



5G

CONTRIBUTION ET ÉCLAIRAGE DU  
CSF INFRASTRUCTURES NUMÉRIQUES  
SUR LA QUESTION ENVIRONNEMENTALE  
ASSOCIÉE AU NUMÉRIQUE ET À LA 5G

**ÉDITION 2022**  
Groupe de travail 5G

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

Contributeurs : Mathieu Lagrange (b<>com), Matthieu Evrard (Acome), Pascal Guiheneuf (CFDT), Viktor Arvidsson (Ericsson), Gérard Memmi (IMT), Christophe Grangeat (Nokia), Quentin Fousson (Orange), Eric Hardouin (Orange), Azeddine Gati (Orange), Samuli Vaija (Orange), Esteban Selva (Orange), Marc Vautier (Orange), Augustin Chaigne (Samsung), Mathieu Belouar (SNCF), Sébastien Kaiser (SNCF), Marc Kieken (SNCF), Hacène Lahreche (SNCF), Olivier Audouin (Systematic), Jonathan Rivalan (Alter Way / Smile)

Comité de relecture : Viktor Arvidsson (Ericsson), Mathieu Belouar (SNCF), Matthieu Evrard (Acome), 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), Gérard Memmi (IMT), Stella Morabito (AFNUM), Jonathan Rivalan (Alter Way / Smile), Hervé Saliou (Images & Réseaux), Marie Santoli (AFNUM), Esteban Selva (Orange)

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.

# SOMMAIRE

Introduction .....	3
1. Synthèse .....	4
2. Numérique, TIC, Réseaux : clarification des périmètres.....	8
3. Qu'est-ce que la 5G ? .....	9
4. Les consommations énergétiques et l'impact carbone du numérique : état des lieux.....	12
A. Une tendance globale à la stabilité.....	12
B. Quelques études de cas .....	17
C. Les spécificités françaises : cas pratique du réseau Orange .....	23
5. La 5G et son rôle dans l'évolution de l'impact du numérique .....	28
A. Une prise en compte native des enjeux énergétiques .....	28
Une normalisation soucieuse d'efficacité énergétique.....	28
Des efforts d'optimisation sur toute la chaîne .....	28
B. Les impacts actuels et futurs de la 5G sur la consommation énergétique des réseaux.....	29
C. Les actions possibles pour contenir et faire baisser l'empreinte carbone de la 5G .....	30
D. Les impacts environnementaux liés aux terminaux 5G .....	31
E. Le remplacement des réseaux et des terminaux.....	33
F. Les engagements individuels et collectifs.....	34
G. Les infrastructures de calcul (data centers).....	35
H. Les orchestrateurs de services open source .....	36
6. Les usages .....	37
A. Des bénéfices pour d'autres secteurs.....	37
B. Bénéfices environnementaux des communications V2X.....	41
C. D'une couverture totale À une couverture adaptée aux usages : Le cas de la SNCF .....	43
Usages et acceptabilité.....	43
Flux de personnes et flux de données : coexistence et optimisation .....	44
Des retombées environnementales et sociales directes.....	45
D. Les effets rebonds.....	47
E. Usages et sobriété numérique .....	48
7. Conclusions .....	49
Glossaire.....	50
Annexes.....	51
1. Recueil de données pour l'analyse de cycle de vie du terminal 5G.....	51
2. Modélisation du semi-conducteur.....	53

## 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 des ressources naturelles.

La transition énergétique et environnementale, qui vise à réduire les impacts de l'activité humaine sur la planète, implique un changement de mentalités et d'habitudes de nature à bousculer l'organisation de nos sociétés et heurter la dimension économique. C'est pourquoi, 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 années 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 finalement l'outil d'une explosion de la consommation énergétique (« effet rebond »).

Dans ce document, 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 pas 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.

Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que la 5G est une composante du domaine plus large des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), qui incluent les technologies de réseaux fixes (RTC, ADSL, fibre) et mobiles (2G, 3G, 4G, 5G), ainsi que les terminaux utilisateurs et les data centers hébergeant les plateformes de services numériques. Une mutation profonde de ce paysage technologique est en cours, qui aura des impacts positifs importants en termes de bénéfices sociétaux comme d'amélioration de l'efficacité énergétique des TIC. On peut citer notamment le décommissionnement en cours ou à venir au cours de la décennie des technologies RTC, 2G et 3G, le déploiement de la fibre, ou encore l'amélioration significative de l'efficacité énergétique des data centers.

## 1. SYNTHÈSE

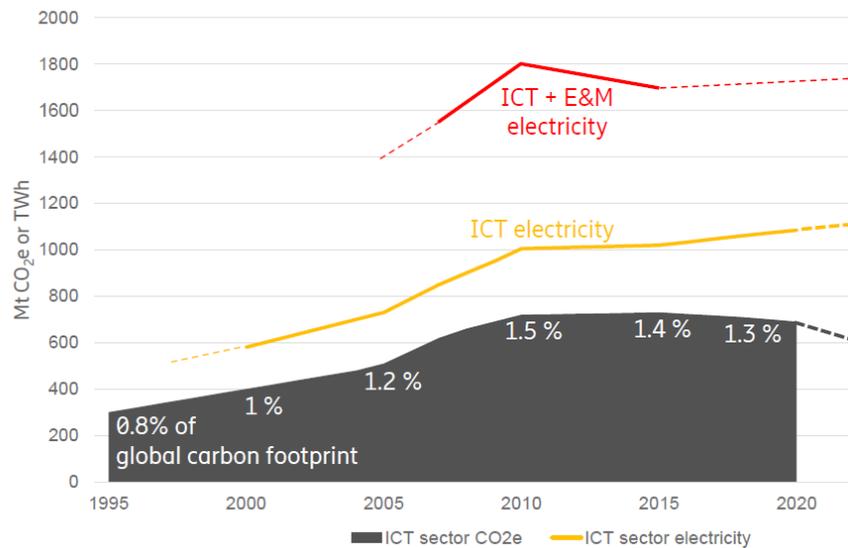
Si les nouveaux cas d'usage de la 5G et le potentiel de transformation associé semblent être au centre des préoccupations actuelles, il est tout aussi crucial de s'intéresser à la question environnementale, au cœur de nombreux débats.

On assiste, en particulier, à une remise en question dans les médias du bien-fondé du déploiement de la 5G, arguant par exemple d'impacts négatifs sur l'environnement pour des bénéfices discutables pour le grand public. Le questionnement est légitime, mais les prises de position en ce sens s'appuient souvent sur des arguments erronés ou partiels, et il convient à notre sens de les corriger ou de les compléter pour contribuer à un débat de société sain, fondement d'une stratégie de déploiement 5G ambitieuse et assumée.

