

# Rapport 5G/6G

Projet SISN

05.2021

—

Alassane KOUSSOUBE  
Yassine AMCHAROD  
Emile-Alexandre BOOM  
Alban MORALI

Centrale   
Marseille

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>Les réseaux 5G par rapport aux réseaux 4G</b>	<b>2</b>
L'automobile	3
La médecine	3
<b>Le cas de l'industrie en France : la 5G, élément déclencheur</b>	<b>4</b>
Les usines automatisées	4
Automatisation des plate-formes logistiques	5
Nouveaux domaines industriels à très fort potentiel	6
<b>Enjeux environnementaux et mise en place de la 5G</b>	<b>8</b>
La consommation direct	8
La consommation indirect	9
<b>Pourquoi la 6G ?</b>	<b>11</b>
Recherches sur la 6G	12
<b>Technologies de la 5G et perspectives pour la 6G</b>	<b>13</b>
Tour d'horizon des technologies de la 5G	13
Espoirs technologiques de la 6G	16
L'entrée en jeu de l'intelligence artificielle	16
De nouvelles fréquences (RF et optiques)	17
Une nouvelle architecture	17
Des nouvelles infrastructures	18
Un nouveau rapport à la sécurité	18
<b>Sources</b>	<b>20</b>

## Introduction

Après la 1G, la 2G, la 3G plus récemment la 4G, c'est maintenant, depuis 2020, au tour de la 5<sup>ème</sup> génération de réseaux mobiles de faire son apparition. Comme nous pouvons nous en douter, cette nouvelle génération vient améliorer les performances par rapport à la 4G sur de nombreux points mais notamment au niveau du temps de latence, du nombre d'appareil connectés simultanément et bien sûr du débit de connexion.

Toutefois, cette technologie ne s'applique pas uniquement au monde des télécommunications mais aura également un apport dans de nombreux domaines comme par exemple les voitures autonomes ou encore les objets connectés avec l'IoT.

Bien que la 5G ne soit pas encore totalement développée, elle devrait se composer d'au moins cinq nouvelles technologies qui lui permettront d'effectuer des tâches beaucoup plus complexes à des vitesses plus élevées. Les nouvelles technologies que la 5G utilisera sont du matériel fonctionnant à des fréquences beaucoup plus élevées (longueurs d'onde millimétriques), des petites cellules, le MIMO massif (multiple input multiple output), la formation de faisceau et le duplex intégral.

En travaillant ensemble, ces nouvelles technologies étendront le potentiel d'un grand nombre d'appareils utilisés aujourd'hui et d'appareils en cours de développement pour l'avenir. Nous finirons dans ce rapport par détailler cette partie technique sur le fonctionnement de la 5G mais également 6G.

## Les réseaux 5G par rapport aux réseaux 4G

L'objectif de la 5G, en tant que successeur de la 4G, sera 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).

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
- l'industrie
- les villes intelligentes
- la médecine et la chirurgie assistée à distance ;

la signalisation etc. Le tout permettra

The illustration shows a variety of transportation modes and infrastructure elements connected by wireless networks. Key components include:

- Satellite Communications:** Represented by a satellite icon in the sky.
- Terrestrial Broadcast:** A tall tower emitting signals over a green landscape.
- Mobile:** A cluster of buildings representing urban mobility hubs.
- ITS-G5:** A central hub for vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication.
- MAN (Metropolitan Area Network):** A network connecting different parts of the city.
- Safety Systems:** Icons showing vehicles interacting to prevent accidents.
- Vehicle-to-Vehicle:** Direct communication between two cars.
- Adaptive Cruise Control:** A car following another at a set distance.
- Fleet Management:** A truck connected to a central control system.
- Travel Assistance:** A car receiving navigation or traffic updates.
- Toll Collection:** A car passing through a toll plaza.
- WLAN (Wireless Local Area Network):** A building providing local wireless access.
- Traffic Lights:** Smart traffic lights that adjust based on real-time conditions.
- Passenger Information:** A train station platform with digital displays.
- Intermodal Communications:** Connecting different transport modes like train, bus, and bike-sharing.
- Navigation:** A car using GPS services.

© ETSI 2012

## Le cas de l'industrie en France : la 5G, élément déclencheur

Souvent on associe la 5G à des usages de communications publics, mais elle pourrait aussi être un accélérateur de l'industrie; grâce à la 5G, de nouveaux outils seront introduits dans l'industrie: maintenance prédictive, usine reconfigurable, réalité augmentée, big data industriel, connectivité généralisée, flottes de VGA (véhicules guidés automatisés) intelligents. En plus d'une efficacité, d'une facilité d'usage et d'une forte sécurité.

### 1. Les usines automatisées

Comme nous avons pu le voir, la 5G permet un grand nombre d'utilisateurs du réseau simultanément ainsi que des temps de latence très faible. Grâce à ces avancées technologiques vient le concept d'industrie 4.0. Ce dernier regroupe de nombreux aspects comme l'intelligence artificielle ou encore l'impression 3D mais nous allons nous concentrer sur la partie réseau. A l'avenir il sera possible de mettre en place une sorte de réseau local (LAN) sans fil se basant sur la 5G. Ce dernier pourrait ressembler à un réseau wifi qui serait présent dans toute l'usine mais sans le désavantage de perdre en débit dès qu'un très grand nombre d'appareils serait connecté. [3] Ainsi cette usine serait des plus modulable car peu importe où les équipements s'y trouvent ils feront partie intégrante du réseau et pourront être déplacés sans soucis pour s'adapter aux différents besoins de l'entreprise. De plus cette connectivité intense permettra de monitorer au mieux toutes les données fournies par les différentes machines et ceci en temps réel grâce au temps de latence très faible.

[12] Plus précisément nous pouvons citer quelques exemples concrets d'applications 5G possibles dans les usines:

- Interaction entre les machines : les machines peuvent communiquer entre elles, ce qui améliore la distribution de l'intelligence dans les usines et optimise les performances générales.
- Réseau plus stable : dans les usines, il y a des systèmes (des boucles de régulation) qui nécessitent un contrôle en temps réel très fiable et un cycle très court. Avec la 5G ces derniers peuvent fonctionner dans leur tranche de réseau sans subir l'effet perturbateur que pourrait avoir un autre composant.
- Communication interne plus rapide: Les capteurs sans fil permettent de mieux contrôler les paramètres comme la température, les vibrations et les émissions sonores sur les machines de production. Si il y a un problème dans les mesures, le capteur déclenche une alerte dans un laps de temps très réduit.



