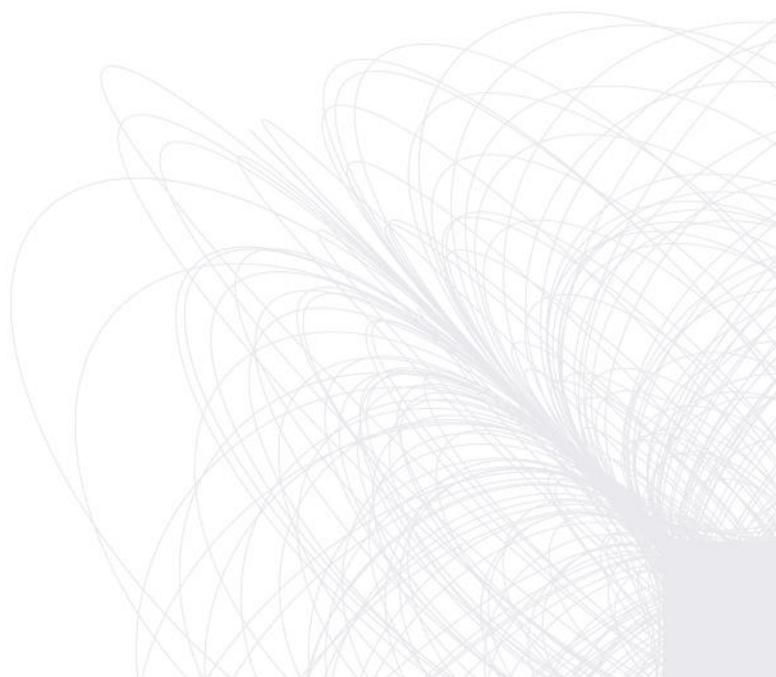


LES ENJEUX DE LA 5G

Mars 2017



Les enjeux de la 5G

L'industrie des télécoms prépare actuellement les technologies qui devraient avoir vocation à prendre la relève de la 4G, qui est en cours de déploiement actuellement. De nombreux travaux sont donc en cours pour préparer ces nouvelles technologies, dites « 5G ».

Afin de préparer l'arrivée de cette nouvelle génération de technologies, l'Arcep a souhaité procéder à un large tour d'horizon de l'industrie pour mieux comprendre ce qui se préparait. Le présent rapport est le fruit des auditions et recherches menées par les services de l'Arcep au fil de l'année 2016. L'Arcep a souhaité le publier afin de contribuer au débat public sur le sujet.

Son objectif est de fournir une vision aussi objective et exhaustive que possible, avec un effort de vulgarisation, des travaux en cours autour de la future génération de téléphonie mobile.

Ce rapport retranscrit les points de vue des acteurs auditionnés mais ne représente en rien des positions ou une feuille de route de l'Arcep sur la 5G. L'Arcep a procédé en 2015 à l'attribution de la bande 700 MHz et travaille actuellement à celle de la bande 3,5 GHz, bandes toutes deux identifiées pour la 5G. L'Autorité est par ailleurs associée aux travaux de la Direction générale des entreprises et de l'Agence nationale des fréquences concernant la 5G.

L'Arcep remercie les entités (listées en dernière page) qui ont accepté de participer à cette démarche et ont bien voulu abonder la réflexion du régulateur sur le développement du successeur de la 4G. Elle reste à l'écoute du marché et invite toute personne intéressée à lui fournir des informations en la matière ou à réagir sur le contenu du présent rapport, en contactant la direction Mobile et Innovation de l'Arcep à l'adresse 5G@arcep.fr.

Sommaire

INTRODUCTION : LA VISION DE LA 5G, L'ULTRA CONNECTIVITE DE LA SOCIETE.....	4
<u>1 LES OBJECTIFS DE LA 5G</u>	7
1.1 LES SPECIFICATIONS TECHNIQUES DE LA 5G	8
1.2 LES FAMILLES D'USAGE 5G	10
1.3 UN SAUT DE PERFORMANCE PAR RAPPORT AUX RESEAUX 4G	12
1.4 NETWORK SLICING ET RESEAUX LOGICIELS	14
1.5 LES BRIQUES TECHNOLOGIQUES POUR ATTEINDRE LES OBJECTIFS	15
1.5.1 LIEN RADIO - AIR INTERFACE	15
1.5.2 ARCHITECTURE RESEAU	18
1.5.3 LA 5G : UNE GENERATION MULTI-TECHNOLOGIES QUI COHABITE AVEC LES RESEAUX EXISTANTS.....	19
<u>2 LES INITIATIVES EN COURS POUR DEVELOPPER LA 5G</u>	21
2.1 INITIATIVES PUBLIQUES.....	21
2.1.1 AU NIVEAU EUROPEEN	21
2.1.2 AU NIVEAU MONDIAL (EXEMPLES AUX USA, COREE, JAPON, CHINE)	23
2.2 DE NOMBREUSES INITIATIVES PRIVEES - QUELQUES EXEMPLES	24
<u>3 LES DEFIS DE LA 5G</u>	27
3.1 DE NOUVEAUX MODELES ECONOMIQUES CENTRES SUR LES MARCHES VERTICAUX	27
3.1.1 SECTEUR AUTOMOBILE.....	27
3.1.2 NUMERISATION DE L'INDUSTRIE	29
3.2 L'HARMONISATION DU SPECTRE.....	29
3.2.1 BANDES MILLIMETRIQUES.....	29
3.2.2 LES BANDES EN DESSOUS DE 6 GHZ.....	30
3.3 DES CELLULES DE PLUS EN PLUS PETITES.....	32
3.3.1 TAXATION.....	32
3.3.2 ACCES AUX POINTS HAUTS ET « SEMI-HAUTS »	33
3.3.3 CONNEXION DES TERRITOIRES ET COLLECTE DES RESEAUX 5G.....	33
3.4 ENJEUX DE LA NEUTRALITE DE L'INTERNET.....	34
<u>ANNEXE 1 TRAVAUX DE DEFINITION ET NORMALISATION.....</u>	37
<u>ANNEXE 2 ENTITES RENCONTREES</u>	42
<u>ANNEXE 3 LISTE DES FIGURES.....</u>	43

Introduction : la vision de la 5G, l'ultra connectivité de la société

La 5G souhaite se présenter comme la génération de rupture, la génération qui ne s'intéresse plus uniquement au monde des opérateurs de téléphonie mobile et des communications grand public, mais qui ouvre de nouvelles perspectives et permet la cohabitation d'applications et usages extrêmement diversifiés, unifiés au sein d'une même technologie. La 5G se pose en *enabler* de la numérisation de la société et de l'économie.

L'idée qui commence à se forger derrière la notion de 5G est que celle-ci ne correspondrait pas à une simple augmentation des débits, comme cela a été le cas pour les précédentes générations.

Les communications mobiles grand public, le téléchargement de vidéos et l'utilisation d'applications mobiles représentent l'essentiel de l'utilisation actuelle des ressources radio dans les réseaux 4G ; avec la 5G, l'objectif serait que le spectre des usages et la diversité des utilisateurs soient grandement élargis.

La 5G vise des secteurs très variés, qui n'auraient pas nécessairement d'autre élément commun que cette technologie, mais qui sont des piliers importants d'une société : l'énergie, la santé, les médias, l'industrie ou le transport.



Figure 1. La 5G moteur du changement industriel et sociétal¹

Le secteur de l'énergie a par exemple connu un grand nombre d'évolutions et de mutations pendant ces dernières années, en termes de production, stockage et transport de l'énergie. L'augmentation des coûts des matières fossiles, l'apparition d'énergies renouvelables et l'ouverture à la concurrence ont contribué à la naissance de nouvelles formes de production énergétique et à l'arrivée de nouveaux acteurs, compagnies indépendantes ou simples citoyens, sur la scène énergétique. L'objectif de la 5G serait donc de permettre une meilleure gestion de tous ces réseaux (*smart grids*,

¹5G Empowering vertical industries. White Paper, 2016, https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/02/BROCHURE_5PPP_BAT2_PL.pdf

smart agriculture, industrie du futur) et de leurs interconnexions en vue d'une distribution plus efficace et plus réactive.

La santé, les transports et les médias sont des secteurs très « proches » du quotidien de nos concitoyens : les améliorations dans ces secteurs ont donc un impact directement visible sur notre vie quotidienne. L'introduction, dans le domaine médical, de robots pour l'exécution d'opérations chirurgicales spécialisées, la vidéo à la demande ou encore l'arrivée de nouvelles fonctionnalités connectées dans la voiture ont déjà amélioré notre vie de tous les jours. La 5G promet d'aller au-delà dans ces domaines : elle pourrait permettre des diagnostics et des opérations à distance en temps réel, démocratiserait le *streaming* de vidéo 3D à 360 degrés, donnerait accès aux utilisateurs à une énorme quantité de contenus vidéo avec une qualité qui ira au-delà de la très haute définition (4K, 8K...). Le monde de l'automobile pourrait utiliser ces nouveaux réseaux pour permettre aux véhicules non seulement de prendre des décisions sans intervention humaine, mais aussi de communiquer entre eux (cette réalité est déjà possible, par exemple, avec la première flotte expérimentale de taxi 100% autonome mise en service à Singapour par les sociétés nuTonomy et Grab²), avec des temps de réaction compatibles avec les exigences d'un déplacement à haute vitesse.

En ce qui concerne l'industrie du futur, les améliorations amenées par la 5G visent principalement l'introduction de nouvelles générations de robots connectés, l'interconnexion des sites de production et la multiplication des capteurs connectés pour l'amélioration des processus industriels. Plus généralement, il s'agit donc de généraliser la communication entre machines, qui se développe déjà fortement actuellement.

Ce qu'il est fondamental de percevoir, au travers des quelques exemples susmentionnés dont les exigences sont parfois orthogonales, c'est que selon le secteur, ou selon l'usage, les caractéristiques du réseau et les fonctionnalités demandées ne seront pas les mêmes. Les fournisseurs de service (qu'il s'agisse des opérateurs mobiles actuels ou d'autres acteurs) devront être en mesure d'adapter le réseau à la demande, parfois en temps réel. La 5G ne serait donc pas tant une technologie universelle qu'une technologie polymorphe, voire protéiforme, capable de s'adapter à tous les usages jusqu'aux plus exigeants.

² <http://nutonomy.com/>

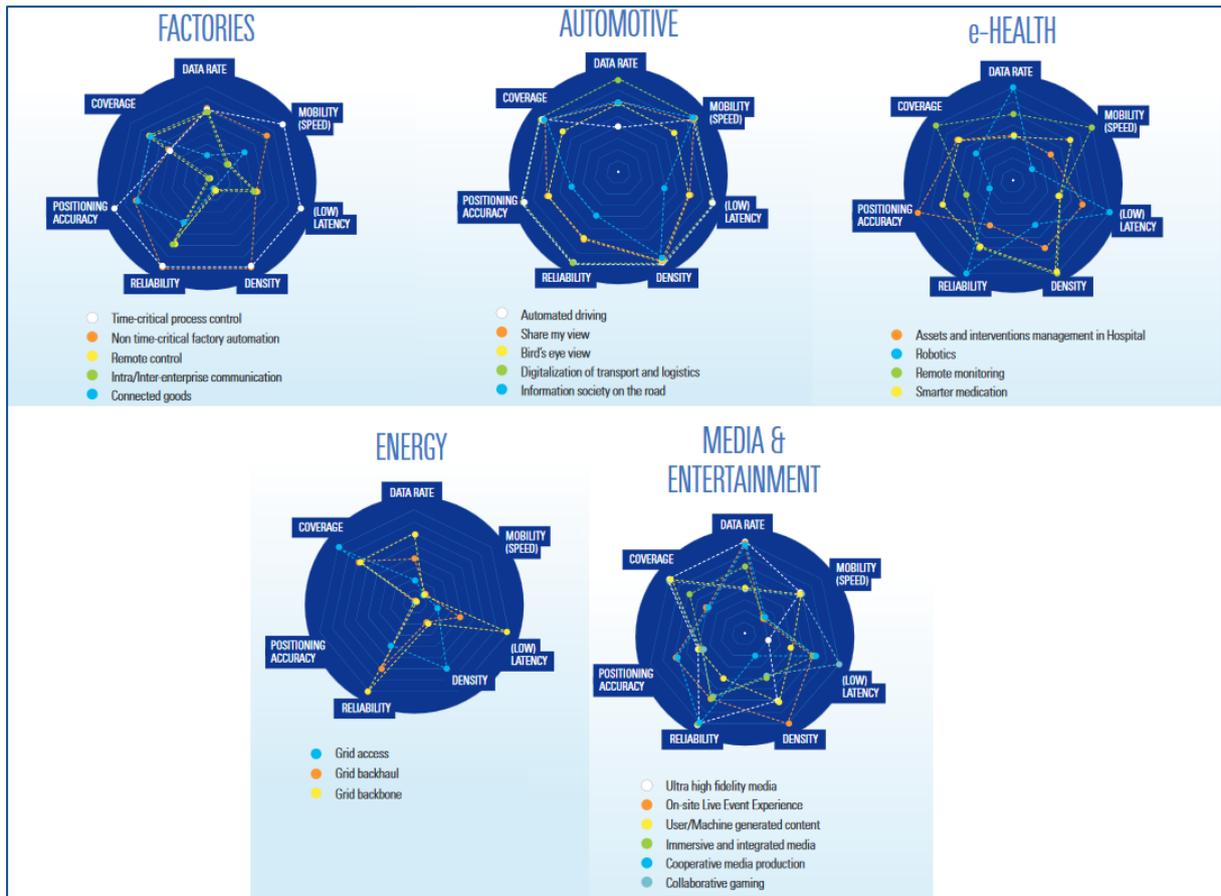


Figure 2. Performances requises pour les secteurs verticaux³

³ 5G Empowering vertical industries. White Paper, 2016, https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/02/BROCHURE_5PPP_BAT2_PL.pdf

1 Les objectifs de la 5G

Depuis le vrai premier appel téléphonique mobile, il y a 44 ans⁴, les technologies mobiles ont évolué de manière continue et leurs performances de manière exponentielle : le service voix, puis la messagerie et enfin l'internet mobile et l'utilisation des applications mobiles multi-services ont caractérisé, comme indiqué dans le paragraphe précédent, l'évolution des réseaux mobiles et le passage d'une génération à l'autre. La naissance de la technologie LTE et de la quatrième génération, couplée à la démocratisation des *smartphones* et tablettes, a mené à une augmentation très forte des volumes de données échangés en mobilité.

L'utilisation d'un mobile et de ses applications est désormais fermement ancrée dans le quotidien de nos concitoyens : les appareils portables connectés sont de plus en plus performants : ils remplacent bien souvent le téléphone fixe, l'appareil photo, voire l'ordinateur et même le téléviseur. Aujourd'hui, 5 million de vidéos sont vues sur YouTube et 67 000 images sont chargées sur Instagram chaque minute (voir Figure 3).



Figure 3. Ce qui est fait aujourd'hui en une minute sur internet⁵

Le dernier « *Mobility Report*⁶ » d'Ericsson indique que, en l'espace d'un an, le volume de données échangées sur les réseaux mobiles a presque doublé et que dans 5 ans il aura été multiplié par 10 par rapport à l'utilisation actuelle. De nouvelles solutions doivent donc être trouvées afin de pouvoir répondre à cette demande et d'optimiser l'utilisation des ressources.

L'augmentation du nombre d'applications, leur diversification ainsi que l'amélioration de la qualité des réseaux mobiles ont conduit à l'augmentation de la demande, à l'apparition de nouveaux usages (objets connectés, drones, etc...) et de nouveaux utilisateurs.

⁴ 3 avril 1973, Martin Cooper de chez Motorola passait un appel depuis la 56ème rue de New York avec le premier téléphone portable

⁵ <https://www.ericsson.com/res/docs/2014/5g-what-is-it-for.pdf>

⁶ <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2016/ericsson-mobility-report-november-2016.pdf>

La 5G se situe au carrefour de ces nouveaux usages ; elle ambitionne de répondre mieux et simultanément à cette grande variété de besoins et ces nouvelles demandes, *via* une technologie unifiée qui prend en compte, dès sa conception, cette diversité.

