



Comité Stratégique de filière
Infrastructures numériques
Groupe de Travail 5G

Septembre 2020

Contribution et éclairage du CSF Infrastructures numériques sur la question environnementale associée au numérique et à la 5G

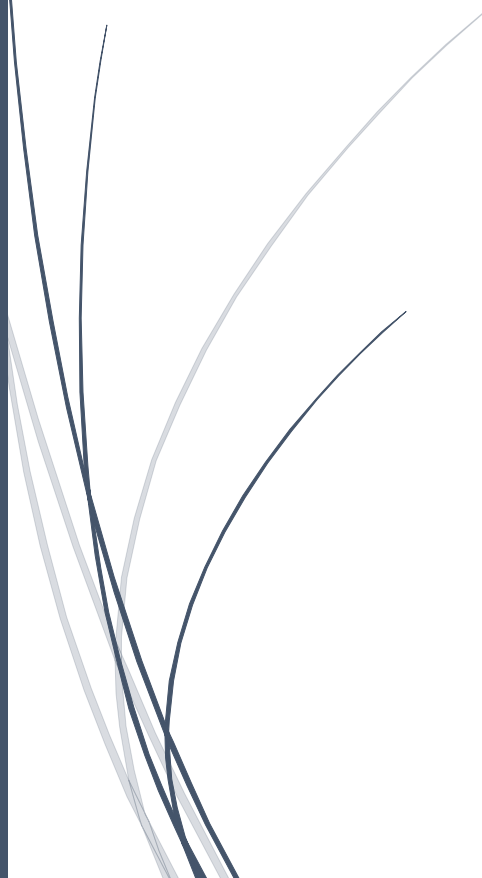


Table des matières

<i>Introduction.....</i>	<i>2</i>
1. Qu'est-ce que la 5G ?	4
2. Les consommations énergétiques et l'impact carbone du numérique : état des lieux.....	7
A. <i>Une tendance globale à la stabilité.....</i>	<i>7</i>
B. <i>Les spécificités françaises : cas pratique du réseau Orange</i>	<i>13</i>
3. La 5G et son rôle dans l'évolution de l'impact du numérique	17
A. <i>Une prise en compte native des enjeux energetiques.....</i>	<i>17</i>
<i>Une normalisation soucieuse d'efficacité énergétique.....</i>	<i>17</i>
<i>Des efforts d'optimisation sur toute la chaîne.....</i>	<i>17</i>
B. <i>Les impacts actuels et futurs de la 5G sur la consommation énergétique des réseaux.....</i>	<i>18</i>
C. <i>Les actions possibles pour contenir et faire baisser l'empreinte carbone de la 5G</i>	<i>20</i>
D. <i>Le remplacement des réseaux et des terminaux.....</i>	<i>21</i>
E. <i>Les engagements individuels et collectifs</i>	<i>22</i>
F. <i>Les infrastructures de calcul.....</i>	<i>23</i>
4. Les usages	24
A. <i>Des bénéfices pour d'autres secteurs.....</i>	<i>24</i>
B. <i>D'une couverture totale à une couverture adaptée aux usages : Le cas de la SNCF.....</i>	<i>26</i>
<i>Usages et acceptabilité.....</i>	<i>26</i>
<i>Flux de personnes et flux de données : coexistence et optimisation</i>	<i>27</i>
<i>Des retombées environnementales et sociales directes.....</i>	<i>29</i>
5. Conclusions	32
<i>GLOSSAIRE.....</i>	<i>33</i>

Contribution et éclairage du CSF Infrastructures numériques sur la question environnementale associée au numérique et à la 5G

Coordinateurs : Viktor Arvidsson (Ericsson), Stella Morabito (AFNUM)

Contributeurs : Mathieu Lagrange (b<>com), Pascal Guiheneuf (CFDT), Viktor Arvidsson (Ericsson), Gérard Memmi (IMT), Christophe Grangeat (Nokia), Quentin Fousson (Orange), Eric Hardouin (Orange), Samuli Vaija (Orange), Augustin Chaigne (Samsung), Mathieu Belouar (SNCF), Sébastien Kaiser (SNCF), Marc Kieken (SNCF), Hacène Lahreche (SNCF), Olivier Audouin (Systematic)

Comité de relecture : Viktor Arvidsson (Ericsson), Mathieu Belouar (SNCF), Dominique Chane-Yook (CSF Infrastructures Numériques), Pierre Dubois (Orange), Alexandre Galdin (FFT), Clara Grojean (AFNUM), Pascal Guiheneuf (CFDT), Eric Hardouin (Orange), Sébastien Kaiser (SNCF), Marc Kieken (SNCF), Hacène Lahreche (SNCF), Michel Malek (Images & Réseaux), Gérard Memmi (IMT), Stella Morabito (AFNUM)

Ce document constitue une contribution des acteurs industriels de la filière des infrastructures numériques aux débats qui traversent la société française à propos de la question environnementale associée au numérique et à la 5G. Il ne reflète que la vision de ses auteurs.

INTRODUCTION

La préservation de la biodiversité et de notre mode de vie, ainsi que la transmission de ces richesses aux générations futures impliquent la contribution de chacun d'entre nous, en tant qu'individus ou en tant que membres d'une organisation ou d'une entreprise. Beaucoup de défis sont à relever : le réchauffement climatique, comme la réduction de l'utilisation de nos ressources.

Réduire les impacts de l'activité humaine sur la planète : la transition énergétique et environnementale peut heurter la dimension économique et l'organisation-même de nos sociétés. Au lieu d'opposer les deux approches, nous nous demandons comment aborder la question de l'impact environnemental de la 5G de manière constructive et positive. D'autres exemples de cette approche existent déjà : la rénovation énergétique des bâtiments représente, par exemple, une opportunité gagnant-gagnant à la fois au niveau énergétique et économique. Qu'en est-il pour l'économie numérique et plus particulièrement pour la connectivité fixe et mobile ? Et pour la 5G ? Celle-ci peut-elle en constituer un pilier ?

En ce qui concerne plus spécifiquement la 5G, la tendance a été de mettre l'accent sur les nouveaux cas d'usage et les innovations technologiques associées, mais il paraît crucial de se pencher également sur d'autres aspects et en particulier sur la question environnementale, qui est au cœur de nombreux débats.

On assiste depuis quelques mois à une remise en question croissante dans les médias du bien-fondé du déploiement de la 5G, notamment au motif qu'elle aurait des impacts négatifs sur l'environnement pour des bénéfices discutables pour le grand public. Les prises de position en ce sens s'appuient souvent sur des arguments erronés, qu'il convient de corriger ou compléter pour un débat de société sain. En tant qu'organisme rassemblant les acteurs de la filière des télécommunications en France, le CSF Infrastructures numériques souhaite par ce livre blanc apporter sa vision de spécialiste de ce sujet complexe, et en particulier corriger certaines idées fausses qui circulent sur la 5G.

Sur les questions liées à l'environnement, les inquiétudes s'articulent en général autour de deux points :

- Le numérique, et en particulier les réseaux mobiles, pourrait engendrer une spirale de consommation énergétique ascendante et difficilement contrôlable.
- Quand bien même la technologie 5G serait plus efficace que les générations précédentes, elle contribuerait à accroître les usages bien au-delà du gain d'efficacité qu'elle apporte et serait au final l'outil d'une explosion de la consommation énergétique (« effet rebond »).

Dans cette note nous aborderons les aspects suivants :

- Les principales caractéristiques techniques de la 5G.
- Un état des lieux de la consommation énergétique, et des émissions de CO₂, du numérique, dans le monde et en France.
- Les perspectives d'évolution de la consommation énergétique et en particulier celle des réseaux mobiles et de la 5G
- Les usages, leur acceptabilité et leur évolution

Nous pensons que la 5G ne doit être abordée seule mais qu'elle doit être appréhendée dans le cadre d'un écosystème plus large qui évalue également les bénéfices qu'elle peut apporter :

- **Les réseaux** : la 5G peut remplacer (plus efficacement) des services rendus par des générations précédentes ;
- **Le numérique** : les usages 5G peuvent aussi avoir un impact positif sur d'autres usages, comme l'évolution vers des terminaux au format plus petit et moins consommateurs ;
- **La société et les secteurs industriels** : la 5G peut contribuer positivement à la baisse des émissions d'autres secteurs.

1. QU'EST-CE QUE LA 5G ?

La 5G est la 5^{ème} génération de système mobile, conçue pour répondre aux besoins croissants de connecter plus d'objets avec des performances individualisées, tout en répondant aux besoins d'efficacité économique et écologique et en utilisant les dernières avancées technologiques. La 5G vise une grande diversité d'applications, incluant le **très haut débit mobile** (eMBB), la **connexion d'un nombre massif d'objets connectés** (mMTC) et **les communications critiques à très faible latence et très haute fiabilité** (URLLC). Si un réseau 5G regroupant toutes ses fonctionnalités n'est pas attendu avant 2023 ou 2024 (la normalisation est toujours en cours), les premiers équipements sont testés et déployés depuis 2019 dans différents pays sur tous les continents. La Corée par exemple a activé les premiers abonnements 5G grand public en avril 2019.

Si les performances accrues de la 5G ouvrent la voie à de nouvelles applications, dont la plupart restent à imaginer, le premier objectif de la 5G est de maintenir la qualité d'expérience actuelle sur les applications existantes à un coût économique et énergétique sous contrôle, en dépit de l'augmentation constante du trafic sur les réseaux mobiles (entre +30% et +50% par an). En effet, sans la 5G le réseau 4G devrait être augmenté pour écouler ce trafic croissant, ce qui s'effectuerait de manière bien moins efficace, notamment parce qu'il demanderait d'ajouter de nouveaux sites d'antennes (voir la section 3 pour une comparaison de ces deux scénarios en termes de consommation énergétique).

Dans une première phase, la 5G sera majoritairement activée sur des sites 4G existants. Ainsi, l'idée d'un déploiement massif d'antennes 5G supplémentaires est très éloignée de la réalité. Une densification liée à la 5G sera a priori ponctuelle et ciblée. De plus, la 5G s'inscrivant pleinement dans la continuité de la 4G, les équipements matériels et logiciels seront communs.

La 5G combine l'utilisation d'**antennes dites massives** (*massive MIMO antennas*¹ qui auront potentiellement jusqu'à plusieurs centaines d'éléments), qui ont pour but d'augmenter la directivité, avec des **fréquences plus élevées** (3,5 GHz et 26 GHz en particulier). Les fréquences dans les bandes des 3,5 GHz et des 26 GHz sont le fruit d'une harmonisation internationale. Elles vont permettre d'utiliser des largeurs de bande plus importantes et ainsi de répondre à la demande de débits plus élevés. Les antennes MIMO émettent le signal uniquement dans la direction du mobile en communication (on parle de faisceaux), plutôt que dans un large secteur comme le font les antennes à faisceau fixe communément utilisées en 4G. Cette caractéristique augmente significativement le débit délivré par une antenne, car plusieurs faisceaux peuvent être utilisés simultanément, chacun pouvant réutiliser les fréquences de la cellule.

Quelques considérations techniques

- Plusieurs types d'antennes sont utilisées dans les réseaux mobiles. Les antennes **à faisceau fixe** peuvent être omnidirectionnelles, c'est-à-dire qu'elles émettent dans un secteur horizontal de 360°, ou directives, c'est-à-dire qu'elles émettent dans un secteur horizontal plus restreint, typiquement

¹ Voir glossaire en fin de document

90° ou 65°. Plus récemment, les réseaux mobiles utilisent également des antennes à **faisceau orientable**, appelées aussi massive MIMO. Dans ce cas, le faisceau s'adapte aux besoins des utilisateurs. Cela permet de limiter les émissions dans les directions où il n'y a pas besoin de passer de communication. La directivité des faisceaux évite l'affaiblissement du signal (*fading*) et donc permet de décroître fortement la puissance émise.

- La puissance de réception dépend de la fréquence mais également de l'inverse de la distance de transmission au carré. Plus la fréquence augmente, plus le signal a du mal à se propager. La bande des 26 GHz, dite millimétrique, sera donc réservée aux transmissions à faible portée, de l'ordre de quelques centaines de mètres.

Au-delà des aspects radio, la 5G repose sur des **technologies logicielles** provenant du cloud et des systèmes d'information, la **virtualisation et le réseau défini par logiciel**. On peut ainsi tirer parti d'une architecture basée sur des traitements réalisés par des serveurs situés en périphérie de réseau, ce que l'on qualifie de **Mobile Edge Computing**², pour assurer une très faible latence aux applications qui nécessitent des traitements en temps réel (ex. véhicule autonome, télé-chirurgie).