- Les véhicules autonomes (AGV) sont plus faciles à exploiter avec la 5G, pour fournir les matériaux en juste-à-temps dans l'usine, ou même en se synchronisant pour répartir les charges importantes.
- La réalité augmentée (RA) permettra aux opérateurs de visualiser en temps réel et directement sur la machine toutes les informations importantes sur son état de fonctionnement. Et s'ils n'arrivent pas à résoudre un problème, ce qu'ils voient pourra être transmis en 5G à un expert qui, à distance, pourra annoter les images ou pointer un composant.

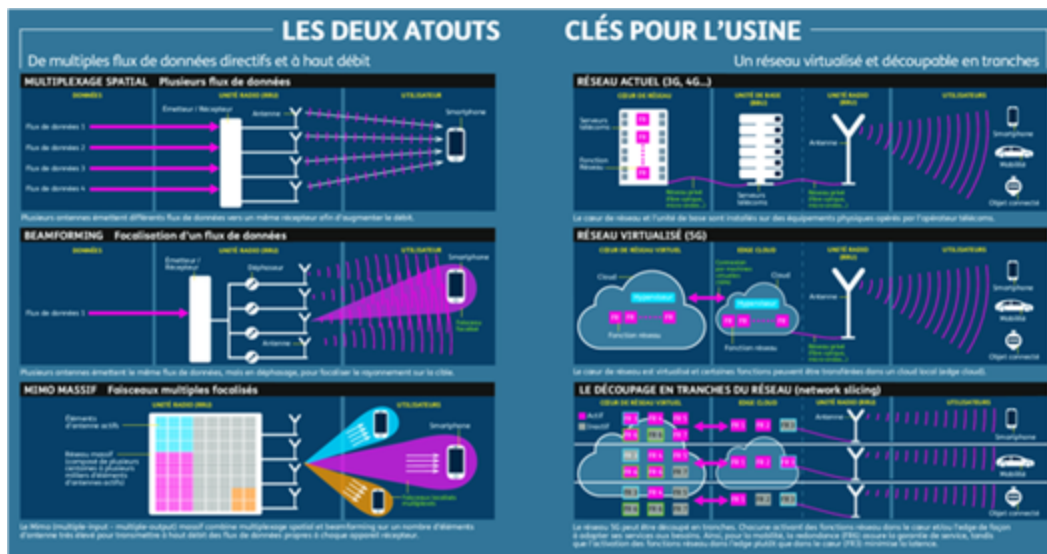


Figure 2 Technologies permettant l'industrie 4.0 [3]

Pour que les applications fournissent la qualité de service attendue, l'usine doit pouvoir bénéficier d'un accès exclusif au réseau. Il faut aussi sécuriser les installations des menaces internes et externes, et si une grande partie des usines fonctionne avec des technologies sans fil, il faut des garanties sur la continuité de service.

## 2. Automatisation des plate-formes logistiques

Les plate-formes logistiques ne se résument pas seulement aux petits robots qui balayent les usines, mais également aux grands ports entre autres. [10] En février 2019, un port intelligent à Qingdao a vu le jour, grâce à une collaboration entre Ericsson et China Unicom. Dans ce port, la 5G permet le pilotage des grues à distance et l'automatisation de beaucoup des tâches. Sans aucun doute, les ports et le transport maritime sont nécessaires au bon fonctionnement de l'industrie, ou plus globalement l'économie, puisqu'ils assurent la fluidité des échanges de marchandises et les matières premières.

La 5G fournit la connectivité rapide, fiable et sécurisée nécessaire par l'infrastructure réseau de port intelligent pour traiter les données de masse générées par les grues, les véhicules, les équipements et le personnel.

[10] Nous pouvons résumer les applications les plus avantageuses en matière de technologies portuaires intelligentes :

- Les grues-portiques pilotées à distance, chargent et déchargent les navires automatiquement, déplacent les conteneurs avec précision et maniabilité.
- Les portiques automatisés empilent les conteneurs sur les terminaux, cette étape est cruciale lorsqu'il s'agit d'empiler des conteneurs de grande capacité et d'assurer une grande manœuvrabilité.
- Les VGA ( véhicules guidés automatisés) bougent dans le port à l'aide des capteurs 3D, ces véhicules manipulent tous les matériaux du port, ce qui réduit les coûts en matière d'énergie et les risques d'accident.
- La maintenance conditionnelle détecte les problèmes avant qu'ils ne se produisent, ce qui réduit les temps d'arrêt imprévus et maximise la productivité.
- Les drones livrent des documents du navire à la terre, ce qui réduit les coûts et l'impact environnemental des navires tout en assurant la surveillance de la sécurité des ports.


### 3. Nouveaux domaines industriels à très fort potentiel

L'arrivée de la 5G devrait faciliter le développement de nouvelles industries, 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 de notre vie et entraînera l'apparition de nouvelles opportunités.

Exemples des nouvelles applications industrielles:

#### Objets Connectés

L'Internet des objets (IoT) est un autre vaste domaine de développement avec un réseau sans fil 5G suralimenté, et l'Internet des objets connectera tous les objets, appareils, capteurs, appareils et applications à Internet. Les applications IoT collecteront une quantité



massive de données à partir de millions d'appareils et de capteurs, ce qui nécessite un réseau efficace pour collecter, traiter, transmettre, contrôler et analyser les données en temps réel.

La 5G est le candidat le plus efficace pour l'Internet des objets en raison de sa flexibilité, de sa disponibilité inexploitée de solutions de spectre et de solutions à faible coût.

### Ville intelligente

Un réseau sans fil 5G fiable peut être utilisé pour des applications de ville intelligente telles que la gestion du trafic, la mise à jour instantanée de la météo, la diffusion locale, la gestion de l'énergie, le réseau électrique intelligent, l'éclairage public intelligent, la gestion des ressources en eau, la gestion des foules, les interventions d'urgence, etc.

### Dirigeables et drones civils

Les drones sont populaires pour de multiples opérations, allant du divertissement à la capture vidéo, à l'accès médical et d'urgence, aux solutions de livraison intelligentes, à la sécurité et à la surveillance, etc.

Le réseau 5G fournira un support robuste avec une connexion Internet sans fil à haut débit pour faire fonctionner le drone dans un large éventail d'applications.

Lors d'urgences telles que les catastrophes naturelles, les humains ont un accès limité aux nombreuses zones où les drones peuvent atteindre et collecter des informations utiles.

### Smart health

La technologie 5G aidera les médecins à effectuer des procédures médicales avancées avec un réseau sans fil fiable connecté à une autre partie du globe.

Les personnes atteintes de maladies chroniques bénéficieront d'appareils intelligents et d'une surveillance en temps réel, les médecins peuvent communiquer avec les patients de n'importe où et à tout moment et les aider si nécessaire.