L'arrivée de la 5G pourrait avoir un impact important non seulement dans la sphère technique, mais aussi dans le développement économique et social des différents pays ; comme indiqué en introduction, la 5G vise de très nombreux secteurs et devrait participer, par la numérisation de la société, à la croissance économique des Etats.

A titre d'illustration, selon une étude réalisée par InterDigital Europe, Real Wireless, Tech4i2 et Connect (Trinity College Dublin)⁷, cette nouvelle technologie demandera d'importants investissements et travaux, mais génèrera 113,1 milliards de profits par an pour l'économie européenne d'ici 2025.

1.1 Les spécifications techniques de la 5G

Une nouvelle génération de téléphonie mobile est spécifiée principalement par deux acteurs : l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) et le 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*).

L'UIT, qui est l'agence des Nations Unies spécialisée dans les technologies de l'information et de la communication, réalise des études via son «*Working Party 5D*», son sous-groupe en charge de traiter les questions techniques et d'exploitation relatives aux radiocommunications. Dès 2013, ce groupe a commencé à travailler sur la définition des caractéristiques d'un nouveau standard IMT (*International Mobile Telecommunications*), le standard IMT-2020 (5G) (cf. 1.3), comme il l'avait fait au début des années 2000 pour définir la 4G (IMT-Advanced). Le calendrier mis en place pour cette étude est abordé en Annexe 1, l'objectif de l'UIT-R étant d'achever ses analyses pour 2020.

En parallèle des travaux de l'UIT, des études sont menées par le 3GPP. Le 3GPP a été instauré en 1998 et regroupe sept organismes de standardisation, plusieurs centaines d'industriels, des associations et des organismes publics. Il s'occupe du développement et de la maintenance des spécifications techniques relatives aux normes de téléphonie mobile⁸. Lorsqu'un nouveau standard est en cours de définition à l'UIT, le 3GPP travaille sur les solutions techniques qui permettent de répondre aux objectifs définis par l'UIT.

Bien que la 5G soit l'un des sujets les plus débattus dans les instances internationales et au niveau européen, à ce stade, aucune norme n'a été définie au sein du 3GPP. La rédaction de la *release 15*, première norme 3GPP relative à la 5G, est en cours : les définitions de la nouvelle architecture ont commencé en décembre 2016 et il est prévu, à partir de mars 2017, d'étudier une nouvelle interface air (appelée NR pour *New Radio*). Une première version du standard devrait être validée en septembre 2018 pour répondre aux demandes plus urgentes ; une deuxième *release* (3GPP *release 16*) serait ensuite publiée en mars 2020. Ces éléments sont abordés en Annexe 1 avec plus de détails.

Il convient de noter que le passage d'une génération à la suivante se fait de façon progressive. Le LTE continuera d'évoluer en parallèle de la NR et ces deux standards seront probablement très complémentaires dans un premier temps. En particulier, il est envisagé, pour une partie des premiers déploiements 5G, que le LTE reste maître du réseau et contrôle les antennes NR. En outre une partie des objectifs de la 5G pourra être atteinte par des fonctionnalités ou technologies mises en place dans les *release 13*, *14* et *15* du 3GPP qui ne seront pas propres à la cinquième génération, mais qui représenteront plutôt des évolutions de la 4G (on parle parfois de 4.9G ou de *LTE Advanced Pro*).

⁷ <http://ir.interdigital.com/file/Index?KeyFile=36051369>

⁸ GSM pour la 2G, UMTS pour la 3G et LTE pour la 4G

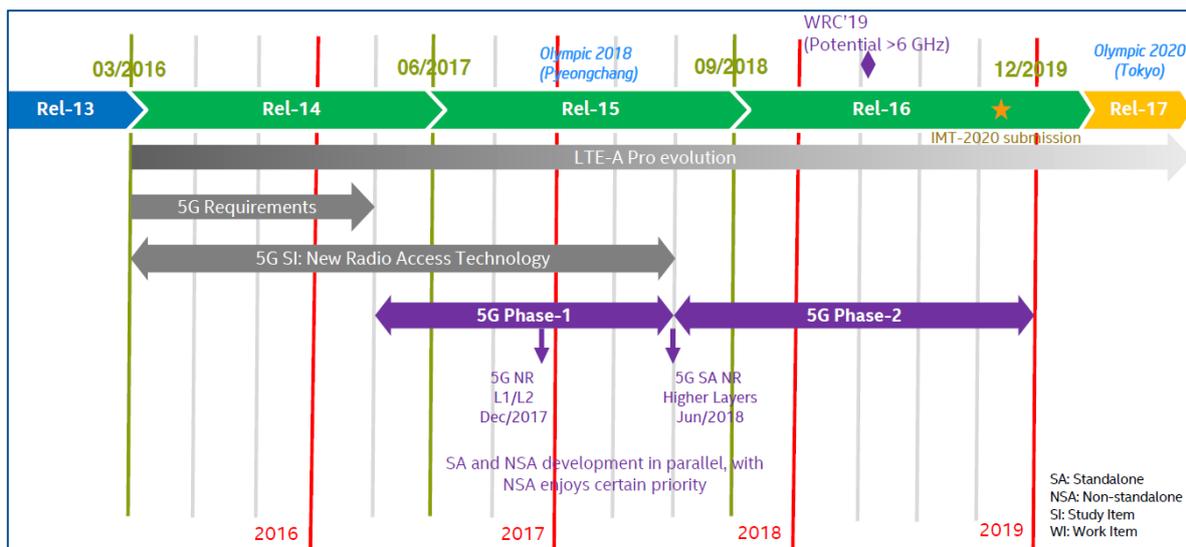


Figure 4. Calendrier de la 5G au 3GPP⁹

Cette même dynamique a pu être observée lors du passage de la 3G (*release 4*) à la 4G (*release 10*, première *release IMT-Advanced*) : les premières spécifications du LTE (*releases 8 & 9*) ne remplissaient pas tous les objectifs de la cible 4G de l'UIT et reprenaient beaucoup des caractéristiques de la 3G la plus avancée de l'époque.

Ces synergies entre les générations qui se succèdent, l'absence, la plupart du temps, d'un grand saut de performances initial entre générations, et la course à la performance et à l'innovation entre concurrents peuvent souvent conduire les opérateurs ou équipementiers à donner une appellation « commerciale » à une génération de téléphonie mobile. A titre d'exemple, aux Etats-Unis, AT&T avait labélisé 4G son réseau HSPA (en France c'est un réseau 3G+).

Il est donc fort probable que les premiers réseaux 5G largement déployés soient des réseaux 4.9G, ayant recours à l'agrégation de porteuses (*carrier aggregation*), au massive MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) ou au NFV (*Network Function Virtualization*) (cf. les expérimentations menées en France évoquées au 1.5.3). Ces technologies, évoquées par la suite, représentent plutôt une évolution de la quatrième génération qu'un vrai passage à la 5G, qui aura lieu quand des technologies de rupture, comme les porteuses NR en bandes millimétriques, le NOMA (*non orthogonal multiple access*) ou le MEC (*mobile edge computing*), pourront être mises en place.

Outre cette course commerciale, les industriels, appuyés souvent par les Etats qui les hébergent, notamment aux Etats-Unis, au Japon ou en Corée, souhaitent se lancer très tôt dans la définition et l'expérimentation des technologies 5G afin de s'arroger un *leadership* technologique, dans les instances internationales de normalisation. A cet égard, la précocité des premiers déploiements annoncés en Corée du Sud (déploiements 5G lors des JO d'hiver en 2018 à Pyeongchang) ou au Japon (déploiement 5G lors des jeux olympiques d'été en 2020 à Tokyo) laisse supposer que ces déploiements ne pourront utiliser qu'une petite partie des technologies 5G, et auront plutôt recours à des technologies 4.9G ou pré-5G.

⁹ <http://gsacom.com/paper/intel-5g-technology-mm-wave-frequencies/>

1.2 Les familles d'usage 5G

Trois grandes catégories d'usages (définies par l'UIT, sous le terme IMT- 2020), avec leurs exigences respectives et potentiellement incompatibles entre elles, sont en train d'émerger et permettraient de répondre aux besoins métier mentionnés en introduction :

1. **mMTC – Massive Machine Type Communications** : communications entre une grande quantité d'objets avec des besoins de qualité de service variés. L'objectif de cette catégorie est de répondre à l'augmentation exponentielle de la densité d'objets connectés ;
2. **eMBB – Enhanced Mobile Broadband** : connexion en ultra haut débit en *outdoor* et en *indoor* avec uniformité de la qualité de service, même en bordure de cellule ;
3. **uRLLC – Ultra-reliable and Low Latency Communications** : communications ultra-fiables pour les besoins critiques avec une très faible latence, pour une réactivité accrue.

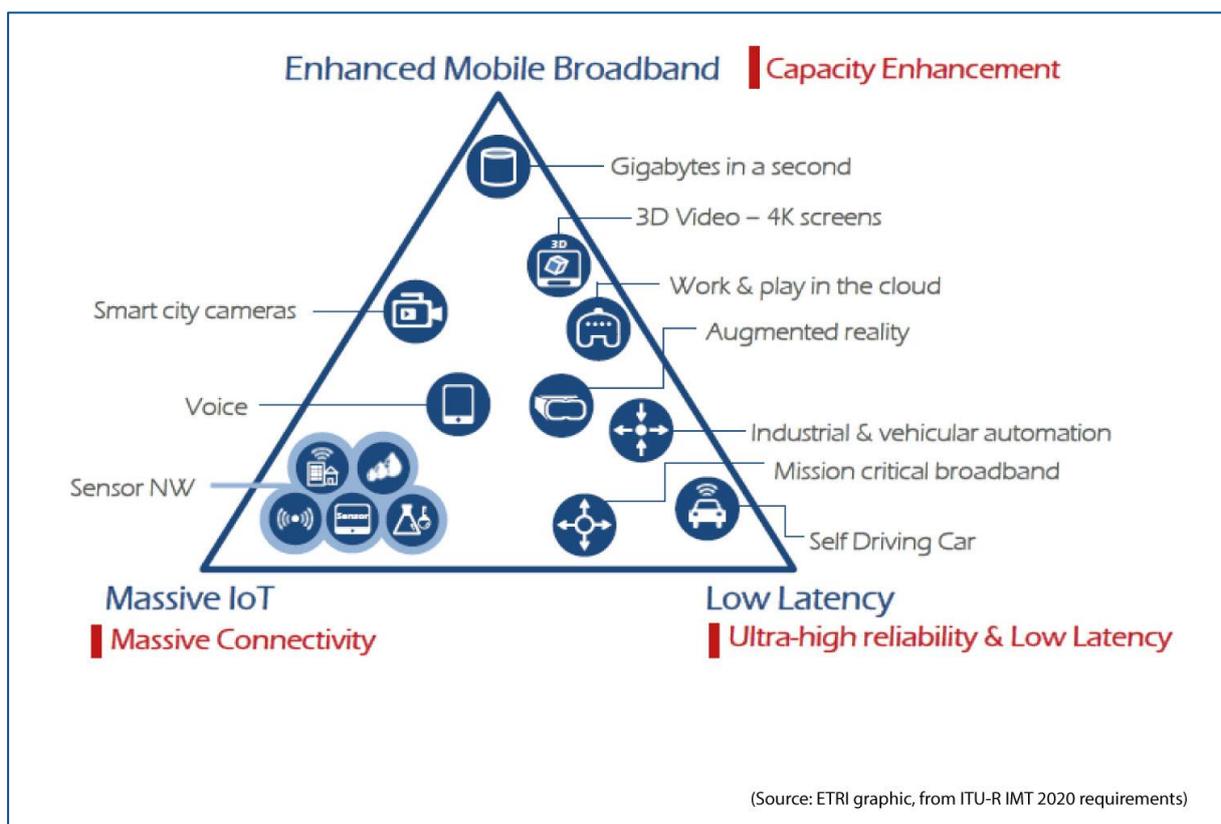


Figure 5. Catégories d'usages de la 5G¹⁰

Le premier groupe (mMTC) englobe principalement tous les usages liés à l'Internet des objets. Ces services nécessitent une couverture étendue, une faible consommation énergétique et des débits relativement restreints. L'apport annoncé de la 5G par rapport aux technologies actuelles réside dans sa capacité à connecter des objets répartis de manière très dense sur le territoire.

L'ultra haut débit (eMBB) concerne tous les applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus rapide, pour permettre par exemple de visionner des vidéos en ultra haute définition (8K) ou de « *streamer* » sans-fil des applications de réalité virtuelle ou augmentée.

¹⁰ <http://5g.ieee.org/standards>

Les communications ultra-fiables à très faible latence (uRLLC) regroupent toutes les applications nécessitant une réactivité extrêmement importante ainsi qu'une garantie très forte de transmission du message. Ces besoins se retrouvent principalement dans les transports (temps de réaction en cas de risque d'accident, par exemple), dans la médecine (téléchirurgie) et, de manière générale, pour la numérisation de l'industrie.

Afin de mettre en œuvre ces trois types d'usages, huit indicateurs¹¹ de performance (KPI – *Key performance indicators*) ont été établis par l'UIT pour préciser, quantifier et mesurer les caractéristiques de systèmes IMT-2020 (5G) :

- Débit crête par utilisateur (Gbit/s) ;
- Débit moyen perçu par l'utilisateur (Mbit/s) ;
- Efficacité spectrale (bit/Hz) ;
- Vitesse maximale des terminaux (km/h) ;
- Latence (ms) ;
- Nombre d'objets connectés sur une zone (quantité d'objets/km²) ;
- Efficacité énergétique du réseau ;
- Débit sur une zone (Mbit/s/m²) ;

¹¹ A ces huit classes, 5 nouveaux indicateurs ont été définis et sont en cours d'étude : fiabilité, temps d'interruption de la mobilité, largeur de bande, efficacité spectrale maximale, 5^{ème} percentile d'efficacité spectrale.

1.3 Un saut de performance par rapport aux réseaux 4G

Comme il a été évoqué au paragraphe 1.1, le déploiement de la 5G sera vraisemblablement étalé sur deux phases :

1. les premiers déploiements 5G offriront des performances en progression mais dans la continuité de ce qu'offrira alors la 4G qui aura évolué en parallèle (4.5G, 4.9G) ;
2. les performances continueront d'augmenter avec l'introduction progressive de technologies de rupture, comme par exemple l'utilisation de fréquences millimétriques.

Une telle arrivée progressive serait tout à fait similaire à ce qui s'est déroulé pour l'introduction de la 4G, dont les performances des premiers déploiements étaient sensiblement similaires aux réseaux 3G alors en place.

L'UIT définit la 4^{ème} génération, sous la terminologie *IMT-advanced*, suivant les 8 KPI susmentionnés avec les valeurs présentées sur le schéma ci-dessous. La 5^{ème} génération, appelée *IMT-2020*, y est également représentée. A cet égard, il convient de noter que la définition officielle de l'UIT de la 4G correspond en réalité à ce que les réseaux commerciaux n'ont déployé que dans un second temps, sous l'appellation 4G+ ou *LTE-Avanced*.

