

Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G

Volet 1 : présentation générale de la 5G

Juillet 2019

Synthèse

Ce rapport est une présentation générale de la 5G abordée sous l'angle de l'exposition. Il s'inscrit dans le cadre d'une réflexion générale sur l'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques des réseaux 5G. Un deuxième volet porte sur les déploiements pilotes menés en France pour tester en grandeur nature les modalités d'un déploiement d'antennes 5G.

Les réseaux 5G s'articulent autour de trois axes de développement :

- Les débits : dans la continuité de réseaux actuels et pour faire face à la demande croissante de trafic, les réseaux 5G devront permettre d'atteindre des débits jusqu'à dix fois plus grands qu'en 4G.
- La latence : le temps de réponse des réseaux 5G sera divisé par 10 pour permettre le développement de nouveaux usages comme la voiture autonome ou la télémédecine.
- La densité : la 5G embarque l'internet des objets (IoT pour *Internet of Things*) et devra donc gérer des millions de connexion.

La construction d'un réseau 5G repose sur un certain nombre d'éléments dont :

- Des fréquences : les fréquences déjà attribuées à la téléphonie mobile pourront être réutilisées pour la 5G mais de nouvelles fréquences seront également attribuées notamment dans des bandes de fréquences plus hautes.
- Des antennes : le recours à des bandes de fréquence plus hautes permet de construire des antennes avec des composants élémentaires de plus petites tailles et donc en plus grands nombres (64, 128, 256 composants élémentaires contre moins de 20 actuellement). Ces antennes permettent de générer des faisceaux orientables qui permettent d'optimiser la ressource fréquentielle.
- Un type de duplexage : c'est le mode de circulation choisi pour gérer les transmissions des données dans les deux sens antenne vers utilisateur et utilisateur vers antenne. Jusqu'à présent, en France, un mode FDD « *frequency domain duplexing* » était utilisé, c'est-à-dire un mode de circulation à double sens, chaque voie ayant sa bande de fréquence dédiée. Dans les bandes de fréquences hautes de la 5G, le mode TDD pour « *time division duplexing* » a été retenu, c'est-à-dire un mode de circulation alternée, les deux voies descendantes et montantes utilisent la même bande de fréquence mais de façon alternée dans le temps.
- Une architecture de réseau : les réseaux de téléphonie mobile actuels sont des réseaux cellulaires organisés en nid d'abeilles. Ces réseaux dits « macro » seront complétés par l'installation de petites antennes ou « *small cells* ». Ces petites antennes pourront par exemple être déployées sur du mobilier urbain.

Les éléments clés de la 5G, pour l'exposition, dans les nouvelles bandes de fréquences sont :

- les antennes à faisceaux orientables vers les utilisateurs ;
- des bandes de fréquences plus larges ;
- des faisceaux plus fins ;
- une exposition alternée (mode TDD).

Et les conséquences attendues sont :

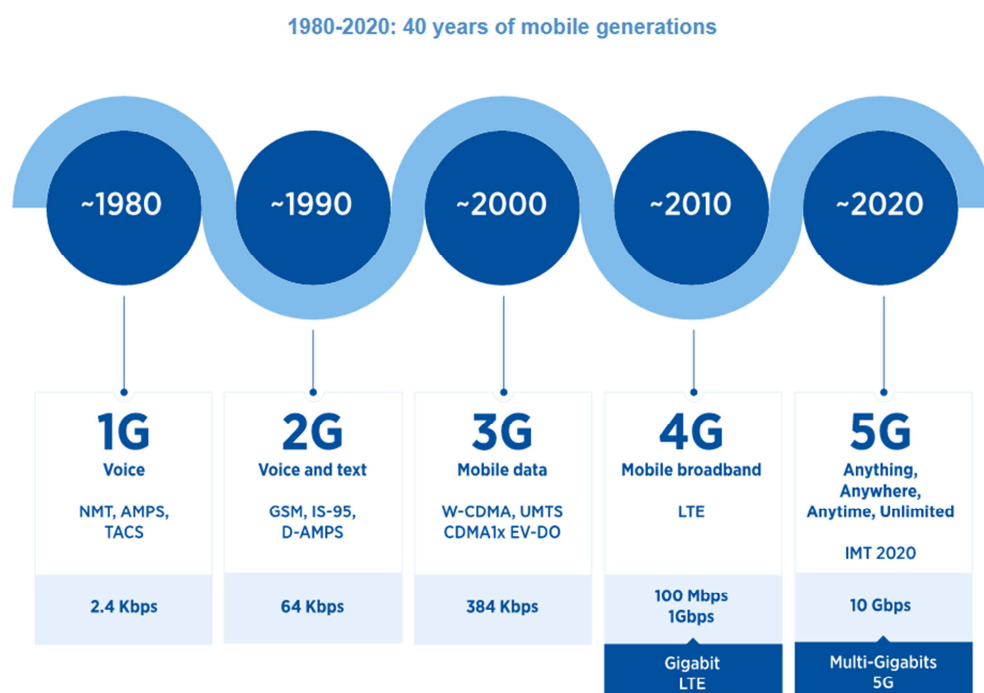
- un niveau d'exposition moindre en dehors des faisceaux ;
- un niveau d'exposition plus grand dans le faisceau ;
- une durée d'exposition plus faible.

Table des matières

1. Introduction.....	4
2. Services et cahier des charges de la 5G.....	5
3. Les solutions envisagées pour la 5G.....	7
3.1. Les fréquences utilisées.....	8
3.2. Les technologies utilisées.....	10
3.2.1. Duplexage.....	10
3.2.2. Modulation.....	11
3.2.3. Antennes.....	12
3.3. Les architectures utilisées.....	15
4. Les impacts sur l'évaluation de l'exposition.....	17

1. Introduction

La première génération de téléphonie mobile sans fil est apparue dans les années 1980. Depuis, le cycle des générations de téléphonie mobile est de 10 ans environ (cf. Figure 1) et la 5G est annoncée commercialement pour 2020.



Source: IDATE DigiWorld, state of LTE & 5G markets, July 2018

Figure 1 : cycles des générations de téléphonie mobile

L'Union Internationale de Télécommunication (UIT ou *IUT* en anglais) est une agence des Nations Unis qui a pour rôle d'assurer la coopération et la bonne compréhension des acteurs des TIC (technologies de l'information et de la communication). L'UIT définit les différentes générations de téléphonie mobile en fixant des exigences et des niveaux de performances. Ensuite les organismes de standardisation, comme l'ETSI en Europe ou le TTA aux Etats Unis, définissent des normes qui répondent aux critères fixés par l'UIT comme la norme GSM pour la 2G ou la norme UMTS pour la 3G. Au fil du temps, ces différents organismes nationaux (ETSI, TTA...) se sont regroupés au sein du 3GPP (3rd Generation Partnership Project) pour converger vers une harmonisation mondiale des standards de téléphonie mobile. Pour la 5G, le standard défini par le 3GPP porte le nom de 5G NR.