Le premier enjeu consiste à définir le périmètre de l'étude. La 5G est évidemment intimement associée au reste des réseaux mobiles, et plus largement aux réseaux de connectivité télécom, fixe ou mobile. De même, considérer la 5G sans regarder les terminaux ou les serveurs a peu de sens. Il faut par ailleurs distinguer les technologies de l'information et de la communication (TIC) des téléviseurs et terminaux media. L'impact du numérique est estimé à 2% des émissions de GES mondiaux en prenant en compte les réseaux, les centres de données et les équipements des clients y compris les téléviseurs. Cet impact a été évalué à 1.3% sans les TV et les écrans<sup>1</sup> (périmètre plus classique des TIC).

---

<sup>1</sup> Malmodin, J., 2020. The ICT sector's carbon footprint. Presentation at the techUK conference in London Tech Week on 'Decarbonizing Data,' 2020. [\[PDF\] The future carbon footprint of the ICT and E&M sectors | Semantic Scholar](#)

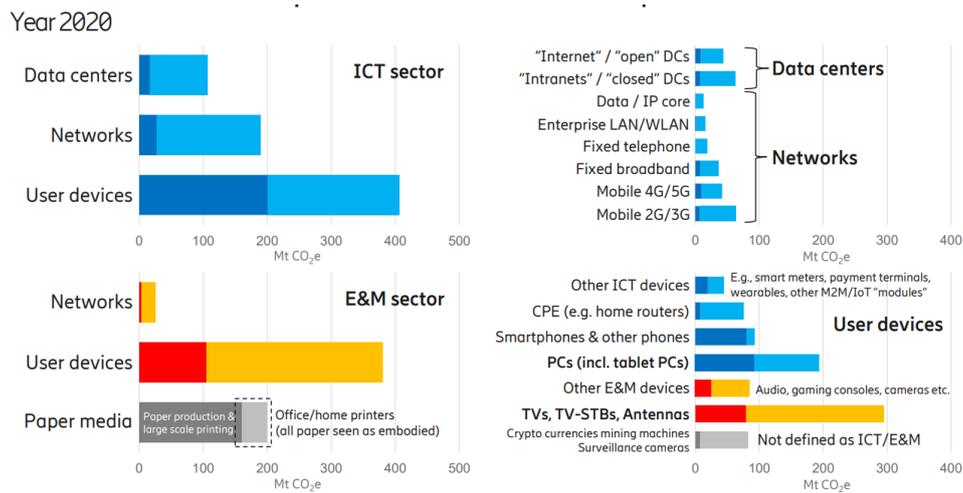


Source : Ericsson (2020)

ICT : Information and Communication Technology

E&M : Entertainment and Media

La consommation, et plus particulièrement l'impact carbone, provient des réseaux, des serveurs et des différents terminaux. Les émissions carbone se répartissent entre celles résultant de la production et du transport (carbone embarqué) et celles provenant de l'utilisation et du cycle de vie de l'équipement. La dernière étape, la fin de vie et idéalement le recyclage, a aussi un impact majeur, en particulier sur la gestion des ressources rares. Dans ce contexte, la France a clairement une spécificité avec une électricité peu carbonée, qui pousse à mettre l'accent plus fortement sur le carbone embarqué.



Source Ericsson (2020) ; Bleu foncé/rouge : carbone embarqué ; Bleu clair/orange : carbone lié à l'utilisation. Note : ces chiffres sont obtenus pour le mix énergétique moyen au niveau mondial ; en France, où l'électricité est peu carbonée, les émissions liées à l'utilisation sont bien plus faibles.

La 5G est une évolution de la 4G, avec des améliorations significatives en termes de performances, y compris sur le plan énergétique. La 5G est attendue comme disruptive en termes d'usages et de transformations induites, particulièrement avec la 5G dite standalone. En effet, cette dernière

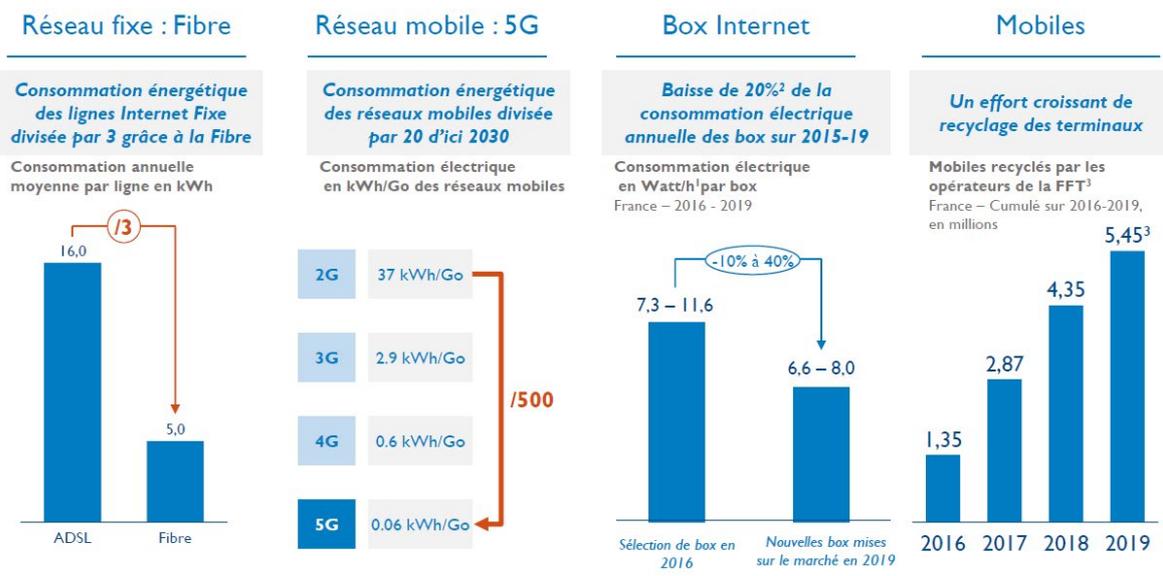
introduira une latence réduite ainsi que la possibilité de créer des réseaux privés virtuels et d'introduire du edge computing, plus facilement qu'en 4G. Les enjeux de la 5G sont également liés à la souveraineté et au développement économique. L'objectif de réduction de l'impact carbone ne peut pas être décorrélié de ces aspects, qui sont aussi des prérequis pour garder la maîtrise de notre autonomie stratégique.