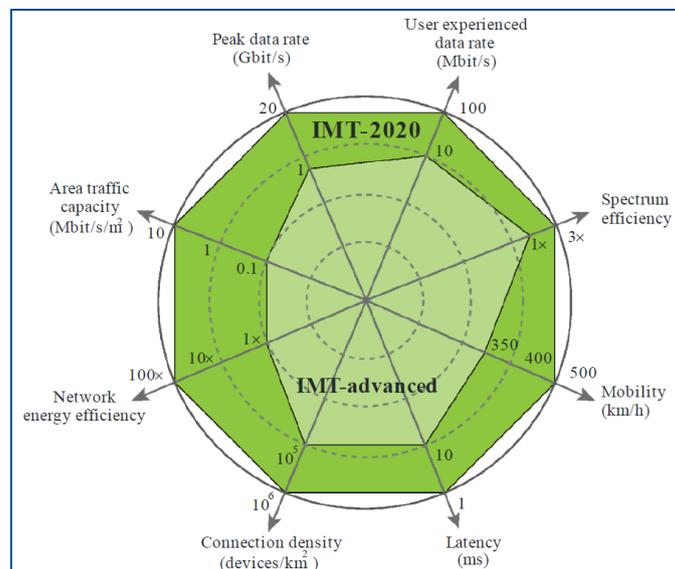


Figure 6. Comparaisons entre 4G et de la 5G au niveau des huit indicateurs de performance¹²

Selon ces objectifs, la 5G devra pouvoir offrir un débit utilisateur et un débit maximal respectivement 10 et 20 fois supérieur à ce qui est disponible actuellement. La densité maximale de connexions sera multipliée par 10 et la latence divisée par au moins 10 (la latence point à point cible est de 1 ms, contre 30 à 40 ms à ce jour).

¹² Recommandation ITU-R M.2083-0 (09/2015), https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf

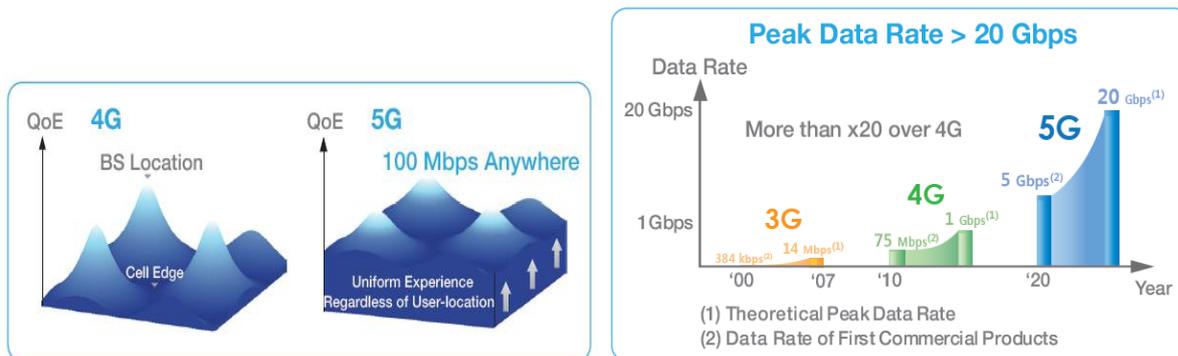


Figure 7. Représentation des indicateurs de performance « débit moyen perçu par l'utilisateur » pour 4G et 5G et « Débit crête par utilisateur » pour la 3G, 4G et 5G¹³

L'objectif de la 5G, en tant que successeur de la 4G, sera aussi de pouvoir fournir :

- un réseau extrêmement fiable, avec des performances plus homogènes, quelle que soit la position de l'utilisateur par rapport à la station de base ;
- une connexion stable même en mobilité (avec de vitesses de l'ordre de 500 km/h) ;
- une augmentation de l'efficacité énergétique (batteries jusqu'à 100 fois moins énergivores).

Le tableau ci-dessous résume les performances attendues de la 5G et celles qui sont actuellement disponibles avec la 4G :

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

Tableau 1. Comparaisons entre les performances de la 4G et de la 5G

¹³ <http://www.samsung.com/global/business-images/insights/2015/Samsung-5G-Vision-0.pdf>

1.4 Network Slicing et réseaux logiciels

Il est fondamental de comprendre que l'ensemble des indicateurs présentés en 1.3 détermine l'enveloppe des performances maximales de la 5G. Cependant, ces valeurs extrêmes ne pourront être atteintes simultanément pour tous les indicateurs : tous les besoins ou cas d'usage ne sont pas compatibles entre eux et un choix devra être réalisé pour définir des classes d'utilisation disposant chacune de son enveloppe de performances, notamment pour les familles décrites en 1.2 (mMTC, eMBB & uRLLC). C'est le principe de *network slicing* : chaque « tranche » dispose de son enveloppe qui est un compromis lié à l'usage ciblé ; à l'intérieur d'un réseau 5G, les caractéristiques devront s'adapter à l'environnement choisi.

Le schéma ci-dessous positionne, sur l'étoile des 8 KPI susmentionnés, les trois familles d'usage principales mentionnées en 1.2.

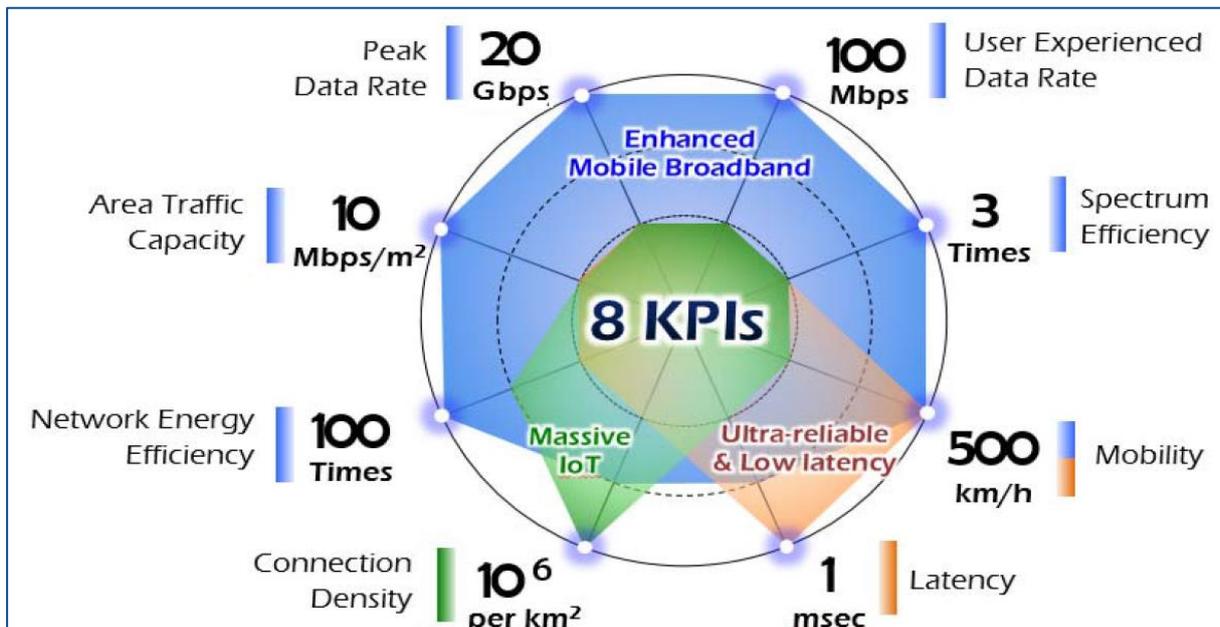


Figure 8. Indicateurs clés de performance pour les trois catégories d'usage de la 5G¹⁴

Ainsi, pour les besoins d'ultra haut débit (eMBB), comme la vidéo 4K, 8K, 3D ou la réalité virtuelle, un certain nombre de performances, comme l'efficacité spectrale, le débit maximal et la capacité globale du réseau, peuvent être atteintes au détriment d'autres, comme la latence ou la densité de connexions simultanées.

A l'inverse, lorsque une connexion massive simultanée d'objets connectés (mMTC) doit être gérée, le réseau concentre ses ressources et utilise les technologies nécessaires à la résolution de cette tâche, mais il n'est pas en mesure, par exemple, d'utiliser aussi efficacement le spectre ou d'assurer une faible latence.

Enfin, lorsque des communications ultra fiables, avec une très faible latence sont nécessaires (uRLLC), le nombre de communications simultanées, le débit ou encore l'efficacité spectrale peuvent être réduits.

Cette flexibilité, ou capacité d'adaptation, qu'apporte le *network slicing*, ne pourra être mise en place que grâce à la « softwarisation » et « virtualisation » d'un nombre important de composants du

¹⁴ https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/11/06_10-Nov_Session-3_Lee-JunHwan.pdf

réseau (cf. 1.5.2) ; on parle notamment de SDN (*Software-Defined Networking*) ou de NFV (*Network Function Virtualisation*). Derrière ces acronymes se cache une idée commune : utiliser le plus possible des composants génériques et reconfigurables, plutôt que des composants spécifiques dédiés *ad vitam* à des tâches très particulières. Cette évolution vers le « logiciel » est envisagée depuis de nombreuses années, mais devient possible grâce à la montée en performances de tous ces composants reconfigurables, y compris ceux qui sont les plus proches des tâches élémentaires de la communication sans-fil (détection, codage en bande de base, gestion des trains binaires, changement de fréquences, traitement de signal, etc...).

1.5 Les briques technologiques pour atteindre les objectifs

1.5.1 Lien radio - Air interface

Plusieurs technologies, parfois concurrentes, sont en cours d'étude pour l'accès radio. Certaines sont déjà pré-implémentées par les différents équipementiers et peuvent être utilisées lors d'expérimentations, en particulier le massive MIMO ou les NFV ; d'autres, comme la modulation NOMA ou le MEC, nécessiteront *a priori* plus de temps pour pouvoir être utilisées. En tout état de cause, un consensus, parfois douloureux pour certains industriels qui verront leurs investissements perdus, devra être trouvé lors de la définition des normes 5G pour assurer l'interopérabilité des systèmes.

Les technologies en cours d'étude sont les suivantes :

- **Bandes millimétriques** : l'utilisation de bandes millimétriques constitue l'une des technologies de rupture de la 5G. Cette appellation correspond aux fréquences supérieures à 6 GHz qui n'ont encore jamais été prises en compte pour le déploiement des réseaux mobiles (*fronthaul*) pour des raisons de maturité technologique et de qualité de propagation. Pour répondre à l'incessante augmentation des débits et des volumes de données échangés, il est nécessaire d'utiliser de nouvelles bandes disposant de très larges canalisations (plus de 100 MHz par utilisateur) : les bandes millimétriques pourraient offrir de telles réserves de spectre et leur utilisation permettrait d'atteindre dans certains cas, les débits affichés dans le Tableau 1. Comparaisons entre les performances de la 4G et de la 5G. En contrepartie, leur utilisation impose le développement de toutes les technologies nécessaires, miniaturisées, à bas coût et avec une consommation énergétique compatible avec des terminaux portables (amplificateurs, codeurs, traitement de signal, antennes...). En particulier, à cause de la faible qualité de propagation des ondes millimétriques, chaque cellule aura une couverture réduite, ce qui nécessitera la mise en place de techniques de *beamforming*, décrites ci-dessous, pour mieux focaliser l'énergie transmise par les antennes.
- **Massive MIMO** (*Multiple Inputs - Multiple Outputs*) : cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes », situées sur le même panneau (de 8 à 128 actuellement, mais le nombre augmentera avec l'utilisation de fréquences supérieures à 6 GHz). L'attrait de l'utilisation du massive MIMO est double : d'une part, cette technologie permet d'augmenter les débits, grâce au multiplexage spatio-temporel ; d'autre part, elle permet de focaliser l'énergie sur un terminal, pour améliorer son bilan de liaison, grâce à la formation de faisceau, ou *beamforming*.

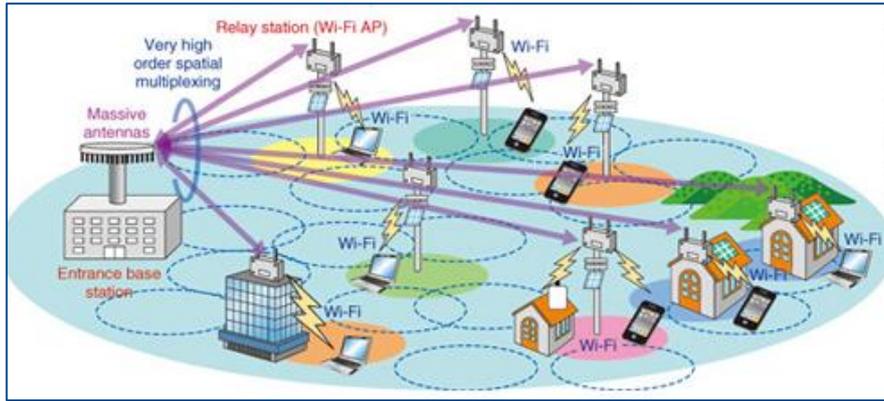


Figure 9. Exemple d'utilisation d'une antenne à formation de faisceau utilisée pour connecter des points d'accès Wi-Fi¹⁵

- **Full Duplex** : Dans les systèmes classiques, l'émission et la réception se font soit sur des bandes de fréquences différentes (duplexage en fréquences dit FDD, *frequency division duplexing*, utilisé sur toutes les bandes des réseaux mobiles français) soit à des instants différents (duplexage temporel dit TDD, *time division duplexing*, pressenti pour les réseaux de boucle locale radio LTE en France). Le *full duplex* ambitionne de permettre l'émission et la réception simultanée d'information, sur les mêmes fréquences, au même moment et au même endroit.¹⁶

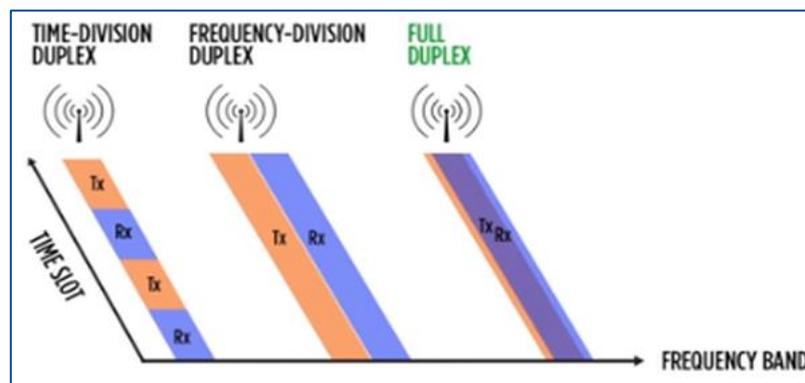


Figure 10. Illustration du *full-duplex*, comparé au FDD et TDD¹⁷

- **Multiplexage NOMA (Non Orthogonal Multiple Access)** : le LTE utilise un multiplexage dit orthogonal, chaque terminal utilisant, de manière unique, une partie des fréquences à un instant donné (*ressource blocks*). Pour améliorer l'efficacité spectrale de la 5G, par rapport à la 4G, des méthodes de multiplexage non orthogonales, c'est-à-dire que plusieurs utilisateurs peuvent recourir aux mêmes fréquences au même moment, sont envisagées. La discrimination entre plusieurs utilisateurs peut se faire en attribuant des codes différents à chaque utilisateur (SCMA, *sparse code multiple access*, combinaison du CDMA, *code division*

¹⁵ <https://www.slideshare.net/100001290086432/massive-mimo>

¹⁶ Le principe de base du fonctionnement est le suivant : une antenne envoie un signal en même temps qu'elle écoute ceux provenant des terminaux de la cellule. Néanmoins le signal reçu par l'antenne est une combinaison du signal émis par elle-même et des signaux émis par les terminaux (tout le monde « parle » en même temps). Dans la mesure où elle connaît parfaitement le signal qu'elle a envoyé, l'antenne est capable de le soustraire lors du traitement numérique à celui qu'elle reçoit. Il ne reste plus dès lors que les signaux reçus des terminaux.

¹⁷ <http://compeng.columbia.edu/biggest-component-full-duplex-wi-fi-radio-antenna>

multiple access, de la 3G et de l'OFDMA, *orthogonal frequency division multiple access*, de la 4G) ou en jouant sur la différence des niveaux du rapport signal à bruit des différents utilisateurs (*power domain NOMA*¹⁸, illustré ci-dessous). Ce sont les deux modes privilégiés pour NR.