Ce rapport est une présentation générale de la 5G abordée sous l'angle de l'exposition. Il s'inscrit dans le cadre d'une réflexion générale sur l'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques des réseaux 5G. Un deuxième volet porte sur les déploiements pilotes menés en France pour tester en grandeur nature les modalités d'un déploiement d'antennes 5G.

2. Services et cahier des charges de la 5G

La 5G est la première génération de téléphonie mobile à être conçue pour des cas d'usage autres que la voix et la donnée.

Les cas d'usage de la 5G se définissent selon les trois catégories suivantes (cf. Figure 2):

- **L'eMBB** pour *enhanced Mobile Broad Band*, c'est-à-dire des communications mobiles ultra haut débit. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile et permet de répondre à l'augmentation exponentielle de l'utilisation des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande et aussi des applications de réalité virtuelle et augmentée. L'objectif est donc de pouvoir répondre à une demande toujours plus grande en termes de quantité de données et de vitesse de transfert.
- Le **mMTC** pour *massive Machine Time Communication*, c'est-à-dire les communications entre objets. L'internet des objets rentre dans cette catégorie. Il s'agit dans cette catégorie de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transmettre par communication est en général limitée et la rapidité de transfert peu contraignante. Un domaine d'application typique est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services.
- L'**uRLLC** pour *ultra Reliable Low latency Communication*, c'est-à-dire les communications dites critiques, pour lesquelles la fiabilité et le temps de réponse sont primordiaux. L'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome mais les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées. Il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication et la transmission doit être la plus rapide possible.

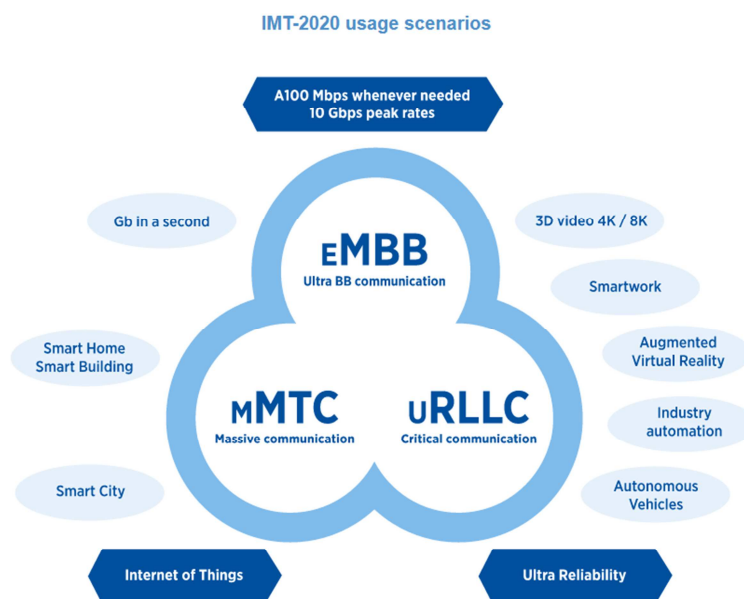


Figure 2 : les cas d'usage de la 5G

Ces trois catégories couvrent des usages très variés et reposent sur des critères de performances très ambitieux (cf. Figure 3).