Les premières études sur l'impact de l'introduction de la 5G sur les réseaux montrent que la 5G permet une réduction importante de la consommation énergétique par rapport à la consommation en 4G pour les mêmes usages. Ces gains sur la consommation énergétique des réseaux mobiles avec la 5G iront croissant avec le temps et le progrès technologique. Des gains similaires se retrouvent également sur les réseaux fixes (avec le passage du cuivre à la fibre) et sur les terminaux (dont la consommation énergétique en fonctionnement est en constante diminution et qui sont conservés plus longtemps et recyclés plus souvent).

Des réseaux télécoms essentiels face aux défis environnementaux



Des investissements des opérateurs télécoms qui ont un rôle central pour un numérique soutenable en France



Source : Arcep Note n°5 « L'empreinte carbone du numérique », Notices techniques des box opérateurs, Communiqué de presse Orange, Données agrégées FFT, Analyse Arthur D. Little  
Notes : (1) En mode veille, avec maintien de la connexion Internet ; (2) 3,9TWh en 2019 versus 4,9TWh en 2015 alors que le parc de box Internet a augmenté de 11% sur la période ; (3) Le nombre de mobiles repris/recyclés représente 18,2% des mobiles neufs mis en marché depuis 2016

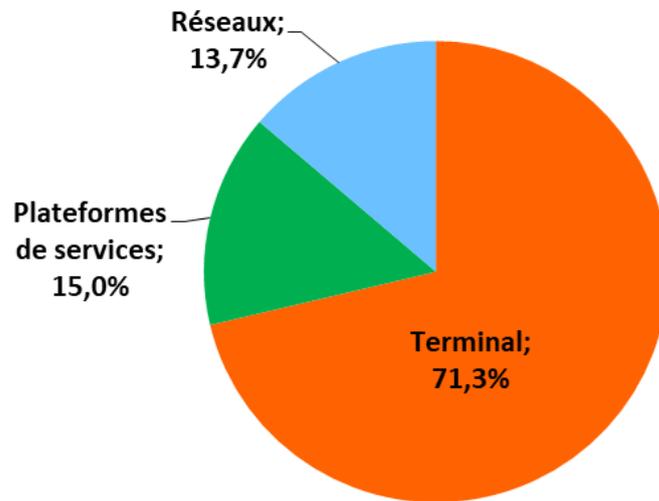


Source : FFT

Néanmoins, même si l'on peut observer une certaine stabilité des émissions carbone associées au numérique<sup>2</sup>, les disruptions à venir peuvent provoquer des changements de consommation énergétique. Par ailleurs, le respect des objectifs de la COP 21 imposera une perspective de forte réduction des émissions carbone du numérique. Ainsi, les gains de performance énergétique évoqués

<sup>2</sup> A ce titre, le rapport annuel d'Orange précise que « Nous avons pour objectif ambitieux d'être net zéro carbone en 2040 et nous nous sommes fixé l'objectif intermédiaire de baisser nos émissions de CO2 de 30 % en 2025 par rapport à 2015. Entre 2015 et 2020, cette baisse est de 12,3 %. Les consommations d'énergie du réseau et du système d'information représentent 86,8 % de la consommation totale du Groupe et 84,5 % des émissions de CO2. Les plans d'action déployés ont permis de limiter l'augmentation des consommations énergétiques du Groupe à +1,4 % en 2020 par rapport à 2019, malgré une augmentation particulièrement significative du trafic en 2020. »

ci-dessus pourraient être contrebalancés par l'accroissement du nombre de terminaux connectés (la corrélation de la consommation est plus forte avec le nombre de terminaux qu'avec le trafic, pour lequel la corrélation est souvent très faible).



Source : Orange - Répartition de l'impact carbone entre terminaux, réseaux et data centers/plateformes de services en France (selon le mix énergétique français peu carboné pour l'utilisation des équipements).

Les considérations sur les usages et les recommandations associées ont également été structurantes dans les débats. Le streaming a parfois été surévalué, mais les études distinguant la part fixe de la consommation (permettant en quelque sorte « d'allumer le réseau ») et la part variable, permettent d'affiner les connaissances sur ce point. En outre, la comparaison entre l'accès fixe et mobile n'est pas triviale et dépend de multiples facteurs. Le fixe sera plus intéressant pour de gros débits, notamment sur des temps importants. Les deux solutions demeurent donc bien complémentaires. Néanmoins, il est certain que lorsque le réseau fixe est disponible, on a intérêt, du point de vue de la consommation énergétique de l'infrastructure réseau, à l'utiliser de préférence au réseau mobile, car la consommation énergétique du réseau fixe est quasi-indépendante de son usage, au contraire du réseau mobile dont la consommation énergétique varie en partie avec le taux d'usage.

L'évaluation de l'empreinte environnementale des réseaux doit être effectuée de manière systémique en prenant en compte à la fois les effets induits positifs du numérique sur l'empreinte carbone d'autres secteurs, les possibles effets rebonds, et, de manière plus transversale, les régulations et les pratiques d'usage qui pourraient être mises en place, y compris pour inciter à une certaine forme de sobriété.

En conclusion nous retiendrons que la tendance actuelle d'évolution de l'empreinte carbone des TIC est stable<sup>3</sup>, mais que cela ne doit pour autant pas occulter les objectifs de baisse de l'empreinte environnementale du secteur. Les études et les évaluations en cours doivent être poursuivies, afin notamment d'identifier les impacts potentiels sur les ressources abiotiques, qui sont encore mal connus. Les TIC présentent un indéniable potentiel de réduction de l'empreinte environnementale

<sup>3</sup> Le [rapport réalisé par l'opérateur Telia](#) montre même que l'impact carbone de l'entreprise en Suède (pays ayant un profil énergétique proche de la France) est en baisse régulière depuis 20 ans. Depuis 2001, les tonnes de CO2 générées par Telia ont été réduites de près de 89% aujourd'hui.

d'autres secteurs, qu'il s'agit d'exploiter et de développer en collaboration avec ces secteurs. Afin de maximiser la valeur apportée par les TIC à la société, l'économie et l'environnement, il conviendra d'associer les gains apportés par les dernières générations technologiques, avec une politique maximisant les effets bénéfiques induits, tout en réduisant les impacts négatifs du numérique.