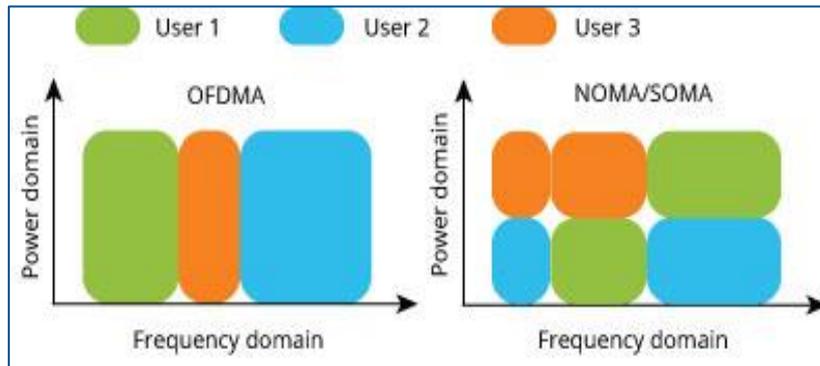


Figure 11. Illustration de multiplexage *power domain* NOMA¹⁹

- **QAM256** : La 4G, comme de nombreux systèmes de communication modernes, utilise la modulation d'amplitude en quadrature, ou *quadrature amplitude modulation* (QAM). Cette modulation, en 4G peut atteindre QAM64, c'est-à-dire qu'à chaque instant, 6 bits d'information sont transmis ($2^6 = 64$). Dans les systèmes sans-fil, la principale limitation sur l'ordre de la QAM est le rapport signal-bruit : quand on envoie beaucoup d'informations d'un coup, la transmission est très sensible aux perturbations (un peu comme quand, dans un environnement bruyant, on essaie de parler : il est facile de comprendre un « oui » ou un « non », mais plus difficile de comprendre une phrase complexe). Grâce à l'amélioration du bilan de liaison de la 5G, *via* des technologies antennaires ou de traitement de signal, la modulation pourra atteindre l'ordre QAM256, c'est-à-dire que 8 bits d'information seront transmis à chaque instant, soit une augmentation de la capacité maximale de 33% (dans des conditions idéales). Cette modulation améliorée sera également déployée sur les réseaux 4G évolués.
- **Formes d'ondes IoT** : de nouvelles formes d'ondes sont à l'étude pour le futur déploiement de l'IoT 5G dans les bandes mobiles. Néanmoins, bien que l'IoT de masse soit un des enjeux principaux de la 5G, aucun résultat concret n'a été rendu public. De nouveaux standards (EC-GSM ou *Extended Coverage GSM*, LTE-(e)MTC ou *enhancements for Machine-Type Communications*, NB-IoT ou *NarrowBand IoT*), qui ont été définis par le 3GPP dans la *release 13*, commencent à être déployés par les opérateurs²⁰, mais, dans la mesure où ils s'appuient sur la 2G et la 4G, ils n'apportent pas les niveaux de performance, notamment en autonomie, en couverture ou en densité, que ciblent les futurs réseaux 5G.

¹⁸ Le principe de base du fonctionnement est le suivant : soit U1 l'utilisateur avec un bon rapport signal bruit et U2 celui avec un moins bon rapport signal bruit. L'antenne envoie avec une forte puissance le signal S2 destiné à U2 et y superpose avec une moindre puissance S1 destiné à U1. U2 ne verra que S2, S1 étant noyé dans le bruit. U1 va décoder S2 puis le supprimer au signal reçu pour en ressortir S1 avec une bonne qualité, étant donné le rapport signal bruit favorable.

¹⁹ <https://www.anritsu.com/en-AU/test-measurement/technologies/5g-everything-connected/5g-everything-connected-detail>

²⁰ <http://www.vodafone.com/content/index/what/technology-blog/nbiot-commercial-launch-spain.html>

1.5.2 Architecture réseau

Au même titre que pour l'interface radio, de nouvelles architectures réseau sont à l'étude :

- **Contrôleur de réseau logiciel (SDN) et virtualisation du réseau (NFV)** : ces deux fonctionnalités dépassent le cadre strict des réseaux 5G ; elles font partie du processus général d'évolution des réseaux actuels et sont déjà disponibles dans la technologie 4G (4.9G). Elles restent toutefois un *key enabler* de la 5G :
 - o Le SDN (*Software Defined Network*) a pour objectif de dissocier la partie contrôle d'un réseau de sa partie opérationnelle, ces deux parties étant traditionnellement liées et distribuées (de manière figée) dans le réseau (cf. figure ci-dessous). Le contrôle du réseau, autrefois dévolu à des composants matériels spécialisés et non évolutifs, est centralisé sous forme de logiciels sur des serveurs plus puissants et affranchis (en théorie) des spécifications des équipementiers. Cela permet le déploiement de services à forte valeur ajoutée (équilibrage de charge, routage intelligent, configuration dynamique...) dans des environnements hétérogènes.

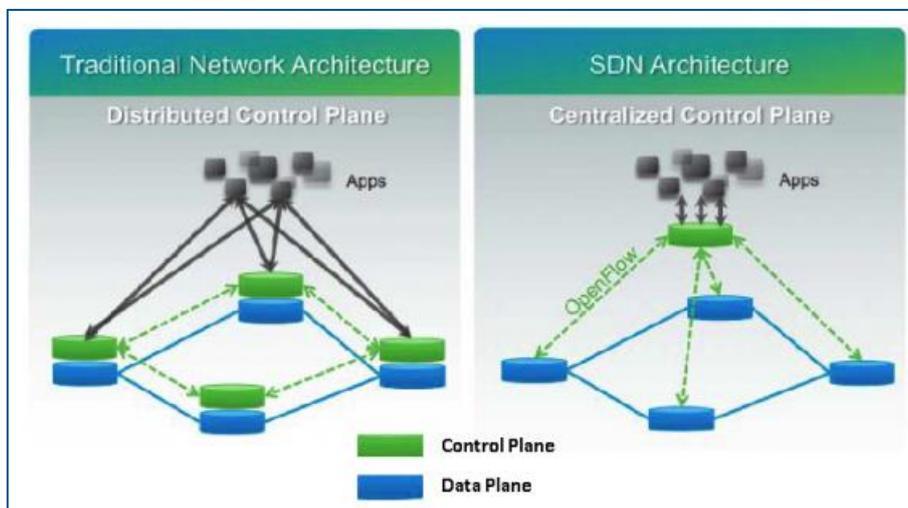


Figure 12. Centralisation du plan de contrôle dans un *software defined network*²¹

- o Le NFV, complémentaire du SDN, a pour objectif de virtualiser, c'est-à-dire remplacer par du logiciel sur un serveur, des équipements matériels spécialisés dans certaines fonctions clés du réseau (firewall, cœur de réseau, interfaces entre différents systèmes...), dans le but d'accélérer les déploiements et de permettre des évolutions rapides.
- **CloudRAN** : cette fonctionnalité, connue aussi sous le nom de *centralized-RAN*, implique une architecture réseau très différente de ce qui se fait actuellement. C'est une évolution du SDN : les unités de traitement du signal des stations de base, actuellement placées au niveau de la station elle-même, sont déportées dans le cloud et centralisées ; elles communiquent avec les têtes de réseau, situées au plus proche de l'antenne, via un réseau fibre optique (technologie *Radio over fiber*). Cette centralisation permet une vision d'ensemble de toutes les stations déployées et de coordonner le traitement de signal et la gestion des interférences entre cellules et terminaux.

²¹ http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2014/software-defined_networking/sdn.html

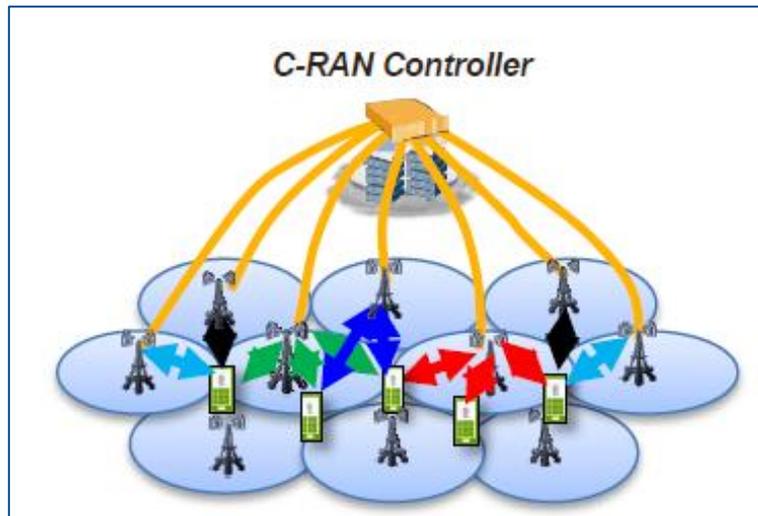


Figure 13. Illustration d'une architecture réseau *CloudRAN*²²

- **Optimisation de la fourniture de contenus (*mobile content delivery network, mobile CDN*)** : correspond à un ensemble de serveurs qui travaillent ensemble de façon transparente pour optimiser l'apport de contenus, via les réseaux sans-fil (mobile ou Wi-Fi), vers les utilisateurs finals avec une disponibilité et des performances élevées. Dans la 5G, l'objectif de ces CDN est de pré-apporter le contenu au plus proche de l'utilisateur, notamment par le biais d'algorithmes prédictifs, dans le but de désengorger les réseaux et de diminuer les temps de latence.
- **MEC (*mobile edge computing*)** : le MEC est une évolution du *mobile CDN* qui a pour but, en plus de rapprocher les données des terminaux, de fournir à ceux-ci une capacité de calcul accessible avec une très faible latence, dans une zone spécifique pour des usages exigeants. Cette technologie permet de placer une partie de l'intelligence (gestion d'applications locales critiques et analyse de performances) du réseau au niveau des stations mobiles. Les « antennes » seront en mesure d'analyser un certain nombre de données et donc de prendre des décisions dans un laps de temps très court.
- **Device to device**: le D2D (*device to device*) est une communication directe, qui ne nécessite pas le passage par le réseau cellulaire, entre deux équipements situés à proximité l'un de l'autre. Ce type de communication n'est pas nouveau ; des technologies comme le *bluetooth*, ou le *Wi-Fi direct* permettent déjà des communications D2D. Cependant une nouvelle technologie de *mesh networking* sera introduite avec le déploiement des réseaux 4.9G puis 5G : le LTE-direct. Ce dernier, beaucoup plus efficace énergétiquement par rapport aux précédentes technologies, permettra une portée jusqu'à 500 mètres et un service de géolocalisation pour favoriser les échanges. Cette technologie sera très utile pour les échanges V2V (*vehicle-to-vehicle*) ou V2X (*vehicle-to-everything communications*) à faible latence ou pour certaines utilisations régaliennes.

1.5.3 La 5G : une génération multi-technologies qui cohabite avec les réseaux existants

Comme évoqué précédemment, la 5G n'a pas vocation à remplacer instantanément la 4G. En pratique, les terminaux seront très certainement multimodaux : toujours connectés au réseau 4G,

²² https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/11/04_10-Nov_Session-3_Takaharu-Nakamura.pdf

qui permettra lors des premiers déploiements la couverture « étendue », ils basculeront vers des réseaux 5G, lorsque ceux-ci sont disponibles.

Si dans un premier temps les fréquences 4G et 5G seront séparées, il est fort probable que les terminaux seront rapidement capables d'agréger des porteuses 4G et 5G et que, dans un second temps, des porteuses 4G seront encapsulées dans les porteuses 5G.

La 4G poursuit aujourd'hui son déploiement et son évolution technologique et certaines briques technologiques seront aussi bien utilisées par les premiers réseaux 5G que les réseaux 4G évolués. A cet égard, les dernières expérimentations menées en France permettent aux réseaux 4G de progresser en performances avec des technologies « pré-5G » :

- Bouygues Telecom en partenariat avec Huawei a pu atteindre un débit maximal de 1 Gbps grâce à l'utilisation simultanée de l'agrégation de 4 porteuses (800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz) et d'une modulation plus performante (256 QAM)²³ ;
- Orange va lancer, dans les semaines à venir, une expérimentation de type massive MIMO (16x16) avec Nokia²⁴.

Outre une intégration poussée entre 4G et 5G, la nouvelle génération poursuivra vraisemblablement les efforts de convergence entre bandes de fréquences sous licence exclusive (i.e. les bandes attribuées exclusivement à un opérateur, par exemple les opérateurs mobiles) et bandes sous autorisation générale, dites « libre » (i.e. bandes Wi-Fi), déjà amorcés en 4G avec le LTE-LAA (*Long Term Evolution - License Assisted Access*) et LTE-LWA (*Long Term Evolution – Wi-Fi Link Aggregation*).

Le LTE-LAA est caractérisé par l'agrégation d'une ou plusieurs porteuses LTE, utilisées dans des bandes sous licences exclusives, avec d'autres porteuses LTE exploitantes les bandes libres du Wi-Fi à 5 GHz. Pour garantir la cohabitation avec les réseaux Wi-Fi, très répandus et dont la nature des déploiements est imprévisible, elle utilise la technologie LBT (*Listen Before Talk*) qui permet d'écouter le canal radio, avant une transmission, pour déterminer si une fréquence est libre ou non.

Le LTE-LWA consiste en une agrégation des porteuses LTE dans des bandes exclusives avec du trafic Wi-Fi. Pour ce faire, la cellule LTE et le point d'accès Wi-Fi doivent être connectés (le trafic Wi-Fi est envoyé à la cellule qui renvoie tout le lien agrégé sur le cœur de réseau 4G). Cette technologie est particulièrement adaptée aux environnements indoor avec des *small-cells*, dispositifs qui, comme indiqué plus bas au paragraphe 3.3, se prêteront bien au déploiement de la 5G.

²³ <https://www.corporate.bouyguetelecom.fr/wp-content/uploads/2016/05/Communiqu%C3%A9-Bouygues-Telecom-et-Huawei-Technologies-r%C3%A9alisent-un-test-de-d%C3%A9bit-4G-%C3%A0-plus-de-1-Gbps-pour-la-premi%C3%A8re-fois-en-Europe-de-lOuest.pdf>

²⁴ <https://reseaux.orange.fr/actualites/actualites-des-reseaux/orange-et-nokia-partenaires-pour-developper-les-futurs-services-5g>

2 Les initiatives en cours pour développer la 5G

Au vu des nombreuses promesses de la 5G, de nombreuses initiatives ont été lancées dans le monde afin de promouvoir son développement. La présente partie expose les principales initiatives que les acteurs rencontrés par l'Arcep ont pu mettre en avant.

2.1 Initiatives publiques

La perspective d'importantes retombées socio-économiques (revenus possibles liés à la 5G s'élevant à près de 225 milliards d'Euros/an²⁵ d'ici 2025) ainsi que la volonté de nombreux pays d'affirmer leur *leadership* technologique et d'améliorer la compétitivité de leurs entreprises ont engendré une multitude d'initiatives publiques visant à inciter, partout dans le monde, l'écosystème mobile à engager les travaux et les investissements nécessaires pour motiver une arrivée rapide des premiers réseaux 5G.

Certaines de ces initiatives, parmi les plus importantes, sont détaillées dans cette partie.

2.1.1 Au niveau européen

5G-PPP

Le 5G-PPP (*5G Public Private Partnership*) est un partenariat public-privé, dédié à la recherche et au développement autour de la 5G et créé à l'initiative de la commission européenne dès 2013, avec un budget de 700 millions d'euros de fonds public. Les objectifs principaux du 5G-PPP sont :

- Réunir le tissu économique et académique du secteur des télécommunications autour de grands projets de R&D, sur toute la chaîne de valeur ;
- Réduire la dépendance technologique aux Etats-Unis et à l'Asie tout en maintenant une forte part de marché mondial ;
- Reprendre du *leadership* technologique, notamment dans les technologies de rupture, par la promotion de standards au sein des instances internationales ;
- Permettre la définition de *business models* innovants ;
- Faciliter l'expérimentation à grande échelle.

Les résultats de ces travaux ont vocation à soutenir le plan d'action 5G (voir ci-dessous) et doivent nourrir les travaux de normalisation en cours.