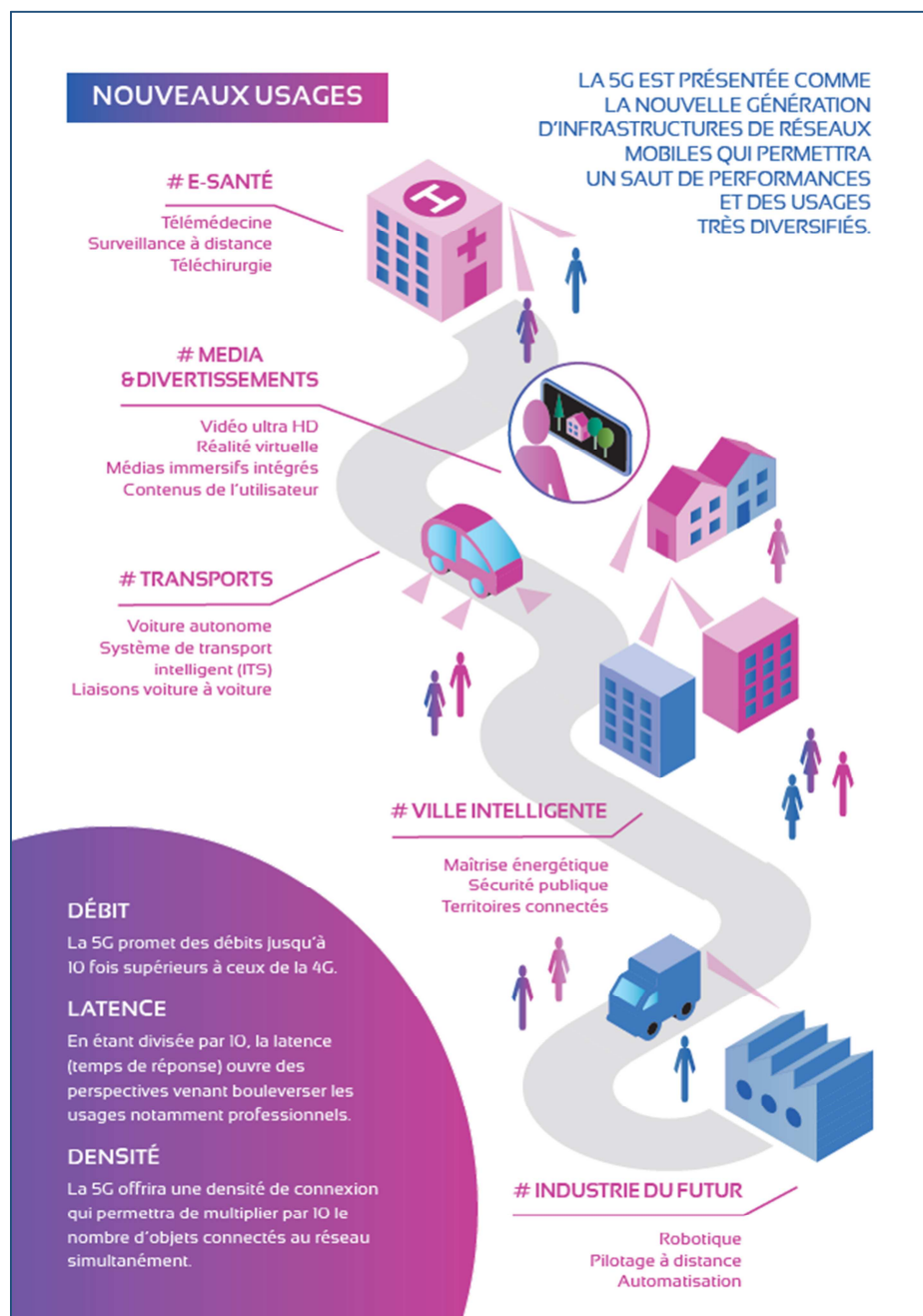


Figure 3 : les nouveaux usages de la 5G

Le cahier des charges de la 5G prévoit ainsi des débits jusqu'à 10 fois supérieurs à ceux de la 4G notamment pour les applications très haut débit (eMBB), une latence (temps de réponse) de l'ordre de la milliseconde, soit 10 fois mieux que la 4G, pour les applications critiques (uRLLC) et un nombre accru d'objets connectés pour l'internet des objets (mMTC).

3. Les solutions envisagées pour la 5G

Pour atteindre ces objectifs, tout un éventail de technologies doit être mis en œuvre (cf. Figure 4).

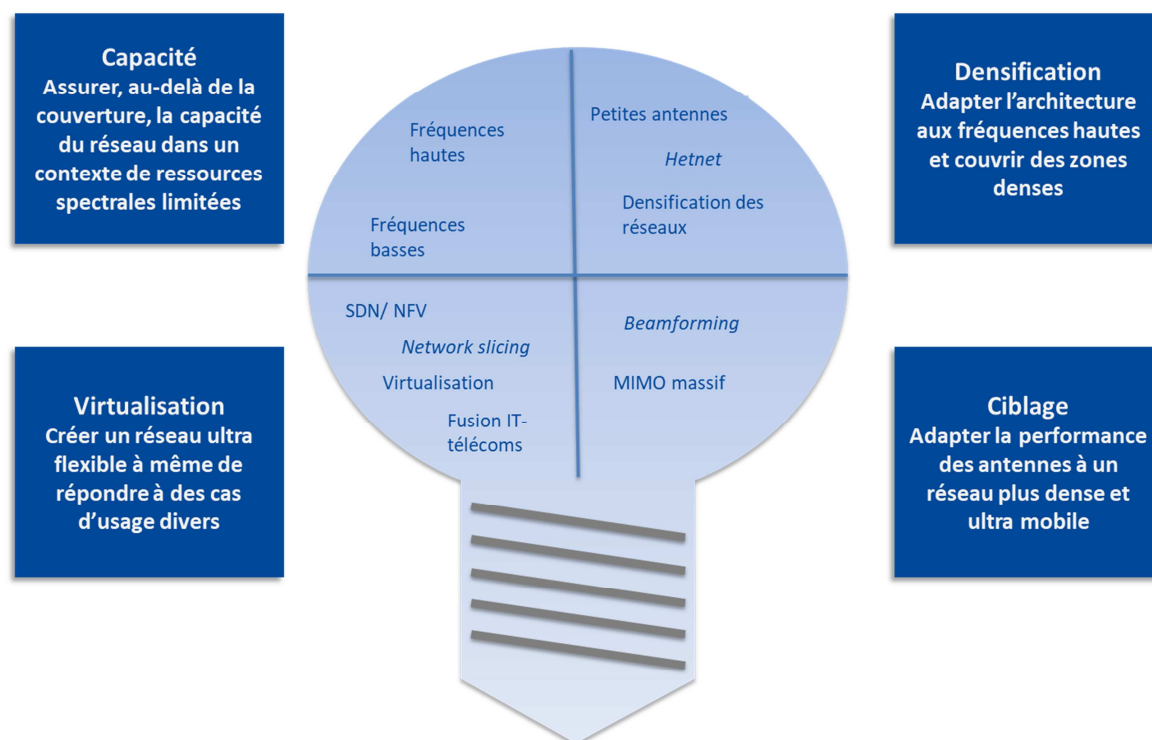


Figure 4 : mots clés des solutions envisagées pour les réseaux 5G

Pour répondre au besoin de capacité, il s'agira notamment d'accroître la variété des bandes de fréquences utilisées, en montant en fréquences pour disposer de largeurs de bandes plus grandes. Cet aspect est traité à la section 3.1.

L'utilisation de bandes de fréquences de plus en plus hautes impose alors de revoir l'architecture des réseaux, on parle de densification et de réseau hétérogène. Pour compléter le réseau d'antennes actuelles de type « macro » à longue portée, des petites antennes de plus faibles portées seront installées pour densifier le réseau là où la demande sera la plus forte. Cet aspect est traité à la section 3.2.

La montée en fréquences permet d'envisager l'emploi d'antennes complexes, constituées de multiples antennes élémentaires de plus petites dimensions. Pilotées par logiciel, ces plaques formées d'un nombre de plus en plus grand d'antennes élémentaires permettent de focaliser instantanément la puissance émise en n'importe quel point du secteur couvert. C'est le mMIMO (*massive Multiple Input Multiple Output*) qui permet notamment de cibler une zone plus étroite pour interagir avec un seul utilisateur pendant un court laps de temps grâce aux techniques de formation de faisceaux (*beam forming*). Cet aspect est traité à la section 3.3

Il existe deux façons de déployer la 5G : en mode non autonome NSA (« *Non StandAlone* ») ou en mode autonome SA (« *StandAlone* »). En mode non autonome NSA, le réseau d'accès radio (RAN « *Radio access network* ») c'est-à-dire l'ensemble des antennes relais du réseau, est relié au réseau cœur 4G (cf. Figure 5). Cette architecture a été la première à être standardisée par le 3GPP et à être

testée par les exploitants de réseau. Ce type de déploiement permet de s'appuyer sur le réseau cœur existant.