Le secteur de la santé doit intégrer toutes les opérations avec l'utilisation d'un réseau robuste, et la 5G revitalisera le secteur de la santé avec des dispositifs médicaux intelligents, un réseau de dispositifs médicaux, des analyses intelligentes et des technologies d'imagerie médicale haute définition.

Les dispositifs médicaux intelligents tels que le dispositif portable surveilleront en permanence l'état du patient et activeront l'alarme en cas d'urgence, les hôpitaux et les services d'ambulance recevront des alertes en cas de situation critique et pourront prendre les mesures nécessaires pour accélérer le diagnostic et le traitement.

Les patients ayant des besoins particuliers peuvent être suivis à l'aide de panneaux spéciaux et de dispositifs de localisation précis, et la base de données de soins de santé est



accessible à partir de n'importe quel endroit. L'analyse des données collectées peut être utilisée pour rechercher et améliorer les traitements.

### Agriculture intelligente

La technologie 5G sera utilisée dans l'agriculture intelligente à l'avenir, et en utilisant les capteurs RFID intelligents et la technologie GPS, les agriculteurs peuvent facilement suivre et gérer l'emplacement du bétail, et des capteurs intelligents peuvent être utilisés pour contrôler l'irrigation, le contrôle d'accès et la gestion de l'énergie.

## Enjeux environnementaux et mise en place de la 5G

L'arrivée de la 5G sur le territoire s'est faite de manière logique, comme une continuité. Cependant et jusqu'à peu, personne ne se posait la question quant à l'impact environnemental que pourrait avoir cette technologie. Bien au contraire, les bienfaits de l'efficacité énergétique et les apports que pouvait avoir ce nouveau réseau étaient largement mis en avant sans questionner de l'utilité de ce dernier pour un particulier lambda.

Il faut savoir que la part d'émission de gaz à effet de serre des télécommunications est estimée à 2%. Même si 2% peuvent sembler qu'une petite partie cela représente quand même 860 million de tonnes de gaz à effet de serre. Ces derniers sont directement liés aux catastrophes naturelles comme les sécheresses, les inondations dont les occurrences augmentent d'année en année. En effet, même si en France la majeure partie de l'électricité est produite grâce aux centrales nucléaires, ce n'est pas le cas dans tous les pays, notamment aux États-Unis où 85 % de l'énergie est produite à base de ressources fossiles.[1]

L'arrivée de la 5G va donc empirer cette situation sur deux aspects: d'une part la consommation énergétique directe et d'autre part indirect.

### La consommation direct

Il est vrai qu'avec cette nouvelle technologie l'efficacité occupe une place de choix et ainsi la consommation énergétique des appareils est optimisée au maximum. Ainsi, à première vue, cela semble être une bonne nouvelle pour l'environnement et être synonyme de réduction de la consommation énergétique. Cependant il y a un paramètre déterminant à prendre en compte: le nombre. La 5G est fortement liée à l'IoT et à l'idée de connecter de plus en plus d'objets en tout genre: réfrigérateur, cafetière, ampoule... Cette démultiplication du nombre d'appareils électroniques contrebalance complètement la réduction de consommation énergétique et vient même l'augmenter drastiquement au vu

du nombre phénoménal d'appareils. Aujourd'hui c'est déjà 6 milliards de téléphones en circulation dans le monde et bien entendu ce nombre tend à augmenter drastiquement. Pire encore, 50 milliards d'objets connectés sont attendus pour les années à venir, peu importe s'ils consomment peu ou non, la demande énergétique ne pourra qu'augmenter. [1]

Un autre point rendant compte du côté énergivore de cette technologie est par son fonctionnement. La 5G utilise les ondes millimétriques et ces dernières sont assez faibles et atténuées très rapidement par un obstacle comme un mur ou encore un arbre. Ainsi, pour pallier à ce problème, il est nécessaire de démultiplier le nombre d'antennes relais permettant une bonne couverture du territoire. Là encore, cette démultiplication entraîne inévitablement un surcoût énergétique qu'il faudra prendre en compte.

Figure 13: Mobile data traffic per smartphone (GB per month)

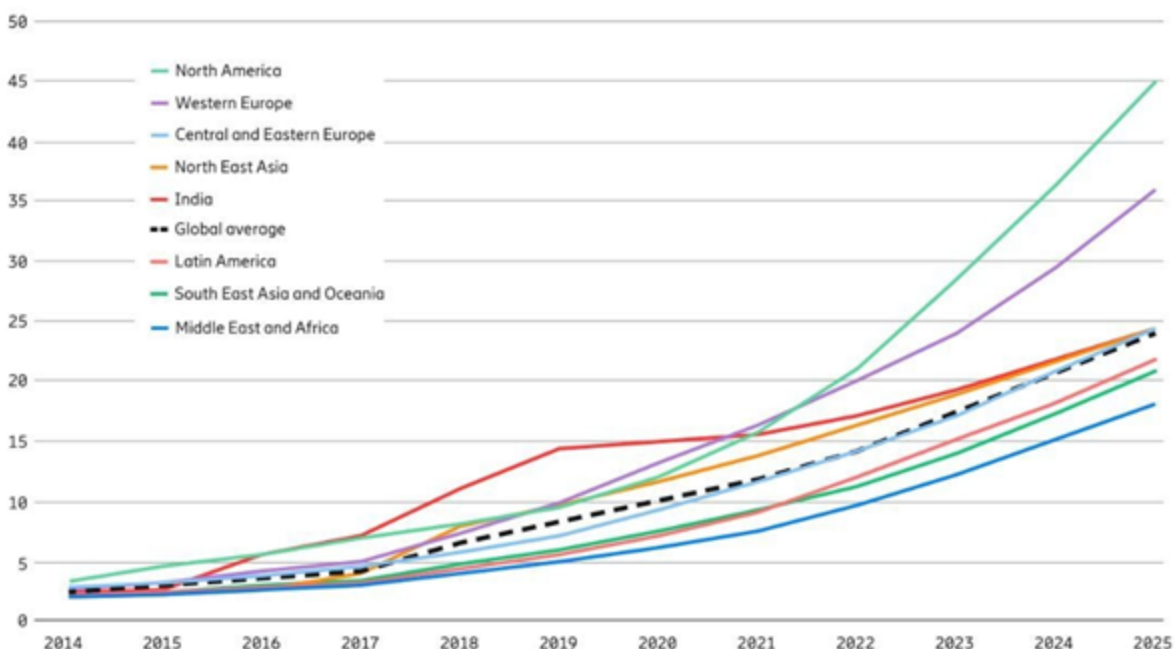


Figure 3 : Consommation par smartphone par pays [6]

