



Effets environnementaux de la 5G (partie 1)

La technologie 5G

Philippe Ciblat¹, Jacques Combaz², Marceau Coupechoux³, Kevin Marquet⁴ et Anne-Cécile Orgerie⁵

Cet article a pour objectif de rassembler les connaissances actuelles liées aux effets environnementaux de la 5G. Il s'articule autour de questions liées à ces effets. Pour cela, il est organisé en trois parties. La première présentée ici donne les bases nécessaires à la compréhension de la technologie elle-même. La deuxième détaillera les services rendus possibles par la 5G. La dernière se penchera enfin sur les effets environnementaux du déploiement de la 5G. Les parties 2 et 3 seront publiées dans les prochains numéros du bulletin.

1. LTCI, Telecom Paris, IP Paris, EcoInfo.

2. Université de Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, VERIMAG, EcoInfo.

3. LTCI, Telecom Paris, IP Paris, LINCS, EcoInfo.

4. Université de Lyon, INSA Lyon, Inria, CITI, EcoInfo.

5. Université de Rennes, Inria, CNRS, IRISA, Rennes, EcoInfo.

La technologie 5G

Qu'est-ce que la 5G, en deux mots ?

La 5G est la 5^e génération de téléphonie mobile. Son déploiement est en cours en France depuis fin 2020 suite à l'attribution des fréquences dans la bande 3,5 GHz par l'ARCEP⁶ en novembre 2020. Les premiers déploiements avaient déjà eu lieu dans plusieurs pays comme les États-Unis ou la Corée du Sud auparavant.

Les exigences de performance d'un réseau cellulaire 5G ont été définies par la recommandation IMT-2020 de l'Union internationale des télécommunications (ITU en anglais) [26]. Ce document comporte deux exigences sur l'efficacité énergétique des interfaces 5G :

- (1) rendre les transmissions de données efficaces en énergie lors des périodes où il y a des données à transmettre et
- (2) intégrer un mode basse consommation (ou veille) lorsqu'il n'y a pas de données à transmettre.

C'est la première fois que l'ITU spécifie ce type de critère énergétique dans ses recommandations sur les prochaines générations de réseaux mobiles. La recommandation IMT-Advanced qui définissait les exigences de la 4G se concentrait sur des critères plus classiques comme la latence, l'efficacité spectrale ou la mobilité, les modes veille n'ont été définis pour la 4G que plus tard avec les évolutions du standard. Les technologies capables de satisfaire les exigences de performances de l'ITU sont reconnues comme des technologies 5G après soumission d'un dossier par des organismes de normalisation. La recommandation de l'ITU ressemble donc à un cahier des charges.

La principale technologie 5G pouvant répondre à ces exigences est celle standardisée par le *Third Generation Partnership Project* (3GPP), un organisme international de normalisation regroupant plusieurs organismes nationaux ou continentaux. Comme son nom l'indique, le 3GPP normalise les technologies cellulaires depuis la 3G et a intégré par la suite la normalisation de la 2G. Pour la 5G, le 3GPP utilise le terme de *New Radio* (NR), une technologie qui succède à *Long Term Evolution* (LTE), le standard 4G, à l'*Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), la 3G, et au *Global System for Mobile communications* (GSM), la 2G. En quelques mots, la 2G offre un service de téléphonie et de transmission de petits messages, elle a évolué ensuite vers la transmission de données à faibles débits (avec GPRS et EDGE). La 3G a augmenté les débits de la transmission de données et a permis l'accès à Internet par le téléphone mobile. La 4G a continué dans cette voie et a coïncidé avec la diffusion des smartphones et de la vidéo. Auparavant, la première génération

6. <https://www.arcep.fr>.

TABLE 1. Évolution des différentes générations de normes de téléphonie mobile en France.

| Génération | Norme | Date de déploiement | Débit théorique en téléchargement |
|------------|---------------|---------------------|-----------------------------------|
| 1G | Radiocom 2000 | 1986 | quelques kbps |
| 2G | GSM | 1992 | quelques dizaines de kbps |
| 2,5G | GPRS | 2001 | quelques dizaines de kbps |
| 2,75G | EDGE | 2004 | quelques centaines de kbps |
| 3G | UMTS | 2004 | quelques dizaines de Mbps |
| 4G | LTE | 2012 | une centaine de Mbps |
| 5G | NR | 2020 | une dizaine de Gbps |

de téléphonie mobile (Radiocom 2000 en France) utilisait une transmission analogique ayant une capacité bien plus faible, elle était réservée à quelques utilisateurs, plutôt à bord des voitures. Cette évolution est résumée dans le tableau 1.

Comme les générations précédentes, la 5G entend augmenter les performances technologiques par rapport à la génération précédente : plus de débits, des délais réduits, une efficacité spectrale plus élevée. C'est ouvrir la voie à de nouveaux services pour le grand public comme la réalité virtuelle. La vraie rupture de la 5G viendrait cependant de sa capacité à répondre aux exigences d'industries aussi différentes que les transports, la santé ou l'énergie. En intégrant dans un même système l'Internet des objets et des communications ultra-fiables et ultra-rapides, elle serait en mesure de révolutionner les processus industriels.

Qui a mis au point la spécification 5G ?

C'est donc le consortium 3GPP, un regroupement d'organismes de normalisation nationaux et continentaux qui spécifie la 5G. Pour l'Europe, c'est l'*European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) qui est membre du 3GPP.

En pratique, le 3GPP est divisé en groupes de travail qui écrivent les spécifications en fonction de leur spécialité (accès radio, réseau cœur, sécurité, services, terminaux, etc.). Dans ces groupes, ce sont les grands industriels du secteur qui sont représentés, notamment les constructeurs d'équipements qui vont devoir intégrer les spécifications dans leurs produits. Des entreprises comme Ericsson, Huawei ou Qualcomm participent très activement à la définition du standard. Parmi les opérateurs français, seul Orange a une activité importante, bien que largement en deçà des acteurs précédemment cités. Les participants aux groupes de travail font des propositions techniques qui sont ensuite intégrées ou non dans le standard. Plus une entreprise est présente (en nombre d'ingénieurs, en contributions), plus elle a d'expertise dans le domaine traité (brevets, recherche et développement), plus elle a d'influence dans la

définition du standard et par conséquent plus elle aura d'avance sur ses concurrents au moment où il faudra développer des produits.

Le monde académique n'est pas présent directement dans ces discussions. Cela demanderait des moyens budgétaires très importants pour suivre toutes les réunions et avoir une chance d'y avoir un poids. Il s'agit aussi d'un travail de consolidation très détaillée des connaissances technologiques à un instant donné qui n'est habituellement pas du ressort de la recherche pratiquée par les universités ou centres de recherche. Indirectement cependant, les spécifications s'appuient sur une littérature scientifique en grande partie produite par les académiques (en collaboration ou non avec les industriels). Les contributions techniques au 3GPP présentées par les industriels peuvent également s'appuyer sur les collaborations avec des académiques. Les recherches qui ont précédé la standardisation, au sein par exemple de projets financés par l'Agence nationale de la recherche (ANR) en France ou le 5G *Private Public Partnership* (5G-PPP) [2] au niveau de l'Union européenne ont associé industriels et (dans une moindre mesure pour le 5GPPP) laboratoires académiques.