Aujourd'hui, la très vaste majorité des déploiements 5G sont réalisés selon l'option 3GPP³ dite *Non-StandAlone (NSA Mode*, voir la Figure 1 ci-dessous) par laquelle les smartphones compatibles 5G se connectant aux fréquences 5G, utilisent toujours préalablement et systématiquement le réseau 4G pour toutes les interactions liées à la gestion des sessions utilisateur et à la sécurité des communications.

En conséquence, ces déploiements sont réalisés selon une logique d'ajout de capacité en exploitant de manière efficace de nouvelles bandes de fréquence, la bande 3,5 GHz étant la première envisagée. Il s'agit de mettre à jour les sites radio 4G avec des antennes *massive MIMO* 5G, le tout se connectant sur le cœur de réseau mobile 4G existant.

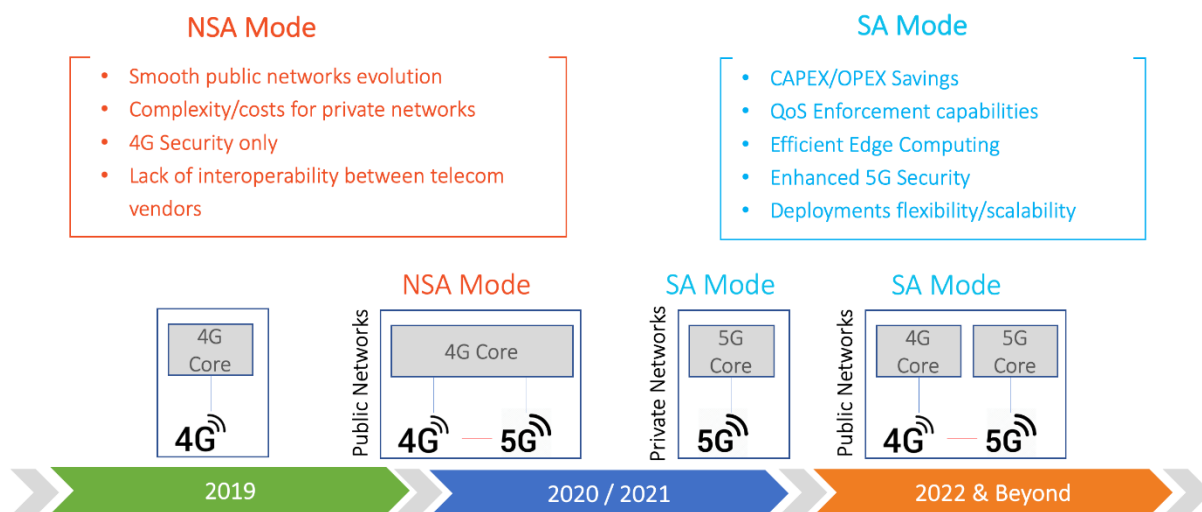


Figure 1: Plan de migration 5G de l'industrie, source interne b<>com

² Voir le glossaire en fin de document

³ Ibid. - glossaire

Dans un second temps, les opérateurs introduiront l'architecture *Standalone* (SA Mode ou 5G-SA), où la 5G-NR (5G-New Radio) est contrôlée par un cœur de réseau 5G (5GC) construit et pensé en fonction des technologies utilisées dans le monde du *cloud computing*.

Cette nouvelle architecture présente par nature de fortes affinités avec les principes dits *Cloud Native* (conçus pour le cloud) et a aussi été spécifiée en considérant les concepts de virtualisation des fonctions réseau (NFV – *Network Function Virtualisation*⁴) et de réseau programmable (SDN – *Software Defined Networks*⁵), établissant une base technologique solide pour un usage optimisé des infrastructures numériques sous-jacentes (des serveurs informatiques, des routeurs ou commutateurs réseau banalisés), celles-ci étant partagées entre plusieurs usagers. Il s'agit donc d'un changement de paradigme majeur, où les équipements matériels statiques déployés dans le cadre des réseaux 4G sont virtualisés, c'est-à-dire remplacés par des composants logiciels distribués dont le cycle de vie est orchestré par les outils de gestion réseau des opérateurs.

Cette nouvelle manière d'opérer les réseaux permettra aux opérateurs d'offrir à la demande des services de connectivité sur mesure à leurs clients, notamment industriels, sur des zones géographiques précises. Il s'agit d'une révolution du même ordre que celle vécue par l'industrie de l'informatique avec le *Cloud Computing*, qui ouvre la porte aux services de réseaux à la demande.

⁴ Ibid. - glossaire

⁵ Ibid. - glossaire

2. LES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET L'IMPACT CARBONE DU NUMERIQUE : ETAT DES LIEUX

Le Numérique représente 1,4% des émissions carbone globales pour 3,6%⁶ de la consommation électrique. L'évaluation de l'empreinte carbone du numérique fait cependant polémique pour deux principales raisons : les données utilisées pour la modélisation sont parfois parcellaires ou datées et les méthodologies d'évaluation sont disparates et font l'objet de controverses. Il n'y a donc pas d'étude récente, exhaustive et basée sur une méthodologie partagée sur laquelle pouvoir fonder une analyse unanime. [L'initiative du consortium NegaOctet](#), dont les travaux sont en cours, vise à consolider une évaluation des impacts environnementaux des services numériques sur des bases scientifiques.

A. UNE TENDANCE GLOBALE A LA STABILITE

Certaines études⁷ montrent une stabilité de l'empreinte carbone du numérique ces dernières années, ce qui semble indiquer un « découplage », voire une décorrélation, entre le trafic réseau et les émissions carbone : le trafic croît de manière exponentielle alors que l'impact carbone reste relativement stable⁸.

La Figure 2. Ci-dessous illustre cette décorrélation. Elle croise l'impact carbone du secteur des TIC (réseaux, *data centers* et terminaux) avec l'évolution du trafic pour en déduire que, depuis 2013, nonobstant une augmentation exponentielle du trafic de données, l'impact carbone reste stable, voire décroît légèrement.

⁶ Source : Ericsson "A quick Guide to your digital carbon footprint", 2020, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/industrylib/reports/a-quick-guide-to-your-digital-carbon-footprint>

⁷ Par exemple le rapport Ericsson « A quick Guide to your digital carbon footprint » (voir lien ci-dessus) ainsi que le rapport ITU, https://www.itu.int/en/mediacentre/Documents/Documents/GSMA_IP_SBT-report_WEB-SINGLE.pdf

⁸ S'il y a corrélation, c'est plutôt entre les émissions carbone et le nombre d'utilisateurs, la connexion d'un nouveau foyer en fibre optique ou le rajout d'une antenne mobile pour connecter de nouveaux utilisateurs s'inscrit dans cette logique. Dans la phase d'acquisition de nouveaux utilisateurs on parlera alors d'une croissance linéaire (tout à fait maîtrisée si nous considérons que nos populations restent stables, ou pour certains pays suivent également des courbes descendantes).

Carbon footprint of ICT and data traffic development

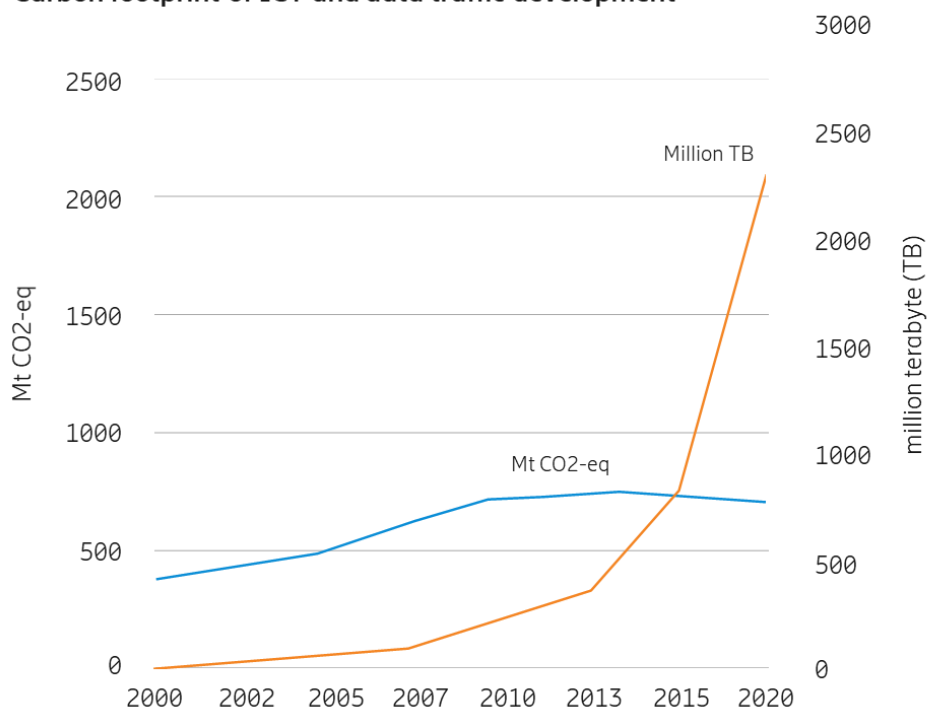


Fig 1.

Figure 2 - Source : Ericsson, « A quick Guide to your digital carbon footprint », <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/industrylib/reports/a-quick-guide-to-your-digital-carbon-footprint>

La tendance à la décorrélation entre consommation énergétique et augmentation des usages, apparaît par ailleurs dans un rapport l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) dédié à la consommation énergétique des *data centers* datant de de juin 2020⁹ dont nous avons extrait la figure ci-dessous. On peut y voir que, nonobstant l'augmentation du trafic internet et du volume de travail des data centers la consommation énergétique de ces derniers reste stable :

:

⁹ <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks#resources>

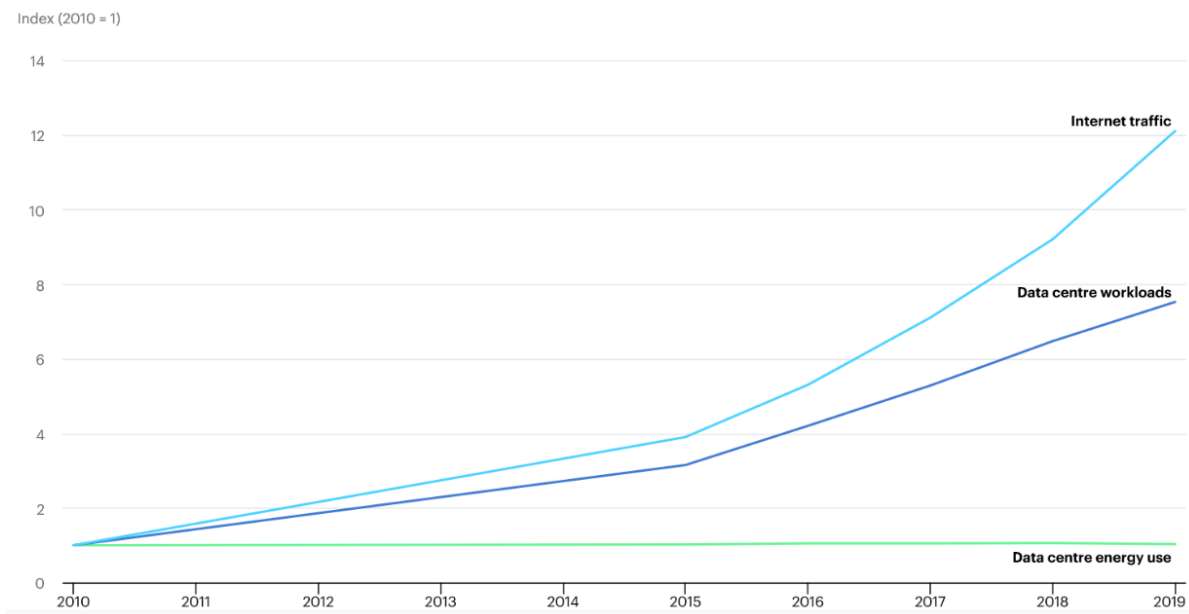


Figure 3 – Source : IEA (2020), *Data Centres and Data Transmission Networks*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

La décorrélation entre l’empreinte carbone ou la consommation énergétique et l’augmentation des usages ne fait toutefois pas consensus. Par exemple, l’étude GreenIT.fr sur les impacts environnementaux du numérique en France¹⁰ estime des émissions de gaz à effet de serre du numérique à hauteur de 5,2% des émissions totales de gaz à effet de serre.