Afin d'atteindre ces ambitions, le 5G-PPP a initié trois phases de travaux financées par l'Union européenne, et dont le calendrier est en phase avec les grandes initiatives internationales (3GPP et UIT, cf.) :

- Une première phase actuellement en cours jusqu'en mi-2017 ;
- Une deuxième phase axée sur les optimisations systèmes entre fin 2017 et mi-2019 ;
- Et enfin une troisième phase d'expérimentations grandeur-nature entre 2019 et 2020.

Déployer la 5G d'ici 2020 va demander à l'Europe de développer des technologies novatrices, des standards approuvés à l'échelle mondiale et surtout de s'accorder sur les bandes de fréquence du

²⁵ <https://www.abiresearch.com/press/abi-research-projects-5g-worldwide-service-revenue>

spectre les plus adéquates. Ces financements et ces projets dans lesquels sont impliqués de nombreux chercheurs de plus d'une centaine d'entreprises et les meilleurs centres de recherche académique européens sont donc primordiaux.

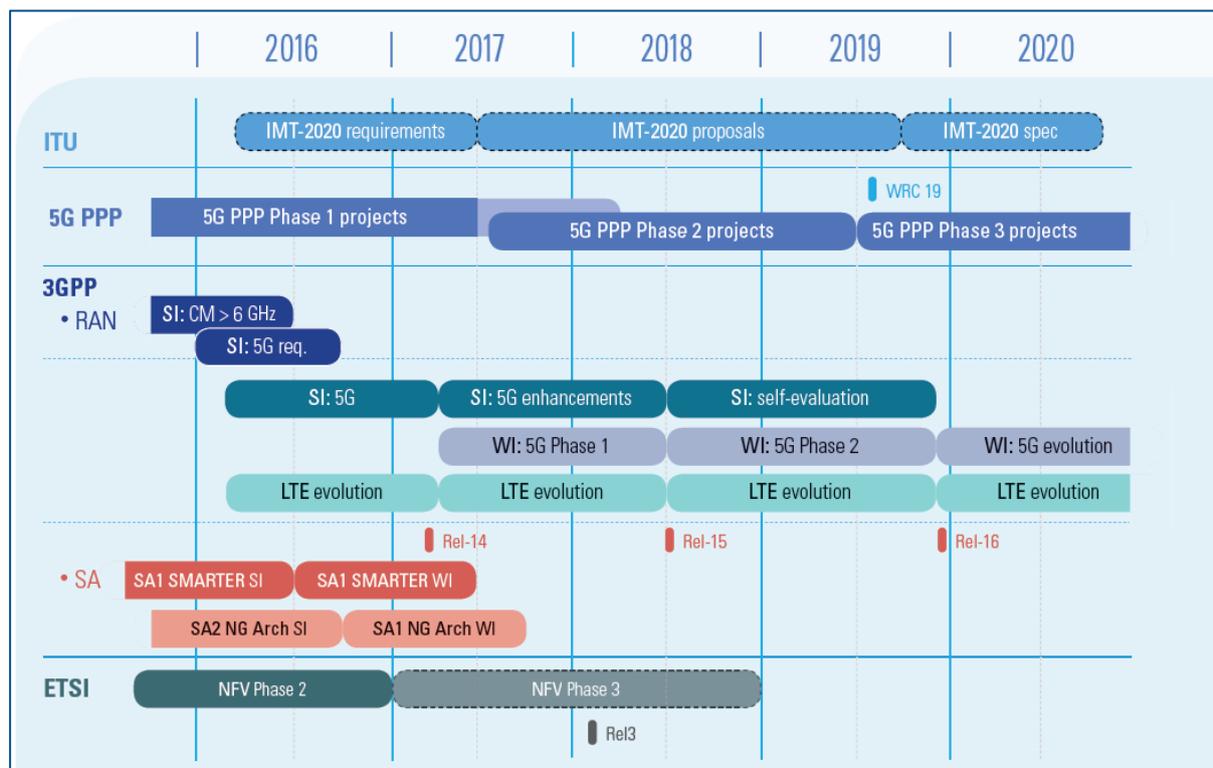


Figure 14. Phasage des projets 5G PPP comparés à ceux du 3GPP et de l'UIT²⁶

5G action plan

En complément, le 14 septembre 2016, la Commission européenne a lancé son « *5G Action Plan* » afin de doper d'ici 2020 les investissements et les efforts pour le déploiement des infrastructures et services 5G à travers le marché numérique unique. Ce plan fixe une *roadmap* claire pour les investissements 5G publics et privés au sein de l'UE.

Afin de réaliser ce plan la commission propose les mesures suivantes :

- harmoniser les priorités et les calendriers nationaux pour un déploiement coordonné à travers tous les pays membres de l'UE, visant de premiers déploiements anticipés dès 2018 et un lancement des déploiements commerciaux généralisés d'ici la fin de 2020 au plus tard ;
- réserver dès à présent des bandes de spectre pour la 5G, sans attendre la CMR19 ;
- promouvoir des déploiements rapides et au plus tôt dans les grands centres urbains et le long des axes majeurs de transport ;
- promouvoir l'expérimentation par les multiples parties prenantes paneuropéennes pour catalyser le passage de l'innovation technologique au marché de masse ;
- faciliter l'implantation d'investissements privés dédiés à l'innovation 5G ;

²⁶5G Empowering vertical industries. White Paper, 2016, https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/02/BROCHURE_5PPP_BAT2_PL.pdf

- fédérer les acteurs principaux afin qu'ils travaillent de concert pour la promotion de standards mondiaux.

La Commission européenne donne à tous les pays de l'Union un certain nombre d'objectifs chiffrés et ambitieux. Ainsi, un objectif phare pour la 5G serait d'avoir en 2020 au moins une grande ville dans chaque pays d'Europe équipée de cette dernière génération mobile, avec une couverture, à l'horizon 2025, de tous les centres urbains, les autoroutes et les voies ferrées à grande vitesse. Il s'agit là de répondre aux annonces de la Corée du Sud et du Japon qui promettent de faire une démonstration à grande échelle de la 5G respectivement aux JO d'hiver en 2018 à Pyeongchang et d'été en 2020 à Tokyo.

2.1.2 Au niveau mondial (exemples aux USA, Corée, Japon, Chine)

La course mondiale est déjà lancée entre pays pour être le premier à mettre en place des expérimentations 5G à grande échelle, puis à lancer des services commerciaux, quand bien même ceux-ci seraient basés sur des pré-standards de spécifications techniques.

Ainsi plusieurs pays, travaillent et essaient de s'accorder entre eux afin de pousser à l'international les spécifications techniques qui satisferont leurs besoins et rentabiliseront au mieux les investissements consentis, créant par exemple beaucoup de tumultes au sujet des bandes de fréquences les plus adéquates à considérer pour la 5G.

Etats-Unis d'Amérique²⁷

La 5G est considérée comme étant une opportunité sans précédent pour la croissance économique avec de gros impacts sur l'éducation, l'emploi, les transports, etc... Ces futurs réseaux nécessitent, selon la FCC (*Federal Communications Commission*, l'agence de régulation américaine) de se pencher sur les 3 éléments suivants : le spectre, l'infrastructure et le réseau de raccordement (*backhaul*).

- **Le spectre** : En Juillet 2016, la FCC a voté la libération et l'aménagement de près de 11 GHz de bande de fréquence dans les fréquences hautes destinés à être utilisés pour des usages large bande fixe et mobile : 3,85 GHz de bande, destinés à être attribués sous licences dans les bandes 27,5 - 28,35 GHz et 37 - 40 GHz ainsi que 7 GHz, sous autorisation générale, dans la bande 64 - 71 GHz. L'objectif affiché de la FCC était de fournir de la sécurité et de la visibilité pour l'investissement dans le secteur des télécoms. Verizon s'est félicité de ces décisions et envisage d'ailleurs de premiers déploiements commerciaux dès 2017, alors que des tests ont déjà commencé dans plusieurs villes à travers le pays (cf. 3.3).
- **Les infrastructures** : La FCC estime que la 5G devra reposer sur un réseau et des infrastructures robustes à même de supporter une utilisation intensive qui augmentera potentiellement de façon exponentielle dans les prochaines années. Elle interagira de façon hybride entre les traditionnelles tours avec des cellules macro et des déploiements de petites cellules ainsi que des systèmes d'antennes distribués. Dans l'optique des nombreux déploiements de nouveaux sites, la FCC a ainsi pris la résolution de réduire ou d'éliminer, dans certains cas, les contraintes réglementaires pour l'installation de sites ou d'antennes qui ont un impact « faible » (réutilisation de site, petites antennes, installations indoor...)²⁸.
- **Le réseau de raccordement** : Dans la mesure où les réseaux 5G auront besoin de réseaux de collecte très performants, la FCC est dans un processus de réforme et de modernisation de la régulation relative aux marchés des services de données (en y incluant le *backhaul* par

²⁷ Forging Our 5G Future – Federal Communications Commission , <https://www.fcc.gov/5G>

²⁸ https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DA-16-900A1_Rcd.pdf

faisceaux hertziens). La FCC cherche à sanctuariser ce marché tout en y injectant de la concurrence, afin que des offres de raccordement aux réseaux de collecte compétitives et performantes puissent émerger.

Japon

Le Japon veut démontrer son *leadership* sur la 5G en déployant le premier réseau commercial 5G à être conforme aux spécifications techniques internationales pour les jeux olympiques d'été de Tokyo en 2020.

Selon le rapport «*Radio Policies Towards 2020*²⁹» publié par le ministère japonais des affaires internes et des communications (MIC - *Ministry of Internal Affairs and Communications*) en juin 2016, les bandes 3600 - 4200 MHz, 4400 - 4900 MHz et 27,5 - 29,5 GHz ont été sélectionnées comme bandes candidates pour la 5G à l'échelle nationale. Bien que d'autres bandes soient également investiguées, dans l'optique de la CMR19, des expérimentations 5G sont déjà prévues dans les bandes 3600 - 4100 MHz, 4405 - 4895 MHz et 27,5 - 28,28 GHz dès 2017 à Tokyo et continueront en s'intensifiant en 2018 et 2019.

Chine

Tout comme au Japon, la Chine entend montrer son *leadership* avec des premiers déploiements commerciaux dès 2020. Les premiers tests seront faits avant 2020 dans la bande 3400 - 3600 MHz. Les bandes 3300 - 3400 MHz, 4400 - 4500 MHz and 4800 - 4990 MHz sont aussi considérées et à l'étude. Pour de plus hauts débits, les bandes autour de 25 GHz et 40 GHz sont envisagées.

Corée

La Corée quant à elle, vise un déploiement pré-commercial de la 5G durant les jeux olympiques d'hiver de Pyeongchang 2018. Plusieurs expérimentations sont en cours de préparation pour des démonstrations grandeur nature dans plusieurs villes coréennes dont Pyeongchang et Seoul. Les trois opérateurs mobiles nationaux espèrent des fréquences dans la bande 26,5 - 29,5 GHz.

SK Telecom, l'opérateur mobile le plus important du pays a annoncé un plan pour des tests d'interopérabilité avec Qualcomm et Ericsson ainsi que des expérimentations en plein-air de la nouvelle interface radio basées sur les standards NR du 3GPP qui sont en cours de développement. Ces tests et expérimentations seront effectués au deuxième semestre 2017.

Si le but de ces expérimentations est d'aider à accélérer les spécifications de cette nouvelle interface NR qui fait partie des travaux de la *release 15*, il n'est pas encore précisé quelles bandes de fréquences seront utilisées pour ces expérimentations.

2.2 De nombreuses initiatives privées - quelques exemples

5G Open Trial Specification Alliance

Les opérateurs sud-coréens KT et SK Telecom, l'opérateur Japonais NTT DoCoMo et l'opérateur américain Verizon ont formé une alliance début 2016 appelée « *5G Open Trial Specification Alliance* » afin de conduire des expérimentations 5G dans une optique de collaboration entre opérateurs.

Ces expérimentations, envisagées durant la période 2016-2018, ont pour but de fournir une plateforme commune aux opérateurs, propice aux échanges de résultats et aux évaluations

²⁹ http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2016/08/MIC_Spectrum-for-5G-MIC-Kuniko-OGAWA.pdf

partagées de différents composants et éléments réseaux 5G. Un des objectifs des opérateurs est aussi d'aider à accélérer la définition des standards et de permettre des économies d'échelle. En effet, les résultats de ces évaluations serviraient d'*inputs* pour les discussions au sein du 3GPP, complétant les simulations avec des données expérimentales issues de ce partenariat.

Les fondateurs de l'alliance prévoient d'attirer autour de cette plateforme divers partenaires industriels parmi lesquels d'autres opérateurs, des équipementiers, fabricants de puces... Plusieurs équipementiers importants des opérateurs fondateurs sont déjà impliqués dans les expérimentations prévues.

Les expérimentations couvriront de multiples bandes du spectre aussi bien en dessous qu'au-dessus de 6 GHz.

Verizon 5G Technical Forum

Le *Verizon 5G Technology Forum* (V5GTF) a été créé fin 2015 par Verizon en coopération avec ses partenaires Cisco, Ericsson, Intel, LG, Nokia et Qualcomm. Le but de la collaboration est de fournir une plateforme de spécifications de tests de l'interface radio dans les bandes 28 et 39 GHz.

Comme premiers résultats de cette collaboration, Verizon a annoncé en juillet 2016 avoir achevé les premières spécifications de leur interface radio 5G. Ces spécifications devraient permettre aux différentes parties prenantes impliquées de développer des solutions interopérables et ainsi contribuer aux avancées de la définition des pré-standards.

Bien que courant le risque de développer des solutions qui ne soient pas conformes aux standards 3GPP ou UIT, Verizon estime avoir une assez bonne idée des concepts généraux qui y sont discutés. Les tests conduits dans plusieurs villes américaines ont ainsi pu valider des capacités substantiellement plus importantes que la 4G.

Orange/Ericsson

Orange et Ericsson sont partenaires depuis Octobre 2016 dans le but de développer ensemble des cas d'usage et des services 5G ainsi que des démonstrations. Il s'agira d'élaborer des briques technologiques, des expérimentations et des projets pilotes pour divers cas d'applications parmi lesquels l'accès internet sans fil multi gigabits/s dans des environnements périurbains et ruraux, l'IoT ou encore les voitures connectées.

Leur collaboration a permis d'atteindre 15 Gb/s lors d'une expérimentation en laboratoire, grâce notamment à l'utilisation des ondes centimétriques, du *massive* MIMO et du *beamtracking*. La collaboration portera également sur l'évolution des solutions 4G vers la 5G, notamment en termes de réduction des coûts et d'amélioration de l'efficacité énergétique, et sur l'utilisation de technologies SDN et NFV.

Ils accueillent depuis Janvier 2017 le groupe PSA (Peugeot) afin de conduire des expérimentations sur les voitures connectées.

5G-ConnectedMobility

Le *5G-ConnectedMobility* est un consortium formé d'Ericsson, du groupe BMW, de la Deutsche Bahn, des trois opérateurs mobiles allemands Deutsche Telekom, Telefonica Deutschland et Vodafone, du laboratoire 5G TU Dresden, de l'institut de recherche BAST et du BNetzA dans le but de renforcer et accélérer les travaux de recherche et développement sur la 5G en Allemagne.

Le *5G-ConnectedMobility* entend ainsi fournir une infrastructure et un environnement d'application réelle d'une « autoroute numérique » afin de procéder à des tests des technologies V2V (*vehicle-to-vehicle*) ou encore relatifs à la numérisation de l'infrastructure ferroviaire.

Dans ce cadre, la *5G-ConnectedMobility* opère à l'aide d'une infrastructure réseau indépendante qui n'est lié à aucun réseau commercial. Le réseau mobile Ericsson dédié à ce projet permet d'effectuer des tests *live* : Ericsson a ainsi reçu la permission du Bnetza d'utiliser les fréquences de la bande 700 MHz dans la zone de Nuremberg.

3 Les défis de la 5G

La présente partie expose les différents défis, pour la 5G, qui ressortent des entretiens que l'Arcep a menés ces derniers mois.