Chaque génération fait l'objet d'évolutions presque continuelles et régulièrement le 3GPP publie de nouvelles versions de son standard, appelées *releases*. La première version de NR correspond par exemple à la *release* 15 ou R15. Ses performances n'atteignent pas encore les exigences de l'IMT-2020, mais sont appelées à s'en rapprocher avec les *releases* suivantes. C'est la raison pour laquelle on risque d'entendre parler de 5.5G ou de 5G+ dans les années à venir.

Quelles sont les justifications techniques au développement de la 5G et de qui émanent-elles ?

Dans la décennie qui précède la standardisation d'une nouvelle génération, un discours se met progressivement en place pour justifier le développement d'une nouvelle technologie. Les industriels jouent un rôle majeur, suivi des politiques et des académiques. Ces acteurs interagissent dans les projets de recherche, les organismes de normalisation, les conférences scientifiques, les groupes de travail des institutions gouvernementales, etc. Des livres blancs, des articles de recherche, des séminaires produisent des textes. Des scientifiques, chefs d'entreprise ou hommes politiques en vue font valoir leur point de vue. Les gouvernements et l'Union européenne fixent des objectifs. Un discours cohérent émerge alors jusqu'à ce que les organismes de normalisation comme l'ITU et le 3GPP s'en saisissent.

En ce qui concerne la 5G, la première justification généralement mise en avant pour son développement est de répondre à la constante augmentation du trafic de données sur les réseaux mobiles. En 2020, la croissance annuelle a été de 46 % au niveau mondial. Le trafic par mois est de 49 EB (Exabit) fin 2020 et devrait être multiplié par cinq d'ici 2026 [15]. La croissance est tirée par la pénétration croissante des smartphones et une augmentation des volumes de données par abonnement, essentiellement due aux contenus vidéo. Le trafic moyen mensuel par smartphone était

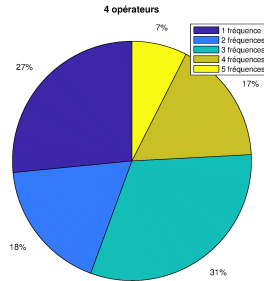


FIGURE 1. Proportions des stations de base 4G ayant jusqu'à 5 fréquences (données issues de la base des émetteurs de plus de 5W de l'ANFR, octobre 2020).

de 10 GB en 2020 alors qu'il n'était que de 5 GB deux ans auparavant [15]. Cette hausse du trafic met sous pression les infrastructures mobiles existantes. Plusieurs opérateurs français insistent sur la saturation des cellules 4G en milieu urbain dense. En fait, la situation est sans doute très contrastée selon les zones dont on parle. Dans les zones urbaines très denses, certaines stations sont sans doute en effet en limite de saturation. Mais la grande majorité des stations, notamment en zone rurale, sont loin d'avoir atteint leur limite de capacité. Sur la figure 1, on voit en effet que le nombre de stations de base (c'est-à-dire l'équipement qui inclut l'antenne et les traitements associés) transmettant sur 5 fréquences 4G différentes (700, 800, 1800, 2100 et 2600 MHz) ne représente que 7% du total. Seules ces stations sont susceptibles d'être saturées. On ne connaît en revanche pas la charge moyenne des cellules et encore moins la distribution statistique de cette charge, ce sont des informations confidentielles détenues par les opérateurs. Il est par conséquent difficile de vérifier l'argument de saturation des réseaux.

Un deuxième élément de réponse d'ordre technique est que les nouvelles applications envisagées nécessitent un débit supérieur, une latence plus faible, ou un grand nombre d'appareils connectés. Contrairement à ce qui s'était passé pour l'élaboration de la 4G, certains secteurs industriels ont eu voix au chapitre dans l'élaboration du standard : leurs besoins spécifiques ont été pris en compte (transports et santé par exemple) dès les premiers projets de recherche puis au 3GPP. Ils peuvent nettement différer des besoins du grand public et la 4G n'est pas en mesure d'assurer ces exigences.

On peut ajouter que les technologies cellulaires ont toujours eu tendance à vouloir s'approcher des performances des réseaux filaires, la mobilité en plus, de façon à offrir à l'utilisateur une expérience similaire quelque soit son mode de connexion. Les débits crêtes descendants sont d'environ 300 Mbps en VDSL2, de l'ordre de 1 Gbps avec la fibre ou WiFi6. On voit donc que la 5G, avec 20 Gbps de débit crête

et 100 Mbps de débit typique par utilisateur vient directement concurrencer ces technologies. Voilà pour le volet technique.

Mais il faut aussi évoquer les raisons économiques. Les opérateurs sont confrontés au *revenue gap* : le trafic est en augmentation d'environ 50 % par an, ce qui génère des frais liés au déploiement des infrastructures, à leur maintenance et à la consommation électrique, mais les revenus n'augmentent que faiblement [37, 35, 32]. L'amélioration de l'efficacité énergétique est une condition nécessaire pour la viabilité économique de la 5G : l'électricité représente environ 15 % des coûts d'opération, et 80 % de l'électricité est consommée par les stations de base [32].

D'autres raisons économiques viennent de certains secteurs industriels, qui envisagent de nouveaux services ou des optimisations de leurs processus de fabrication, logistiques ou commerciaux. La 5G serait appelée à révolutionner certains processus industriels et devrait accroître la compétitivité des entreprises. Dans cette logique, un pays qui ne développerait pas la 5G risquerait d'être distancé dans la compétition économique mondiale. C'est le principal argument du discours du président de la République du 13 septembre 2020 sur le lancement de la 5G en France. En Allemagne, certaines licences 5G (100 MHz dans la bande 3.7-3.8 GHz) ont d'ailleurs été attribuées à des industriels comme BMW ou Siemens (33 entreprises en tout) afin qu'ils puissent opérer directement un réseau 5G répondant à leurs besoins [11]. En France, seuls les opérateurs ont eu le droit de participer aux enchères.

Quelles sont les performances cibles de la 5G ?

C'est la recommandation IMT-2020 de l'ITU [26] qui spécifie les performances cibles de la 5G. Voici quelques performances cibles issues du document :

- débits crêtes : 20 Gbps sur la voie descendante (entre la station de base et l'utilisateur), 10 Gbps sur la voie montante (entre l'utilisateur et la station de base). Ces débits crêtes sont obtenus dans des conditions idéales par un utilisateur situé au pied de l'antenne-relais, seul dans sa cellule et bénéficiant de toutes les ressources de la cellule. C'est une situation irréaliste mais qui donne une idée du maximum que l'on peut atteindre ;
- débit perçu par l'utilisateur : au moins 100 Mbps (voie descendante) et 50 Mbps (voie montante). Contrairement au débit crête, le débit perçu par l'utilisateur prend en compte les imperfections du canal et le partage des ressources de la cellule avec les autres utilisateurs ;
- latence sur l'interface radio : entre 1 et 4 ms. Ces valeurs sont environ dix fois inférieures à ce qu'elles sont en 4G ;
- densité des objets connectés : 1 million par km². L'ITU prend en compte la forte croissance attendue de l'Internet de objets ;
- fiabilité : 99,99999 % de succès pour la transmission d'un petit paquet de données en 1 ms. Ces chiffres sont très contraignants et peu d'applications nécessitent à notre connaissance une telle exigence ;

— mobilité : le service doit être disponible pour un utilisateur se déplaçant jusqu'à 500 km/h.