## 2. NUMÉRIQUE, TIC, RÉSEAUX : CLARIFICATION DES PÉRIMÈTRES

Des études scientifiques ont été lancées depuis plusieurs années afin de quantifier l'impact du numérique d'une manière générale. On peut par exemple citer l'étude Gartner ([link](#)), le centre de recherche d'Ericsson ([link](#)), les projets de recherche comme le projet Européen Earth ou l'initiative mondiale GreenTouch en 2015 et les travaux de l'université de Gand ([link](#)). Ces travaux, qui semblent aboutir à des résultats différents, convergent néanmoins sur les points suivants :

- L'impact du numérique dépend fortement du périmètre pris en compte, notamment en ce qui concerne les équipements utilisateurs ou user devices. Ainsi, beaucoup d'études ont en effet été réalisées sur une temporalité où les TV ne faisaient pas partie des technologies de l'information et de la communication (TIC) mais plutôt de la classe « Entertainment & Media ». Aujourd'hui, cette frontière est moins marquée puisque de nombreuses TV sont connectées, ce qui amène à inclure les TV connectées dans le champ des TIC. La classification peut dès lors s'avérer plus complexe : par exemple, comment prendre en compte les émissions d'un réfrigérateur connecté ? Doivent-elles être attribuées aux TIC, quand bien même elles seraient principalement dues à l'activité de refroidissement du réfrigérateur et non au module de communication ?
- La transposition des impacts évalués en GES à l'échelle mondiale doit se faire en considérant le mix énergétique au niveau de chaque pays. En effet, cela va beaucoup jouer surtout sur la phase d'usage des appareils électroniques.

En revanche, ces différents travaux mettent aussi en valeur des divergences, notamment sur la part du numérique dans les émissions de gaz à effets de serre (GES) mondiaux. Selon l'étude de J. Malmodin (Ericsson), la part du numérique est à 2 % des émissions de GES mondiaux<sup>4</sup> en prenant en compte les réseaux, les centres de données et les équipements des clients y compris les TV. Cette part a été évaluée à 1.3 % sans les TV et les écrans. Cependant d'autres acteurs ne sont pas d'accord avec cette évaluation, par exemple l'étude GreenIT.fr sur les impacts environnementaux du numérique en France<sup>5</sup> estime les émissions de GES du numérique à hauteur de 3,2% des émissions totales de GES. A noter la différence de périmètre géographique entre ces deux valeurs (monde d'une part, France d'autre part).

---

<sup>4</sup> Malmodin, J., 2020. The ICT sector's carbon footprint. Presentation at the techUK conference in London Tech Week on 'Decarbonizing Data,' 2020. [\[PDF\] The future carbon footprint of the ICT and EaM sectors | Semantic Scholar](#)

<sup>5</sup> 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/>

D'autre part, ces publications scientifiques et ces travaux de recherche dans le monde ont permis de définir un contour de chaque domaine que nous pouvons résumer d'une manière simplifiée comme suit :

- Le numérique regroupe l'ensemble des TIC et des appareils « Entertainment & media », incluant l'ensemble des appareils électroniques communicants fixes ou mobiles ;
- Les TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) sont une sous-partie du numérique. Ce domaine inclut d'après l'OCDE et l'UIT les réseaux de télécommunications, les data centers et les équipements clients communicants (téléphones, ordinateurs, routeurs, IoT, etc. MAIS pas les TV, à l'exception des TV connectées) ;
- Les réseaux sont une sous-partie des TIC et ils regroupent les réseaux de télécommunication fixes (DSL, fibre, cuivre...) et mobiles (2G, 3G, 4G, 5G...) des opérateurs.

Il nous paraît important de clarifier ces notions car leur utilisation est devenue très répandue dans le débat public comme dans le discours des experts et des institutions publiques. Cela permet de comprendre les périmètres dont il est question et d'interpréter les chiffres correspondants, de manière éclairée : ainsi, ne pas faire l'amalgame entre par exemple l'impact du numérique en général, d'une part, et celui d'une sous-partie comme les réseaux ou même une technologie réseau (comme la 5G) d'autre part. Cela ouvre également la porte à une évaluation standardisée de l'impact du numérique et de ses sous-ensembles afin d'identifier les gisements d'optimisation et de réduction de leur impact environnemental.

### 3. QU'EST-CE QUE LA 5G ?

La 5G est la 5<sup>ème</sup> 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, 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. En France, la 5G a été lancée commercialement en décembre 2020.

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.

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 à priori ponctuelle et ciblée. De plus, la 5G s'inscrivant pleinement dans la continuité de la 4G, les équipements matériels et logiciels seront largement communs.

La 5G combine l'utilisation d'**antennes dites « Massive MIMO »** (*massive MIMO antennas*<sup>6</sup> qui comportent plusieurs dizaines d'éléments, potentiellement jusqu'à plusieurs centaines), qui ont pour but d'augmenter la directivité, avec des **fréquences plus élevées**, dans les bandes 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 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**<sup>7</sup>, 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 3GPP<sup>8</sup> 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.

---

<sup>6</sup> Voir glossaire en fin de document

<sup>7</sup> Voir le glossaire en fin de document

<sup>8</sup> Ibid. - glossaire

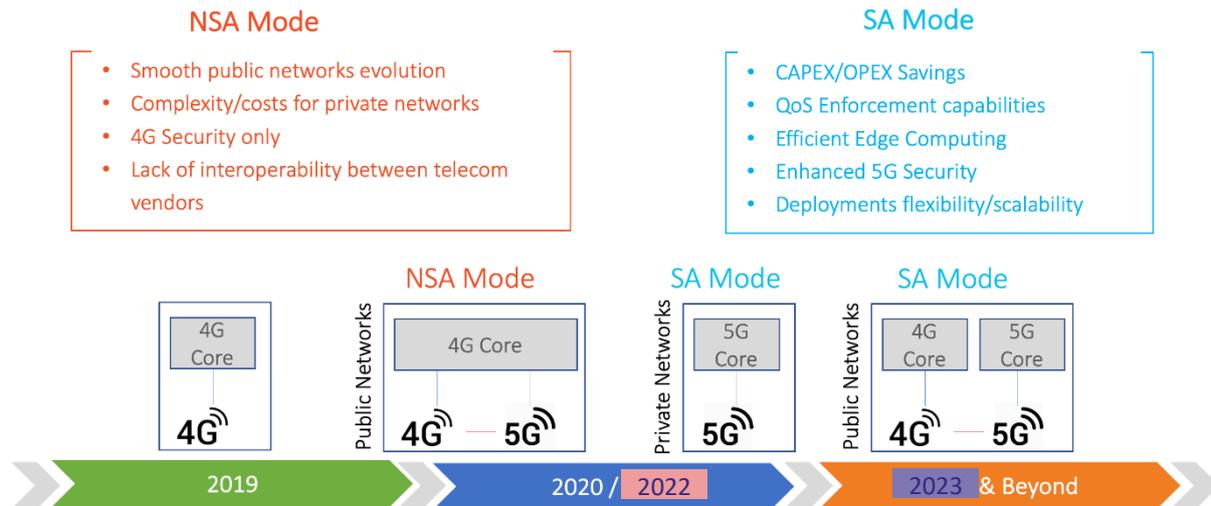


Figure 1. Plan de migration 5G de l'industrie, source interne b<>com

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*<sup>9</sup>) et de réseau programmable (SDN – *Software Defined Networks*<sup>10</sup>), 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.