## La consommation indirecte

Cette consommation n'est pas la première à laquelle nous pensons mais même si elle est moindre que la consommation directe elle n'est pour autant pas négligeable. La production de tous ces nouveaux appareils pour la transmission de la 5G, la réception et l'utilisation possède un "double" coût. D'une part, la consommation électrique pour les produire, mais également l'exploitation de ressources fossiles comme des métaux rares. Ces derniers

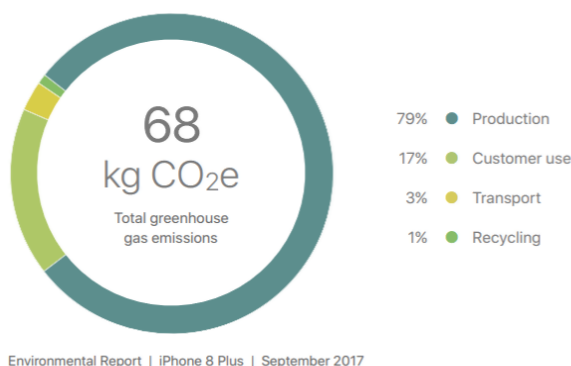
peuvent avoir un coût environnemental et éthique énorme. Que ce soit par des conditions extractions sordides, parfois effectuées par des enfants sans aucune condition sanitaire ni protection, ou par l'utilisation intensive d'eau qui sera par la suite polluée et qui pourtant manque déjà beaucoup dans les régions du monde concernées.

Il faut prendre en compte également les déchets que va engendrer le remplacement des anciens terminaux qui ne seront pas compatibles avec la 5G. D'un côté, car la proportion de téléphones récupérés pour le recyclage est très faible, les gens n'ont pas le réflexe de penser au recyclage de leurs appareils et le plus souvent ils restent au fond d'un tiroir alors

qu'ils sont encore en état de marche. D'un autre côté, la proportion de matériaux recyclables, au sein d'un smartphone par exemple, est très faible. Un simple smartphone utilisé pendant 3 ans sans prendre en compte l'utilisation du réseau ou dépense énergétique diverses représente 300 km parcouru en voiture. [1] Une fois de plus il faut prendre en compte également la production de toutes les nouvelles infrastructures nécessaires au

fonctionnement du réseau comme par exemple les nouvelles antennes 5G.

Greenhouse Gas Emissions for iPhone 8 Plus—64GB model



Nous pouvons nous rendre compte que l'arrivée de cette technologie ne sera pas sans impact environnemental. Toutefois, cela ne signifie pas non plus qu'il faut tout arrêter, il faut se questionner quant à l'utilité et le rapport bienfait/méfait. Est-ce que par exemple en tant qu'individu, pouvoir regarder une vidéo en 4K sur mon smartphone est vraiment un apport qui justifierait une telle dépense énergétique. Ne pouvons-nous pas limiter la mise en place de cette technologie dans les secteurs où elle apporterait une réelle plus value comme dans la chirurgie à distance ou encore l'industrie par exemple. Chacun se fera son avis sur la question mais dans tous les cas ce genre de questionnement est nécessaire à une technologie saine.

## Pourquoi la 6G ?

La 6G a pour objectif principal l'effectivité de l'internet des objets. Grâce à la 6G, les débits seront encore plus rapides que la 5G par l'utilisation d'ondes nanométriques. L'internet des

objets devrait connaître un essor important. Ainsi La 6G permettrait de synchroniser l'ensemble des objets connectés à travers une communication ultra rapide et ultra sécurisée.

Nombreuses sont les spécificité techniques envisagées de la sixième génération [7] :

- **Elle devra bénéficier de technologies à spectre encore plus élevé** que celle de la 5G, par exemple via le térahertz et les communications optiques.
- **On aura besoin d'une architectures de réseau innovantes:** malgré que la 5G a une configurations de réseau plus efficaces, l'hétérogénéité des futures applications de réseau et le besoin de couverture 3D appellent de nouveaux paradigmes architecturaux sans cellule, basés sur l'intégration étroite de différentes technologies de communication, à la fois pour l'accès et le backhaul, et sur la désagrégation et la virtualisation des équipements réseau
- **Il faut intégrer de l'intelligence dans le réseau:** nous nous attendons à ce que la 6G apporte l'intelligence des installations informatiques centralisées aux terminaux, fournissant ainsi une implémentation concrète à des modèles d'apprentissage distribués qui ont été étudiés d'un point de vue théorique dans un contexte 5G.

On ne sait pas encore très bien ce que la 6G implique comme progrès après les grandes révolutions de la 5G. Mais elle comprendra des technologies pertinentes considérées comme trop immatures pour la 5G ou qui se situent en dehors du champ d'application défini de la 5G. Plus précisément, la manière dont les données sont collectées, traitées, transmises et consommées au sein du réseau sans fil sera un élément clé de la 6G. Ainsi la recherche sur la 6G devrait se pencher sur le problème de la transmission jusqu'à 1 Tbps par utilisateur. L'un des cas les plus extrêmes est celui du contrôle industriel, où seul un bit erroné sur un milliard de bits transmis avec une latence de 0,1 ms est autorisé est autorisé. En 6G, tous les calculs et l'intelligence spécifiques à l'utilisateur peuvent être déplacés vers le cloud. [8]

Beaucoup de cas d'utilisations sont envisageables [7] :

#### ❖ **Réalité augmentée (AR) et réalité virtuelle (VR)**

La prolifération des applications AR / VR épuisera le spectre 5G et nécessitera une capacité système supérieure à 1 Tbps, par opposition à la cible de 20 Gbps définie pour la 5G. De plus, pour répondre aux exigences de latence qui permettent une interaction utilisateur en temps réel dans l'environnement immersif, AR / VR ne peut pas être compressé (le codage et le décodage sont un processus qui prend du temps), ainsi le débit de données par utilisateur doit toucher le Gbps, contrairement à la cible 5G de 100 Mbps plus détendue.

#### ❖ **Téléprésence holographique (téléportation)**

les exigences du débit de la connexion pour un affichage holographique 3D: un hologramme brut, sans aucune compression, avec des couleurs, une parallaxe complète et 30 fps, nécessiterait 4,32 Tbps. L'exigence de latence atteindra les sous-ms, et des milliers d'angles de vue synchronisés seront nécessaires, par opposition aux quelques requis pour VR / AR.

#### ❖ **cybersanté**

La 6G révolutionnera le secteur des soins de santé, éliminant les barrières de temps et d'espace grâce à la chirurgie à distance et garantissant des optimisations du flux de travail des soins de santé.

#### ❖ **Connectivité omniprésente**

Les réseaux 6G fourniront plutôt une connectivité transparente et omniprésente dans une variété de contextes différents, correspondant aux exigences de qualité de service strictes dans les scénarios extérieurs et intérieurs avec une infrastructure résiliente et sensible aux coûts.