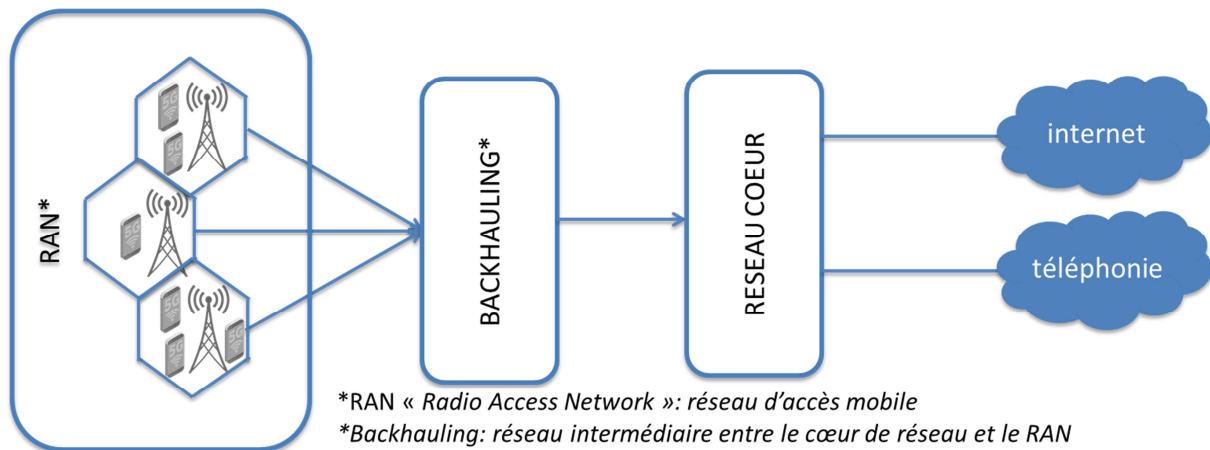


Figure 5 : illustration de la structure générale d'un réseau de téléphonie mobile

Pour servir des utilisateurs aux besoins très variés (internet des objets, communication critiques ou ultra haut débit mobile), des techniques de *network slicing*, c'est-à-dire de réseau structuré en couches, seront utilisées. L'opérateur peut ainsi tirer parti de son spectre pour servir différents utilisateurs pour différentes applications (eMBB, mMTC, uLLRC) fonctionnant avec une qualité de service différente.

La 5G doit répondre à des usages très variés et devra donc être flexible et adaptative. Cette flexibilité sera rendue possible en mode autonome SA notamment par des techniques de virtualisation (NFV *Network Function Virtualisation*) et de radio-logiciel (SDN, *Software Defined Network*) au niveau des cœurs de réseau c'est-à-dire en amont du réseau d'antennes relais, pour assurer le lien avec les serveurs d'application.

L'exposition aux ondes générée par un réseau ne dépendant pas directement de son cœur de réseau, la problématique du cœur de réseau 5G ne sera pas abordée dans ce rapport.

3.1. Les fréquences utilisées

Le choix d'une bande de fréquence représente toujours un compromis entre couverture (définie par la taille de la zone où le service est accessible) et capacité (caractérisée par exemple par le débit obtenu). Pour assurer une bonne couverture, les fréquences basses sont privilégiées car elles permettent d'avoir de bonnes conditions de propagation. Pour augmenter la capacité, les fréquences hautes sont préférables car les largeurs de bandes disponibles y sont plus importantes, ce qui permet d'écouler plus de trafic. Cependant, les conditions de propagation sont plus difficiles à haute fréquence car l'environnement perturbe alors beaucoup la propagation, notamment à l'intérieur des bâtiments du fait d'une forte atténuation par les murs, ce qui limite la couverture.

Les réseaux de téléphonie mobile recherchent donc un équilibre entre bandes basses pour bien couvrir l'ensemble des populations et bandes hautes pour assurer une bonne capacité dans les zones où les demandes de trafic sont les plus importantes.

Dans ce contexte, la 5G disposera d'une gamme élargie pour son déploiement : elle pourra réutiliser le spectre déjà alloué pour la téléphonie mobile, notamment les bandes basses autour de 1 GHz, pour assurer une bonne couverture et se verra également attribuer de nouvelles bandes de fréquences notamment dans les bandes millimétriques, utilisées pour la première fois pour des services grand public, qui permettront d'augmenter la capacité (cf. Figure 6).

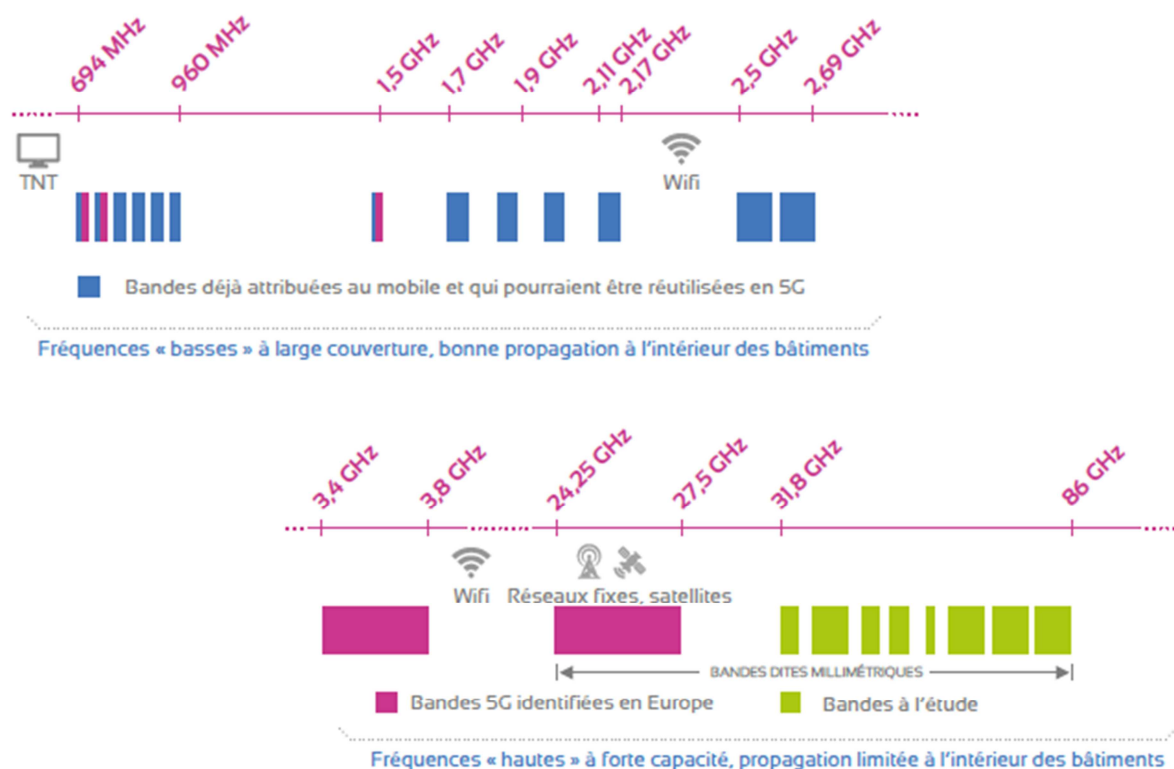


Figure 6 : spectre des fréquences 5G

Du point de vue de l'exposition aux ondes radiofréquences, le recours à des largeurs de bandes plus grandes induira des puissances globales plus importantes. En effet, à densité spectrale de puissance égale (c'est-à-dire avec la même puissance par unité fréquentielle), si la 4G utilise typiquement 40 watts distribuée sur 20 MHz, la 5G avec un ordre de grandeur typique de 100 MHz de largeur de bande dans les nouvelles bandes de fréquences, émettra 200 watts. Il convient toutefois de noter que cet effet d'augmentation de puissance sera contrebalancé par des débits meilleurs et donc, à quantité de données transmises identique, par une durée d'exposition plus brève.