Il faut cependant noter qu’un certain nombre de rapports reposent en partie sur des données parcellaires et datées. A titre d’exemple, une référence fréquente est l’article des chercheurs [Andrae & Edler, « On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 »](#), qui date de 2015 mais utilise des données de 2010 ou plus anciennes.

Au-delà de cette première approche globale, il nous paraît aussi utile de pousser un peu plus loin l’analyse, et d’explorer deux autres dimensions :

- la répartition des émissions carbone par grande catégorie du numérique,
- la répartition entre émissions de carbone résultantes des phases de production et transport des produits et émissions de carbone résultantes de la phase d’utilisation.

Les deux schémas ci-dessous proviennent d’une étude Ericsson de 2020¹¹.

Le schéma ci-dessous montre que la consommation énergétique des réseaux est nettement inférieure à celle des terminaux mobiles et du même ordre de grandeur que celle des data centers. Par ailleurs des

¹⁰ GreenIT, « Quels sont les impacts environnementaux du Numérique en France, 23 juin 2020, <https://www.greenit.fr/2020/06/23/quels-sont-les-impacts-environnementaux-du-numerique-en-france/>

¹¹ <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/industry/industry-lab/reports/a-quick-guide-to-your-digital-carbon-footprint>

terminaux tels que les téléviseurs (et leurs périphériques associés) ou les fermes de serveurs pour les cryptomonnaies peuvent être très consommateurs.

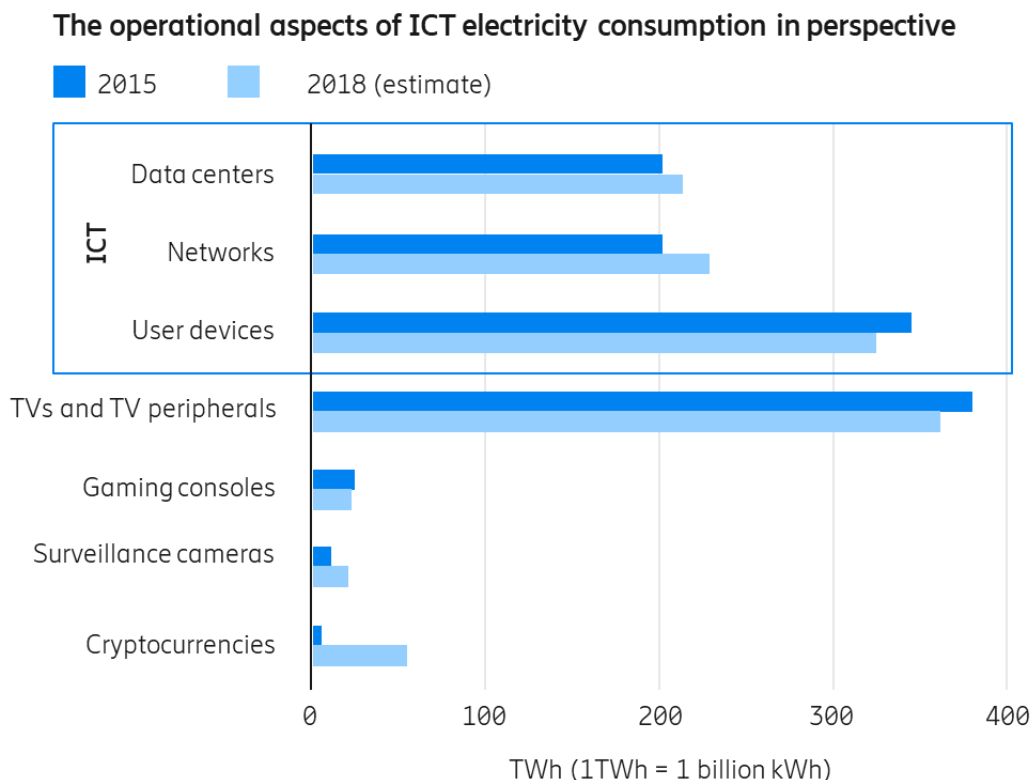
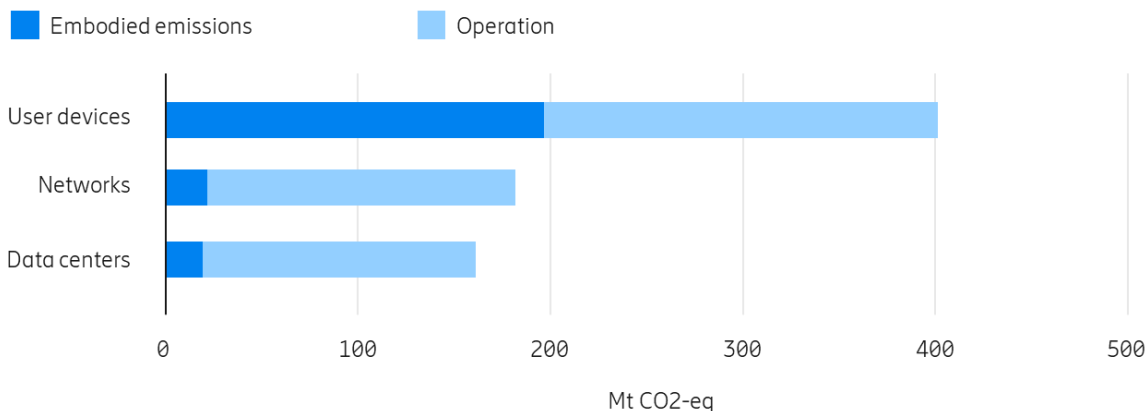


Figure 4 : comparaison des consommations électriques dans le secteur du numérique (extrait du rapport Ericsson « A quick guide to your digital carbon footprint » – 2020).

Le schéma ci-dessous détaille la répartition de l'impact carbone entre phase de production et phase d'utilisation pour les terminaux, les data centers et les réseaux. Il en ressort que, en ce qui concerne les terminaux, la moitié de l'impact carbone est embarquée dans leur fabrication et qu'une attention particulière doit donc être portée à la phase de production et de distribution et à la durée d'usage de ces terminaux. A contrario, pour les réseaux, l'essentiel de l'impact carbone est lié au fonctionnement du réseau, et c'est donc là qu'il faut chercher en premier les optimisations énergétiques. En pratique, cela veut dire que d'un point de vue environnemental il peut se révéler plus intéressant pour un réseau de disposer de la dernière génération d'équipements d'infrastructure puisqu'elle sera plus efficace et plus sobre (avec une électronique plus intégrée, des algorithmes optimisés, ...).

Distribution of ICT's carbon footprint (2015)



Fig

4.

Figure 5 : Répartition des empreintes carbone du numérique (extrait du rapport Ericsson « A quick Guide to your digital carbon footprint » – 2020).

Un autre aspect clé, et aussi complexe, est que les différents facteurs sont étroitement liés. Ainsi, l'impact environnemental des terminaux est significatif mais décroissant, d'une part parce que les fabricants recherchent constamment des composants moins énergivores pour améliorer l'autonomie des produits, d'autre part parce que les utilisateurs privilégient des terminaux plus compacts et sobres, comme des smartphones ou des tablettes, au détriment des PC fixes ou des téléviseurs, plus énergivores.

La baisse continue de la vente de PC dans le monde¹² illustre cette tendance (voir Fig. 6).

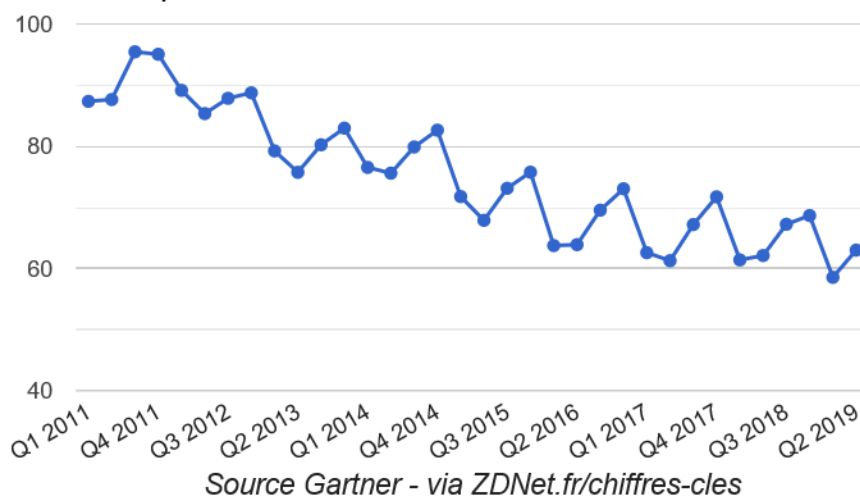


Figure 6 : Livraisons trimestrielles de PC sans le monde, en millions d'unités (source Gartner / ZDNet.fr/chiffres-cles).

¹² <https://www.zdnet.fr/actualites/chiffres-cles-le-marche-des-pc-39380521.htm>)

Si les utilisateurs font ce choix c'est avant tout parce que ces terminaux offrent une connectivité versatile et ubiquitaire (en mobilité sur les réseaux mobiles, à la maison ou au bureau sur le réseau local), qui les rend attractifs. La consommation électrique des réseaux est d'ailleurs en croissance entre 2015 et 2018 (fig. 4), mais au global l'impact du numérique sur les émissions de CO2 reste relativement stable.

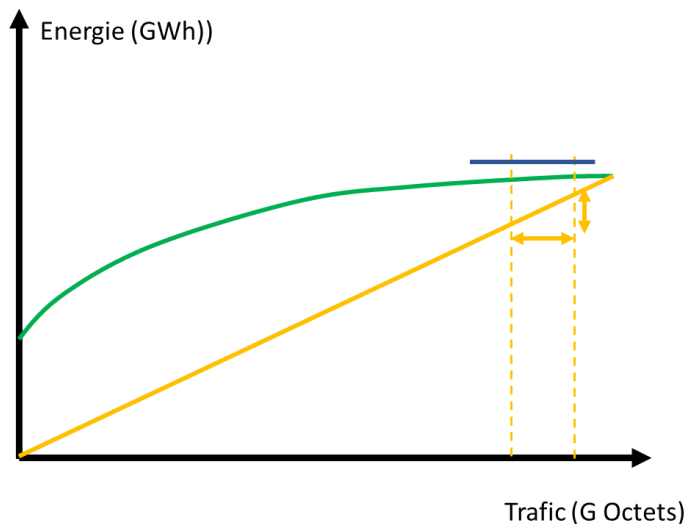
Une étude de cas : le *streaming*

En rentrant plus en détail sur les différents services, l'impact carbone du streaming vidéo alimente de nombreuses discussions.

Une des méthodes pour évaluer l'impact carbone d'un service de streaming consiste à diviser la consommation énergétique globale d'un réseau par le débit global écoulé par ce même réseau (sur une période donnée). Cette méthode, représentée sur l'option 1 de la figure 7, donne une image de l'énergie associée à chaque bit de donnée.

Une autre approche fait le constat qu'une part importante de la consommation énergétique d'un réseau est fixe et que l'impact instantané de l'activation d'un flux vidéo est proportionnellement faible. Dans cette approche représentée sur l'option 2 de la figure 7, l'impact réel du *streaming* est évalué à partir de la consommation du réseau par utilisateur. Les données sont assez facilement accessibles : à titre d'exemple, on peut obtenir les données de consommation d'Orange¹³. Le schéma ci-dessous illustre cela :

Video streaming, méthodologie, énergie/trafic dans un réseau



Option 2: Considérer que la consommation énergétique évolue peu en fonction des variations de trafic et que par ailleurs une part majeure de la consommation énergétique est en fait fixe. Une approche est alors de considérer plutôt la consommation énergétique moyenne par utilisateur.

Ratio énergie/trafic dans un réseau

Option 1: évaluer la consommation énergétique du streaming en considérant que le rapport énergie/trafic suit une fonction linéaire et attribuer la quote part d'énergie à un flux de streaming suivant cette règle.

Fig 7. Source : interne Orange

¹³ https://csr-datas.orange.com/downloads/2018-CSR_Orange-environnemental-fr.pdf)

Dans le présent document, nous n'avons pas l'ambition de clore le débat complexe sur l'impact carbone des différents services numériques, mais tout comme une entreprise prendrait des décisions désastreuses en confondant coûts fixes, coûts variables et coût marginal, une analyse sur ce sujet doit également appréhender les dimensions de consommation énergétique fixe, variable et marginale (fonction de l'activation du dernier service).