3.1 De nouveaux modèles économiques centrés sur les marchés verticaux

Les technologies 3G et, surtout, 4G visaient principalement l'internet mobile à très haut débit. La 5G continuera à viser cet usage, mais souhaite s'adresser également aux marchés dits « verticaux », caractérisés par plusieurs segments, dont notamment :

- les véhicules connectés, non seulement pour l'*entertainment* et l'information passagers, mais pour garantir la sécurité *via* des communications entre véhicules et entre véhicules et infrastructures ;
- l'industrie du futur ;
- les villes intelligentes avec des besoins au niveau des transports publics (similaires aux besoins des véhicules connectés), de l'environnement, de la gestion des bâtiments et de la consommation énergétique ;
- la médecine et la chirurgie assistée à distance ;
- le suivi et la gestion de flux « smartgrids » (électricité, gaz, eau, etc..).

La suite de cette partie s'intéressera aux 2 segments des véhicules connectés et de l'industrie du futur. Ces segments constituent, par leur contexte macro-économique actuel et à venir ainsi que par la pluralité et l'effervescence des travaux préliminaires en cours les concernant, les axes principaux de développement de la 5G sur des marchés verticaux. Les villes intelligentes et les *smartgrids* ont déjà commencé leur essor au travers des technologies actuelles de l'IoT.

3.1.1 Secteur automobile

La voiture est un moyen de transport très répandu et la sécurité associée à la conduite est un élément primordial ; l'erreur humaine est la principale cause d'accidents dans les transports. Le secteur des transports souhaite utiliser les innovations technologiques pour répondre à cette problématique et pour rendre les transports toujours plus efficaces, durables et sûrs.

Il existe trois domaines dans lesquels les progrès technologiques pourraient améliorer le transport automobile. Pour plusieurs d'entre eux, et notamment pour les deux premiers, la 5G pourrait jouer un rôle :

- l'apport de la connectivité Internet aux véhicules, dans le but de participer au divertissement des passagers ;
- l'accès à des informations permettant de fournir une aide à la conduite, dans le but de réduire les accidents et d'améliorer la fluidité du trafic ;
- enfin, la possibilité de rendre les véhicules autonomes, grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle.

Le premier domaine représente une simple extension de ce qui se développe actuellement avec la 4G : il s'agit de donner accès, aux passagers, à leur messagerie, à Internet, à des contenus multimédias, à des jeux en ligne... L'amélioration des débits promise par la 5G permettra d'améliorer tous ces services.

Le deuxième domaine vise à rendre les véhicules plus intelligents, en utilisant des informations qui ne leur étaient pas disponibles précédemment. Cela permettrait d'améliorer la sécurité et l'efficacité des réseaux en aidant le conducteur à prendre les bonnes décisions et à s'adapter à la situation. Ainsi, les véhicules pourraient avoir accès à des informations relatives aux endroits dangereux (véhicules lents ou à l'arrêt, avertissement en cas d'encombrements, avertissement en cas de travaux de voirie, conditions météorologiques, freinage d'urgence, véhicule d'intervention d'urgence en approche...) ou à la signalisation (signalisation à bord des véhicules, limites de vitesse à bord des véhicules, non-respect de la signalisation/sécurité aux croisements, demande de priorité par rapport aux feux de signalisation émise par des véhicules désignés, vitesse d'approche optimale recommandée pour le passage au feu vert, etc...). D'autres services, comme les informations sur les stations de ravitaillement et de recharge, la protection des usagers vulnérables de la route, la gestion du stationnement sur voirie et les informations de circulation et guidage intelligent, pourraient être utiles également. Il n'est pas encore clair de savoir si, pour cela, les véhicules se contenteront d'échanger des informations entre eux, ou si une infrastructure sera nécessaire, le long des routes, pour optimiser le comportement des véhicules. Dans les deux cas, la 5G pourra peut-être jouer un rôle.

A titre d'exemple, parmi les nombreuses initiatives qui sont d'ores et déjà en cours, on peut citer tout d'abord, en France, le projet SCOP@F³⁰ (systèmes de transport intelligents coopératifs), coordonné par le Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer et fédérant des collectivités locales, des gestionnaires routiers, les constructeurs automobiles PSA et Renault, des universités et des centres de recherche, qui a été lancé en février 2014. Par la suite, de nouveaux partenaires (dont Orange et des partenaires autrichiens, espagnols et portugais) l'ont rejoint ; en tant que projet européen, il est subventionné par la Commission européenne à hauteur de 50% et des tests croisés seront organisés avec l'Autriche, l'Espagne et le Portugal. SCOP@F est un projet de déploiement pilote de systèmes de transport intelligents coopératifs ; il vise à déployer 3000 véhicules sur 2000 km de route répartis en cinq sites : Ile-de-France, A4, Isère, rocade de Bordeaux et Bretagne. Ses principaux objectifs consistent à améliorer la sécurité routière et celle des agents d'exploitation, rendre la gestion de trafic plus efficace, contribuer aux réductions d'émissions polluantes, optimiser les coûts de gestion de l'infrastructure et participer à la définition de la voiture du futur.

Par ailleurs, au début de l'année 2017, l'opérateur de téléphonie mobile Orange, l'équipementier Ericsson et le groupe PSA ont signé un accord de partenariat³¹, dans le cadre de l'initiative "Towards 5G", pour réaliser des expérimentations techniques autour de la 5G. L'objectif de ce rapprochement consiste à tester les différentes évolutions technologiques de la 4G vers la 5G afin de répondre aux besoins du véhicule connecté, notamment en termes de système de transport intelligent (STI), pour une conduite plus sûre et de nouveaux services embarqués.

Enfin, le troisième domaine concerne l'émergence des véhicules autonomes. De nombreux travaux sont en cours sur le sujet. Il s'agit avant tout, pour le véhicule, d'être doté d'algorithmes lui permettant de prendre des décisions rapidement en fonction de son environnement. Un grand nombre de capteurs locaux est ainsi nécessaire, afin de lui permettre d'avoir une vision de ce qui l'entoure. Sans préjuger des technologies qui seront, in fine, utilisées pour cela, le véhicule pourra également, tout comme un conducteur humain (cf le deuxième domaine, ci-dessus), bénéficier d'une connexion entre véhicules ou avec une infrastructure afin d'avoir accès aux informations mentionnées plus haut.

³⁰ <http://www.scoop.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=sommaire>

³¹ <http://www.orange.com/fr/Press-Room/communiqués-2017/Ericsson-Orange-et-le-groupe-PSA-partenaires-pour-la-voiture-connectee-en-5G>

3.1.2 Numérisation de l'industrie

La compétitivité ne passe pas uniquement par l'innovation et l'évolution des produits, mais aussi par la modernisation des entreprises et de leurs moyens de production. Ainsi, selon certaines études menées en 2015³², le passage au numérique en Europe permettrait aux entreprises d'augmenter leurs recettes de plus de 110 milliards d'euros par an sur une période de 5 années.

De très nombreux pays se sont d'ailleurs dotés d'une stratégie de modernisation de leur industrie (industrie du futur en France³³, industrie 4.0 en Allemagne...) dont une partie passera par la numérisation des procédés et des échanges. La Commission européenne elle-même a lancé en 2016 des mesures pour renforcer la compétitivité en Europe, pour lesquelles la 5G pourrait jouer un rôle important. Elle a par exemple alloué 500 millions d'euros au programme de recherche Horizon-2020³⁴.

L'apparition de nouvelles technologies (comme la 4G, la fibre et bientôt la 5G) comme de nouveaux services (Internet des objets, *cloud*, *big data*) devraient faciliter le passage au numérique des entreprises. En particulier, la 5G qui s'annonce comme une technologie très versatile, capable de satisfaire un très grand nombre d'usages, pourra participer à de nombreux aspects de la numérisation des entreprises.

3.2 L'harmonisation du spectre

La 5G se présente comme une technologie qui utilisera à la fois des fréquences basses ($f < 1$ GHz), des fréquences hautes ($1 \text{ GHz} < f < 6 \text{ GHz}$) et, pour la première fois dans des réseaux grand public, des fréquences très hautes, dites « millimétriques » ($f > 6 \text{ GHz}$).

Cette diversité spectrale est liée aux promesses de la 5G : couverture étendue (fréquences basses), ultra haut débit (très larges canalisations en bandes très hautes), faible consommation énergétique. En outre, les services satellitaires pourront également participer au développement de cette nouvelle technologie, notamment dans les zones les plus difficilement couvertes ou pour amener un complément de débit (*backhaul*). A cet égard, le monde satellitaire s'intéresse à la 5G et souhaite être impliqué dans la définition de cette génération.

3.2.1 Bandes millimétriques

Les bandes dites « millimétriques », c'est-à-dire des fréquences supérieures à 6 GHz, sont essentielles pour que la 5G puisse marquer une rupture avec la 4G, pour les raisons évoquées en 1.5.1.

Lors de la dernière Conférence mondiale des radiocommunications (CMR-15 à Genève), conférence sous l'égide de l'UIT dont l'objectif est de faire évoluer la répartition des fréquences entre utilisateurs, les différentes discussions sur la définition des futures bandes mobiles ont permis de focaliser les études de la 5G, pour les fréquences millimétriques, sur un certain nombre de bandes situées entre 24 GHz et 86 GHz (33,25 GHz identifiés au total) : 24,25 - 27,5 GHz, 31,8 - 33,4 GHz, 37 - 43,5 GHz, 45,5 - 50,2 GHz, 50,4 - 52,6 GHz, 66 - 76 GHz, 81 - 86 GHz.

³² PwC, «Industry 4.0: Opportunities and challenges of the industrial internet» (2015), et Boston Consulting Group, «Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries» (2015).

³³ http://www.economie.gouv.fr/files/files/PDF/industrie-du-futur_dp.pdf

³⁴ <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>

Il est important de souligner que, même si les bandes susmentionnées ont été identifiées comme « bandes 5G », rien n’indique encore, à ce stade, si elles pourront vraiment être utilisées pour le déploiement de cette dernière génération ; seuls les résultats des études techniques pourront permettre d’établir les contraintes et les règles à respecter ainsi que de valider la faisabilité de ces hypothèses.

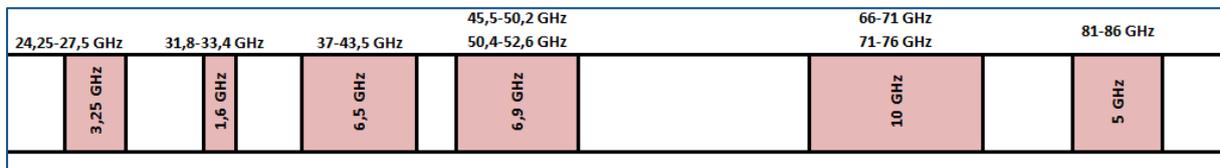


Figure 15. Bandes millimétriques identifiées lors de la CMR-15

Contrairement aux conclusions de la Conférence, qui reflètent les recommandations européennes, les Etats-Unis et d’autres pays Asiatiques (Corée, Japon) ont décidé de lancer des expérimentations 5G en bande 28 GHz et les équipementiers, comme par exemple Qualcomm ou Samsung, ont commencé à fabriquer des produits en bande 28 GHz.

L’Europe, de son côté a décidé, suite à la publication d’un avis du RSPG (*Radio Spectrum Policy Group*, groupe européen de politique spectral dans lequel la France est représentée par l’ANFR)³⁵, de réaliser en priorité des études sur la bande 26 GHz (bande pionnière), puis sur les bandes 32 GHz et 42 GHz. Dans un second temps, les études pour l’introduction de la 5G dans toutes les autres bandes identifiées par la CMR-15 seront menées.

Le choix rapide de la bande 26 GHz comme bande pionnière a été effectué pour permettre des économies d’échelle dans la production d’équipements, puisqu’il est très vraisemblable que des équipements bi-mode, fonctionnant aussi bien en bande 26 GHz que 28 GHz seront disponibles dès les premiers déploiements³⁶.

En France, la bande 26 GHz est d’ores et déjà utilisée pour une variété d’applications : faisceaux hertziens des opérateurs de téléphonie mobile (liaisons d’infrastructure des réseaux 4G), systèmes du service fixe par satellite et stations terrestres de réception de services spatiaux. Des études devront donc être réalisées pour la prise en compte de ces services et définir la cohabitation ou la migration des usages dans d’autres bandes millimétriques.

3.2.2 Les bandes en dessous de 6 GHz

a) La bande 3,4-3,8 GHz

La 5G ne pourra pas être véhiculée complètement par les bandes millimétriques : les qualités de propagation de ces bandes rendent délicate une couverture étendue, notamment dans les zones les moins densément peuplées du territoire. En outre la maturité technologique relative à l’utilisation de ces bandes pour des communications grand public reste encore très faible. Il convient donc d’identifier une bande « cœur », inférieure à 6 GHz et proposant des canalisations suffisamment larges pour que les futurs opérateurs 5G puissent fournir des services innovants et une qualité de service en progression par rapport à la 4G.

La bande 3400 - 3800 MHz semble être un bon candidat pour répondre à ce besoin.

³⁵ http://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/RPSG16-032-Opinion_5G.pdf

³⁶ Le *tuning range* ou plage d’accord est ici primordial : un système capable de régler sa fréquence de 26 à 28 GHz semble tout à fait réalisable technologiquement, dans le calendrier des premiers déploiements 5G millimétriques. Cela aurait été moins vrai s’il avait fallu commuter entre 28 et 32 GHz.

Tout d'abord, elle fait déjà l'objet d'une harmonisation pour le très haut débit mobile au sein de l'Union européenne. Dans un premier temps la bande 3400 - 3600 MHz puis la bande 3600 - 3800 MHz ont été identifiées comme des bandes dites « IMT » (pour le mobile haut débit). Ensuite, elle dispose d'une grande quantité de spectre disponible (jusqu'à 400 MHz). Enfin, les avancées technologiques (traitement d'antenne et de signal) permettent d'envisager l'utilisation de ces fréquences pour l'établissement de macro cellules, et pas simplement microcellules. A titre d'illustration, il ressort des entrevues menées par l'Arcep que la couverture avec cette bande pourrait être similaire à celle de la bande 2.6 GHz, bande cœur de la 4G.

Cette analyse a été confirmée par la Commission européenne (dans son mandat 5G au RSCOM³⁷) et le RSPG³⁸ qui considèrent la bande 3,4 - 3,8 GHz comme la seule bande 5G crédible pour un déploiement avant la fin 2020.

En France, la bande est affectée à l'Arcep, à titre prioritaire, pour les fréquences 3400 - 3600 MHz (le ministère de l'Intérieur et le ministère de la Défense sont affectataires à titre non-prioritaire), et à titre exclusif pour les fréquences 3600 - 3800 MHz. Elle est utilisée pour des usages de type boucle locale radio ou satellitaires.

Une consultation publique, portant notamment sur cette bande, vient de s'achever et l'Arcep étudie actuellement les contributions des acteurs.

La compatibilité des futurs usages avec les usages actuels a été étudiée au sein de la Commission Consultative de la Compatibilité Electromagnétique présidée par l'Agence nationale des fréquences, commission à laquelle l'Arcep a pris part : des zones d'exclusions, protégeant certains sites liés aux utilisations satellitaires pérennes seront à prévoir. Il conviendra également de protéger les systèmes militaires de radiolocalisation fonctionnant en deçà de 3,4 GHz.

b) Les autres bandes en dessous de 6 GHz

Les bandes aujourd'hui utilisées pour la 2G, la 3G et la 4G pourraient être à l'avenir utilisées pour des déploiements 5G.

Pour autant, le *refarming* des bandes 2G, 3G et 4G pourrait s'avérer délicat, du fait du mode de duplexage utilisé par ces dernières. En effet, la plupart des communications mobiles en Europe utilisent le mode FDD - *Frequency Division Duplexing*³⁹ pour échanger les informations. Les discussions techniques autour de la 5G annoncent cependant le mode TDD - *Time Division Duplexing*⁴⁰ comme mode de duplexage privilégié (sinon unique) pour cette nouvelle génération, notamment parce qu'il permet d'adapter la bande passante utilisée au débit et parce qu'il est particulièrement efficace lorsque le *beamforming* est utilisé.