#### ❖ **industrie 4.0 et robotique**

La 6G va accélérer la révolution de l'Industrie 4.0 dont les bases ont été jetées par la 5G. Cela consistera en une transformation numérique de la fabrication via des systèmes cyber-physiques et des services IoT. Le dépassement des frontières entre l'usine réelle et l'espace informatique cyber permettra des diagnostics, une maintenance, une exploitation et des communications directes sur Internet de manière rentable, flexible et efficace.

#### ❖ **mobilité sans pilote**

La 6G va intensifier le développement et l'utilisation des véhicules connectés ( qui sont des objectifs de la 5G) grâce aux progrès du matériel, des logiciels et des nouvelles solutions de connectivité.

## Recherches sur la 6G

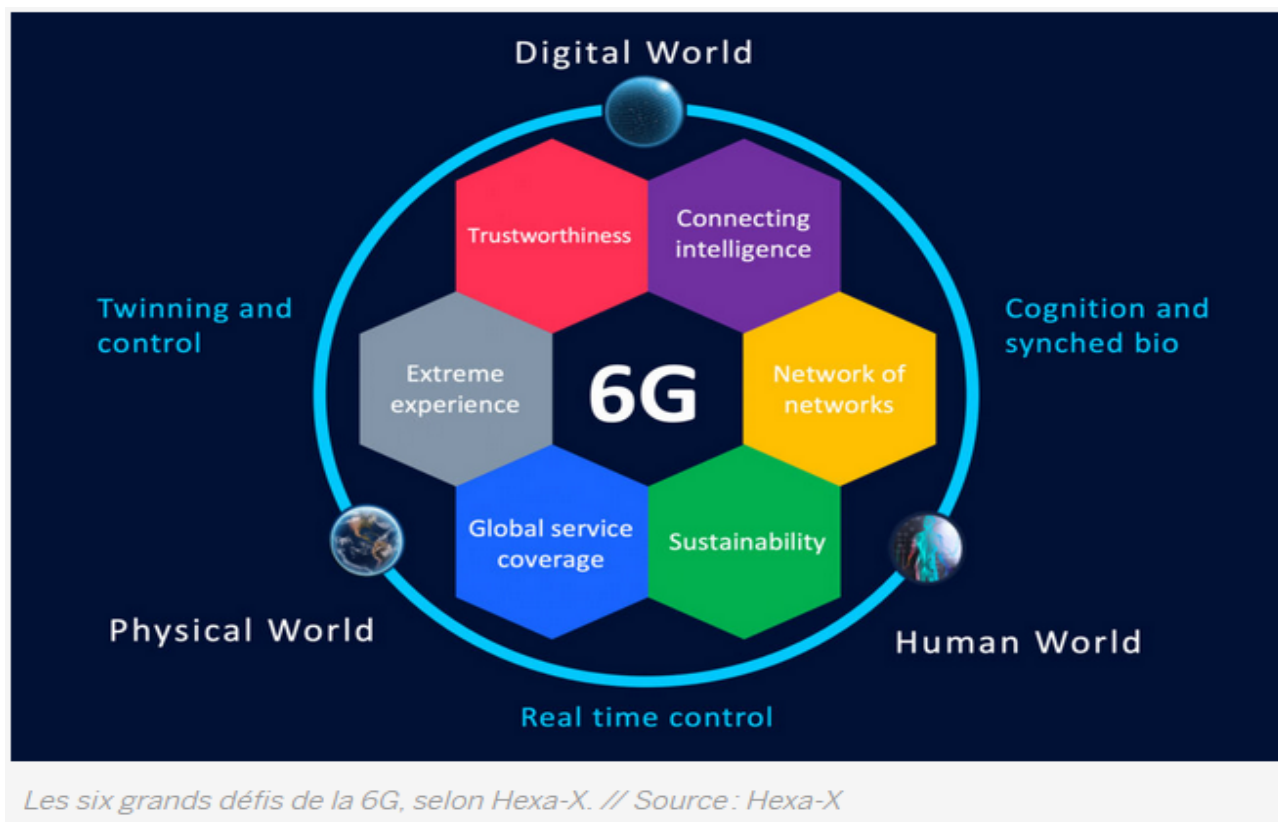
Bien que le déploiement de la 5G n'est pas encore achevé, beaucoup de pays à travers les opérateurs de téléphonie sont dans la course à la 6G. C'est dans ce cadre que l'Union Européenne, ne voulant plus rester en marge comme le cas de la 5G, a lancé un projet Hexa-X. Ce projet a pour ambition de tracer les sillons de la sixième génération.

C'est un consortium de 23 partenaires de 7 pays sous la direction de Nokia qui a cette lourde tâche de définir les spécificités de la 6G.



La vision de Hexa-X est de connecter les mondes humain, physique et numérique avec un tissu de catalyseurs clés de la 6 G [22]. Pour faire de cette vision une réalité, Hexa-X a identifié 6 principaux défis à relever :

1. Connecting intelligence
2. Network of networks
3. Sustainability
4. Global service coverage
5. Extreme experience
6. Trustworthiness



## Technologies de la 5G et perspectives pour la 6G

### Tour d'horizon des technologies de la 5G

Afin de mieux cerner les promesses de la 6G, il est nécessaire de faire un état de l'art sur des différentes technologies prévues aujourd'hui par la 5G. Sans rentrer dans une description de l'ensemble des technologies de la communication mobile, nous allons ici décrire les principaux axes de progrès, et donc les axes technologiquement prometteurs pour la suite.