Le graphique ci-dessous fait une évaluation de l'impact du streaming sur la base de l'option 2 décrite ci-dessus, et il en ressort des chiffres de consommation bien plus faibles que ceux régulièrement communiqués, l'enjeu est donc de taille.

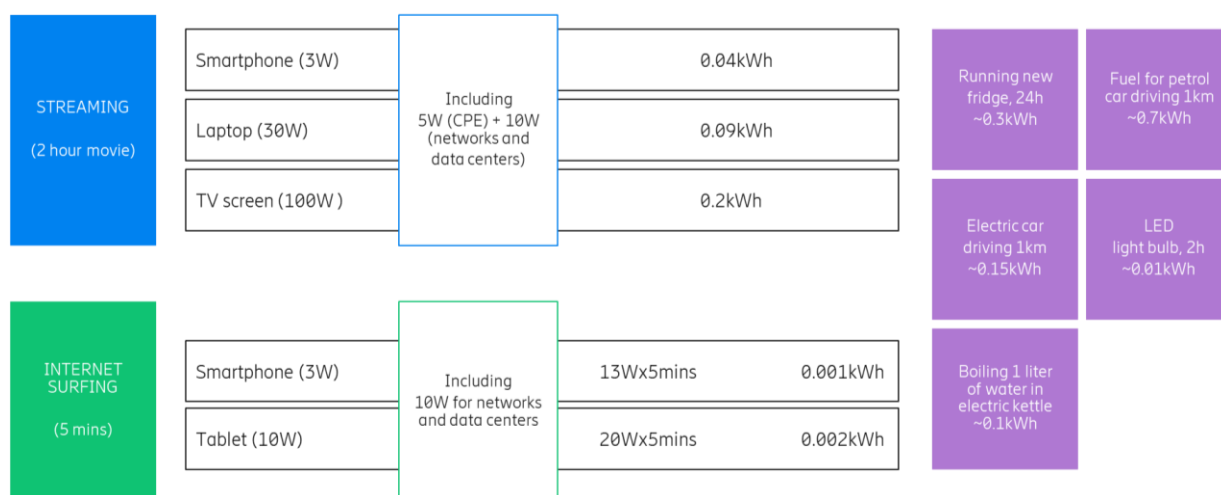


Fig 8. Consommations relatives du streaming, du surfing et d'autres activités. Source : Ericsson – "A quick guide to your digital carbon footprint", <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/industrylab/reports/a-quick-guide-to-your-digital-carbon-footprint>

B. LES SPECIFICITES FRANÇAISES : CAS PRATIQUE DU RESEAU ORANGE

Après une analyse générale, nous proposons dans ce paragraphe une approche plus détaillée du contexte français, avec ses spécificités, notamment une électricité peu carbonée.

L'évaluation de l'empreinte environnementale des infrastructures réseaux est un problème complexe, au vu de la multiplicité des types d'équipements et de leur technicité intrinsèque.

Afin de disposer de sources de données en interne, Orange a réalisé en 2019 une analyse de cycle de vie (ACV, selon les standards ISO 14044 et ITU-T L.1410) sur **une unité radio distante (RRU) LTE**. La répartition des impacts environnementaux de cet équipement est représentée dans la Figure 9 pour un cycle de vie de 12 ans. L'importance de la phase d'utilisation, entièrement liée à la consommation d'électricité de l'équipement, est à noter. La phase de fabrication, liée principalement aux circuits intégrés et leurs puces

et semi-conducteurs ainsi qu'à l'imposant châssis en aluminium, contribue également -quoique de manière bien inférieure à la phase d'utilisation- aux impacts de l'équipement.

En ce qui concerne plus spécifiquement la 5G et toujours à l'échelle de l'équipement, une analyse de cycle de vie a débuté pour **une unité bande de base (BBU)**.

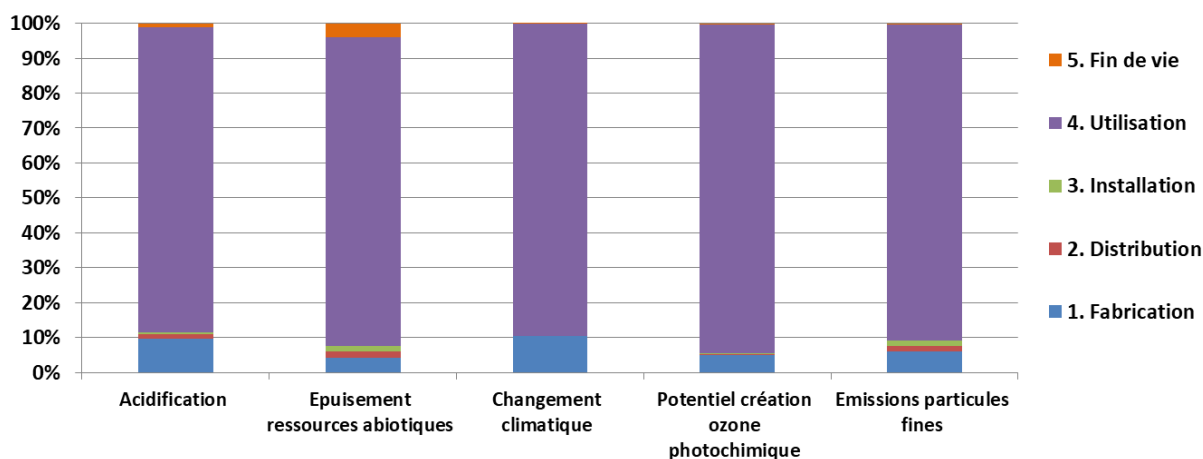


Fig. 9 - Source : interne Orange - Répartition des impacts environnementaux sur le cycle de vie d'un RRU (set d'indicateurs ILCD)

Le modèle mis en place a porté sur l'évaluation de l'impact carbone de la transmission de données depuis un smartphone sur le réseau mobile actuel, avec la prise en compte de l'aspect cycle de vie de chacun des grands ensembles (terminal, infrastructure réseau et *data centers* dans leur utilisation pour les plateformes de services).

A l'échelle des **terminaux** actuellement en parc sur le réseau Orange en France, les analyses de cycles de vie fournies par les industriels ont été combinées à des mesures de consommation (pour des actions comme de la consultation de site internet ou de la lecture de vidéo). A l'autre bout de l'infrastructure, les **data centers** utilisés pour héberger des **plateformes de services** ont été traités de façon similaire en combinant des données globales sur la consommation d'énergie (publiées par l'agence internationale de l'énergie) à des données de transmission (communiquées par Cisco) et à une analyse de cycle de vie à l'échelle d'un *data center* (réalisée par Neutreo pour le compte d'Orange).

Ainsi, pour ces deux extrémités de l'infrastructure (terminaux d'un côté et *data centers* de l'autre) il a été obtenu une approximation des émissions de gaz à effet de serre par Mégaoctet transmis.

En ce qui concerne **le réseau**, les mesures de consommation d'énergie effectuées par Orange en 2019 sur les différentes tranches du réseau (accès, cœur mobile, cœur, etc.), ont été combinées aux mesures de trafic de données afin d'obtenir une efficacité énergétique par Mégaoctet transmis (kWh/MB). En considérant le mix électrique français et des analyses de cycle de vie réalisées par des partenaires industriels (par ex. sur des stations de base), il a été possible de transformer les kWh/MB en kg équivalent CO₂/MB.

La Figure 10 présente la répartition de l'impact carbone (kg équivalent CO₂) à l'échelle des trois sous-ensembles **terminaux**, **infrastructures réseaux** et **data centers/plateformes de services**.

Plusieurs points sont à noter :

- L'impact carbone des **terminaux** compte pour 71% environ de l'impact global du triptyque « terminaux-réseaux-data centers ». La phase de fabrication est à l'origine de la majorité des impacts environnementaux pour un smartphone. La durée d'usage du terminal va donc être un élément déterminant dans le calcul des impacts globaux.

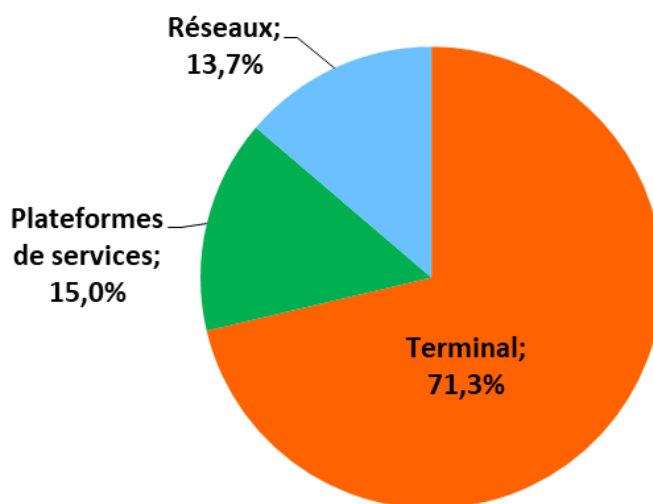


Fig.10 : Source : interne Orange - Répartition de l'impact carbone entre terminaux, réseaux et data centers/plateformes de services.

Dans la Figure 10 cette durée d'usage est fixée à 2 ans et, selon les calculs réalisés par Orange, une augmentation à 4 ans ferait baisser la part du terminal de 71,3% à 55,4%.

- En ce qui concerne l'utilisation des **data centers** pour les **plateformes de services**, des aspects opérationnels, comme le Power Usage Effectiveness (PUE - qui traduit la part de l'énergie alimentant un data center effectivement utilisée pour l'IT¹⁴), vont directement impacter l'efficacité énergétique. En complément, le mix électrique (i.e. kg éq. CO₂/kWh) utilisé pour alimenter ces installations est lié à leur pays d'implémentation et aux choix de leurs opérateurs d'intégrer de l'énergie d'origine renouvelable.
- Enfin pour les **réseaux** la performance énergétique évolue rapidement avec les nouvelles générations d'équipements, comme indiqué précédemment. Le mix électrique du pays d'implémentation est également un facteur important. En l'occurrence le calcul réalisé ici est valable pour un réseau installé en France, pays dont le mix électrique est peu carboné.

Une éventuelle extrapolation des chiffres de la Figure 10 à un environnement en majorité basé sur la 5G nécessitera de prendre en compte plusieurs facteurs, tels que les spécifications techniques, la

¹⁴ Voir également le glossaire en fin de document

performance énergétique, les débits, les taux de charge des équipements, etc. En même temps l'arrivée de la 5G pour le grand public ne correspondra pas forcément à un remplacement massif des terminaux par les consommateurs puisque la 4G et la 4G+ continueront d'exister en parallèle et permettront de continuer à utiliser l'ensemble des terminaux déjà dans le parc. Il est clair que les offres des opérateurs incitant ou pas au remplacement des terminaux pour des modèles 5G auront également un rôle à jouer dans la sobriété des usages des consommateurs.

En synthèse, nous avons abordé dans ce chapitre les aspects suivants :

- **La consommation énergétique du numérique fait l'objet de nombreux débats et ne fait pas consensus. Elle est probablement plus stable que ce qui peut être annoncé par certaines instances, et cela malgré des usages en croissance exponentielle. Des études plus poussées, comme celle menée actuellement par le consortium NegaOctet, permettront, -nous l'espérons- la définition de méthodologies de calcul partagées et une vision plus claire et objective de l'impact environnemental du numérique ;**
- **Au niveau mondial, les réseaux représentent le quart des émissions carbone du secteur TIC, les *data centers* un autre quart et les terminaux la moitié restante (voir Fig. 4). En France, l'énergie peu carbonée exacerbe la composante fabrication dans le calcul des émissions globales, ce qui augmente mécaniquement la part des terminaux pour lesquels la phase de fabrication est prépondérante (voir Fig. 10) ;**
- **L'impact carbone des infrastructures de réseaux (fabrication et usage des équipements, ce dernier étant dominant) sera réduit en remplaçant d'anciens équipements par de plus récents intégrant les dernières évolutions technologiques ;**
- **Les différents ensembles du numérique étant fortement interconnectés, une augmentation de l'utilisation de smartphones au détriment d'autres écrans, tels que les ordinateurs ou les téléviseurs, peut favoriser une migration d'usages depuis des produits plus consommateurs en énergie vers des produits énergétiquement plus sobres avec un impact global bénéfique en termes d'émissions (GES).**

3. LA 5G ET SON ROLE DANS L'EVOLUTION DE L'IMPACT DU NUMERIQUE

En tant que nouvelle génération de technologie de réseaux mobiles, dont le déploiement et l'adoption seront progressifs au cours de la décennie 2020-2030, la 5G est appelée à jouer un rôle phare dans l'évolution de l'impact environnemental du numérique. Nous avons vu à la section précédente que le renouvellement des infrastructures de réseau par des équipements plus récents avait un impact vertueux sur la consommation globale d'énergie. La 5G va naturellement inciter à ce renouvellement d'équipements réseaux, mais va également permettre d'aller plus loin comme décrit dans cette section.