<sup>9</sup> Ibid. - glossaire

<sup>10</sup> Ibid. - glossaire

## 4. LES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES ET L'IMPACT CARBONE DU NUMÉRIQUE : ÉTAT DES LIEUX

Pour pouvoir estimer l'impact environnemental de la technologie 5G, il faut comprendre le contexte télécom du déploiement de celle-ci et les dynamiques derrière l'impact environnemental des TIC au-delà de la 5G. Ici, nous considérerons majoritairement le périmètre des TIC (voir section 1). Nous mentionnons principalement l'impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES), ou impact carbone. Les autres impacts environnementaux éventuels des TIC (raréfaction des ressources abiotiques, contrainte en eau, perte de biodiversité, et autres), ne seront pas évoqués ici car ils ne sont pas encore bien connus et font actuellement l'objet d'études, notamment par le consortium Négaoctet.

Les TIC (Technologies de l'Information et de Communication, n'incluant pas les TV) représentent 1,3% des émissions carbone globales<sup>11</sup>. 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 Négaoctet](#), 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 STABILITÉ

Certaines études<sup>12</sup> montrent une stabilité de l'empreinte carbone du numérique ces dernières années, alors même que le trafic réseau croît de manière exponentielle. Sans pour autant parler de « découplage » entre le trafic réseau et les émissions carbone, nous pouvons affirmer, sous réserve des évolutions futures, que l'impact carbone reste relativement stable<sup>13</sup>.

La Figure 2 ci-dessous illustre ce phénomène. 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.

---

<sup>11</sup> Malmodin, J., 2020. The ICT sector's carbon footprint. Presentation at the techUK conference in London Tech Week on 'Decarbonizing Data,' 2020. [PDF] The future carbon footprint of the ICT and EaM sectors | Semantic Scholar

<sup>12</sup> Par exemple le rapport Ericsson « A quick Guide to your digital carbon footprint » (voir lien ci-dessus) ainsi que le rapport ITU : GSMA\_IP\_SBT-report\_WEB-SINGLE.pdf (itu.int)

<sup>13</sup> S'il y a un couplage, 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).

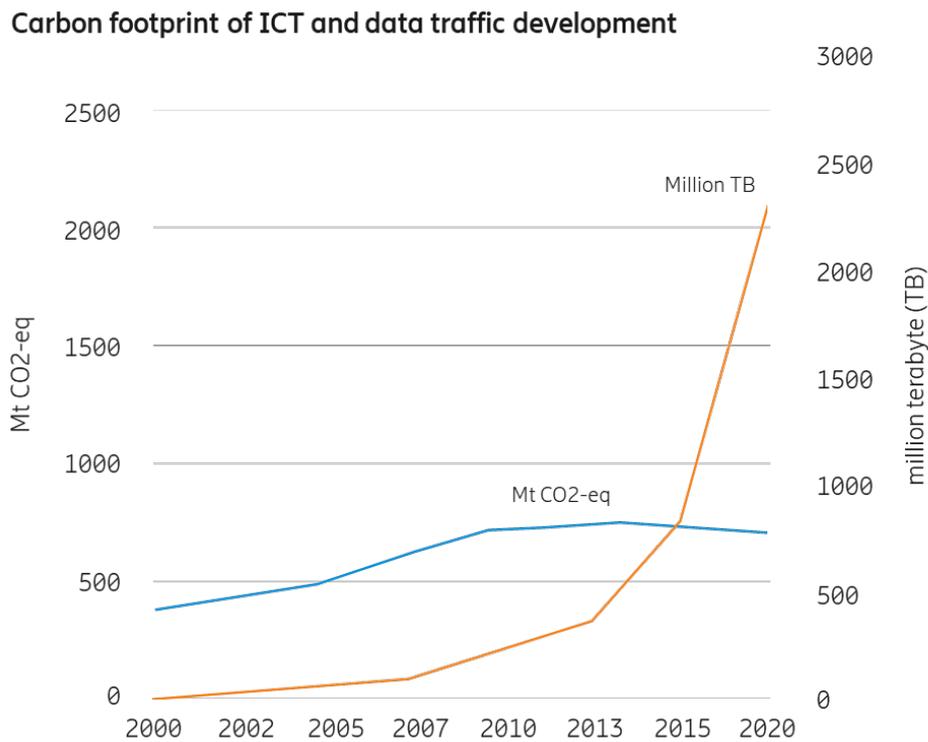


Figure 2. Source : Ericsson, « A quick guide to your digital carbon footprint »<sup>14</sup>

A noter : la figure 2 correspond à la situation mondiale et a été réalisée avec un mix énergétique mondial moyen 1 kWh ⇔ 600 g CO2eq, différent du mix français.

Pour analyser plus finement la tendance, nous proposons de pousser un peu plus loin l'analyse à travers l'exploration de deux autres dimensions :

- la répartition des émissions carbone par grande catégorie des TIC (équipement utilisateurs – réseaux d'opérateurs – plateformes de services ou data centers), et les tendances ;
- 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.

### Répartition de l'impact carbone par catégorie des TIC

Le schéma ci-dessous, issu d'une étude Ericsson de 2020, démontre que la consommation énergétique des réseaux est nettement inférieure à celle des équipements utilisateurs et du même ordre de grandeur que celle des data centers. Par ailleurs, des terminaux tels que les téléviseurs (et leurs périphériques associés) ou les fermes de serveurs pour les cryptomonnaies peuvent être très consommateurs.