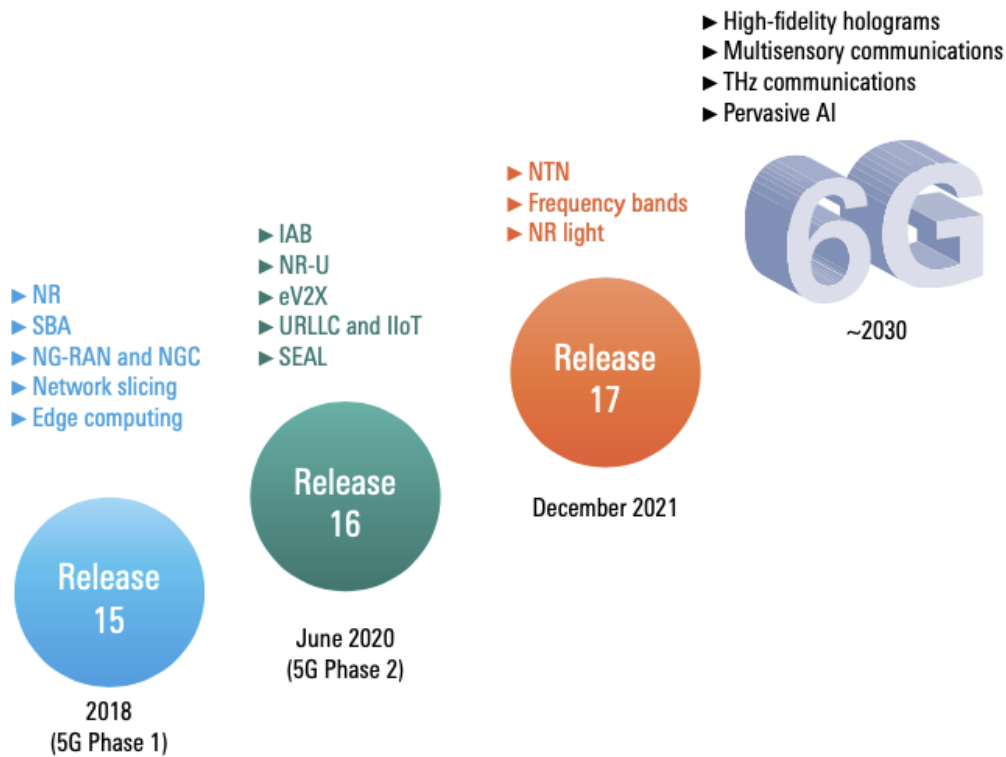


Figure : [14] 5G/6G White Paper

Les technologies 5G vont être déployées en 3 étapes : R15, R16 et R17. Les technologies R15 sont disponibles et mises en place depuis 2018 à la suite de la 4G LTE. Les technologies R16 sont celles mises en place depuis le dit « déploiement de la 5G » en 2020. Les technologies R17 sont les technologies qui seront mises en place avec la standalone 5G en 2022, ultime étape prévue à ce jour de la 5G.

La 5G inclus alors [14] :

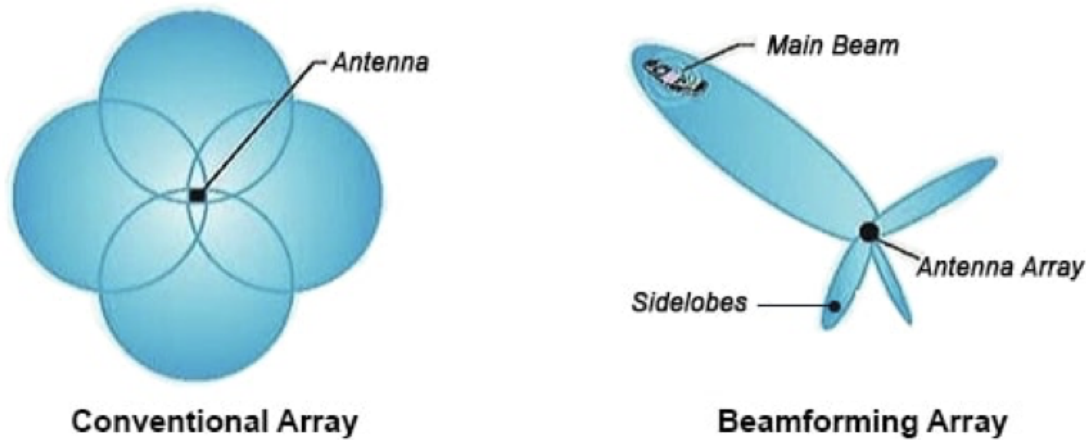


Figure : Beamforming (<https://www.everythingrf.com/community/what-is-beamforming>)

Des technologies installées depuis la 4G LTE dont notamment : le multiplexage en division orthogonale de fréquence [20], le multiplexage spatial MIMO à utilisateurs multiples [17], le beamforming (rayon d'onde orienté) [17], le *Dynamic Spectrum Sharing (DSS)* [17].

Des technologies nouvelles dont l'introduction du *mMIMO* (MIMO massif), de nouvelles méthodes de codage dont le low density parity check coding ou le codage polaire et le *beamforming* hybride combinant *beamforming* numérique et analogique. [14]

### Des technologies New Radio (NR) dont [14] :

- ❖ Les *Integrated Access and Backhaul (IAB)*, une méthode de partage des fréquences entre les communications avec les terminaux utilisateurs et entre les communications antennes. Ce sera possible grâce au déploiement de noeuds intelligents nouvelle génération (*gNBs*).
- ❖ le NR unlicensed (NR-U) qui inclut des technologies permettant d'optimiser l'utilisation des fréquences libres selon les interférences en plus des fréquences propriétaires (les fréquences libres devenant de plus en plus nombreuses à être exploitables)
- ❖ De nouvelles bandes de fréquences sont exploitées : de 7 GHz à 24 GHz et au-dessus de 53 GHz.
- ❖ Des protocoles améliorés et optimisés comme la duplication PDCP qui améliore la fiabilité par la redondance, la priorisation intra-UE qui optimise la latence en jouant sur la priorité du message, le référencement temporel TSN qui améliore la synchronisation temporelle entre l'émetteur et le récepteur.

### Des technologies de l'architecture du réseau dont [14] :

- ❖ Des améliorations de la connectivité Vehicle-to-Everything (V2X) pour une meilleure mobilité dans le réseau : une amélioration de la communication entre le terminal et les antennes et une meilleure répartition des flux et de la charge entre les calculateurs locaux.
- ❖ Les débuts des technologies de *network automation*, de *edge computing* et de *network slicing* : voir *Espoirs technologiques de la 6G* pour le développement des ces technologies.

### D'autres technologies dont [14] :

- ❖ L'expérimentation des *Self Organizing Network (SON)* en boucle ouverte avec des algorithmes d'amélioration développés par les humains (voir 2. Espoirs technologiques de la 6G, 2.1. L'entrée en jeu de l'intelligence artificielle pour le SON en boucle fermé)
- ❖ De nombreuses améliorations en termes de sécurité du réseau dont des améliorations concernant l'authentification d'un nœud ou d'un terminal sur le réseau, concernant les attaques *Denial-of-Service (DoS)*...

## Espoirs technologiques de la 6G

Dans cette partie, de nombreuses pistes de réflexions sur la 6G sont proposées. L'objectif de lancement de la 6G étant espéré autour de 2030, aucune norme, aucun accord n'a encore été fixé entre les industriels et les instances internationales. Certaines technologies prometteuses ont une probabilité d'être mises en application plus grandes que d'autres : le travail suivant est donc un travail de projection et combine les projections de différents points de vue. Il est intéressant de remarquer que les projections se recoupent.

### L'entrée en jeu de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle devra être implémentée à tous les niveaux de la chaîne de communication pour offrir au réseau une meilleure efficacité et une meilleure fiabilité.