A. UNE PRISE EN COMPTE NATIVE DES ENJEUX ENERGETIQUES

Une normalisation soucieuse d'efficacité énergétique

L'un des intérêts majeurs de la 5G est d'avoir intégré la problématique de la consommation énergétique dès le début de sa conception. Des optimisations spécifiques de l'interface radio ont ainsi été définies au cours de sa normalisation au 3GPP¹⁵, notamment pour permettre des modes de mise en veille avancés des équipements radio lorsqu'ils n'ont pas de trafic à transmettre. Ces mécanismes ont été décrits dès les premières versions de la norme (*releases 15 et 16*)¹⁶ qui sera finalisée au cours de l'année 2020 (*release 17*).

Des efforts d'optimisation sur toute la chaîne

Cela étant dit, la consommation énergétique ne dépend pas que de la norme mais également des choix de déploiement, des optimisations ou encore des progrès réalisés dans les différentes technologies associées (e.g. semi-conducteurs)¹⁷. Ces mécanismes devraient conduire dès 2025 à une efficacité énergétique¹⁸ de la 5G améliorée d'un facteur x10 par rapport à la 4G, pour une amélioration à terme

¹⁵ Voir le glossaire en fin de document

¹⁶ Ibid. – voir « RGPP Releases » dans le glossaire

¹⁷ En particulier l'introduction progressive du Nitrure de Gallium (GaN), qui améliorera l'efficacité des amplificateurs de puissance grâce à sa plus forte réactivité aux variations de puissance et sa meilleure résistance à la chaleur.

¹⁸ L'efficacité énergétique traduit la quantité d'énergie nécessaire à la transmission d'un bit ou octet d'information et s'exprime généralement en bit/Joule, ou en Gbit/kWh.

(2030) d'un facteur 20 ou plus^{19 20 21} Les améliorations techniques associées concernent le réseau d'accès, la radio qui représente environ 80% de la consommation électrique aujourd'hui, mais aussi le cœur de réseau.

Sur les terminaux, certains constructeurs annoncent pouvoir réduire la consommation de moitié²².

B. LES IMPACTS ACTUELS ET FUTURS DE LA 5G SUR LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES RESEAUX

La 5G permettra d'absorber l'augmentation attendue du trafic réseau des prochaines années grâce à une consommation d'énergie en kWh inférieure à la 4G.

Tout d'abord, il faut bien comprendre que les équipements 5G actuellement déployés (pour des tests, en France) ont des marges importantes d'optimisation d'implémentation. Cette situation est identique à celle du déploiement de la 4G, et auparavant de la 3G. Les premières implémentations d'une nouvelle technologie demandent de relever des défis technologiques qui se concentrent dans un premier temps sur la délivrance des performances attendues. La réduction de la consommation énergétique est ensuite généralement rapidement prise en compte.

Comme décrit au chapitre 1, une des principales évolutions de la 5G concerne la mise en œuvre de nouvelles antennes à faisceaux orientables utilisant la technologie *Massive MIMO*. Les antennes *Massive MIMO* sont caractérisées par une conception ultra-intégrée qui concentre des amplificateurs de puissance au niveau du radôme (protection de l'antenne) et combine des éléments de rayonnement, d'électronique analogique, et de logiciel pour les fonctions de gestion de faisceaux²³. Les premiers modèles de ces antennes n'étaient pas optimisés sur le plan de consommation énergétique. Les progrès sur les technologies utilisées, notamment l'intégration et la densification des composants de l'antenne, vont permettre de réduire significativement la consommation de ces antennes actives à faisceaux orientables. Les progrès en ce domaine sont rapides.

Ainsi, si une antenne 5G pas encore optimisée d'aujourd'hui consomme trois fois plus d'énergie que la mise en œuvre d'une antenne 4G mono-bande, la consultation des fournisseurs d'antennes montre que

¹⁹ B. Thors, A. Furuskär, D. Colombi, and C. Törnevik, "Time-averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO," IEEE Access, vol. 5, pp. 19711-19719, September 18th, 2017

²⁰ F. Charpentier, M. Debbah, "L'optimisation énergétique de la 5G", La Jaune et la Rouge, Avril 2020, N°754, dossier « Numérique et Environnement », <https://www.lajauneetlarouge.com/loptimisation-energetique-de-la-5g/>

²¹ "5G : energy efficiency by design" : <https://hellofuture.orange.com/en/5g-energy-efficiency-by-design/>

²² B. Thors, A. Furuskär, D. Colombi, and C. Törnevik, "Time-averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO," IEEE Access, vol. 5, pp. 19711-19719, September 18th, 2017

²³ F. Charpentier, M. Debbah, "L'optimisation énergétique de la 5G", La Jaune et la Rouge, Avril 2020, N°754, dossier « Numérique et Environnement », <https://www.lajauneetlarouge.com/loptimisation-energetique-de-la-5g/>

dès 2022, la consommation d'une antenne 5G descendra à 1,7 fois celle d'une antenne 4G mono-bande et en 2023 elle ne sera plus que 1,35 fois supérieure²⁴. Dans le même temps, cette antenne 5G gèrera une largeur de bande 5 fois plus importante qu'une antenne 4G mono-bande²⁵ et mettra en œuvre le *Beamforming*²⁶, conduisant à permettre un débit total (à partager entre les utilisateurs connectés) bien supérieur.

En prenant en compte l'ensemble d'un site radio, où la 4G met typiquement en œuvre 4 bandes de fréquences (800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz et 2600 MHz), l'ajout de la bande 5G 3.5 GHz à l'horizon 2023 n'augmentera donc la consommation que d'un tiers, tandis que dans le même temps elle augmentera la capacité délivrée par un facteur 2,5 (pour une largeur de bande 5G de 100 MHz). Atteindre la même augmentation capacitaire sans la 5G demanderait d'augmenter le nombre de sites radio 4G, ce qui entraînerait une augmentation bien supérieure de la consommation énergétique du réseau.

La figure 11 ci-dessous compare, à l'échelle d'un pays comme la France et pour des hypothèses de mise à jour capacitaire réalistes, la consommation énergétique d'un réseau d'accès radio 4G avec celle d'un réseau 4G augmenté par la 5G pour deux scénarios d'augmentation du trafic : +30% et +50% d'accroissement annuel. Dans les deux scénarios, on observe une réduction de la consommation d'énergie absolue du réseau grâce au déploiement de la 5G : de -7% et -14% pour une augmentation annuelle du trafic de +30% et +50% respectivement. Au final, l'ajout de la 5G aux réseaux 4G actuels est donc une solution qui consommera moins d'énergie en valeur absolue qu'une évolution du réseau 4G pour absorber les hausses de trafic à venir.

²⁴ En 4G les traitements radiofréquences et d'amplification de puissance sont effectués par un équipement séparé de l'antenne appelé RRU (Remote Radio Unit), tandis qu'en 5G la RRU est intégrée avec l'antenne ; dans cette comparaison de consommation énergétique, nous comparons une antenne 4G et sa RRU associée sur une largeur de bande de 20 MHz avec une antenne 5G et sa RRU intégrée sur une largeur de bande de 100 MHz.

²⁵ La norme 5G permet d'opérer une fréquence porteuse d'une largeur de bande jusqu'à 100 MHz, tandis qu'en 4G la largeur de bande d'une fréquence porteuse est limitée à 20 MHz.

²⁶ Voir glossaire à la fin du document

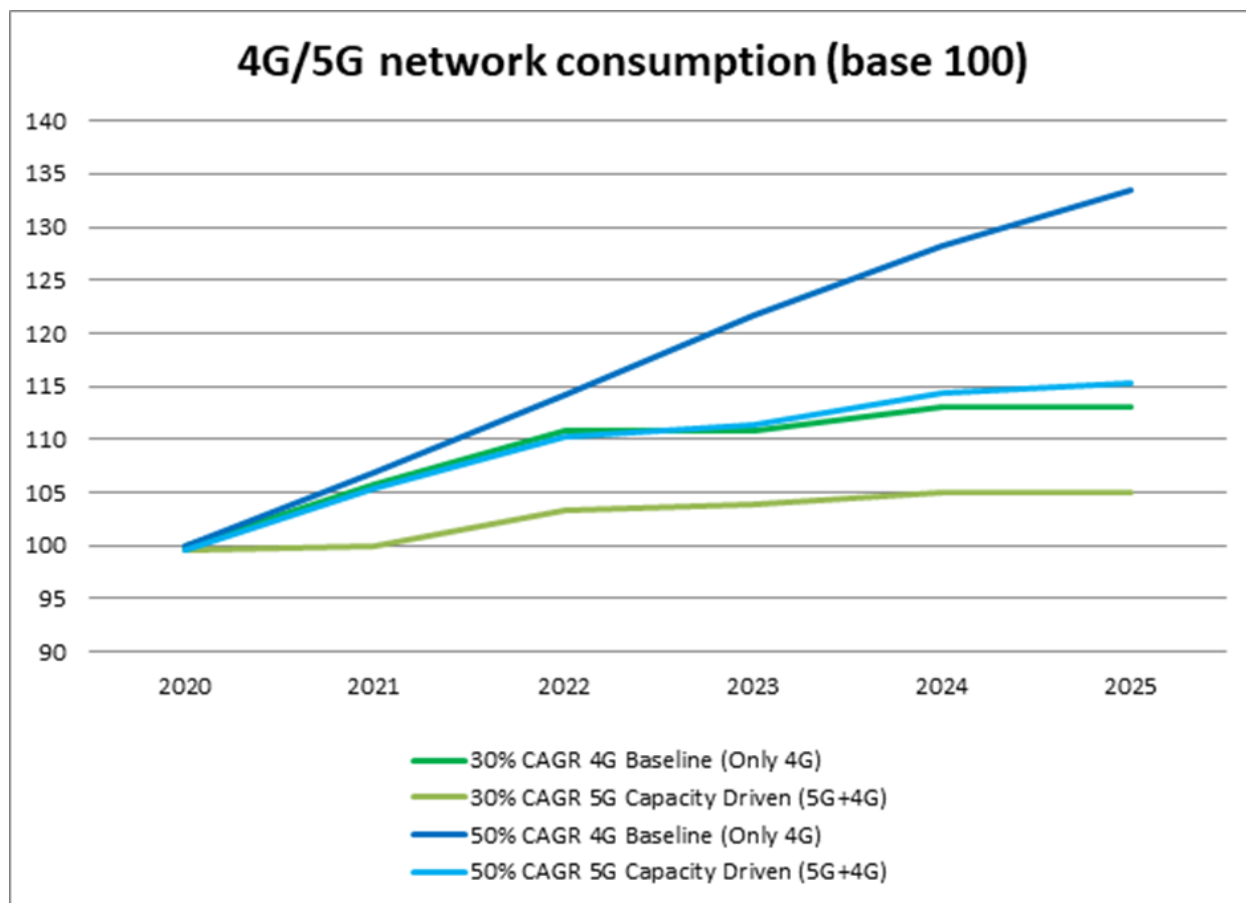


Figure 11 : Source : interne Orange - comparaison de la consommation d'énergie d'un réseau d'accès radio 4G+5G avec un réseau d'accès radio 4G, pour 2 scénarios d'augmentation du trafic, à l'échelle d'un pays comme la France. Les hypothèses suivantes ont été adoptées : en 5G, 80 MHz en bande 3,5GHz + 10MHz en bande 700 MHz ; en 4G, 4 bandes avec une largeur de bande totale de 65 MHz ; 50% de trafic 5G en 2025.