Enfin, plus les fréquences utilisées sont hautes, plus les longueurs d'onde sont courtes et plus l'exposition devient superficielle. Au-delà de 10 GHz, la propagation dans le corps humain est ainsi limitée aux premières couches de la peau et l'exposition ne se quantifie plus par le débit d'absorption spécifique (exprimé en Watt par kilogramme) mais par une densité surfacique de puissance (exprimée en Watt par mètre carré).

3.2. Les technologies utilisées

3.2.1. Duplexage

Le « duplexage » est le mode de circulation utilisé pour transmettre les données à la fois dans le sens descendant « *downlink* » donc de l'antenne relais vers l'utilisateur et dans le sens montant « *uplink* » donc dans le sens de l'utilisateur vers la station de base (cf. Figure 7).

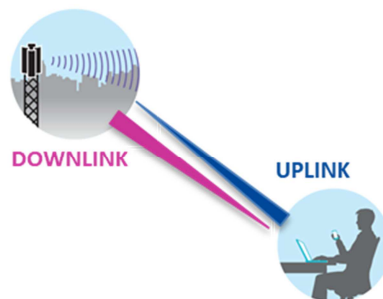


Figure 7 : échanges bilatéraux entre les antennes du réseau et les utilisateurs : sens descendant « *downlink* » de l'antenne relais vers l'utilisateur et sens montant « *uplink* ». de l'utilisateur vers l'antenne relais.

Pour la 2G, 3G et 4G en France, un duplexage fréquentiel, dit FDD (*Frequency Division Duplexing*), est utilisé, il s'agit d'un mode de circulation à double sens, chaque voie à sa bande de fréquences réservée. Des blocs de fréquences sont ainsi réservés pour les transmissions *downlink* et d'autres pour les transmissions *uplink* (cf. Figure 8). Dans les bandes de fréquences déjà allouées à la téléphonie mobile, la 5G continuera d'utiliser ce duplexage FDD, fondé sur une séparation en fréquences.

Cependant, les échanges de données entre les antennes d'un réseau de téléphonie mobile et les mobiles apparaissent aujourd'hui très largement déséquilibrés dans le sens descendant (des antennes vers les mobiles). Les utilisateurs reçoivent en effet en moyenne beaucoup plus de données du réseau (vidéo, internet, téléchargement d'email) qu'ils n'en envoient (envoi de email). Le mode FDD n'est pas assez flexible pour tenir compte de ce déséquilibre entre flux de données *downlink* et *uplink*.

En 5G, pour les nouvelles bandes de fréquences ouvertes, un duplexage temporel, dit TDD (*Time Division Duplexing*), a ainsi été retenu (cf. Figure 8) pour notamment mieux tirer parti de tout le spectre disponible dans le sens descendant. Il s'agit d'un mode de circulation à sens unique avec circulation alternée. Les antennes relais et les terminaux utiliseront donc la même bande de fréquences mais le sens de transmission variera au cours du temps.

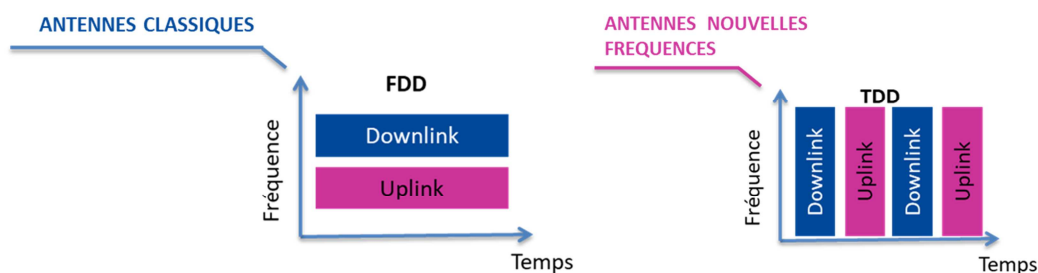


Figure 8 : illustration du duplexage fréquentiel (FDD) ou temporel (TDD)

L'utilisation du duplexage temporel TDD présente notamment l'avantage de permettre une grande flexibilité sur la répartition *downlink/uplink* ; mais il provoque des interférences entre antennes et entre terminaux qui nécessitent de mettre en place des techniques spécifiques pour y remédier. Trois solutions techniques principales sont identifiées pour permettre la coexistence de plusieurs utilisateurs exploitants des réseaux TDD dans des bandes de fréquences adjacentes :

- la synchronisation des réseaux qui impose un format d'émission commun aux opérateurs ;
- l'usage de bandes de garde et de filtres spécifiques par opérateur ;
- la séparation spatiale des émetteurs (séparation géographique).

Le duplexage temporel TDD implique que lors des périodes *uplink*, les antennes n'émettent plus : l'exposition due aux antennes du réseau est donc nulle pendant ces instants.

3.2.2. Modulation

La transmission des données entre le réseau et l'utilisateur est assurée en modulant le signal, c'est-à-dire en codant l'information avant de l'envoyer sur le canal de propagation. Le multiplexage permet de faire passer plusieurs informations sur un même canal de transmission.

Depuis le début de la téléphonie mobile, différents types de modulation multiplexée ont été utilisés (cf. Figure 9) :

- FDMA « *Frequency Division Multiple Access* » : chaque utilisateur utilise une fréquence qui lui est dédiée. Le FDMA a été utilisé au début de la téléphonie mobile
- TDMA « *Time Division Multiple Access* » : les utilisateurs utilisent tous la même bande de fréquences mais à des moments différents. La répartition se fait dans le temps. En France, la 2G utilise une modulation TDMA, ainsi les mobiles n'émettent qu'un huitième du temps en 2G.
- CDMA « *Code Division Multiple Access* » : les utilisateurs utilisent tous la même bande de fréquence de façon simultanée mais avec des codes différents qui permet de les distinguer. En France, la 3G utilise une modulation CDMA.
- OFDMA « *orthogonal frequency division multiple access* » : la matrice temps/fréquence est découpée en ressources élémentaires qui sont répartis entre les utilisateurs. Cette modulation est utilisée en 4G en France.