L'intelligence artificielle pourra adapter les protocoles de communication à utiliser selon le contexte : dans un contexte à la connexion stable, utiliser des protocoles rapides ; dans un contexte à connexion instable. [13]

Elle saura adapter l'interface de connexion au contexte d'utilisation [19], c'est-à-dire choisir la bande de fréquence la plus adaptée, l'antenne la plus adaptée, le mode de connexion le plus adapté (réseau satellite, réseau WiFi, réseaux mobile, autres réseaux longues portées...)

Elle pourra exploiter les technologies de partition du réseau en sous-réseaux locaux (*network slicing*) [18] et de réseaux distribués (*distributed network*) [19] pour optimiser le

chemin de l'information : favoriser des data-centers locaux pour des utilisateurs locaux, et prendre en compte l'encombrement local du réseau.

Elle permettra d'anticiper un chemin optimal pour l'information en se fondant sur les habitudes du réseau. L'apprentissage profond en particulier permet en effet de générer des métriques (ou paramètres) utiles à la connaissance des réseaux sans utiliser de modèle mathématique centralisé grâce au système de *trust networking* [19] (voir plus bas dans *Une nouvelle architecture* le paragraphe sur le *trust networking*...). En anticipant ces paramètres, le meilleur chemin peut-être mesuré, et ceux localement de façon décentralisé [18]

Le réseau pourra anticiper, analyser, proposer des améliorations et s'améliorer tout seul grâce à l'intelligence artificielle. C'est le principe du *Self Organizing Network* (SON) développé depuis la LTE mais jamais sans intervention humaine (jamais en boucle fermée) implémenté maintenant grâce à l'intelligence artificielle [18] [14]

### **De nouvelles fréquences (RF et optiques)**

De nouvelles couches physiques seront exploitées : les hyperfréquences (Gigahertz, Terahertz et plus). Celles-ci incluent les fréquences visibles (les VLC ou *Visible Light Communication* ou communication en lumière visible). [13]

Les ondes millimétriques, sont aujourd'hui plus disponibles, sont plus performantes et permettent d'équiper du matériel plus petit. La lumière visible en particulier permet d'exploiter des gammes de fréquences abondantes et encore disponibles pour la transmission d'information et pourra être exploitée dans les petites zones densément peuplées en terminaux (dont terminaux *IoT*). Par exemple dans les hôpitaux connectés où les patients peuvent être bardés de capteurs [21] et où ces capteurs atteindront peut-être la taille d'une cellule. [15]

La limite actuelle est fixée par les capacités des composants électroniques : leur consommation reste importante et les limites physiques sont difficiles à contourner en hyperfréquences [16]. La faible portée dans l'air de ces ondes rend aussi plus difficile l'usage. [15] [14] [13]

### **Une nouvelle architecture**

L'architecture va évoluer et sera pensée selon une logique de gestion holistique du réseau de communication. On appelle cela une gestion C4 (communication, computation, caching and control ou communication, calcul, sauvegarde et contrôle), c'est-à-dire que l'architecture prendra en compte ces quatre domaines du réseau pour s'optimiser. Concrètement, le stockage et les calculs pourront être répartis dans le réseau grâce à l'IA selon la logique la plus optimale. [13]

Le réseau peut-être partitionné (*network slicing*) et (re)configuré entièrement virtuellement grâce à la virtualisation du réseau. Il pourra ainsi être optimisé automatiquement grâce à



l'IA. Il sera pour cela de moins en moins physiquement partitionné, ce qui permet une plus grande souplesse. [18]

Les calculs d'IA permettant d'optimiser le réseau pourront être distribués (voir *Un nouveau rapport à la sécurité* plus loin pour le principe) pour limiter le flux de données en transit et répartir les calculs selon les capacités. [18]

Grâce au *edge computing*, selon l'application, les calculs seront répartis grâce à l'IA de façon optimale entre les data-centers et le terminal (smartphone, ordinateur...). Ainsi par exemple, selon la puissance requise et la connexion disponible, un logiciel pourra faire appel à un data-center pour réaliser des calculs. [15]

Le *trust networking* serait un système consistant en l'attribution d'une note de confiance à un nœud du réseau. Cette note permettrait de déterminer son efficacité, sa fiabilité, sa puissance... autrement dit la qualité d'expérience (*Quality of Experience* ou *QoE*) [14] pour déterminer si le passage de l'information par ce nœud serait intéressant ou non. Ce principe serait intéressant et à la base d'un réseau auto-configurable. Il va cependant être difficile à concevoir en pratique [Ylantilia]. La collecte de ce type de KPI est expérimenté en 5G pour préparer les réseaux intelligents [14]

### **Des nouvelles infrastructures**

Il sera possible de démultiplier les points d'accès et de réaliser une couverture 3D (*3D coverage*), c'est à dire un maillage de points d'accès incluant : points d'accès terrestres (antennes mobiles, points d'accès locaux...) et point d'accès aériens (satellites, ballons, drones...). Ce maillage pourra doublement améliorer la connectivité : meilleure couverture (zones faiblement peuplées...) et maximisation des voies de secours (ballons et satellites en cas de catastrophe ayant détruit localement le réseau). [13]

Le *distributed laser charging* permettrait à de petits objets connectés de ne pas nécessiter de batterie. Sans être passifs, ils seraient chargés à distance grâce au réseau de communication qui pourrait fournir à 10m des puissances allant jusqu'à 2W. [13]

### **Un nouveau rapport à la sécurité**

La 6G sera pensée dès les premiers pas de sa création pour offrir des niveaux de sécurité élevés sans excessivement impacter l'efficacité.

Le cryptage homomorphe permettra de transmettre des données sensibles cryptées à traiter sur un moteur distant mais sans avoir besoin de la décrypter avant traitement. Avec ce cryptage, une information traitée cryptée donne le même résultat qu'une information traitée non cryptée. C'est donc une méthode de cryptage qui rend l'information incompréhensible pour tout non-destinataire mais qui permet toujours à une intelligence artificielle d'en extraire une information. Ceci sera particulièrement utile dans un contexte de smart-cities où de nombreuses données personnelles sur l'utilisation du réseau

pourront être générées et seront utilisées par l'IA. Cette technique a aujourd'hui des limites en termes d'efficacité de calcul. [Ylantilia] [13]

Le machine learning distribué est une technique de machine learning dans lequel le résultat de multiples mini-réseaux de neurones seraient exécutés localement sur des données et transmettra le résultat à un réseau de neurone central agrégateur. Cette méthode permet de ne pas faire transiter les données personnelles dans le réseaux, mais seulement le résultat des exécutions locales. Cette méthode à l'avantage d'offrir des garanties en termes de sécurité (en plus d'être optimisée en termes de flux de données). [18]