<sup>14</sup><https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/industry-lab/reports/a-quick-guide-to-your-digital-carbon-footprint>

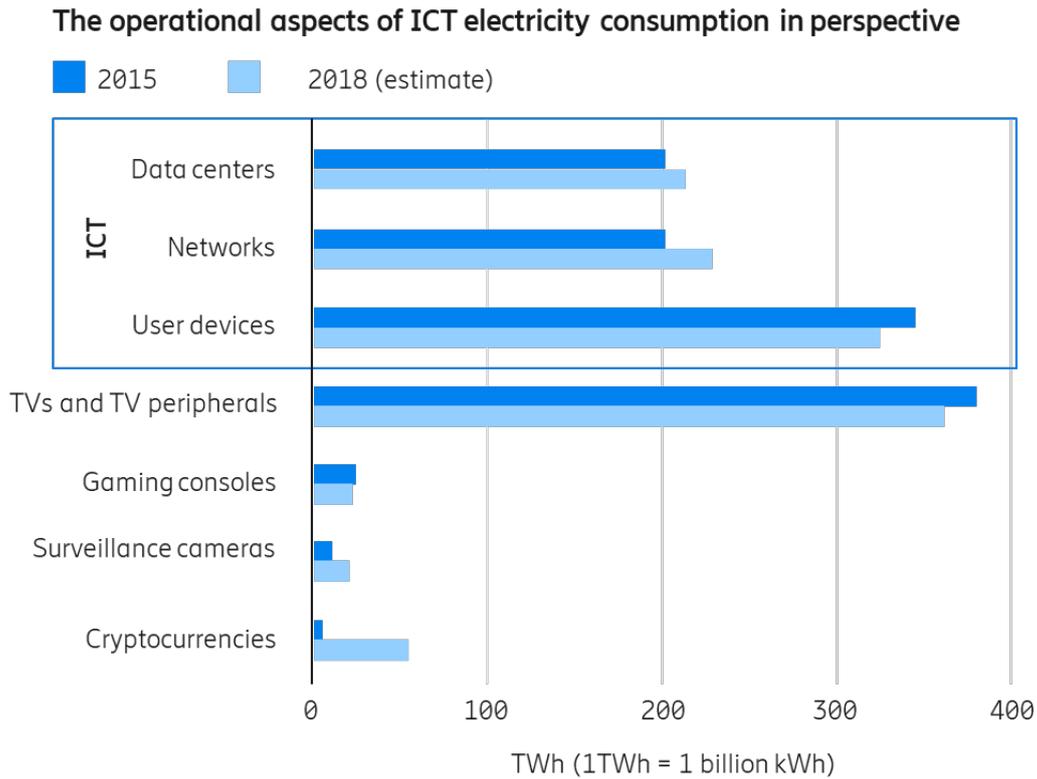


Figure 3. Comparaison des consommations électriques dans le secteur du numérique (extrait du rapport Ericsson « A quick guide to your digital carbon footprint » – 2020).

### Tendance par catégorie des TIC

#### *Terminaux utilisateurs*

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 monde illustre cette tendance (voir Fig. 4), avec une petite hausse en 2020 liée aux confinements :

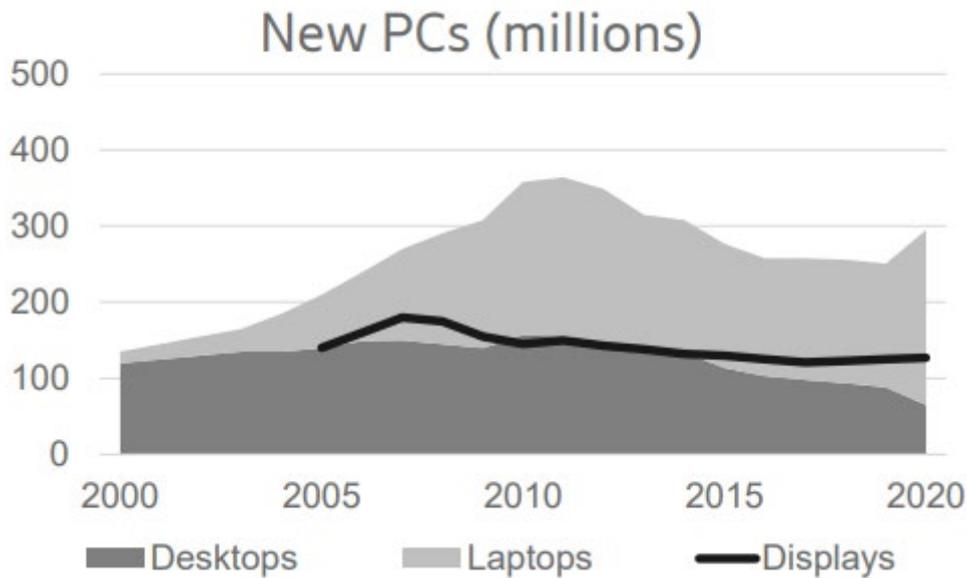


Figure 4. Livraisons annuelles de PC dans le monde, en millions d'unités (source Ericsson).

De même l'évolution des ventes de terminaux mobiles montre une tendance à la baisse et à un allongement de la durée de vie des terminaux.

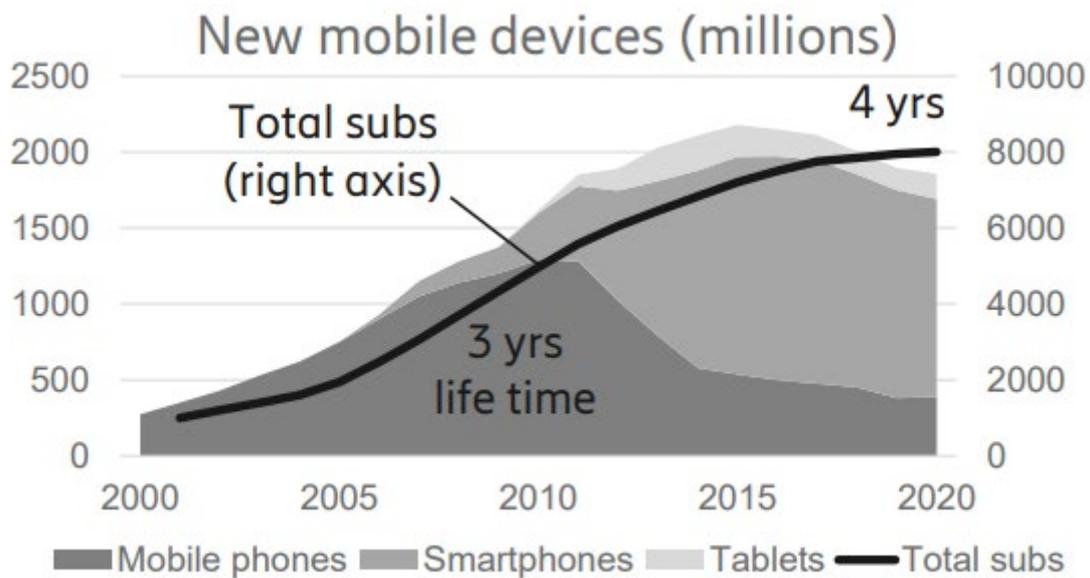


Figure 5. Livraisons annuelles d'appareils mobiles dans le monde, en millions d'unités (source Ericsson).