Par rapport à la 4G, le débit crête est multiplié par 20, le débit perçu par l'utilisateur par 10, le nombre d'objets connectés par 10, la latence est divisée par 10 [5]. En outre, la 4G n'assurait de bonnes performances que jusqu'à 350 km/h. Comme précisé précédemment, la recommandation de l'ITU n'indique pas *comment* ces performances vont être atteintes. Elle n'indique pas non plus que ces performances doivent être toutes atteintes simultanément. C'est ce que nous abordons dans le prochain paragraphe.

Comment (technologiquement) va-t-on atteindre ces performances ?

Rappelons d'abord qu'un réseau cellulaire est constitué d'un réseau d'accès (les premiers équipements auxquels se connectent les utilisateurs) et d'un réseau cœur (le réseau filaire de l'opérateur qui est relié à Internet). Le réseau d'accès est lui-même constitué d'équipements appelés « stations de base » qui servent les utilisateurs dans une zone géographique limitée (une « cellule »). Chaque station de base inclut notamment des capacités de calcul pour le traitement du signal, pour la transmission de données vers le réseau cœur et une ou plusieurs antennes. On utilise parfois la notion d'antenne-relais pour désigner une station de base, mais le terme peut porter à confusion car une station de base inclut généralement plus qu'une seule antenne.

Les premiers déploiements de la 5G reposent sur un réseau cœur 4G, c'est-à-dire que les stations de base 5G sont connectées au réseau filaire d'ancienne génération, on parle de version *Non Stand Alone* (NSA) pour signifier que la 5G ne peut fonctionner sans la 4G. Une fois que le réseau cœur 5G est déployé, on parle de version *Stand Alone* (SA). Les performances cibles de la 5G ne peuvent être atteintes que dans la version SA.

Les performances affichées reposent sur des techniques bien connues en réseaux cellulaires (amplifiées par rapport à la 4G), mais aussi sur des innovations technologiques.

Densification des stations de base

En augmentant le nombre de stations de base par unité de surface, on accroît la capacité globale du réseau et on diminue le nombre moyen d'utilisateurs servis par une station. Comme la capacité de la station est partagée entre les utilisateurs, la densification du réseau induit une augmentation du débit par utilisateur. Dans un premier temps, les stations 5G sont co-localisées avec des stations 4G. Il est cependant prévu ensuite de déployer de nombreuses petites cellules (par exemple le long des rues, installées dans les lampadaires) qui viendront augmenter la capacité du réseau. D'après [25], on s'achemine vers trois fois plus de stations 5G que 4G, ce qui grossièrement entraînerait un triplement de la capacité du réseau grâce à la seule densification. La densification peut permettre de réduire les puissances d'émission des stations et donc leur consommation d'énergie. En pratique, il semblerait que les

opérateurs ne diminuent pas la puissance des plus grandes cellules (appelées aussi cellules macro), mais il n'existe pas de données publiques permettant de confirmer cela. En revanche, les petites cellules consomment en effet nettement moins d'énergie notamment grâce à leur puissance d'émission réduite.

De nouvelles fréquences

Pour transmettre un signal radio, il faut choisir une fréquence porteuse et une largeur de spectre (ou bande) autour de cette fréquence. L'augmentation des débits peut être obtenue en accroissant la largeur du spectre occupé par le signal. De 5 MHz en 3G, on est passé à 20 MHz en 4G. En 5G, les premières allocations offrent entre 70 et 90 MHz mais la première version du standard propose déjà une largeur de 400 MHz. Pour le choix de la fréquence porteuse, on distingue les fréquences basses (typiquement en dessous de 6 GHz) qui portent loin et nécessitent de grandes antennes et les fréquences hautes qui ne se propagent pas bien, mais pour lesquelles les antennes sont plus petites. Les fréquences basses sont déjà largement utilisées par différents systèmes et il devient difficile d'y trouver des fréquences avec de larges bandes. Il faut donc « monter » en fréquence porteuse avec l'inconvénient que la propagation radio y est bien plus difficile. Le signal s'atténue alors plus rapidement avec la distance et il est plus sensible aux obstacles entre l'émetteur et le récepteur. On peut alors compenser en partie cette perte en plaçant de nombreuses petites antennes sur les stations de base pour bénéficier des techniques *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). C'est l'enjeu des ondes millimétriques (des fréquences porteuses très hautes, au début autour de 26-28 GHz puis 41 et 66 GHz, avec des largeurs de bande importantes). La 5G spécifie donc l'utilisation de nouvelles fréquences plus élevées que la 4G afin de pouvoir utiliser des largeurs de bandes plus grandes et donc des débits plus importants.

L'allocation des bandes dépend des pays, mais le cas de la France est assez typique de plusieurs pays européens. Voici la liste des fréquences déjà attribuées ou candidates :

- 700 MHz : cette fréquence a déjà été allouée aux opérateurs fin 2015. La fréquence étant basse, la propagation y est favorable. En revanche, les largeurs de bande sont faibles (pas plus de 10 MHz en 2021 et sans doute pas plus de 20 ou 30 MHz à terme si le régulateur alloue plus de bande). Selon la stratégie des opérateurs, cette bande peut être utilisée pour faire de la couverture, c'est-à-dire offrir un signal 5G dans des zones de plus faible trafic (en zone rurale par exemple), elle peut venir en appoint d'une autre fréquence pour mieux couvrir l'intérieur des bâtiments ou offrir des services d'Internet des objets qui ne nécessitent pas de gros débits mais une bonne couverture ;
- de 800 MHz à 2,6 GHz : les bandes de fréquence autour de 800, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,6 GHz sont déjà allouées aux opérateurs pour la 2G, la 3G, la 4G, ils peuvent les réutiliser pour la 5G avec l'accord du régulateur ;

- 3,5 GHz : il s'agit de la bande « cœur » de la 5G. Les opérateurs ont obtenu fin 2020 entre 70 et 90 MHz de largeur de bande à cette fréquence. Plus élevée que la bande cœur 4G (2,6 GHz), la propagation y est plus difficile. Les antennes sont en revanche plus petites, ce qui permet d'y déployer les MIMO massifs, une technologie permettant d'augmenter les débits et la couverture ;
- 26 GHz : ces longueurs d'ondes millimétriques permettent une grande augmentation de la bande passante et du débit. Les antennes sont très petites à cette fréquence, ce qui permet d'en positionner beaucoup par station de base. En revanche la portée est faible (quelques centaines de mètres contre un à plusieurs kilomètres pour les fréquences plus basses vues précédemment). En 2021, ces fréquences n'ont pas été attribuées en France, mais font l'objet de déploiements importants aux États-Unis. L'opérateur Verizon par exemple avait ainsi déployé 30 000 sites en ondes millimétriques fin 2021 [29].