C. LES ACTIONS POSSIBLES POUR CONTENIR ET FAIRE BAISSER L'EMPREINTE CARBONE DE LA 5G

Les efforts de R&D actuellement engagés dans le développement des équipements sont cruciaux et doivent être amplifiés pour améliorer encore l'efficacité énergétique de la 5G. On citera comme pistes la gestion des modes de veille avancés, par exemple à l'aide d'intelligence artificielle et du big data, en plus de l'optimisation des antennes. Au-delà de l'efficacité énergétique des réseaux, l'intelligence artificielle permet également de réduire l'impact carbone des opérations, par exemple en anticipant les pannes, et en permettant de regrouper les déplacements de techniciens.

Afin que les gains d'efficacité énergétique se traduisent par une réelle baisse de la consommation d'énergie de la 5G, un usage plus sobre du numérique doit être encouragé.

Une première étape consistera à **informer les usagers des réseaux du coût en émission de CO₂ de leurs usages**, ce qui peut les inciter à les modérer. Cette information a déjà été prévue pour les abonnés des services de réseau grand public à l'art. 13 III de la loi AGEC, relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire du 10 février 2020.²⁷ Il faut noter que l'on peut réduire la consommation d'énergie induite par les usages simplement en modifiant certains comportements et sans nécessairement priver les utilisateurs: par exemple, il n'est pas indispensable de lancer une vidéo musicale si l'on souhaite seulement en écouter la musique. Une application de streaming audio sera moins consommatrice. On peut également encourager la prise en compte par les développeurs de services de la consommation énergétique induite dans les réseaux et les terminaux par leurs choix de conception. En évitant les lancements automatiques de vidéo sur les pages web, par exemple, on peut réduire la consommation énergétique. Une autre voie pour encourager la sobriété pourrait être un retour à une facturation en fonction de la consommation ; elle nécessiterait néanmoins une action de régulation afin de maintenir un *level playing field* entre opérateurs.

Enfin, l'écoconception des équipements réseaux et terminaux doit être favorisée pour réduire la consommation de matière et d'énergie liée à leur fabrication. En particulier, leur réutilisation et recyclabilité doivent être envisagées dès leur conception. La phase de fabrication des terminaux, on l'a vu, représente une part importante de leur impact énergétique total. La mise à disposition des usagers de terminaux plus durables est donc aussi une piste à creuser.

D. LE REMPLACEMENT DES RESEAUX ET DES TERMINAUX

Les analyses présentées à la section 2 montrent que les terminaux (grand public) représentent une part significative de l'impact carbone, et qu'un allongement de leurs durées d'usage peut avoir un impact significatif sur les émissions de CO₂ associées. A ce propos, il est utile de préciser que l'introduction de la 4G n'a pas généré d'augmentation significative du renouvellement des terminaux 3G. Il est donc attendu que les terminaux 5G seront en grande majorité introduits de manière progressive et lors d'un renouvellement « naturel » du parc.

Les équipements de réseaux mobiles évoluent progressivement vers des plateformes matérielles et logicielles intégrant à la fois 2G, 3G, 4G et 5G bien que le trafic de la 2G/3G diminue de plus en plus. L'activation de la 5G sur un réseau d'accès radio sera généralement compatible avec les équipements déployés actuellement s'ils sont récents. Dans ce cas, seules les antennes actives 5G (dans les bandes 3,5 GHz) devront être rajoutés. Dans le cas contraire, les anciens équipements devront être remplacés par

²⁷ Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, art. 13 II : « Après le 1 du I de l'article 6 de la loi n° 2004-575 du 21 juin 2004 pour la confiance dans l'économie numérique, il est inséré un 1 bis ainsi rédigé :
« 1 bis. A compter du 1er janvier 2022, et dans le respect de la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, les personnes mentionnées au 1 informent également leurs abonnés de la quantité de données consommées dans le cadre de la fourniture d'accès au réseau et indiquent l'équivalent des émissions de gaz à effet de serre correspondant.
« Les équivalents d'émissions de gaz à effet de serre correspondant à la consommation de données sont établis suivant une méthodologie mise à disposition par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. »

des équipements de dernière génération, qui seront également plus économes énergétiquement (pour prendre une analogie avec l'automobile, cela revient à passer du diesel à l'hybride).

E. LES ENGAGEMENTS INDIVIDUELS ET COLLECTIFS

Dans le traitement de la question liée à la consommation énergétique des réseaux, un aspect crucial porte sur les perspectives d'évolution des émissions carbone. Un point structurant, dans ce contexte, est que les différents acteurs du secteur prennent collectivement conscience qu'il convient de faire baisser les émissions carbone. L'initiative « [Science Based Targets](#) » vise à proposer des trajectoires de réduction des émissions carbone des opérateurs permettant d'aider à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Elle est soutenue par différentes organisations comme le GSMA (représentant les opérateurs), l'UIT (Union Internationale des Télécommunications), le GeSI, et compte aussi l'implication forte de certains équipementiers. L'ITU-T SG5²⁸ développe des méthodologies harmonisées pour l'évaluation de la soutenabilité des technologies de l'information et de la communication (TIC) et de leur impact sur le changement climatique. Certains opérateurs (y compris en France) prennent des engagements publics de baisse de leurs émissions pour les années à venir. Par exemple, Orange s'engage sur la neutralité carbone à l'horizon 2040 sur l'ensemble de son empreinte géographique (Europe, Afrique, Moyen Orient). Ericsson affiche également une volonté de neutralité carbone à l'horizon 2030.

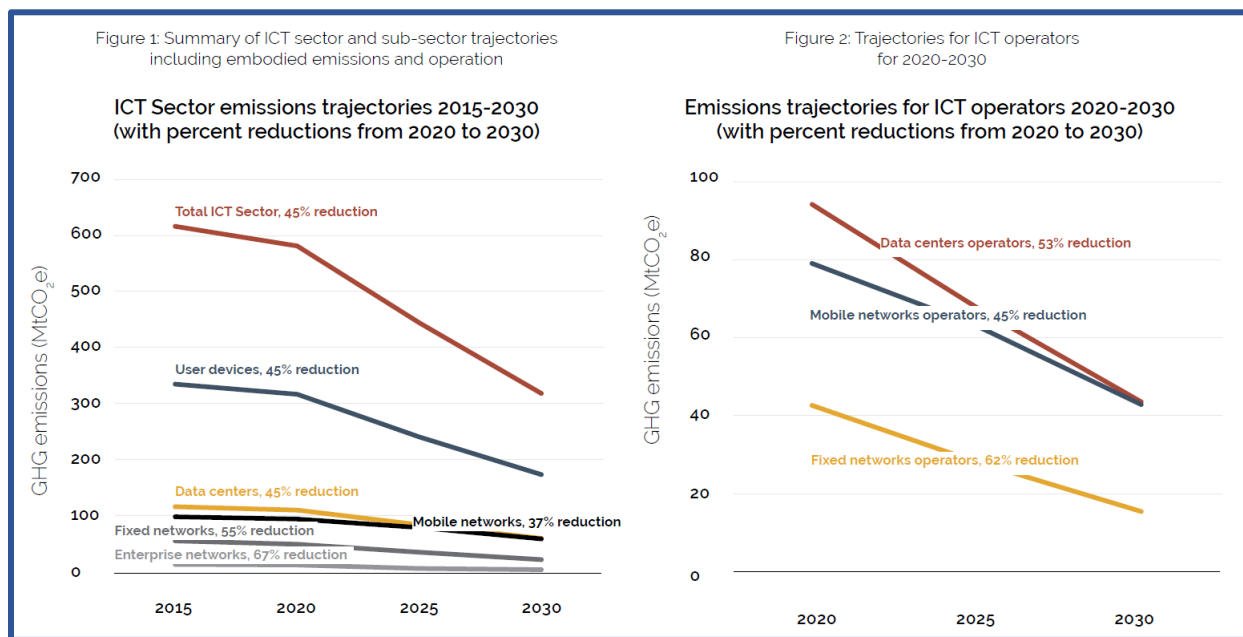


Fig. 12 – CDP, GSMA and The Carbon Trust, « An Introduction to Setting Science-based Targets »

Le secteur de l'ICT prend donc de plus en plus largement conscience qu'il faut travailler vers une réduction de l'impact carbone du numérique et des études montrent que c'est possible.

²⁸ <https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/05/Pages/q9.aspx>

F. LES INFRASTRUCTURES DE CALCUL

Les infrastructures de calcul constitueront l'épine dorsale de la société numérique de demain, allant de serveurs pour héberger des fonctions de réseau virtualisées à l'*edge*, jusqu'aux data centers pour les plateformes de service. Contrairement aux data centers géants que l'on connaît aujourd'hui, ces infrastructures auront des capacités variables en fonction de leur destination et de la zone géographique qu'ils couvriront. Elles seront également plus distribuées sur le territoire, en fonction des besoins. Par exemple, un serveur de *edge computing* pourra se trouver directement dans l'usine dont il couvre les besoins.

En ce qui concerne les grands *data centers*, des progrès considérables ont été réalisés ces dernières années sur leur efficacité énergétique, notamment par des techniques de refroidissement avancées. Une analyse complète doit également inclure la contribution en carbone embarqué dans toutes les phases du cycle de vie produit, ceci incluant la fabrication des serveurs, leur emballage, leur transport jusqu'au datacenter, leur installation et enfin l'éventuel recyclage des matériaux lors du remplacement des équipements. Ainsi les hébergeurs et fournisseurs de services numériques pourraient chercher à réduire l'impact écologique de leur activité en adoptant de nouveaux équipements plus économes. Néanmoins, si tous les serveurs étaient remplacés sur une courte période, l'empreinte carbone liée à la destruction et au recyclage des matériaux et des métaux utilisés dans les équipements serait très élevée. À cela vient s'ajouter l'empreinte liée à la conception, à la fabrication et à l'acheminement du nouveau matériel.

Les enjeux technologiques sur les nouvelles infrastructures matérielles pourraient donc se résumer dans les points suivants :

- Efficacité énergétique globale dans un contexte d'augmentation massive des besoins de traitement,
- Rationalisation de l'usage des infrastructures à toutes les échelles,
- Optimisation des coûts opérationnels et d'investissement dans un contexte de distribution des infrastructures matérielles,
- Architectures résilientes et souveraines au service des communautés

Pour résumer, nous avons vu que la consommation du numérique est stable depuis quelques années nonobstant des usages en croissance. Nous avons également vu qu'une prise en compte native des enjeux énergétiques, une amélioration des consommations des équipements réseaux et des antennes, les évolutions vers des terminaux grand public moins énergivores, une sensibilisation des usagers aux usages les plus sobres et l'engagement proactif de certains opérateurs et constructeurs permettront de réduire de manière proactive et durable l'impact carbone des terminaux, des réseaux et des data centers , en inscrivant cette tendance dans la durée.

4. LES USAGES

Après une revue de la consommation du numérique, la dernière partie de cette note porte plus spécifiquement sur les interrogations soulevées par l'impact possible des usages.

Deux considérations devraient être prises en compte dans les analyses :

- Les bénéfices que la 5G peut apporter à d'autres secteurs ;
- L'évolution du trafic dans les espaces publics, qu'il soit lié aux activités de loisir ou professionnelles. La réflexion est en particulier menée dans le cas d'une gare.

A. DES BENEFICES POUR D'AUTRES SECTEURS

La 5G a un potentiel important de réduction de la consommation énergétique d'autres secteurs.

Pensons par exemple au télétravail et plus largement à toutes les applications de communication qui permettent d'éviter un déplacement physique (par exemple dans le domaine de la santé). Pourquoi la 5G serait-elle nécessaire ? Les attentes pour le télétravail évoluent continuellement, il y a quelques années, la disponibilité d'une ligne mobile et la possibilité d'envoyer des mails étaient la panacée ; demain les attentes seront bien supérieures à ce que nous pouvons réaliser aujourd'hui. De plus, la 4G actuelle n'est pas toujours satisfaisante puisque nous cherchons parfois un point d'accès fibre.

A titre de comparaison, l'impact carbone d'un an d'utilisation d'un smartphone (y compris la part d'utilisation du réseau et la quote-part de production du terminal) est de 60 kg de CO₂²⁹, ce qui correspond à 400 km parcourus par une voiture moyenne (en dehors de l'impact carbone de la construction des routes, de la production des véhicules,... qui réduit ultérieurement le nombre de kilomètres parcourus pour 60 kg de CO₂), c'est-à-dire 2-3% de la distance moyenne parcourue par les véhicules particuliers en France.