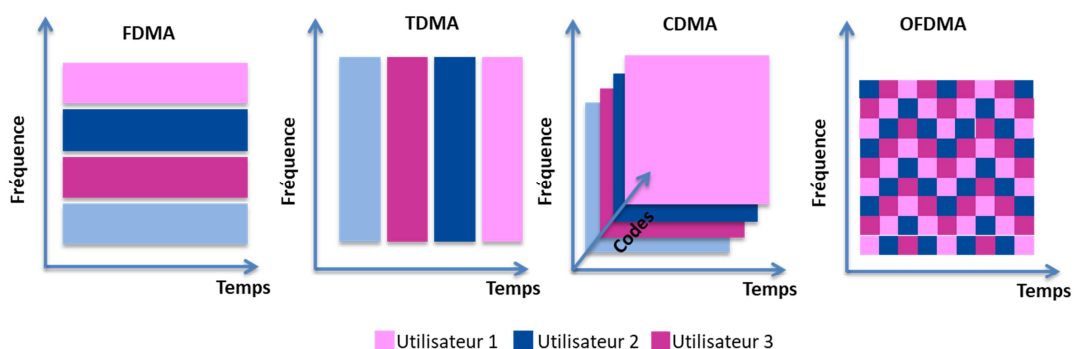
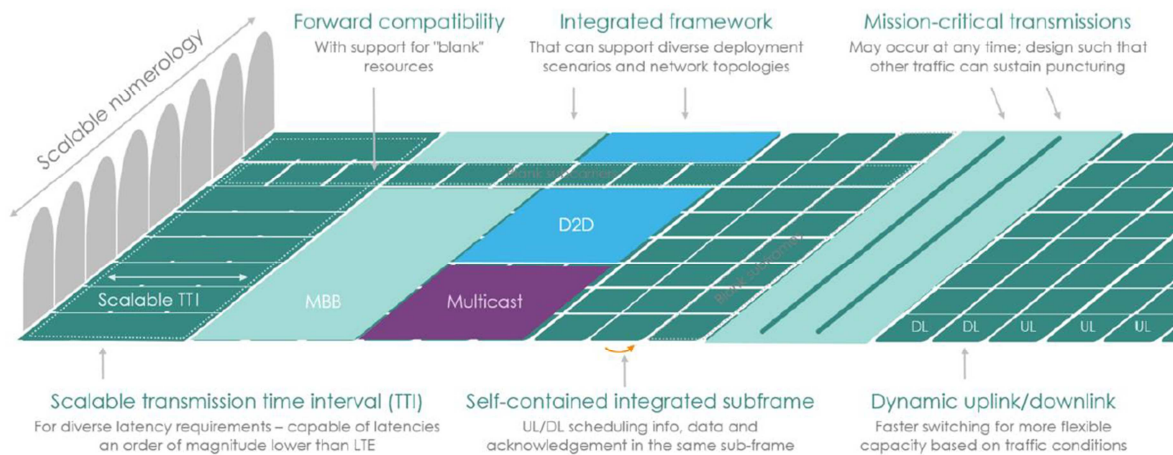


Figure 9 : Standards de transmission de l'information entre l'utilisateur et la station de base selon la génération de téléphonie mobile

La 5G utilisera comme la 4G de l'OFDMA mais avec beaucoup plus de flexibilité et de souplesse dans le découpage en temps et en fréquence pour permettre de servir des utilisateurs aux contraintes très variées (Figure 10).



Source: Qualcomm

Figure 10 : illustration d'une répartition des ressources en temps et en fréquence pour couvrir les différents usages de la 5G (eMBB, mMTC, uLLRC).

Il convient de souligner que l'OFDMA consiste à transmettre simultanément des signaux sur plusieurs porteuses différentes ce qui résulte en de fortes variabilités des niveaux instantanés du fait d'interférences constructives et destructives. Ces additions constructives se mesurent par le PAPR (« Peak to Average Power Ratio ») qui est le rapport entre la valeur crête et la valeur moyenne d'un signal.

3.2.3. Antennes

Les antennes couramment utilisées pour les réseaux 2G, 3G et 4G sont des empilements verticaux de dipôles élémentaires (cf. Figure 11). La taille d'un étage est conditionnée par la taille des dipôles élémentaires qui est de l'ordre de la moitié d'une longueur d'onde. A titre d'exemple, à 900 MHz (longueur d'onde de 33 cm), la taille d'un étage est ainsi d'environ 15 cm. En empilant typiquement une petite dizaine d'étages, le rayonnement de ces antennes couvre une zone d'environ 65° d'ouverture horizontale et d'environ 10° d'ouverture verticale. La capacité de focalisation de ce type d'antenne, c'est-à-dire son gain, est typiquement de 17 dBi.

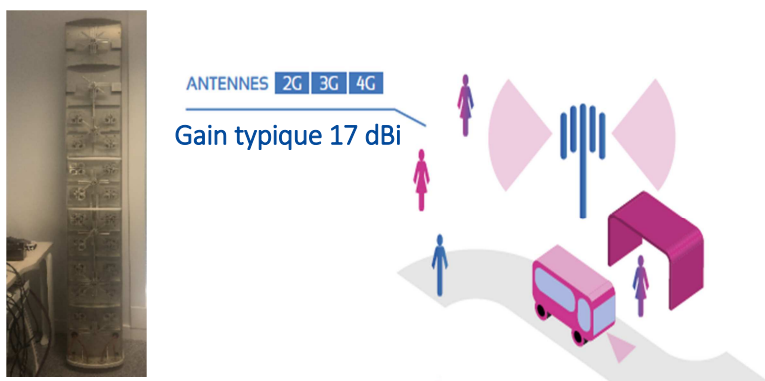


Figure 11 : vue d'une antenne 2G – 3G ouverte et principe de rayonnement

Les antennes 5G pour les bandes de fréquences déjà attribuées à la téléphonie mobile seront généralement semblables aux antennes existantes.

En revanche, l'utilisation de bandes de fréquences plus hautes permet de construire des dipôles élémentaires de plus petites tailles, de l'ordre de 5 cm dans la bande 3 400 – 3 800 MHz (longueur d'onde médiane d'environ 9 cm) et de l'ordre de 0,5 cm dans la bande 26 GHz (longueur d'onde médiane d'environ 1,2 cm). Les antennes 5G dans ces bandes de fréquences seront des réseaux deux dimensions comportant un grand nombre de dipôles élémentaires permettant de bénéficier de plusieurs émetteurs/récepteurs. Un émetteur/récepteur peut être soit une antenne élémentaire (également appelé élément rayonnant) soit un regroupement d'antennes élémentaires. Par exemple (cf. Figure 12), une antenne 5G peut être constituée de 192 éléments rayonnants organisés sur 8 colonnes, 12 lignes et 2 polarisations croisées pour former 64 émetteurs/récepteurs (64T64R) en regroupant verticalement par trois les éléments rayonnants.