L'utilisation, pour des réseaux 5G, des bandes mobiles déjà harmonisées nécessitera donc des études techniques approfondies pour définir les conditions d'utilisation et de partage avec les services en place. A cet égard, l'ECC - *Electronic Communications Committee*⁴¹ a décidé d'évaluer le potentiel de certaines bandes déjà harmonisées, notamment la bande 700 MHz et la bande L (1427-1492 MHz).

³⁷https://circabc.europa.eu/sd/a/448dc765-51de-4fc8-b6e0-56ed6a1d0bca/RSCOM16-40rev3%205G%20draft_mandate_C EPT.pdf

³⁸http://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/RPSG16-032-Opinion_5G.pdf

³⁹ Technique consistante à émettre et recevoir des données simultanément, mais sur deux bandes de fréquence différentes

⁴⁰ Technique consistante à émettre et recevoir des données dans la même bande de fréquences mais à des instants différents

⁴¹ Organe européen qui précise les conditions techniques pour l'utilisation des bandes de fréquences, fixées ensuite par des décisions de la Commission européenne.

En France, la bande 700 MHz a été attribuée par l'Arcep aux opérateurs de téléphonie mobile à la fin de l'année 2015. Même si les quatre opérateurs ont obtenu des blocs de fréquences dans cette bande, seul Free Mobile, qui ne possède pas de blocs en bande 800 MHz, a décidé de commencer son déploiement dans la bande, selon la technologie LTE (4G).

La bande L (1427 - 1518 MHz), qui a été définie pour une utilisation exclusivement en mode SDL - *Supplemental DownLink*, pourrait être envisagée pour répondre à la demande constante de débit et à l'augmentation du trafic écoulé par la voie descendante par rapport à la voie montante. En France, la bande est utilisée par des faisceaux hertziens autorisés par l'Arcep, par le ministère de la Défense pour le service mobile (sauf aéronautique) et par le ministère de l'Intérieur. Son utilisation pour la 4G ou la 5G supposerait donc une migration de ces usages vers d'autres bandes.

3.3 Des cellules de plus en plus petites

Le déploiement des réseaux mobiles actuels est essentiellement basé sur l'utilisation de stations de base dites « macro » ; des sites dotés d'antennes de forte puissance sont installés pour garantir la couverture d'une zone relativement large, avec une qualité de service suffisante. L'architecture du réseau est en constante évolution : de nouvelles stations radioélectriques sont régulièrement installées afin d'augmenter la capacité des réseaux en vue de mieux répondre aux préoccupations des utilisateurs, en ce qui concerne la couverture *indoor* et *outdoor* ainsi que la qualité de service.

Néanmoins, l'augmentation continue des demandes capacitaires impose aux opérateurs, déjà aujourd'hui, de densifier leurs réseaux avec des cellules toujours plus petites.

La 5G, qui verra encore probablement une forte augmentation des volumes de données échangés, et qui utilisera des bandes millimétriques, aux faibles capacités de propagation, nécessitera probablement la généralisation de la mise en place d'émetteurs radioélectriques de faible puissance (*small-cells*).

Des estimations évoquent, pour satisfaire la demande et permettre l'introduction de la 5G, un nombre d'au moins 10 *small-cells* par site macro en milieu urbain⁴², milieu dans lequel les cellules sont déjà relativement resserrées pour faire face à la densité des usages.

A cet égard, les acteurs rencontrés ont soulevé plusieurs questions qui vont probablement se poser en lien avec la généralisation de telles petites cellules.

3.3.1 Taxation

Le cadre réglementaire actuel dispose que les stations radioélectriques, dont la puissance impose un avis, un accord ou une déclaration à l'Agence nationale des fréquences (ANFR), sont soumises à l'imposition forfaitaire sur les entreprises de réseaux (IFER). Le montant de l'imposition varie selon la puissance, le type d'installation et la zone de déploiement. Dans le cadre d'un déploiement en zone urbaine l'imposition est de 1607 €/an/site pour une station avec une puissance d'émission (PIRE) supérieure à 5W (un accord COMSIS de l'ANFR est requis pour pouvoir émettre) et de 160,7 €/an/site pour une puissance comprise entre 1W et 5W (une déclaration à l'ANFR est requise pour pouvoir émettre).

Les *small-cells* 5G utiliseront vraisemblablement des puissances variables comprises entre 1W et 25 W. Etant données les prévisions sur la densité de déploiement, et donc le nombre de petites

⁴²http://www.lemag-numerique.com/wp-content/uploads/2015/10/WP_-Souverainete_Telecoms_PetitesCellules_FINAL.pdf

cellules à installer, certains acteurs rencontrés par l'Arcep ont soulevé la question de l'adaptation éventuelle de cette taxe en vue de permettre des déploiements massifs de petites cellules sans générer une trop forte augmentation du montant total de cette taxe.

Ce mouvement est d'ores et déjà en marche, notamment en vue de diminuer la fiscalité des stations radioélectriques dans les lieux les plus difficilement couverts : la loi n° 2016-1888 du 28 décembre 2016 de modernisation, de développement et de protection des territoires de montagne exonère ainsi les stations de téléphonie mobile construites, entre le 1er janvier 2017 et le 31 décembre 2020, dans les zones de montagne, de la taxe IFER.

3.3.2 Accès aux points hauts et « semi-hauts ».

Pour qu'un déploiement puisse avoir lieu les opérateurs de téléphonie mobile ont traditionnellement besoin d'installer leurs sites sur des « points hauts » (pylônes, toit-terrasses, etc...). Ce besoin restera avéré pour les réseaux 5G, mais sera encore plus sensible pour deux raisons principales :

1. Les antennes 5G seront probablement beaucoup plus volumineuses (de l'ordre du m² pour certaines) que les antennes actuelles 2G, 3G ou 4G, du fait des traitements *massive* MIMO susmentionnés, qui nécessiteront l'utilisation de très nombreux éléments rayonnants. En outre, il sera probablement nécessaire de déployer des antennes supplémentaires, à même d'utiliser les nouvelles bandes 5G. La réutilisation des mats actuels risque donc de s'avérer problématique et il conviendra de trouver de nouveaux sites (éventuellement colocalisés).
2. Cette recherche de nouveaux sites devra également être menée pour l'implantation de petites cellules sur des points « semi-hauts », mais avec une attention d'autant plus forte que la densité de ces sites devra être élevée : les opérateurs devront dès lors déployer leurs équipements sur des infrastructures urbaines comme les abribus, les éclairages ou les bâtiments publics, les panneaux publicitaires, etc...

Les pouvoirs publics devront donc suivre avec attention le sujet afin d'adopter, si cela s'avérait nécessaire, des mesures qui pourraient faciliter le déploiement de la 5G.

3.3.3 Connexion des territoires et collecte des réseaux 5G

La question de la connectivité des territoires sera un des enjeux de cette nouvelle génération de réseaux mobiles. Les enjeux de couverture devront en effet être appréhendés en relation avec la diversité des usages envisagés pour les futurs réseaux 5G, dont on ne connaît pas précisément, à ce stade, la répartition géographique.

Les bandes de fréquences plus élevées qui sont pressenties pour être utilisées pour les futurs réseaux 5G, ainsi que les bandes passantes potentiellement très importantes, mobilisées par les nouveaux usages, posent la question de l'empreinte géographique de ces réseaux. En effet, jamais les réseaux mobiles n'ont eu recours à des fréquences aussi hautes, dont l'utilisation implique la multiplication des antennes-relais.

En outre, le raccordement au réseau des sites 5G posera la question du coût de leur raccordement en fibre optique, dans la mesure où celle-ci sera vraisemblablement nécessaire dans la majorité des cas pour assurer la qualité de service attendue. L'industrie devra imaginer les technologies qui permettront de minimiser les coûts de déploiement de la 5G en zones rurales.

3.4 Enjeux de la neutralité de l'internet

Le règlement européen sur l'internet ouvert⁴³, adopté par le Parlement européen et le Conseil de l'UE le 25 novembre 2015 et dont il a fallu aux régulateurs européens neuf mois supplémentaires pour préciser les règles de mise en application, introduit le principe de neutralité de l'internet à un niveau élevé dans la hiérarchie des normes.

La neutralité de l'internet est un principe général garantissant l'égalité de traitement de tous les flux de données sur internet. Il exclut en particulier toute forme de discrimination à l'égard de la source, de la destination ou du contenu des flux de données.

Le 30 août 2016, l'ORECE (organisme regroupant les régulateurs européens des communications électroniques) a publié des lignes directrices destinées à guider les régulateurs nationaux dans l'application du règlement européen sur l'accès à un internet ouvert⁴⁴.

Lors de la consultation publique de l'ORECE⁴⁵ sur son projet de lignes directrices sur la neutralité de l'Internet, plusieurs entreprises et plusieurs acteurs du secteur des communications électroniques ont à cette occasion émis un point de vue tranché, au travers du « *5G manifesto for timely deployment of 5G in Europe* »⁴⁶. Ce manifeste se veut une mise en garde des pouvoirs publics européens contre une approche trop restrictive de la gestion du trafic et, en particulier, sur les effets supposés négatifs qu'une application trop poussée de la neutralité de l'internet pourrait, selon eux, avoir sur le calendrier des déploiements 5G.

L'avis de l'ORECE⁴⁷, réagissant aux contributions reçues lors de la consultation publique sur son projet de lignes directrices précitées, rappelle que les règles de neutralité de l'internet sont neutres technologiquement et s'appliquent en conséquence aux réseaux 5G. En outre, il est précisé dans les lignes directrices de l'ORECE que le « *network slicing* », auquel les réseaux devront avoir recours pour répondre aux différents cas d'usage (mMTC, eMBB, uRLLC) prévus par cette nouvelle génération (cf. 1.4), peut être utilisé pour la fourniture de services spécialisés⁴⁸.

Le sujet de la neutralité de l'internet appliquée aux futurs réseaux 5G est encore très ouvert et inexploré, de nouvelles analyses pourront être menées en parallèle aux travaux de définition de la 5G. L'Arcep est ouverte aux échanges constructifs et travaillera également, au sein de l'ORECE, pour donner toute la visibilité nécessaire aux acteurs.

⁴³ Règlement (UE) 2015/2120 : <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R2120&from=EN>

⁴⁴ Les fournisseurs d'accès à internet peuvent mettre en œuvre des mesures de gestion de trafic raisonnable pour certaines catégories de trafic, dans des conditions non-discriminatoires et pour autant qu'elles soient transparentes, proportionnées et se justifient par des exigences techniques objectives – et non dans l'optique de privilégier leurs intérêts commerciaux. Les fournisseurs d'accès à internet peuvent également distinguer certains services particuliers appelés services spécialisés, qui sont distincts de l'accès à internet sans pour autant impacter la disponibilité de celui-ci, à la condition là encore que ces services présentent des exigences objectives spécifiques en matière de qualité d'acheminement.

⁴⁵ <http://www.berec.europa.eu/>

⁴⁶ <http://telecoms.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2016/07/5GManifestofortimelydeploymentof5GinEurope.pdf>

⁴⁷ http://berec.europa.eu/eng/document_register/subject_matter/berec/download/0/6161-berec-report-on-the-outcome-of-the-publi_0.pdf

⁴⁸ http://berec.europa.eu/eng/document_register/subject_matter/berec/download/0/6160-berec-guidelines-on-the-implementation-b_0.pdf - note de bas de page n° 26.

Annexes

Annexe 1 Travaux de définition et normalisation

Une nouvelle génération de téléphonie mobile est définie principalement par deux acteurs : l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) et le 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Ces deux organismes, respectivement public et privé, s'attèlent à définir les objectifs, les normes et les spécifications techniques de la nouvelle technologie en question.

UIT

Les premiers déploiements commerciaux à grande échelle de la 5G sont attendus pour 2020. La phase exploratoire permettant de déterminer les exigences et identifier les techniques et technologies les plus prometteuses de ces futurs réseaux 5G a déjà commencé, comme il a été évoqué précédemment. Bien que de nombreux organismes ou consortiums soient impliqués dans la définition de la 5G, le 3GPP sera très probablement l'organisme central de standardisation des spécifications techniques.

Quoiqu'il en soit l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) est indispensable pour définir au niveau mondial l'ensemble des technologies et des normes qui régissent toute nouvelle génération mobile, sous la nomenclature IMT (*International Mobile Telecommunications*).

Ces normes IMT sont mises en place en impliquant pouvoirs publics et acteurs de l'industrie et ont encadré l'évolution des services de communications mobiles à travers le monde, depuis les débuts de la normalisation IMT, avec l'IMT-2000 (3G, UMTS), puis l'IMT-Advanced (4G, LTE-A) et plus récemment l'IMT-2020 (5G).

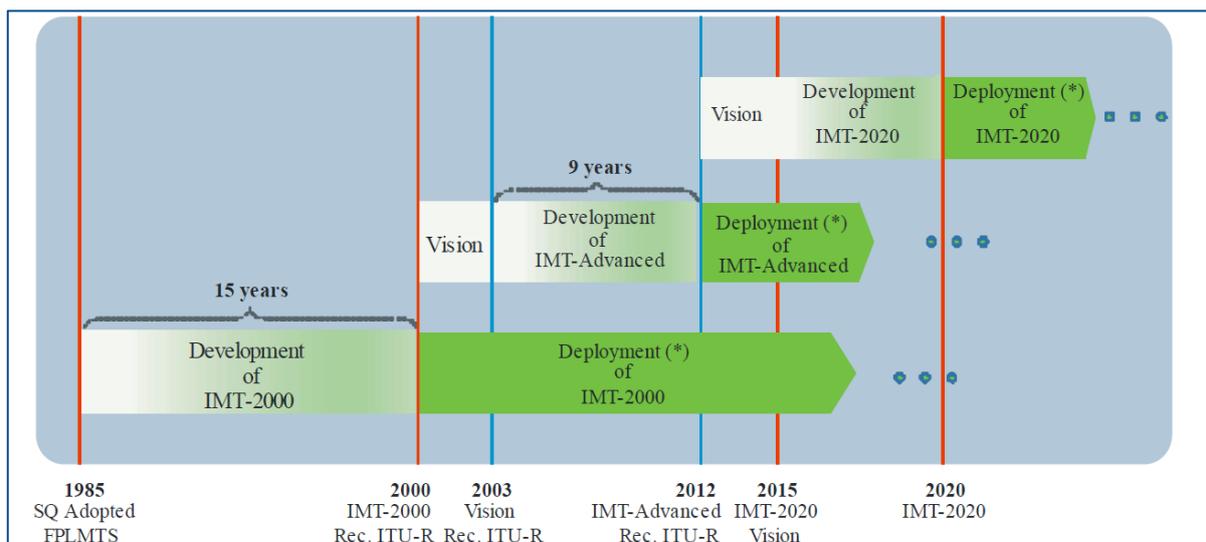


Figure 16. Aperçu de la *timeline* des développements et déploiements IMT⁴⁹

L'avènement d'une norme IMT se fait en général selon trois grandes phases : une phase vision, une phase développement et une phase déploiement.

La phase vision dont la fin est marquée par un document généralement nommé recommandation « vision » est la phase pendant laquelle l'UIT fixe le cadre et les objectifs de la future technologie. Ce document a généralement pour but de définir de façon plus ou moins concrète ce que sera la nouvelle technologie en question, quelles seront ses caractéristiques, les usages qu'elle permettra de

⁴⁹Recommandation ITU-R M.2083-0 (09/2015), https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf

couvrir, etc... Que ce soit pour l'IMT-Advanced, sigle technique communément attribué à la définition de la 4G, ou pour l'IMT-2020, sigle attribué à la définition de la 5G, la phase vision a duré environ 3 ans.