Concernant les smartphones, 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 en moyenne de 60 kg de CO<sub>2</sub><sup>15</sup>, ce qui correspond à 400 km parcourus par une voiture moyenne (en dehors de l'impact carbone

<sup>15</sup> <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/research-papers/life-cycle-assessment-of-a-smartphone>

de la construction des routes, de la production des véhicules,... qui réduit ultérieurement le nombre de kilomètres parcourus pour 60 kg de CO<sub>2</sub>), c'est-à-dire 2-3% de la distance moyenne parcourue chaque année par les véhicules particuliers en France.

### Réseaux d'opérateurs

La consommation électrique des réseaux est en croissance entre 2015 et 2018 (fig. 3), en particulier du fait de la hausse du nombre d'utilisateurs dans le monde.

### Data centers

Nonobstant l'augmentation du trafic internet et du volume de travail des data centers la consommation énergétique de ces derniers reste stable, comme le montre la figure ci-dessous, extraite d'un rapport de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) dédié à la consommation énergétique des data centers datant de juin 2020<sup>16</sup>.

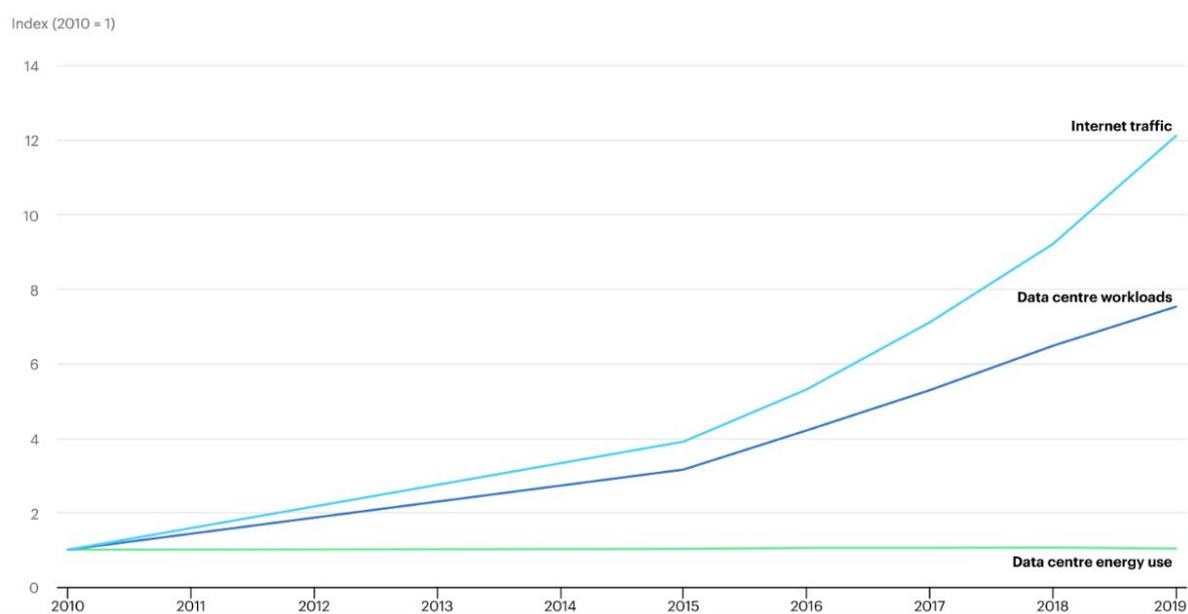


Figure 6. Source : IEA (2020), Data Centers and Data Transmission Networks, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

Une potentielle décorrélation entre consommation énergétique et augmentation des usages ne fait toutefois pas consensus. Il faut cependant noter qu'un certain nombre de rapports repose en partie sur des données parcellaires et datées. À 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.

### Répartition de l'impact carbone entre émissions embarquées (fabrication) et d'utilisation

Le schéma ci-dessous détaille la répartition de l'impact carbone (moyenné mondialement) 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 (toujours au niveau mondial) 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. C'est a fortiori le cas en France, où les émissions d'utilisation sont très faibles grâce au mix énergétique peu carboné

<sup>16</sup> <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks#resources>

(facteur d'émission : 1kWh ⇔ 60 g CO<sub>2</sub>e (ADEME), à comparer au facteur d'émission mondial 1kWh ⇔ 600 g CO<sub>2</sub>e). Au niveau mondial, 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 dans un pays à l'électricité fortement carbonée 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, ...). Dans des pays à l'électricité peu carbonée tels que la France, le poids relatif de la phase de fabrication des équipements est plus important : amortir l'impact de la fabrication sur une durée de vie plus longue est une piste à étudier vers une réduction accrue de l'empreinte des réseaux.