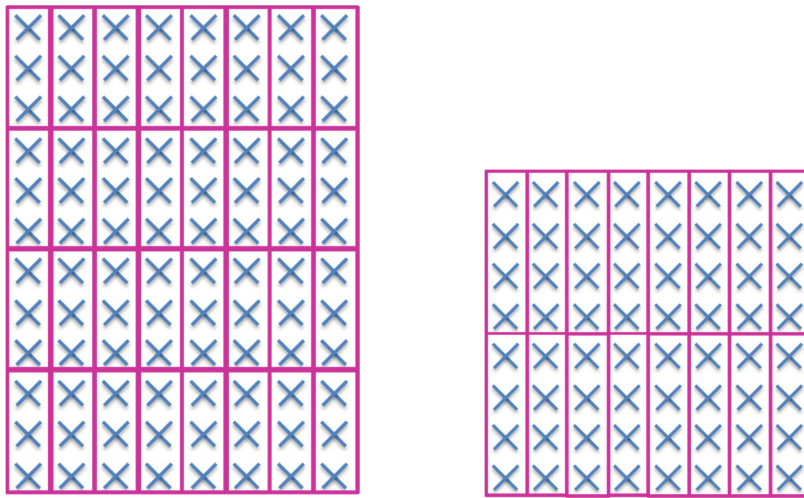


Figure 12 : illustrations à gauche d'une antenne 64T64R constituée de 192 éléments rayonnants regroupés par groupe 3 et à droite d'une antenne 32T32R constituée de 128 éléments rayonnants regroupés par groupe de 4.

Ce grand nombre d'émetteurs/récepteurs permet d'utiliser des techniques de *massive MIMO* « *Multiple Input Multiple Output* » (cf. Figure 14) et un contrôle beaucoup plus fin du rayonnement global de l'antenne. L'effet MIMO permet de profiter de la diversité spatiale du canal de propagation en envoyant plusieurs flux simultanés.

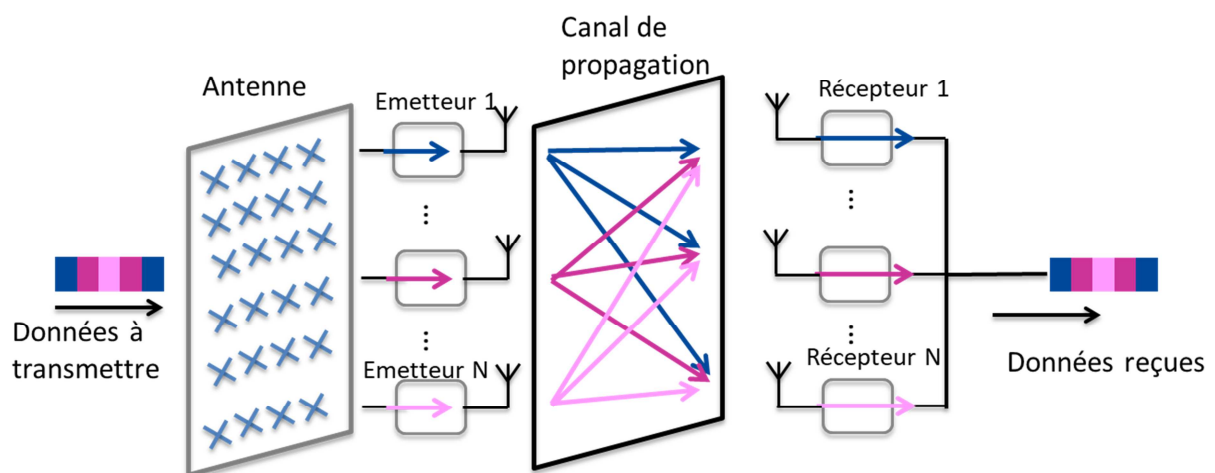


Figure 13 : illustration de la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Les antennes *massive MIMO* permettent également de focaliser le rayonnement de façon beaucoup plus efficace dans une direction donnée. Le gain des antennes 5G dans la bande 3 400 MHz -

3 800 MHz est de l'ordre de 24 dBi, c'est-à-dire environ 5 fois plus que pour une antenne 2G-3G-4G classique. Le rayonnement est concentré dans un faisceau beaucoup plus fin qu'actuellement, c'est ce que l'on appelle le *beamforming* ou antenne à formation de faisceaux. L'antenne pourra gérer indépendamment plusieurs faisceaux et les orienter dans la direction des utilisateurs (cf. Figure 14). Deux techniques de *beamforming* existent : le GoB (« *Grid of Beams* ») pour lequel l'ensemble des faisceaux possibles est pré-codé dans un « *codebook* » et l'EBB (« *eigen-value based beamforming* ») pour lequel les faisceaux se définissent dynamiquement dans le temps.

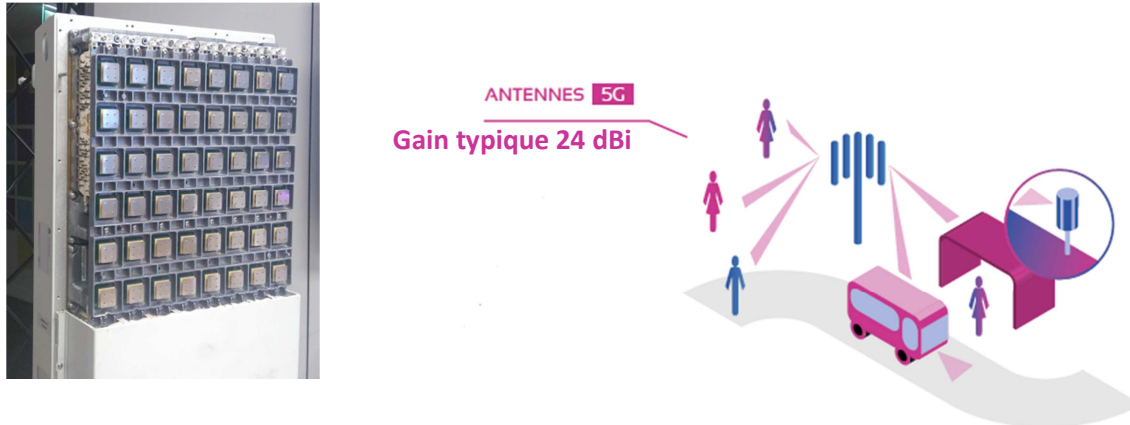


Figure 14 : vue d'une antenne 5G massive MIMO 3400 – 3600 MHz partiellement ouverte et principe de rayonnement

Deux types de faisceaux coexistent (cf. Figure 15) :

- Faisceaux de signalisation ou *broadcast beams* ou *SSB* qui permettent d'identifier les utilisateurs qui se trouvent dans la zone de couverture de l'antenne. Cette signalisation peut être diffusée par un faisceau unique couvrant l'ensemble de la zone ou bien par des faisceaux plus fins scrutant successivement les différentes zones (technique de *beam scanning* ou *beam sweeping*).
- Faisceaux de trafic ou *traffic beams* : des faisceaux de trafic éventuellement plus fins servent, à leur demande, les utilisateurs identifiés par les faisceaux de signalisation.