Techniques multi-antennaires MIMO et de formation de faisceaux

L'utilisation de plusieurs antennes au sein d'une même station de base permet d'augmenter les débits à largeur de bande donnée (MIMO), de rendre le signal plus robuste aux interférences (MIMO) et de focaliser l'énergie dans la direction de l'utilisateur (formation de faisceaux ou *beamforming*). La focalisation de l'énergie évite à l'émetteur de transmettre son signal dans des directions inutiles. C'est donc une technique importante pour l'amélioration de l'efficacité énergétique (même si un bilan global incluant le hardware supplémentaire à installer reste à réaliser [12]). C'est aussi une nécessité quand les fréquences sont élevées car la propagation radio y est dégradée. La taille d'une antenne étant proportionnelle à la longueur d'onde, elles sont plus petites à hautes fréquences, ce qui permet d'avoir par exemple 32 ou 64 antennes à 3,5 GHz et peut-être 128–256 antennes à 26 GHz.

Modes veille

Les modes veille permettent à une station de se mettre dans un état de consommation énergétique réduite quand il n'y a pas de trafic. Cette possibilité est offerte par de récentes avancées en électronique. Lorsqu'il n'y a pas d'utilisateur à servir, la station peut désactiver certains de ses composants de façon à réduire sa consommation. Une station peut s'éteindre pendant des durées variant de quelques dizaines de micro-secondes à plusieurs secondes. Plus la durée d'extinction est longue, plus la consommation est faible car davantage de composants peuvent entrer en veille [14]. Des gains importants peuvent être atteints, notamment dans les zones de faible trafic ou de trafic très intermittent où les stations sont installées essentiellement pour assurer la couverture du service. Les gains sont faibles en revanche quand le trafic est important. Il s'agit donc de rendre la consommation énergétique des stations de base davantage proportionnelle au trafic (en 4G la consommation est relativement indépendante de la charge de trafic). Cette technique est possible en 4G mais dans une moindre mesure car les stations 4G émettent en permanence des signaux permettant

à un nouvel utilisateur entrant sous leur couverture de se synchroniser. En 5G, ces signaux sont émis de façon plus intermittente ou seulement lorsqu'un utilisateur en a besoin [36].

Device-to-Device (D2D)

Il s'agit de communications directes entre terminaux. Aujourd'hui, pour communiquer avec un autre terminal, le signal est nécessairement relayé par la station de base, même si les deux terminaux sont géographiquement proches. Avec le D2D, deux terminaux proches peuvent communiquer directement sans passer par la station de base. Il en résulte des débits plus importants, des latences plus faibles et une consommation énergétique réduite (la distance entre l'émetteur et le récepteur étant plus faible, la puissance d'émission peut être réduite). Les principaux cas d'usage du D2D sont les communications entre professionnels de la sûreté publique (qui pourraient continuer à communiquer si une catastrophe détruisait les stations de base) et surtout les communications entre véhicules connectés ou autonomes.

Traitements de périphérie

En 5G, il est prévu de délocaliser une partie des traitements faits habituellement dans les centres de données (*data centers*) vers des centres plus proches des utilisateurs, éventuellement dans les stations de base elles-mêmes. On parle de *Mobile Edge Computing* (MEC). Il s'agit essentiellement de pouvoir réduire les latences, notamment pour les applications qui ont des contraintes très fortes de délai (pour la réalité virtuelle par exemple), et de décharger si possible le réseau « d'amenée » qui relie les stations de base au cœur de réseau grâce à la mise en cache de fichiers ou à la réalisation de calculs intermédiaires (par exemple pour l'intelligence artificielle) qui ne peuvent pas être effectuées dans les smartphones.

La virtualisation des réseaux

La virtualisation des fonctions réseau consiste à porter des fonctions habituellement remplies par des équipements dédiés et spécifiques sur des serveurs génériques situés dans des centres de données. Ces fonctions, historiquement intégrées au *hardware*, sont maintenant des programmes informatiques pouvant être facilement activés, désactivés et paramétrés en fonction des besoins. Les ressources en mémoire ou capacité de calcul peuvent être allouées de manière très dynamique. La virtualisation est à la base du MEC que l'on a vu précédemment, mais aussi de la découpe du réseau en tranches (*network slicing*). Cette technique permet de diviser une même infrastructure physique en plusieurs tranches logicielles qui seront autant de sous-réseaux qui apparaîtront comme isolés et indépendants les uns des autres aux utilisateurs. On pourrait par exemple imaginer de dédier une tranche à des applications industrielles, une tranche aux véhicules connectés et une tranche aux applications grand public. Chaque tranche est alors optimisée pour ses besoins et apparaît aux utilisateurs comme un réseau à part entière indépendant des autres. En réalité, ces

tranches partagent la même infrastructure physique (c'est-à-dire que le spectre, les antennes, les liens de transmissions, etc., sont partagés).

Pour bénéficier des technologies offertes par la 5G, il faut bien sûr disposer de terminaux compatibles capables de communiquer en utilisant les protocoles 5G et de traiter les informations avec les performances requises en termes de débit ou de latence. On pense bien sûr aux smartphones, mais il peut s'agir également de tablettes, ordinateurs, modules pour véhicules ou robots, routeurs, drones ou caméras de surveillance. Tous ces terminaux, même s'ils sont compatibles 5G, n'ont pas les mêmes fonctionnalités et performances. En 2022 par exemple, la plupart des smartphones ne permettent pas encore d'utiliser la 5G SA [18].

Quel est l'inconvénient d'utiliser de nouvelles bandes de fréquences ?

Plus la largeur de bande est grande, plus la quantité d'information qui peut être transmise par unité de temps est importante. Afin de pouvoir disposer de très grandes largeurs de bandes, il faut utiliser des fréquences plus élevées. À ces hautes fréquences cependant, la propagation radio est dégradée, le signal porte notamment moins loin et a plus de mal à contourner les obstacles. En revanche, plus les fréquences sont hautes, plus les antennes sont petites (leur taille est proportionnelle à la longueur d'onde), ce qui permet d'en utiliser plus en même temps et ainsi de compenser en partie les problèmes de propagation radio. Voici quelques exemples pour appréhender cette atténuation :

- en espace vide, l'atténuation de la puissance du signal est proportionnelle à la fréquence au carré. À titre d'exemple, une antenne qui porterait à 1 km à 700 MHz, aurait un rayon de couverture de 270 m à 2,6 GHz (la fréquence principale de la 4G), de 200 m à 3,5 GHz (la fréquence principale de la 5G) et de 27 m à 26 GHz (les ondes millimétriques). Les techniques MIMO et de formation de faisceaux disponibles aux fréquences plus élevées permettent d'augmenter ces rayons de cellule. Cela explique que les premiers déploiements 5G réutilisent les sites des stations de base 4G et visent donc une couverture similaire. Des études de terrain montrent que les cellules à 26 GHz pourraient avoir un rayon d'environ 200 m en milieu urbain grâce aux techniques multi-antennaires [8] ;
- dans un environnement réel, les obstacles ajoutent une atténuation supplémentaire. Par exemple, [41] indique des débits divisés par deux en moyenne à l'intérieur des bâtiments pour un signal de 100 MHz autour de 3,5 GHz. L'isolation des nouveaux bâtiments qui répond à des normes d'efficacité énergétique peut créer une atténuation supplémentaire très importante par rapport à des bâtiments plus anciens [7]. Plus la fréquence est élevée, plus les ondes ont des difficultés à traverser les obstacles. Le phénomène est particulièrement marquée pour les ondes millimétriques. Par exemple, un feuillage

d'arbres sur une longueur de quelques mètres peut atténuer fortement le signal à 26 GHz [34].