Au-delà de ces exemples bien connus, nous pouvons mentionner :

- Dans l'industrie, la connectivité mobile permet d'augmenter largement la productivité mais elle permet aussi de réduire l'impact environnemental. En particulier un meilleur contrôle du processus de production (par exemple avec des capteurs de vibration 5G à très faible latence) permet de réduire les pertes et les rebuts de production. De même, la connectivité de masse permet d'optimiser la logistique et les process et de réduire l'énergie consommée dans la production.
- En mobilité, la connectivité entre véhicules apporte des bénéfices environnementaux : les trajets sont optimisés, les accidents réduits, ... Pour les camions plus spécifiquement, les acteurs du secteur développent le concept de *platooning*, avec des grappes de camions qui se suivent à

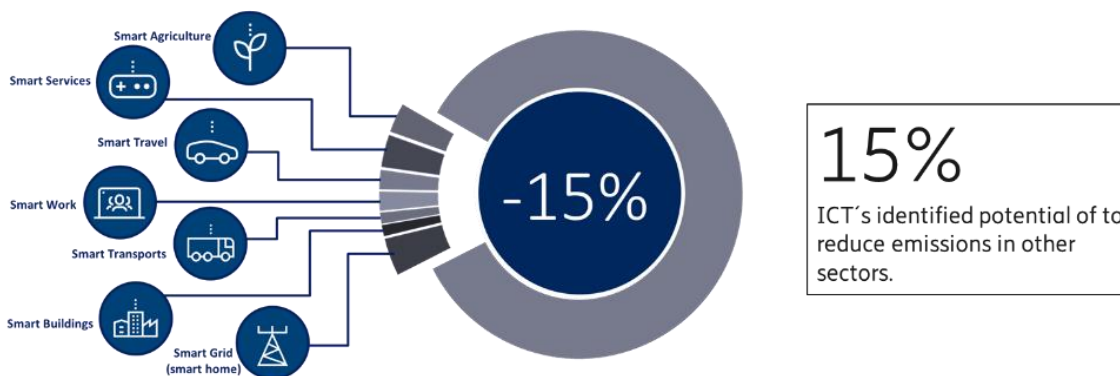
²⁹ <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/research-papers/life-cycle-assessment-of-a-smartphone>

quelques mètres sur l'autoroute ce qui permet de réduire les émissions carbone associées (les camions suivant le premier véhicule consommant moins de carburant).

- Dans la santé, les débits accrus, la réactivité des réseaux 5G (faible latence) et la fiabilité des communications contribueront à démocratiser la télémédecine. La téléconsultation et la télé-expertise bénéficieront des possibilités d'échanges de contenus haute-définition en temps réel sécurisés. Cela permettra de désengorger les hôpitaux tout en procurant une expérience qualitative tant aux patients qu'aux médecins. L'accès à l'expertise médicale sera facilité, notamment dans le cadre des réunions de concertation pluridisciplinaires (RCP) entre établissements distants et avec des praticiens en mobilité. D'autres applications de la 5G concernent l'évolution des pratiques au bloc opératoire, avec notamment l'apport de la réalité augmentée qui permettra de nouvelles approches dans la formation ainsi que la préparation et la réalisation des opérations. Enfin, l'usage d'objets connectés sécurisés permettra le suivi de données de santé dans l'hôpital ou dans le cadre de HAD (hospitalisation à domicile) ou de MAD (maintien à domicile).

Plus généralement, les études montrent que jusqu'à 15% des émissions de carbone globales pourraient être éliminées grâce au numérique³⁰ (voir également l'illustration ci-dessous)³¹.

ICT as a driver for a more sustainable future



Malmodin and Bergmark, 2015,
Exploring the effect of ICT solutions on GHG emissions in 2030

Fig. 13 – Malmodin and Bergmark, Exploring the effect of ICT solutions on GHG emissions in 2030, 2015

³⁰ European Commission, « Supporting the Green Transition », February 2020,
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bd211835-5390-11ea-aece-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>

³¹ Malmodin and Bergmark, Exploring the effect of ICT solutions on GHG emissions in 2030, 2015,
<https://download.atlantis-press.com/article/25836149.pdf>

Suite à la crise du Covid, la 5G sera aussi un élément de relance et un pilier pour une nouvelle économie plus résiliente. La volonté de relocalisation de certaines productions en France conduira à construire de nouvelles usines, qui pourront être dès le départ équipées des dernières technologies « industrie 4.0 » d'automatisation de la production, et tireront donc avantage de la 5G. La 5G sera donc un élément de compétitivité de notre pays.

Nous voyons déjà un certain nombre de pays qui reconnaissent ce paradigme, et la crise devrait contribuer à accélérer cette digitalisation, qui aura des effets bénéfiques sur la consommation d'autres secteurs.

Deux exemples, parmi d'autres, sont l'accélération des déploiements 5G en Australie et en Chine, dans le contexte de la crise du Covid :

- <https://nwwireless.org/feed-rss/telstra-suspends-job-cuts-accelerates-5g-rollout-to-face-covid-19-crisis/>
- <https://www.reuters.com/article/us-health-coronavirus-china-5g/chinas-it-ministry-calls-for-faster-5g-network-rollout-government-document-idUSKBN21B0WY?feedType=RSS&feedName=technologyNews>

B. D'UNE COUVERTURE TOTALE A UNE COUVERTURE ADAPTEE AUX USAGES : LE CAS DE LA SNCF

Usages et acceptabilité

Une 5G déployée en fonction des besoins réels à l'échelle locale et associée à une meilleure gestion énergétique et environnementale, pour un impact global positif.

Dans l'optique de connecter tous les citoyens, l'enjeu des réseaux de 2^{de}, 3^{ème} et 4^{ème} génération a été d'étendre progressivement la couverture du territoire, avec pour cible une couverture quasi-totale de la population³². La densification des sites radioélectriques a ainsi été permanente, avec pour maître mot le très haut débit pour tous.

La 5^{ème} génération arrive non pas en substitution mais en complément des technologies actuelles. Cela se traduit par une augmentation de la densité spectrale (de nouvelles bandes de fréquences), de nouveaux déploiements d'infrastructures ainsi qu'une accélération de l'obsolescence des technologies actuelles. Les questions d'acceptabilité économique, environnementale et sociale trouvent ici leur source. Il est en effet communément admis que le déploiement de la 5G doit se faire comme pour les générations précédentes, par une approche de couverture totale. **Pourtant, il est envisageable de penser différemment le**

³² Les autorisations de l'Arcep les plus récentes pour les fréquences des réseaux mobiles publics intègrent une obligation de couverture de 99,8% de la population métropolitaine en 2028, ou encore de 95% du réseau ferré régional d'ici 2025.

déploiement de la 5G, notamment dans l'espace public que constitue une gare et son environnement, avec une approche de couverture locale adaptée aux usages réels.

L'introduction de la 5G en **complément** trouve alors tout son sens.

En effet, la limitation liée aux propriétés de propagation des fréquences de la 5G peut être utilisée comme une force : il est possible de confiner les réseaux dans des zones clairement délimitées, en combinant les propriétés de propagation des bandes de fréquences (3,5GHz et 26GHz) et l'utilisation de petites cellules. **Les cas d'usages de la 5G déjà identifiés par SNCF sont effectivement localisés.** Les besoins en connectivité ne sont pas identiques en tout point d'une gare, d'un centre technique ou d'une voiture. Un réseau global à QoS (*Quality of Service*, qualité de service) unique n'est donc pas une solution optimale. A contrario, l'adaptation des propriétés du réseau aux besoins locaux permet d'optimiser la quantité de fréquences et d'énergie sollicités ; elle permet aussi d'entraîner une évolution positive des comportements et change l'appropriation de l'espace public par le citoyen, notamment vis-à-vis des communications électroniques.

Flux de personnes et flux de données : coexistence et optimisation



Fig. 14 – représentation des flux de personnes et de données en gare – source SNCF

La technologie 5G est conçue pour être plus efficace d'un point de vue énergétique que les technologies précédentes, mais son déploiement entrainera mécaniquement de nouvelles dépenses énergétiques (qui seront compensées à terme, voir l'étude Orange détaillée au chapitre 3 de ce document). Il est cependant possible de concevoir les réseaux en combinant l'optimisation de la qualité de service (QoS) et l'optimisation des consommations énergétiques.

Pour cela, il est envisagé de partir des cas d'usages réels des utilisateurs pour adapter la QoS localement. Cela nécessite de modéliser les flux de personnes et les flux de données en mobilité, puis de proposer **un aménagement d'espace qui traite conjointement les flux de personnes et leurs usages numériques**.

L'optimisation des réseaux par le design d'espace tend à encourager certaines pratiques d'utilisation des réseaux. A titre d'exemple, les zones à fort flux (axes principaux de déplacements pour l'arrivée aux quais) seront limitées en débit ; les abords de ces zones proposeront à contrario des très forts débits. L'enjeu est d'encourager les voyageurs ayant besoin de télécharger des contenus importants à ne pas engorger les voies de passage et à se diriger vers les zones dédiées. Ces zones seront conçues pour limiter les consommations énergétiques (petites cellules 26GHz de très faible énergie autorisant un très haut débit supérieur au GB/s, environnement optimisé grâce à des méta-surfaces). Les voies de passages principales, quant à elles, ne seront pas couvertes par les ondes 26GHz mais seulement par les bandes de fréquences « sous 6 GHz » afin d'y limiter l'usage du spectre et la consommation énergétique.

Cette approche s'appuie sur de nouvelles pratiques d'architecture et d'aménagement des lieux, intégrant nativement la conception et le déploiement des infrastructure télécom. Les étapes sont : **(1) la définition de zones de trafic et de leurs usages associés, (2) la configuration ad hoc des moyens de connectivité dans leur environnement, (3) l'iconographie pour orienter l'utilisateur vers les zones adaptées, (4) la mise en œuvre d'incitations (nudge)**.

La scénarisation d'espace en fonction des zones de trafic en gare contribue à l'atteinte des objectifs suivants :

- + **Limiter l'engorgement des flux principaux de personnes et les expositions non souhaitées** : garantir une couverture étendue et fiable mais avec une capacité de débit modérée dans les axes principaux, optimisée pour les besoins de connectivité des personnes en déplacement (géolocalisation, recherche d'information et appel) ;
- + **Créer des zones très haut débit ouvertes ou closes** : faire converger les utilisateurs d'applications très haut débit (streaming, téléchargement instantané de contenus avant l'entrée en voiture) dans ces zones qui seront visuellement délimitées. Elles permettront le décongestionnement des artères principales et l'optimisation des réseaux Gigabit d'un point de vue énergétique.
- + **Créer des zones closes ou semi closes étanches aux ondes 5G, pour offrir une solution à tous adaptée à tous les usagers** : proposer l'accès à des services haute performance pour un public en demande, et l'accès à des espaces protégés sans aucune propagation d'ondes.

Des retombées environnementales et sociales directes

- + **Mieux contrôler la consommation énergétique pour les applications très haut débit** : les bornes de téléchargement instantanées faisant appel à des petites cellules dimensionnées pour émettre sur un périmètre de quelques mètres seront optimisées pour cet usage. Le téléchargement par les voyageurs avant l'entrée en voiture permettra en complément de limiter fortement la sollicitation des réseaux le long des voies. La bande 26GHz permettra ainsi des téléchargements de contenus importants en moins d'une seconde (instant download). De telles bornes auront aussi la capacité à s'éteindre en fin d'utilisation, avec un double effet de moindre consommation énergétique et de moindre densification des ondes.
- + **Restreindre les zones d'exposition** : si les bornes de téléchargement sont en environnement ouvert, il est aussi possible de concevoir des espaces clos offrant une connectivité en 26GHz (espace business ou loisir) ou a contrario non couvert par un tel réseau. En dehors de telles zones, le niveau de puissance émis dans cette bande sera non significatif.
- + **Solliciter plus légèrement le réseau principal et améliorer sa performance pour les applications usuelles** : l'incitation à converger vers des zones très haut débit pour les utilisateurs d'applications de type streaming libèrera d'autant les ressources des réseaux principaux (2G, 3G, 4G et 5G en bande 3,5GHz) qui gagneront mécaniquement en **QOS** pour les applications communes.
- + **Optimiser la propagation des ondes** : l'ingénierie du mobilier urbain et des espaces permettra ainsi d'optimiser la propagation des ondes dans les zones souhaitées, espace clos ou ouverts, et d'améliorer la qualité de connectivité.

Le schéma suivant présente les 30 cas d'usage qui ont été imaginés par les agents du groupe SNCF et pour lesquels la 5G représente une amélioration ou une possibilité nouvelle.