En septembre 2015, la recommandation IUT-R M.2083-0 a été publiée, clôturant trois ans de travaux effectués par l'UIT-R (précisément le *study group* WP 5D) afin de définir le cadre et les objectifs de l'IMT pour 2020 et au-delà. C'est ce document qui sert aujourd'hui de base aux différents travaux de recherches ou de normalisation de la 5G à l'échelle mondiale.

Ensuite vient la phase de développement des standards sur la base des conclusions de la phase vision. En ce qui concerne l'IMT-2020, ces travaux de développement et normalisation ont déjà commencé et l'UIT prévoit de les achever au cours de l'année 2020, de façon à répondre aux besoins pressants des différents membres et organisations de l'UIT qui souhaitent déployer la 5G au plus tôt. Ceci constitue d'autant plus un défi que les développements ne devront durer que 5 ans, comparés aux 15 ans pour l'IMT-2000 et 9 ans pour l'IMT-Advanced.

Les différentes échéances relatives à la mise en place de l'IMT-2020 au niveau de l'UIT sont présentées dans la Figure 17. Les phases d'identifications de spectre (figurées par des triangles noirs) sont liées aux conférences mondiales dont la dernière était la CMR-2015 et la prochaine CMR-2019 (voir 3.2).

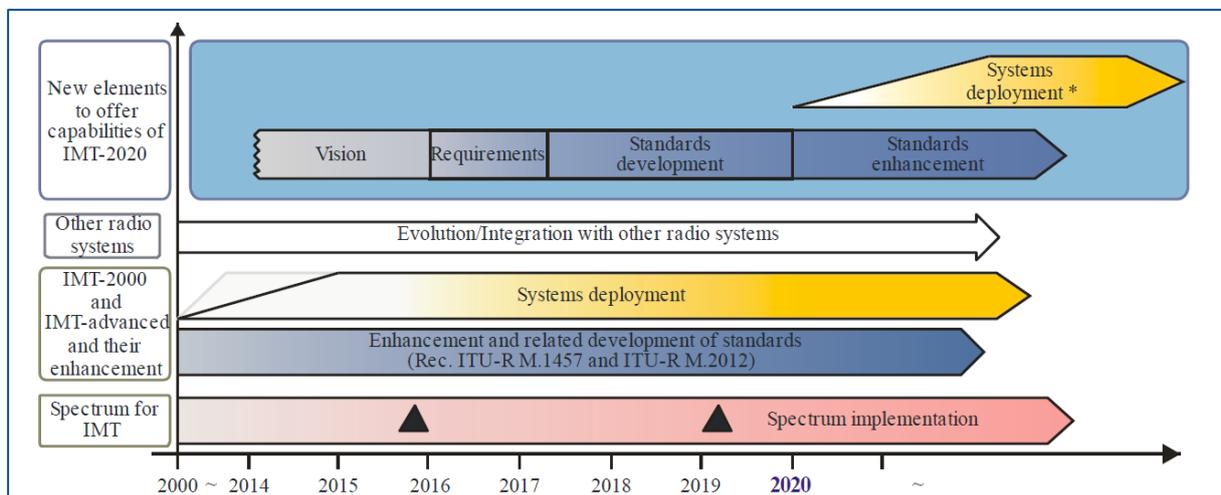


Figure 17. Phases et échéances attendues pour l'IMT-2020⁵⁰

L'ensemble des travaux menés par l'UIT, liés à l'IMT-2020, se déroule selon le calendrier d'étapes décrit en Figure 18, où figurent, en vert, les étapes déjà accomplies et, en bleu, celles à venir. Les travaux en cours aujourd'hui sont ceux traitant des aspects fréquentiels, des prérequis et des critères d'évaluation de la 5G, ainsi que différentes études et propositions techniques, prérequis de la phase normative des travaux.

⁵⁰Recommandation ITU-R M.2083-0 (09/2015), https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!!PDF-E.pdf

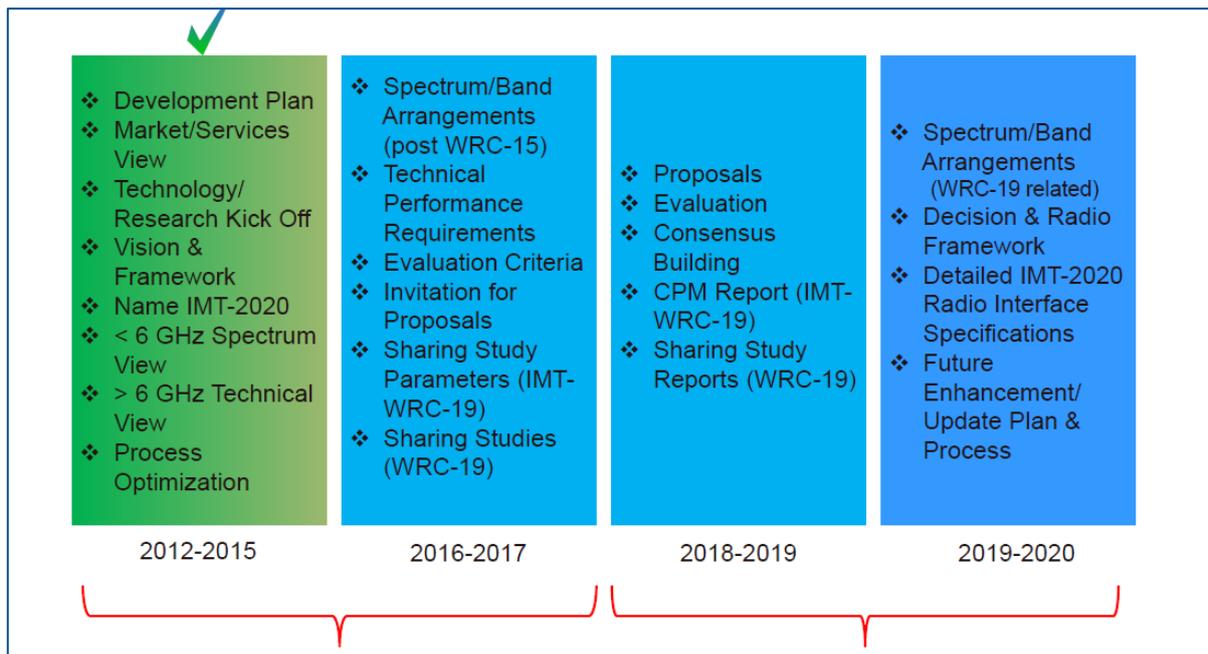


Figure 18. Travaux en cours au WP 5D⁵¹

3GPP

Se basant sur les recommandations de l'UIT, le 3GPP a joué un rôle important dans le succès du LTE ces dernières années, qui s'avère être la technologie cellulaire à la plus rapide croissance : jamais auparavant une nouvelle norme radio n'avait été adoptée et déployée aussi rapidement et largement dès la finalisation de la première version de sa standardisation (pour le LTE la *release 8*, datant de décembre 2008).

Sous le sigle LTE, pour la première fois, l'ensemble de l'industrie mobile s'est accordé sur une unique nouvelle technologie (contrairement au cas de la 3G où ont cohabité 3GPP et 3GPP2, défendant chacun leur version de normalisation 3G répondant aux critères IMT-2000), permettant ainsi des économies d'échelles et un dynamisme de l'écosystème sans précédents.

Après la *release 8*, les travaux du 3GPP se sont concentrés sur les sujets spécifiques suivants :

- Améliorer les standards radios LTE pour davantage de capacité et de performance ;
- Améliorer les standards afin de rendre les technologies LTE et EPC (*Evolved Packet Core*, la technologie cœur de réseau du LTE) disponibles pour de nouveaux marchés ;
- Introduire des améliorations pour plus de robustesse, afin notamment de mieux gérer la croissance exponentielle du trafic liée aux smartphones.

Ces points de focalisation ont permis de tracer les grandes lignes de l'évolution du LTE vers le LTE-Advanced (*releases 10 à 12*) puis LTE-Advanced Pro (*releases 13 et 14*) en attendant la 5G.

Le caractère ambitieux des exigences de la 5G, le calendrier serré « imposé » par le marché, ainsi que les différentes velléités nationales ont poussé le 3GPP à définir deux phases de travaux de spécifications :

1. Une première phase qui se terminera au deuxième semestre 2018, avec la fin de la *release 15*, et qui traitera des sujets les plus urgents pour les besoins commerciaux ;

⁵¹ <https://www.itu.int/en/membership/Documents/missions/GVA-mission-briefing-5G-28Sept2016.pdf>

2. Une deuxième phase qui se terminera en décembre 2019, période prévue de la fin de la *release 16*, qui traitera des autres cas d'usages et prérequis identifiés dans la recommandation vision IMT-2020.

La *release 15*, premier ensemble de spécifications 5G a vu son plan de travail agréé lors de la plénière TSG#72 (*Technical Specification Group #72*) des groupes de travail du 3GPP de juin 2016. Ce plan inclut un ensemble de tâches intermédiaires et de points de contrôle pour guider les études courantes dans les différents groupes. Ce plan de travail présente notamment la transition des études en cours vers la phase normative des travaux :

- Dès décembre 2016 : début des travaux normatifs au TSG SA2 (*Technical Specification Group System Architecture*) dont le rôle est de définir l'architecture d'ensemble ;
- A partir de mars 2017 : début de la spécification de la nouvelle interface radio 5G (« NR », *New Radio*) dans les TSG RAN (*Technical Specification Group Radio Access Network*).

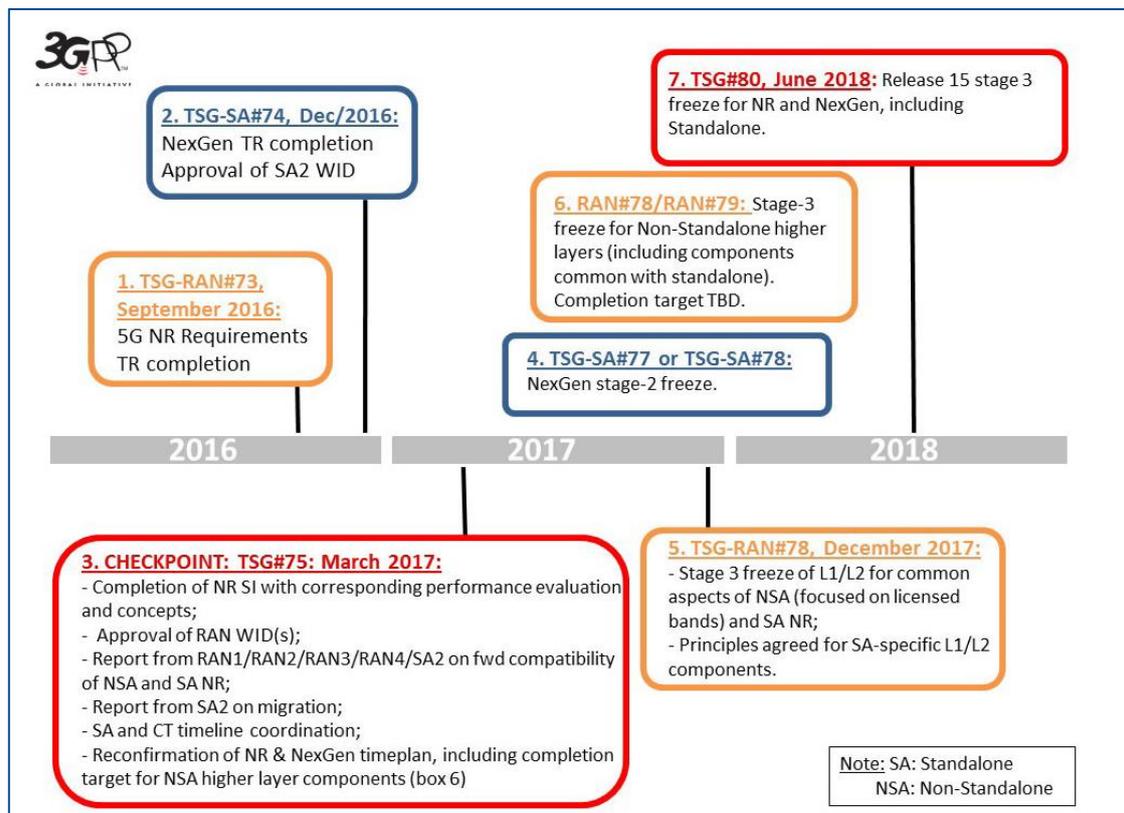


Figure 19. Points d'étapes des groupes de spécifications au 3GPP⁵²

⁵² https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/11/01_10-Nov_Session-3_Dino-Flore.pdf

Si la 5G est perçue comme étant la technologie qui permettra de transformer la société, voire de mener à la prochaine révolution industrielle en impactant de multiples secteurs (les verticaux) avec de nouveaux *business models* et pour le bénéfice de l'économie (notamment en Europe), il est fort probable qu'elle sera néanmoins poussée en avant, dans un premier temps, par l'eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*, cf. 1.2).

Fort de ce constat, le 3GPP a défini le cadre des spécifications de la *release* 15, phase 1 de la standardisation 5G comme explicité précédemment, dont les travaux porteront sur les sujets suivants :

- La définition de la nouvelle interface radio « NR » : à ce titre une version « *standalone* » (autonome) a été définie, fonctionnant indépendamment de la technologie LTE, et une version « *non-standalone* » (non autonome) avec une très forte interopérabilité avec la LTE⁵³.
- Les usages cibles seront centrés dans un premier temps sur l'eMBB ainsi que sur certaines technologies permettant une faible latence et une grande fiabilité pour permettre une partie des cas d'usage uRLCC (*Ultra-reliable and Low Latency Communications*, cf. 1.2).
- L'étude simultanée de plages de fréquences inférieures à 6 GHz et celles au-dessus de 6 GHz.

La *release* 16, deuxième phase des spécifications de la 5G, serait ensuite plus axée sur les autres segments tels que le mMTC (*Massive Machine Type Communications*, cf. 1.2), afin de traiter par exemple des cas d'usages IoT nécessitant une meilleure qualité de service que ce que les LPWAN (*Low-Power Wide-Area Network*)⁵⁴ peuvent proposer.

⁵³ En version *non-standalone*, le plan de contrôle de NR est celui du LTE. En d'autres termes, le réseau 4G contrôle les porteuses 5G et répartit les utilisateurs entre les différentes bandes et technologies.

⁵⁴ LPWAN type Sigfox et LoRa

Annexe 2 Entités rencontrées



Annexe 3 Liste des figures

Figure 1. La 5G moteur du changement industriel et sociétal.....	4
Figure 2. Performances requises pour les secteurs verticaux.....	6
Figure 3. Ce qui est fait aujourd’hui en une minute sur internet.....	7
Figure 4. Calendrier de la 5G au 3GPP.....	9
Figure 5. Catégories d’usages de la 5G.....	10
Figure 6. Comparaisons entre 4G et de la 5G au niveau des huit indicateurs de performance	12
Figure 7. Représentation des indicateurs de performance « débit moyen perçu par l’utilisateur » pour 4G et 5G et « Débit crête par utilisateur » pour la 3G, 4G et 5G	13
Figure 8. Indicateurs clés de performance pour les trois catégories d’usage de la 5G.....	14
Figure 9. Exemple d’utilisation d’une antenne à formation de faisceau utilisée pour connecter des points d’accès Wi-Fi.....	16
Figure 10. Illustration du <i>full-duplex</i> , comparé au FDD et TDD.....	16
Figure 11. Illustration de multiplexage <i>power domain</i> NOMA	17
Figure 12. Centralisation du plan de contrôle dans un <i>software defined network</i>	18
Figure 13. Illustration d’une architecture réseau <i>CloudRAN</i>	19
Figure 14. Phasage des projets 5G PPP comparés à ceux du 3GPP et de l’UIT	22
Figure 15. Bandes millimétriques identifiées lors de la CMR-15	30
Figure 16. Aperçu de la <i>timeline</i> des développements et déploiements IMT	37
Figure 17. Phases et échéances attendues pour l’IMT-2020	38
Figure 18. Travaux en cours au WP 5D.....	39
Figure 19. Points d’étapes des groupes de spécifications au 3GPP	40