Cela a plusieurs conséquences sur la stratégie de déploiement des opérateurs. Il faut utiliser des fréquences plutôt basses, par exemple à 700 MHz, pour avoir une bonne couverture, comme en zone rurale ou à l'intérieur des bâtiments. Mais à ces fréquences, du fait des largeurs de bande plus faibles et d'antennes plus grandes, le passage de la 4G à la 5G n'entraînera pas une augmentation importante du débit (peut-être de l'ordre de 10 ou 15 % grâce à certaines optimisations). Ce qui pose le paradoxe suivant : la technologie qui promet des améliorations techniques n'est pas forcément optimale là où on se connecte beaucoup (à l'intérieur des bâtiments).

Il est certes imaginable de densifier très fortement les infrastructures radio en zone rurale ou à l'intérieur des bâtiments, mais les opérateurs verraient alors leur rentabilité décroître à cause d'un investissement supplémentaire en équipements (stations de base et réseau d'amenée) et en locations de nouveaux sites (de plus en plus difficiles à trouver). La couverture des bâtiments avec des antennes dédiées en intérieur est techniquement réalisable et des solutions existent en 4G par exemple. En pratique cependant, ce marché n'a jamais vraiment décollé. Les particuliers ne voient pas vraiment l'intérêt de déployer un réseau cellulaire à la maison alors qu'ils disposent pour la plupart de technologies efficaces dans cet environnement comme le WiFi. Les entreprises sont freinées, elles, par les coûts d'installation. Autant dans un bâtiment neuf, on peut prévoir de tels déploiements de sorte que le coût marginal soit faible, autant dans un bâtiment ancien, le câblage et l'installation des équipements engendrent un coût important. Il faut ajouter à cela la nécessité de faire cohabiter plusieurs opérateurs. C'est techniquement possible, mais peu évident à mettre en œuvre et ces freins ne devraient pas disparaître avec la 5G.

La 5G constitue-t-elle une rupture technologique ? Se base-t-elle sur une révolution scientifique ?

La 5G ne constitue sans doute pas une révolution scientifique dans le sens où la technologie est fondée sur la théorie de l'information [38], la cybernétique [39], le traitement du signal et les communications numériques [17] ou le domaine des réseaux de communication [9]. Si ces champs ont fortement évolué ces dernières années, peu de chercheurs parlent de révolution scientifique pour décrire la 5G. Si les fondements théoriques n'ont pas été bouleversés pour permettre le développement de la 5G, certaines technologies mises en œuvre sont en revanche plus récentes. La notion de MIMO massif qui combine les techniques multi-antennes pour un très grand nombre d'antennes date par exemple de 2010 [28]. Gardons tout de même à l'esprit que si ces technologies sont aujourd'hui mises en œuvre dans un système commercial, c'est qu'elles sont connues depuis plusieurs années et que les ingénieurs en ont déjà acquis une certaine expérience. Il est également difficile de parler de rupture alors que les réseaux évoluent de manière quasi-continue. Par exemple, depuis son

premier déploiement, le standard 4G a évolué et a su intégrer petit à petit plusieurs techniques que l'on retrouve en 5G.

Qu'en est-il des performances en pratique ?

L'ARCEP, le régulateur français des télécommunication, a publié en novembre 2021 une première étude de la qualité de service 5G en France [6]. Les résultats ont été jugés plutôt décevants, eu égard aux promesses, avec des débits moyens descendants d'environ 30 à 140 Mbps selon les opérateurs pour un utilisateur disposant d'un abonnement 5G (qui n'utilise la 5G qu'une partie du temps du fait de la couverture incomplète de la 5G). Deux études menées début 2022 à partir de mesures sur le terrain montrent que les débits atteints sur la voie descendante par les utilisateurs 5G en France varient entre 140 Mbps à 340 Mbps selon les opérateurs, c'est quatre à cinq fois plus rapide qu'en 4G [16, 33]. En terme de latence, les gains sont très faibles en moyenne (de 38 ms en 4G à 33 ms en 5G) [33]. Notons qu'il n'est pas forcément aisé de comparer les études entre elles car les méthodologies peuvent être très différentes. On peut tout de même constater qu'à ses débuts la 5G s'apparente plus à une « super 4G » qu'à une technologie révolutionnaire, mais que les performances auront probablement tendance à s'améliorer avec le temps.

On peut fournir quelques éléments d'explication. D'abord, tous les opérateurs ne sont pas équivalents. Par exemple, ils ne disposent pas du même spectre. Suite aux enchères, certains ont obtenu plus de bande passante que d'autres, ce qui explique en partie les différences observées. Chaque opérateur a sa propre stratégie de déploiement : certains privilégient la couverture 5G la plus large possible en utilisant des fréquences basses (700 MHz) offrant de plus faibles débits alors que d'autres mettent l'accent sur les performances en déployant en priorité des fréquences plus hautes (3,5 GHz) avec de larges bandes passantes [6]. Le nombre de stations de base déployées joue un rôle important également puisque la densification des réseaux augmente leur capacité en offrant plus de ressources par utilisateur. De manière générale, plus les opérateurs investissent dans le réseau, meilleures sont les performances.

Ensuite, lors des premiers déploiements, toutes les fonctionnalités de la 5G ne sont pas encore disponibles. Comme on l'a vu précédemment, le 3GPP procède par versions successives du standard 5G (les *releases*). Les opérateurs ne déploient au début que la première version et ne mettront à jour leur réseau que progressivement. Par exemple, mi-2022, très peu d'opérateurs dans le monde avaient activé la fonctionnalité SA (*Stand-Alone*) qui permet de se passer du réseau cœur 4G qui alimente les stations de base [19]. Elle est pourtant essentielle pour pouvoir réduire les latences de manière importante [41]. En France, le choix par l'ARCEP d'une trame radio similaire à celle de la 4G pour des raisons de gestion des interférences ne favorise pas les faibles latences. Dans plusieurs pays, notamment en Europe, les ondes millimétriques ne sont pas encore utilisées. En France, les fréquences correspondantes n'ont

pas encore été attribuées par l'ARCEP, or c'est à ces fréquences que les gains en débit seront les plus importants. Avec le temps, les opérateurs vont mieux maîtriser la technologie et pourront davantage optimiser les paramètres de leur réseau ; on peut donc s'attendre à des performances accrues dans le futur.

Enfin, les terminaux n'intègrent pas tous les mêmes fonctionnalités de la 5G [1]. Tous les smartphones « compatibles 5G » sont bien sûr capables d'utiliser le protocole 5G pour communiquer avec les stations de base, mais les débits crêtes dépendent de fonctions qui sont optionnelles. Au lancement d'une nouvelle génération, les fabricants ont à cœur de lancer sur le marché le plus rapidement possible des terminaux compatibles. Mais en fonction de la gamme de prix, leurs capacités de traitement ne permettront pas nécessairement de profiter à plein des capacités du réseau. Un smartphone équipé d'un modem de 2022 Qualcomm Snapdragon X70 pourra par exemple atteindre un débit crête de 10 Gbps si le réseau le permet, alors qu'un modem plus ancien Mediatek M70 (2018) fournirait un débit de 4,77 Gbps au maximum.