Figure 15 : illustration, à gauche, de la phase de *beam sweeping/scanning* pour identifier les utilisateurs et à droite des faisceaux de trafic servant à la demande les utilisateurs.

3.3. Les architectures utilisées

Les réseaux mobiles actuels (2G, 3G et 4G) sont essentiellement constitués d'antennes longue portée dite « macro » déployées pour assurer la couverture dans toutes les configurations de terrain, qu'il s'agisse de zones urbaines denses ou de territoires ruraux. A l'avenir, en 5G, et notamment avec l'utilisation des bandes de fréquences plus hautes qui se propagent moins bien, cette couverture pourrait être complétée par des petites antennes (cf. Figure 16) de moyenne portée pour améliorer la connectivité pour tous dans les zones les plus denses.

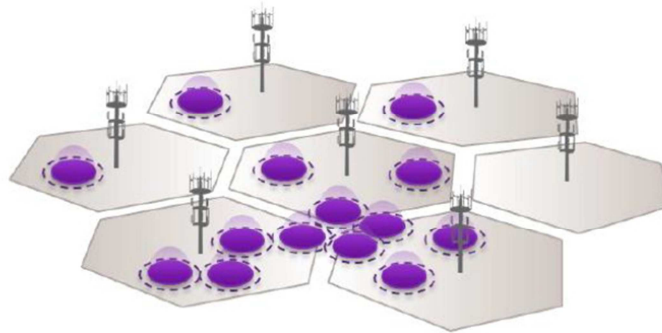


Figure 16 : illustration d'un réseau hétérogène constitué d'une couche d'antennes longue portée complétée localement par des antennes moyenne portée.

Une réflexion générale a été menée en 2017-2018 sur le déploiement de réseaux de petites antennes à faible puissance venant compléter les réseaux mobiles actuels, essentiellement constitués d'antennes longue portée dites « macro ».

Les villes d'Annecy, de Montreuil et du Kremlin-Bicêtre ont alors accueilli des déploiements pilotes de petites antennes 4G sur du mobilier urbain. Différentes configurations ont été testées notamment en termes de mobilier urbain utilisé (Abribus, panneaux d'information ou colonnes Morris), de bandes de fréquences utilisées (4G 1800 MHz et 4G 2600 MHz) et de zones d'implantation plus ou moins denses.

Cette étude a fait l'objet de rapports publiés sur le site internet de l'ANFR (<https://www.anfr.fr/petites-antennes>).

L'analyse a montré que le déploiement de ces petites antennes permet d'améliorer les débits dans le sens descendant (antenne relais vers mobile) avec un débit de plus de 50 Mb/s dans environ 50 % des cas sur les petites antennes, contre un débit de 30 Mb/s en moyenne sur le réseau macro actuel. Une amélioration est également constatée dans le sens montant (mobile vers antenne relais) avec un débit de plus de 20 Mb/s dans 75 % des cas en présence de petites antennes contre un débit de 11 Mb/s en moyenne sur le réseau macro actuel.

En fonction de la couverture initiale du réseau macro et des charges des réseaux, le déploiement des petites antennes permet soit de diminuer la puissance d'émission du mobile (en gardant des débits comparables à ceux obtenus sur le réseau macro), soit d'augmenter le débit (en gardant des puissances d'émission comparables à celles obtenues sur le réseau macro). Dans tous les cas, le bilan sur l'exposition du public aux ondes est apparu positif. L'exposition réelle de l'utilisateur à son mobile est en moyenne plus faible (moindre puissance mise en jeu ou durée d'exposition moins longue) lorsque le mobile se connecte à une petite antenne que lorsqu'il se connecte au réseau macro actuel.

Enfin, la mesure de l'exposition aux ondes émises par les petites antennes a montré que, localement, à proximité immédiate des petites antennes, le niveau d'exposition reste du même ordre de grandeur que celui que peut créer un réseau macro (de l'ordre de 1 à 3 V/m). Dans une zone plus large de 100 mètres autour des petites antennes, le niveau d'exposition moyen n'est pas modifié par la mise en service des petites antennes. Il apparaît comparable au niveau d'exposition moyen observé au niveau national (de l'ordre de 0,7 V/m).

4. Les impacts sur l'évaluation de l'exposition

Dans le cadre de ses missions, l'Agence nationale des fréquences veille également au respect des valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques qui sont fixées par le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002.

A cette fin, elle élabore différentes procédures :

- un guide informatique qui établit des règles pratiques d'installation des sites radioélectriques visant notamment à délimiter les périmètres de sécurité autour des stations radioélectriques à l'extérieur desquels le niveau d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les installations radioélectriques est inférieur aux valeurs limites ;
- un protocole de mesure de l'exposition, référencé au Journal Officiel, qui constitue le texte de référence des laboratoires accrédités qui réalisent des mesures sur le terrain. Le protocole de mesure répond à un double objectif : vérifier le respect des valeurs limites d'exposition du public et fournir des informations sur les niveaux d'exposition généralement observés.
- des lignes directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation de l'exposition aux ondes émises par les nouvelles installations radioélectriques. Sur demande du maire, lors de l'implantation d'une installation radioélectrique, l'exploitant doit joindre au dossier d'information-mairie (DIM) une simulation de l'exposition. Les lignes directrices fixent les éléments de base à fournir pour une bonne compréhension du dossier par les élus et nos concitoyens.

L'ANFR actualisera ces procédures pour prendre en compte les évolutions technologiques de la 5G.

Du point de vue de l'exposition, les éléments clés de la 5G dans les nouvelles bandes de fréquences sont :

- les antennes à faisceaux orientables vers les utilisateurs ;
- des bandes de fréquences plus larges ;
- des faisceaux plus fins ;
- une exposition alternée (mode TDD).

Et les conséquences attendues sont :

- un niveau d'exposition moindre en dehors des faisceaux ;
- un niveau d'exposition plus grand dans le faisceau ;
- une durée d'exposition plus faible.