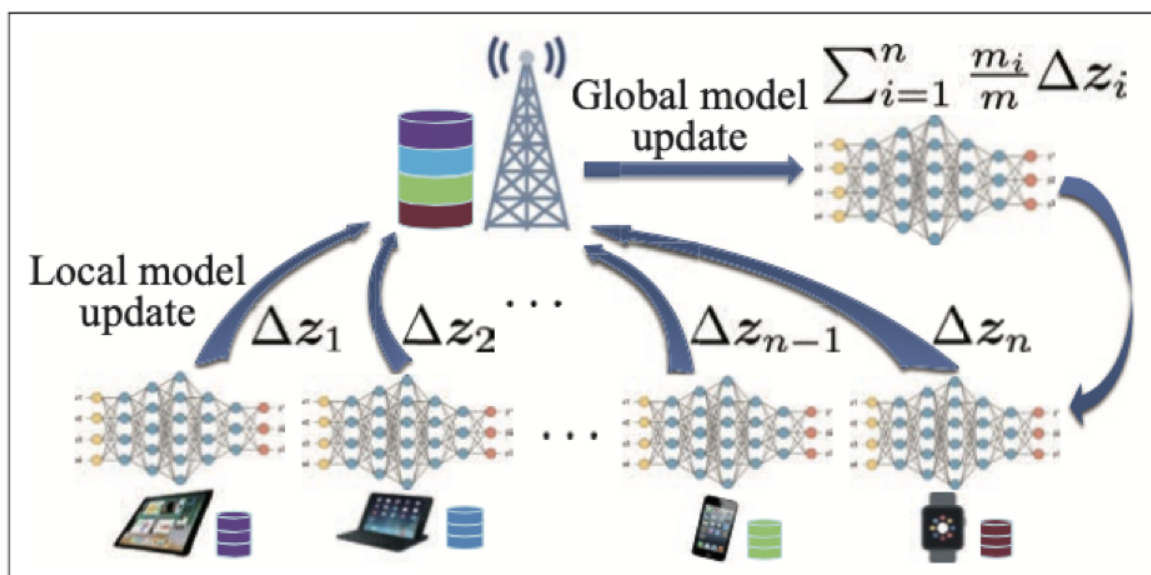


Figure : [18] Machine learning distribué

Pour sécuriser un réseau 6G très hétérogène (aux nombreux acteurs et nœuds), des systèmes d'authentification basés sur les blockchains permettront à un nœud du réseau d'être identifié localement par des nœuds alentours et donc sans avoir besoin d'un gestionnaire universel. [13]

Pour améliorer les performances du réseau, l'IA pourrait adapter le cryptage des données au contexte et à l'environnement. Dans un environnement hostile et pour des données sensibles, l'IA cryptera avec les meilleures méthodes bien que la méthode de cryptage sera la très gourmande en calcul. Inversement, dans un environnement sûr et pour des données non sensibles, l'IA pourra favoriser un cryptage plus léger et rapide. [Ylantilia]

Les méthodes de cryptographie de la 6G doivent anticiper l'arrivée de l'ère post-quantique. Si certaines méthodes de cryptage semblent aujourd'hui pouvoir résister à l'arrivée de l'informatique quantique, l'introduction en cas de nécessité de nouvelles méthodes de cryptage résistantes pourrait être coûteuse en efficacité et en argent. [19]

## Sources

- [1] Curran, Claire *What Will 5G Mean for the Environment?* January 30, 2020  
[https://jsis.washington.edu/news/what-will-5g-mean-for-the-environment/#\\_ftn15](https://jsis.washington.edu/news/what-will-5g-mean-for-the-environment/#_ftn15)
- [2] ARCEP Les enjeux de la 5G Mars 2017
- [3] Poireault, Kevin Comment la 5G veut transformer les usines ? 13/02/2020  
<https://www.industrie-techno.com/article/dossier-comment-la-5g-veut-transformer-les-usines.58966>
- [4] Institut Sapiens La 5G au service du secteur de la santé de demain Juillet 2020
- [5] Glyde Editorial Team Smartphone Trends 2019 – Buying Pre-Owned for the Environment August 25, 2019  
<https://glyde.com/blog/2019/08/25/why-choose-used-smartphones/>
- [6] Awad, Rany Maîtriser l'accroissement du coût énergétique de la 5G Février 2020  
<https://www.sofrecom.com/fr/publications/maitriser-l-accroissement-du-cout-energetique-de-la-5g>
- [7] Marco Giordani et al., Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies, IEEE communication magazine, Mars 2020
- [8] Keys drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence, Research Vision 1, Septembre 2019
- [9] Ministère de l'Économie, LA nouvelle France industrielle, septembre 2014  
<nouvelle-france-industrielle-sept-2014.pdf> ([economie.gouv.fr](http://economie.gouv.fr))
- [10] Ericsson, Connected ports, 2021  
[A guide to making ports smarter with private cellular technology - Ericsson](#)
- [11] journaldunet, 5G: déploiement, usages, fonctionnement, Célia Garcia-Monter, 26/03/21  
[5G : déploiement, usages, fonctionnement \(journaldunet.fr\)](#)
- [12] expertise, La 5G dans l'industrie 4.0 va bouleverser les process de fabrication,  
["La 5G dans l'industrie 4.0 va bouleverser les process de fabrication" \(boschrexroth.fr\)](#)
- [13] E. C. Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Kténas, N. Cassiau, L. Maret, C. Dehos, *6G : The Next Frontier*, Août 2019
- [14] Dr. N. D. Tripathi, Dr. J.H. Reed (ROHDE&SCHWARZ), *5G EVOLUTION – ON THE PATH TO 6G*, Mars 2020

- 
- [15] University of Oulu, *KEY DRIVERS AND RESEARCH CHALLENGES FOR 6G UBIQUITOUS WIRELESS INTELLIGENCE*, Septembre 2019
- [16] J. Bittebierre, *cours Hyperfréquences - Électif 2A Centrale Marseille*, 2019
- [17] A. Khalighi, *cours Réseaux de Télécommunications - SISN 2A Centrale Marseille*, 2021
- [18] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, *The Roadmap to 6G : AI Empowered Wireless Networks*, Aout 2019
- [19] M.Ylianttila, R. Kantola, A.Gurtov, T.Hewa, *6G White paper : Research challenges for Trust, Security and Privacy*, Avril 2020
- [20] S. Bourennane, *cours Télécommunications - SISN 2A Centrale Marseille*, 2021
- [21] J. Hasan, M.-A. Khalighi, J. Garcia, *High-Rate Full-Duplex Optical Wireless Data Transmission for Medical Applications*, mai 2020
- [22] Projet Hexa-X, <https://hexa-x.eu/>