Peu d'études scientifiques sont, à notre connaissance, parues sur le sujet [41, 27, 30]. Chacune ne porte que sur un seul réseau bien particulier, mais les résultats présentés par ces études sont cohérents entre eux. Nous détaillons une étude chinoise qui confirme plusieurs points vus précédemment, menant à des performances réduites (cf. encadré 1) :

- le signal est effectivement beaucoup atténué par les obstacles ;
- les infrastructures Internet existantes (filaire ou pas) ne sont pas faites pour les caractéristiques de la 5G, notamment en termes de latence réduite ;
- l'impact est grand sur les besoins en performances des terminaux.

1. Étude de cas : la 5G sur un campus en Chine

Nous détaillons ici une étude effectuée sur un campus chinois [41]. Les paramètres importants du réseau étudié sont les suivants :

- le réseau fonctionne dans le mode dégradé NSA, évoqué plus haut, comme en France ;
- toutes les antennes 5G sont co-localisées avec les antennes 4G, c'est une hypothèse conforme aux premiers déploiements commerciaux ;
- la densité des stations de base est de 13 au km^2 , ce qui constitue un réseau 5G très dense ;
- chaque station de base a 2 ou 3 secteurs ;
- la bande de fréquence utilisée est de 100 MHz, la fréquence porteuse à 3,5 GHz ;
- la zone est assez densément urbanisée, la rendant comparable à une ville.

La bande de fréquence utilisée a plusieurs effets :

- les auteurs observent davantage de trous dans la couverture qu'en 4G, ce qui est logique puisque la bande de fréquence autour de 3,5 GHz subit une plus grande atténuation sur une même distance que les fréquences plus basses ;
- le rayon dans lequel les appareils peuvent se connecter est 2,5 fois plus petit en 5G qu'en 4G encore une fois, c'est logique puisque à 3,5 GHz, les ondes se propagent moins loin qu'à 800 MHz ;
- l'atténuation subie en intérieur est d'environ 50 % contre 20 % en 4G.

Cela confirme la théorie sur la propagation des ondes, et indique que la 5G va demander une densité

d'équipement plus importante pour profiter des avantages des nouvelles bandes de fréquence. Les débits observés sont les suivants : le débit maximum est environ six à sept fois celui de la 4G et le débit moyen est environ cinq fois celui de la 4G. On est dans le même ordre de grandeur que les études de terrain réalisées en France [33] (en fait légèrement au dessus grâce à une bande passante plus large et une densification importante). On est donc encore loin des performances promises dans la spécification 5G. La latence est un peu réduite par rapport à la 4G (de 20 à 40 ms de gain environ), mais elle est bien plus grande que ce que promet la spécification. Cette réduction de latence vient de la connexion entre les stations de base et le cœur de réseau cellulaire (fibre optique 25 Gbps). Il faudrait des équipements dédiés au traitement du réseau 5G pour que les performances s'améliorent nettement. La conclusion est qu'il va falloir faire de gros efforts sur le réseau cœur pour améliorer les performances en terme de latence. L'article cherche à comprendre pourquoi les performances sont limitées (au-delà de la bande de fréquence utilisée), ce qui est intéressant pour savoir si les performances à venir seront meilleures. Un premier point intéressant identifié par l'article est que l'augmentation des débits sur le réseau mobile induit des goulots d'étranglement sur l'infrastructure filaire, parce que les protocoles utilisés (TCP) n'ont pas été conçus pour de tels débit sur le lien radio :

- les mémoires (*buffers*) sont sous-dimensionnées. Leur taille dépend en effet d'une estimation de la capacité du réseau qui n'est plus réaliste quand le réseau mobile est en 5G. Augmenter la taille de ces *buffers* est possible mais pourrait induire des latences plus élevées ;
- avant tout, il semble que ce soit le protocole TCP (utilisé pour la plupart des communications sur Internet) qui soit, d'une manière générale, mal adapté à la 5G. Il faut par exemple plusieurs secondes à TCP pour s'adapter au débit et en profiter. Or de nombreuses applications nécessitent des temps de réaction beaucoup plus courts. Cela explique un gain de seulement 20 % en temps de téléchargement d'une page web par rapport à la 4G. La modification d'un protocole aussi largement utilisé par les équipements connectés à Internet s'avère difficile.

Un autre point soulevé par les auteurs est que le temps de chargement d'une page web est en fait limité par les capacités du terminal. L'amélioration des performances passe donc par des capacités de traitement supérieures au niveau des terminaux.

Quelle cohabitation entre la 5G et le WiFi ?

Le WiFi est une technologie radio pour les réseaux locaux sans fil pour des utilisateurs plutôt statiques à l'intérieur des bâtiments ou dans des lieux publics comme les gares ou les parcs. Au contraire, la 5G est une technologie de réseaux mobiles pouvant offrir une couverture potentiellement nationale pour des utilisateurs en mobilité. Les deux systèmes ne sont généralement pas gérés de la même manière et souvent pas par les mêmes acteurs : alors que le WiFi peut être installé par tout un chacun en utilisant une fréquence libre à condition de disposer d'une connexion Internet, la 5G est opérée par des acteurs nationaux ayant acquis au prix fort des licences pour les fréquences. La fréquence 5G d'un opérateur est ainsi assurée de ne subir aucune interférence d'un autre acteur, alors que les fréquences WiFi sont soumises à une congestion incontrôlée. Enfin, nombre de terminaux sont capables d'être connectés en 5G ou en WiFi et pourront dans le futur les utiliser conjointement [40]. En tenant compte de ces complémentarités et des modèles d'affaire différents, on a donc du mal à imaginer qu'une technologie remplacera l'autre.

Pour autant, le WiFi et la 5G sont régulièrement comparés car ils offrent tous deux un accès Internet haut débit sans fil. Sans entrer trop dans les détails, la normalisation WiFi évolue en parallèle de celle de la 5G avec une augmentation régulière des débits. La version la plus récente est le WiFi6 (fondée sur le standard IEEE 802.11ax). Elle offre des débits jusqu'à environ 10 Gbps et inclut des fonctionnalités pour l'Internet des objets. De son côté, la 5G pourrait se développer dans les bandes WiFi grâce à une nouvelle version du standard. On voit donc que ces technologies entrent en concurrence dans le domaine de la connectivité à l'intérieur des bâtiments notamment, mais aussi de l'Internet des objets. Le WiFi a l'avantage du faible coût et d'une grande base installée en intérieur dans les bâtiments, mais peut difficilement concurrencer la 5G en termes de performances sur la connectivité nationale ou sur les communications ultra-fiables et à ultra-faible latence, essentielles pour certaines industries.

Reste la question de la consommation énergétique. Si une box WiFi/ADSL ou WiFi/fibre consomme nettement moins qu'une station de base 5G, elle ne sert que quelques utilisateurs. Un rapide calcul montre que la question du meilleur système n'est pas tranchée (cf. encadré 2). Il conviendrait donc de poursuivre les études dans ce domaine.

2. Étude de cas : WiFi ou 5G pour le télétravail ?