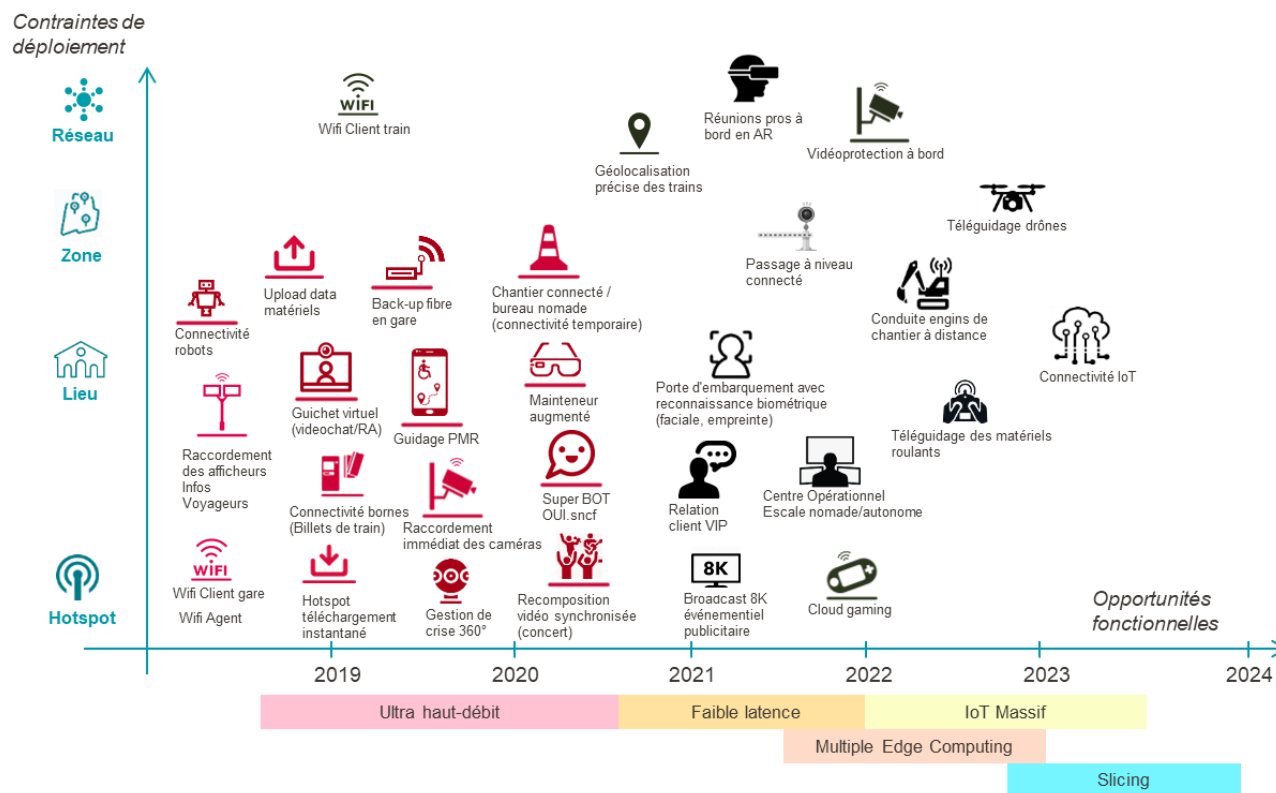


Fig. 15 – Cas d'usage 5G SNCF

Les cas d'usage sont répartis par contrainte de disponibilité de la 5G en termes de couverture (local / national), et dans le temps en prenant en compte les différentes évolutions de la technologie et l'intégration progressive de nouvelles capacités (telles que décrites par le 3GPP mais ayant un temps d'intégration par les fabricants non négligeables).

L'impact environnemental de ces cas d'usages présentés au-dessus peut se concevoir dans les dimensions suivantes :

- Les applications métiers de la SNCF augmentent la productivité, la sécurité et l'efficacité du transport ferroviaire, ce dernier étant particulièrement vertueux d'un point de vue environnemental ;
- Les applications dédiées aux utilisateurs contribuent à améliorer l'expérience du voyageur, ce qui aura aussi un effet induit extrêmement bénéfique.

On va trouver dans un premier temps (2019-2021), les usages liés au très haut débit mobile. On a alors une série de cas d'usages **Fixed Wireless Access** (accès câblé fixe) en gare qui sont importants. Il s'agit soit de travaux de câblage qui peuvent être très lourds, ou simplement décalés dans le temps. Dans ce cadre-

là la 5G est vue comme une **connectivité temporaire (ou un back-up de secours)** qui permet de faire gagner beaucoup de temps en termes de *time to market* des installations.

On retrouve ensuite les usages liés à la faible latence et à l'IoT. **La faible latence n'est pas encore une fonctionnalité pour laquelle on trouve une multitude d'usages**, mais c'est principalement dû à la nouveauté des programmes de modernisation des sites industriels. Les dispositifs ou processus industriels qui bénéficieraient grandement d'une réactivité à la milliseconde, sont en partie à imaginer, mais on pense par exemple à :

- Le contrôle et la commande de robots industriels dans des clouds de proximité (edge cloud)
- Le contrôle de certains processus industriels (comme le fraisage de rotors d'avion) peut bénéficier de la présence de capteurs indiquant en quelques millisecondes si des vibrations risquent par exemple d'abimer les pièces en cours de production.
- Stéphane Klajzyngier (PDG Lacroix) donne également quelques exemples https://youtu.be/tBiCbQ_F21s

5. CONCLUSIONS

Les points suivants nous paraissent cruciaux :

- L'impact du numérique est stable ces dernières années, même si la consommation des réseaux est en légère croissance, et ceci alors que le trafic de données est en croissance exponentielle.
- Une croissance forte du trafic fait craindre que cette stabilité de l'impact du numérique ne soit pas pérenne. Par ailleurs, les objectifs climatiques de la conférence de Paris doivent aussi nous amener à envisager des pistes de baisse de la consommation énergétique du numérique et des réseaux ;
- Les différentes composantes du numérique sont intimement liées, la consommation des réseaux est associée à celle des terminaux, et le tout est étroitement lié à l'évolution des usages. Nos approches se doivent donc d'être holistiques ;
- la 5G, plutôt qu'un problème, fait partie de la solution aux impacts énergétiques du numérique, avec une efficacité énergétique fortement améliorée par rapport aux générations précédentes et avec une capacité à accompagner d'autres secteurs dans leur transformation numérique. Ce qui est sûr est que si nous restons sur les générations technologiques actuelles nous serons dans l'incapacité de stabiliser voire de faire baisser les émissions, compte-tenu de la croissance actuelle et estimée du trafic. De même, il est illusoire de penser que le trafic cessera d'augmenter si on reste en 4G ;
- Evidemment la croissance du trafic ne doit pas être vue comme inéluctable et subie. C'est à l'ensemble des acteurs de l'infrastructure numérique et à la société dans son ensemble d'orienter les usages, tant professionnels que grand public, pour que l'évolution du trafic soit maîtrisée, voulue et créatrice de valeur.

Certains demandent un moratoire au déploiement de la 5G, le temps d'en évaluer le besoin et les impacts. Au vu des avantages que la 5G peut avoir à la fois pour absorber de manière plus efficace un trafic de données en croissance et également en soutien aux usages innovants de nombreux secteurs verticaux (industrie 4.0, santé, mobilité, villes intelligentes, etc.), il est à notre sens crucial de ne pas rater le train d'un déploiement qui contribuera activement à une meilleure efficacité énergétique, au développement d'usages innovants et, plus globalement, à l'amélioration de la compétitivité de notre pays sur l'échiquier international.

Il est par ailleurs illusoire de penser que nous pourrions séquencer d'une part la décision de lancer ou pas la 5G et d'autre part les modalités de son déploiement. Les deux processus se dérouleront en réalité simultanément et de façon itérative, les premiers déploiements 5G nous permettant de mieux comprendre les usages et les améliorations à apporter par la suite.

La bonne approche nous semble être d'embrasser l'innovation apportée par le déploiement de la 5G, tout en gardant la maîtrise des décisions concernant son utilisation. Nous sommes persuadés que cette stratégie est applicable au déploiement de la 5G en France.

GLOSSAIRE

3GPP - *3rd Generation Partnership Project* : coopération entre organismes de normalisation en télécommunications tels que : l'UIT, l'ETSI, l'ARIB/TTC, le CCSA, l'ATIS et le TTA, qui produit et publie les spécifications techniques pour les réseaux mobiles.

3GPP Releases : Les normes 3GPP subissent des changements continuels. Afin de garantir une diffusion organisée des nouvelles fonctionnalités, les nouvelles versions des normes ont lieu à des moments planifiés. Voir également le calendrier : <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/3gpp/standards-releases.php>

API REST : style d'architecture logicielle définissant un ensemble de contraintes à utiliser pour créer des services web. Les services web conformes au style d'architecture REST, aussi appelés services web RESTful, établissent une interopérabilité entre les ordinateurs sur Internet.

Beamforming : technique de traitement du signal utilisée dans les réseaux d'antennes et de capteurs pour l'émission ou la réception directionnelle de signaux.

Cloud Computing : accès à des services informatiques via Internet à partir d'un fournisseur. Les principaux services proposés en cloud computing sont le SaaS, le PaaS et le IaaS ou le MBaaS.

Edge Computing : méthode d'optimisation employée dans le cloud computing qui consiste à traiter les données à la périphérie du réseau, près de la source des données.

LTE : évolution des normes de téléphonie mobile GSM/EDGE, CDMA2000, TD-SCDMA et UMTS. La norme LTE, définie par le consortium 3GPP, a d'abord été considérée comme une norme de troisième génération « 3.9G »

Massive MIMO : une technologie émergente pour les nouveaux systèmes de communication et de l'internet des objets, basée sur l'usage de centaines d'antennes interférant entre elles. C'est une des techniques candidates pour la 5G et pour succéder à la 4G LTE et LTE-A.

Mobile Edge Computing : concept d'architecture de réseau défini par ETSI ^[1] qui permet des capacités de cloud computing et un environnement de service informatique à la périphérie du réseau cellulaire ^{[2] [3]} et, plus généralement en bordure de tout réseau.

NFV - *Network Function Virtualisation* : La virtualisation des fonctions réseau est un concept d'architecture réseau qui utilise les technologies de virtualisation informatique pour virtualiser des classes entières de fonctions de nœuds réseau en blocs de construction qui peuvent se connecter, ou enchaîner, pour créer des services de communication.

OFDMA : technique de multiplexage et de codage des données utilisée principalement dans les réseaux de téléphonie mobile de 4^e et 5^e génération.

Power Usage Effectiveness (PUE) : Le PUE est un ratio qui décrit l'efficacité avec laquelle un centre de données informatique utilise l'énergie et plus précisément, la quantité d'énergie utilisée par l'équipement informatique uniquement (sans prendre en compte les frais liés au refroidissement et aux autres frais généraux). L'indice est utilisé pour qualifier l'efficacité énergétique d'un centre d'exploitation informatique. C'est un des éléments de l'informatique éco-responsable.

QOS : Qualité de service : capacité à véhiculer dans de bonnes conditions un type de trafic donné, en termes de disponibilité, débit, délais de transmission, gigue, taux de perte de paquets...

SDN – Software Defined Networks : ensemble de technologies ayant comme points communs :

- un contrôle centralisé des ressources réseau : Jusqu'à présent, la plupart des équipements réseau se configurent de manière individuelle en se connectant sur ceux-ci. D'une part, cette approche est coûteuse en temps pour des grands réseaux et d'autre part sujette à des erreurs humaines. Le SDN définit des normes (netconf, REST, BGP-LS...) pour lire les états du réseau et agir sur sa configuration depuis des serveurs.
- une orchestration centralisée : Ces protocoles autorisent une reconfiguration du réseau de manière centralisée par des transactions. Une transaction est une opération élémentaire qui agit sur un ou plusieurs équipements. En général, les transactions sont implémentées sous forme d'API pour être utilisées par des programmes tiers et sur des composants logiciels séparés de l'orchestrateur appelé contrôleurs pour plus de modularité.
- une virtualisation des ressources physiques : à partir du point de management, en général via une interface web, on peut alors agir sur la configuration d'un réseau local ou le routage indépendamment des équipements physiquement installés sur les sites (par exemple avec ou sans redondance) détachant ainsi la nature de l'opération de son mode d'opération (abstraction).