Le télétravail est souvent présenté comme un cas d'usage pour lequel les réseaux de communications pourraient aider à réduire notre consommation énergétique. Le rapport de l'université de Zurich sur les bénéfices attendus de la 5G en fait un exemple typique [10]. On observe que le réseau Internet filaire tend à s'améliorer sur la totalité du territoire national en raison d'investissements massifs des collectivités territoriales dans la fibre optique (au moins jusqu'au dernier répartiteur dans les campagnes). Le WiFi servi par un réseau ADSL ou par une fibre optique apparaît donc comme une solution viable pour le télétravail. Elle a d'ailleurs fait ses preuves lors des différents confinements de la pandémie Covid-19. Il est donc intéressant de pouvoir comparer WiFi et 5G pour ce cas d'usage.

Dans ce calcul très sommaire, on fait les hypothèses suivantes :

- toutes les ressources (5G et WiFi/Box) sont dédiées au télétravail lorsqu'on est en télétravail ;
- on ne compte pas le coût de fabrication des appareils (terminaux et réseaux) ;
- on ne compte pas les installations de la fibre optique qui relient au réseau coeur la station de base ou la box ;
- on considère une densité d'habitants de 400 personnes/ha (cas de Paris) ;
- on considère une cellule de 250 m de rayon. Par conséquent il y a au maximum 8 000 personnes dans cette cellule, soit environ 4 000 ménages ;
- on considère un point accès WiFi par utilisateur et on suppose que les points d'accès WiFi n'interfèrent pas entre eux. Cette hypothèse qui semble la plus restrictive est néanmoins valide dans une grande majorité des cas des appartements parisiens où même si on voit les WiFi voisins, le débit de sa propre connexion WiFi est suffisant pour un trafic de visioconférence ;
- on considère un trafic de visioconférence d'environ 300 kbps ;
- pour la station de base 5G, on considère un débit moyen de 100 Mbps. Cette valeur a été obtenue en utilisant la méthodologie et les paramètres de [13] pour le cas d'une cellule en milieu urbain, une bande de 100 MHz et une fréquence porteuse à 3,5 GHz. On suppose

en outre une consommation de 5 kW à pleine charge (les stations de base compatibles 5G consomment généralement bien plus mais toute la consommation n'est pas dédiée à la 5G, on alloue ici environ 50 % à la 5G) [24];

- pour le WiFi, on considère la consommation totale de la box en incluant les modules de transmission vers le réseau filaire. On suppose que la consommation est de 10 W indépendamment du trafic (la puissance de transmission étant relativement faible, la consommation dépend peu du trafic). C'est un ordre de grandeur compatible avec les box WiFi6 commercialisées mi-2022 : la Livebox 6 d'Orange consomme 7,8 W et la Bbox Ultym de Bouygues Telecom consomme 11 W [23].

Nous sommes maintenant prêts au calcul de consommation électrique. Sachant que le nombre d'utilisateurs par station de base en visioconférence est 100 Mbps/300 kbps=333,4 % des habitants d'une cellule sont connectés simultanément à la station 5G. Par conséquent, la puissance par utilisateur en 5G est de 5 kW/333 = 15 W. On semble donc assez proche de la combinaison WiFi/box, mais encore une fois, ces chiffres méritent d'être affinés. En conclusion, la 5G et le WiFi semblent assez équivalents dans ce scénario. Le WiFi bénéficie en revanche d'être déjà installé alors que la 5G est actuellement en déploiement.

Parle-t-on déjà de la 6G ?

On estime qu'il faut environ 10 ans pour qu'une nouvelle génération de réseaux mobiles émerge. Les premières discussions, séminaires, livres blancs ont donc déjà été lancés pour définir ce que pourrait être la 6G. Les États-Unis ont lancé le projet de recherche *Next-G Alliance* [31] sous l'égide de l'organisme de standardisation ATIS. Il regroupe les grands industriels du secteur (à l'exception des Chinois). Le principal projet européen sur la 6G est Hexa-X [21].

Dans leur description des cas d'usage possibles de la 6G [4], les auteurs du projet Next-G estiment que la 6G est « *susceptible de développer les marchés nord-américains et pourrait impacter virtuellement tous les aspects de la vie, de la société et des industries* ». Dans la vie de tous les jours, l'accent est mis sur les services de robots, notamment pour l'assistance aux personnes âgées, qui est présentée comme une grande opportunité pour les affaires. Les interactions homme-machine seraient appelées à s'enrichir grâce à la réalité virtuelle multi-sensorielle ou à la télé-présence. Enfin, la 6G pourrait faciliter l'atteinte d'objectifs sociétaux, par exemple ceux de l'agenda 2030 des Nations unies pour le développement durable. Un accent est mis sur la fracture numérique et sur la réduction des émissions de CO₂ grâce à des gains en efficacité énergétique et des technologies comme la récupération d'énergie renouvelable ou des batteries de très longue durée de vie.

Dans son rapport [3], l'alliance Next-G aborde les questions environnementales. Les auteurs reconnaissent la part croissante des industries numériques dans la consommation énergétique mondiale. Cette croissance est selon eux accrue par l'augmentation de la population et les demandes de la société en termes de services numériques. L'industrie se serait cependant engagée à des émissions nettes de gaz à effet de serre nulles en 2050. D'autres effets environnementaux sont évoqués comme ceux générés par les déchets électroniques, les activités minières ou encore l'usage

intensif d'eau. Par conséquent l'alliance Next-G recommande aux entreprises du numérique de s'engager sur des objectifs précis, de mettre en place des indicateurs, de collecter des données, d'améliorer l'efficacité énergétique et estime que la 6G permettra de favoriser l'économie circulaire et aidera les autres secteurs à réduire leurs émissions. Il est clairement dit que les gains en efficacité énergétique ne pourront pas compenser les effets de l'augmentation du trafic et que par conséquent la consommation énergétique continuera d'augmenter.

Le projet Hexa-X développe sa vision de la 6G dans son second livrable [22]. Il est d'emblée question des périls qui pèsent sur l'humanité en évoquant le changement climatique, les pandémies, les inégalités sociales ou la perte de confiance dans la démocratie. La réponse résiderait dans une numérisation accrue de la société avec les réseaux mobiles comme pierre angulaire de cette transformation. À nouveau les objectifs des Nations unies sont mis en avant et l'industrie numérique se félicite de ses apports à la croissance économique ou à la réduction des émissions de CO₂ en citant l'étude controversée du GSMA sur la question [20]. L'augmentation du trafic de données est présentée comme inéluctable. Hexa-X envisage un futur dans lequel les mondes humains (leurs sens, corps, intelligence, valeurs), physiques (objets et organismes) et numériques (information, communication, calcul) auront fusionné. La 6G devrait nous permettre de naviguer entre ces mondes de manière fluide grâce à des jumeaux numériques, à la télé-présence ou au déploiement de robots dans notre vie quotidienne.

Dans sa vision de la 6G, le projet Hexa-X consacre une section à la soutenabilité [22]. Les objectifs fixés par l'ONU devraient être atteints essentiellement en numérisant l'économie et en connectant de plus en plus d'humains. L'empreinte carbone du numérique y est minimisée et sa réduction devrait dépendre des gains en efficacité et d'une meilleure information en direction des utilisateurs. Selon les auteurs, la 6G devrait permettre d'aider les autres secteurs à réduire leurs émissions grâce aux applications *smart X* (*city, working, agriculture*, etc). Pour rendre la 6G moins consommatrice d'énergie tout en permettant une augmentation du trafic, il faudra être plus efficace énergétiquement en atteignant l'objectif de zéro consommation à charge nulle grâce à l'intelligence artificielle (IA), à l'adaptation des protocoles, aux modes de veille et à la virtualisation. Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il s'agira d'utiliser plus d'énergies renouvelables. Les équipements devraient être conçus en utilisant les principes de l'éco-conception et de l'économie circulaire.

Références

- [1] 3GPP. NR; User Equipment (UE) radio access capabilities. TS 38.306, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2017. URL : <http://www.3gpp.org/DynaReport/38306.htm>.
- [2] The 5g infrstructure public private partnership. <https://5g-ppp.eu/>.

- [3] Next G Alliance. Green G : The Path Toward Sustainable 6G. Technical report, ATIS, 2022. URL : <http://www.atis.org/legal/patentinfo.asp>.
- [4] NextG Alliance. 6G Applications and Use Cases. Technical report, ATIS, 2022.
- [5] ARCEP. La 5G : une nouvelle technologie pour les réseaux mobiles. <https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1582218129/reprise/dossiers/collectivites/ateliers-TC-2019/atelier-TC-5G-part01-260619.pdf>, 2019.
- [6] ARCEP. Qualité des services mobiles. Technical report, ARCEP, 2021.
- [7] Ari Asp, Yaroslav Sydorov, Mikko Kesikastari, Mikko Valkama, and Jarmo Niemela. Impact of Modern Construction Materials on Radio Signal Propagation : Practical Measurements and Network Planning Aspects. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2014. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7022939>. doi:10.1109/VTCspring.2014.7022939.
- [8] Yaniv Azar, George N Wong, Kevin Wang, Rimma Mayzus, Jocelyn K Schulz, Hang Zhao, Felix Guierrez, DuckDong Hwang, and Theodore S Rappaport. 28 GHz propagation measurements for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York City. In *IEEE international conference on communications (ICC)*, pages 5143–5147. IEEE, 2013. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6655399>.
- [9] Dimitri Bertsekas and Robert Gallager. *Data networks*. Athena Scientific, 2021.
- [10] Jan Bieser, Beatrice Salieri, Roland Hirschler, and Lorenz Hilty. Next generation mobile networks : Problem or opportunity for climate protection? Technical report, University of Zurich, 2020.
- [11] Nummern fuer campusnetze. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Nummerierung/Campusnetze/start.html>, 2022.
- [12] Philippe Ciblat. A propos du MIMO massif dans un contexte de sobriété numérique. In *GRETSI*, 2022.
- [13] Marceau Coupechoux. Performances 5G : étude comparée en zones rurales et urbaines. Rapport pour l'arcep, Telecom Paristech, October 2021. URL : <https://hal.telecom-paris.fr/hal-03367918>.
- [14] Bjorn Debaille, Claude Desset, and Filip Louagie. A flexible and future-proof power model for cellular base stations. In *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–7. IEEE, 2015.
- [15] Ericsson. Ericsson Mobility Report. Technical Report June, Ericsson, 2021.
- [16] Ian Fogg. France Mobile Network Experience Report. Technical report, OpenSignal, 2022.
- [17] Andrea Goldsmith. *Wireless communications*. Cambridge university press, 2005.
- [18] GSA. 5G Device Ecosystem. Technical report, Global Mobile Supplier Association, 2022.
- [19] GSA. 5G Standalone August 2022 - Summary Report. Technical report, Global Mobile Supplier Association, 2022.
- [20] GSMA. The enablement effect. the impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions. Technical report, GSMA, 2019.
- [21] Hexa-X Project. <https://hexa-x.eu/>.
- [22] Hexa-X. Deliverable D1.2 Expanded 6G vision, use cases and societal values-including aspects of sustainability, security and spectrum. Technical report, Hexa-X, 2021.
- [23] Johann Hoeffler. Facture d'énergie : peut-on réduire la consommation électrique de sa Box Internet? Technical report, Echos du Net, 2022.
- [24] Huawei. 5G Power Whitepaper. Technical report, Huawei, 2019.
- [25] Chih Lin I, Shuangfeng Han, and Sen Bian. Energy-efficient 5G for a greener future. *Nature Electronics*, 3(4) :182–184, 2020. doi:10.1038/s41928-020-0404-1.

- [26] ITU. ITU-R M.2410-0. Technical report, ITU, 2017.
- [27] Tong Liu, Jianguo Pan, and Ye Tian. Detect the Bottleneck of Commercial 5G in China. In *2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pages 941–945, 2020. doi:10.1109/ICCC51575.2020.9345115.
- [28] Thomas L Marzetta. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE transactions on wireless communications*, 9(11):3590–3600, 2010.
- [29] Fierce Wireless Monica Allevan. Verizon marks 711 Mbps upload speed in mmWave trial with Samsung, Qualcomm. <https://www.fiercewireless.com/operators/verizon-marks-711-mbps-upload-speed-mmwave-trial-samsung-qualcomm>, octobre 2021.
- [30] Arvind Narayanan, Xumiao Zhang, Ruiyang Zhu, Ahmad Hassan, Shuwei Jin, Xiao Zhu, Xiaoxuan Zhang, Denis Rybkin, Zhengxuan Yang, Zhuoqing Morley Mao, Feng Qian, and Zhi-Li Zhang. A Variegated Look at 5G in the Wild : Performance, Power, and QoE Implications. In *ACM SIGCOMM Conference*, page 610–625, 2021. URL : <https://doi-org.docelec.insa-lyon.fr/10.1145/3452296.3472923>, doi:10.1145/3452296.3472923.
- [31] Next G Alliance. <https://nextgalliance.org/>.
- [32] Nokia. 5G network energy efficiency : Massive capacity boost with flat energy consumption. Technical report, Nokia, 2016.
- [33] nPerf. Internet mobiles en France métropolitaine, 1er semestre 2022. Technical report, nPerf, 2022.
- [34] Zhouyue Pi and Farooq Khan. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. *IEEE Communications Magazine*, 49(6):101–107, 2011. doi:10.1109/MCOM.2011.5783993.
- [35] Gauthier Roussilhe. La controverse de la 5G. <https://gauthierroussilhe.com/pdf/5G-Juillet2020.pdf>, 2020.
- [36] Fatma Ezzahra Salem. *Management of advanced sleep modes for energy-efficient 5G networks*. Theses, Institut Polytechnique de Paris, December 2019. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02500618>.
- [37] Samsung. 5G Vision. Technical report, Samsung, 2015.
- [38] Claude Elwood Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3):379–423, 1948.
- [39] Norbert Wiener. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT press, 2019.
- [40] Hongjia Wu, Simone Ferlin, Giuseppe Caso, Özgü Alay, and Anna Brunstrom. A Survey on Multipath Transport Protocols Towards 5G Access Traffic Steering, Switching and Splitting. *IEEE Access*, 9:164417–164439, 2021.
- [41] Dongzhu Xu, Anfu Zhou, Xinyu Zhang, Guixian Wang, Xi Liu, Congkai An, Yiming Shi, Liang Liu, and Huadong Ma. Understanding Operational 5G : A First Measurement Study on Its Coverage, Performance and Energy Consumption. In *ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication (SIGCOMM) Conference*, 2020. <https://doi.org/10.1145/3387514.3405882>.