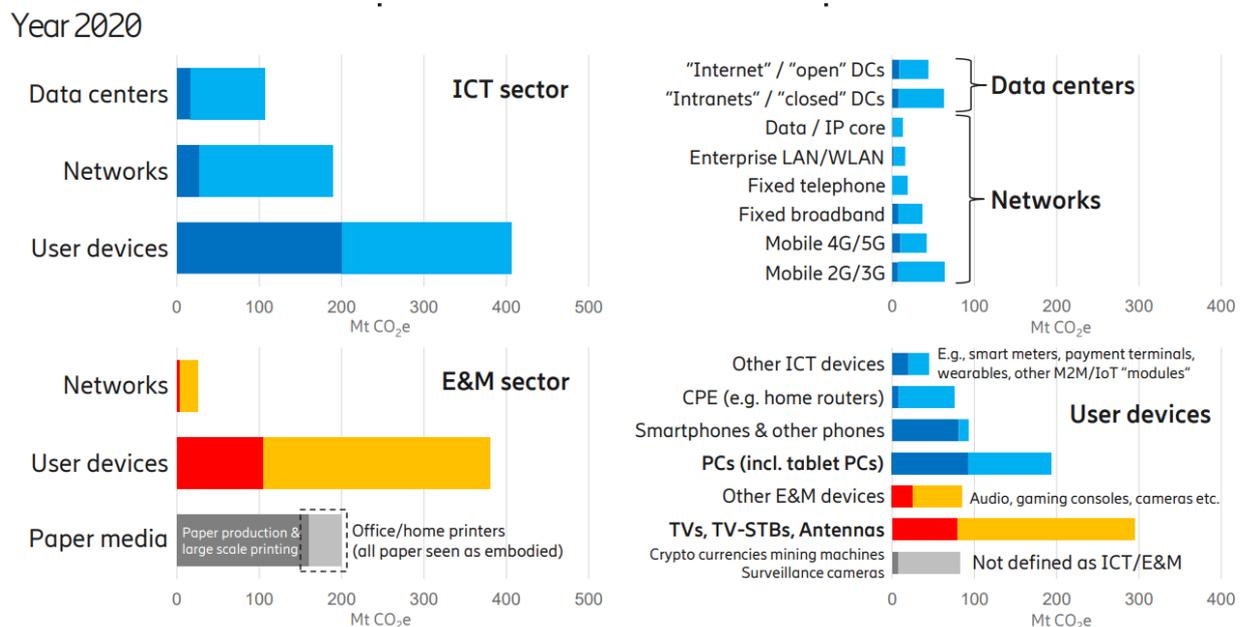


Figure 7. Répartition des empreintes carbone du numérique, chiffres Ericsson pour l'année 2020, les couleurs plus foncées correspondent au carbone embarqué (fabrication entre autres), et les couleurs plus claires au carbone émis dans la phase d'utilisation. Note : ces chiffres sont obtenus pour le mix énergétique moyen au niveau mondial ; en France, où l'électricité est peu carbonée, les émissions liées à l'utilisation sont bien plus faibles.

## B. QUELQUES ÉTUDES DE CAS

### Étude de cas n°1 : le *streaming*

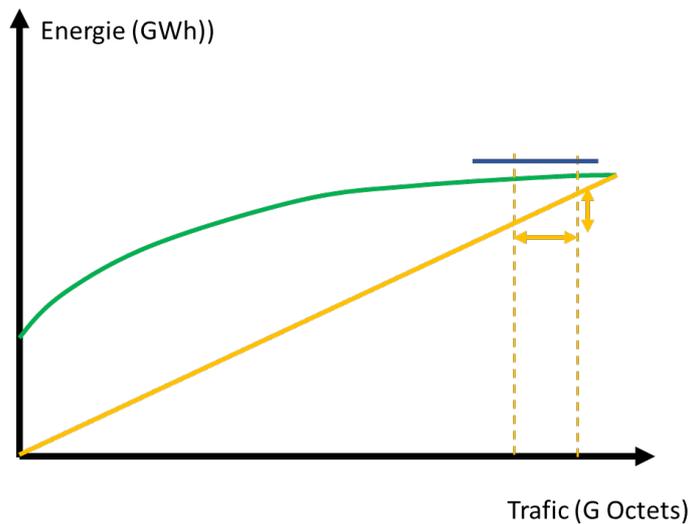
En raison de sa part importante et croissante dans la répartition du trafic de données, le streaming vidéo alimente de nombreuses discussions en termes d'impact carbone.

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 8, 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 8, 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'Orange<sup>17</sup>. 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

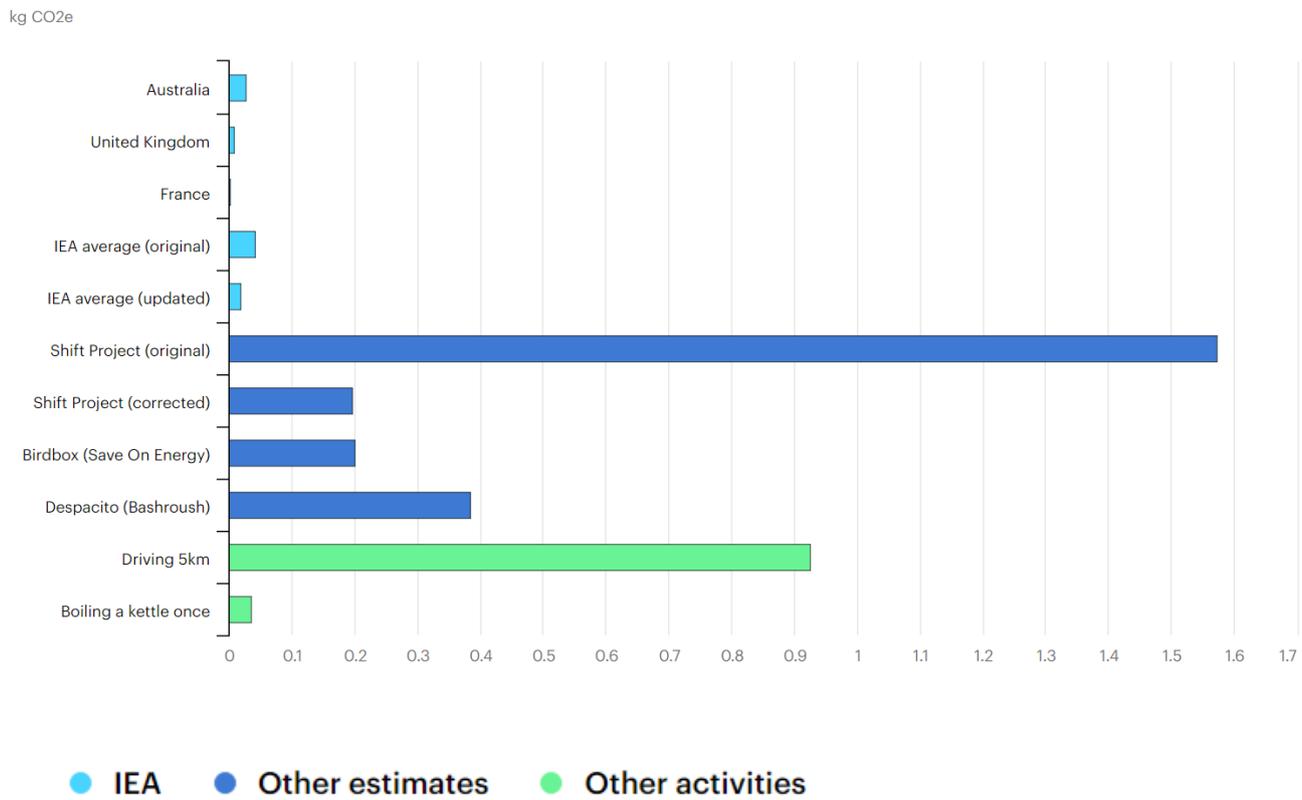
Option 1: évaluer la consommation énergétique du streaming en considérant que le rapport énergie/trafic suit une fonction linéaire et attribuer la quote part d'énergie à un flux de streaming suivant cette règle.

Figure 8. Source : interne Orange

L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), comme d'autres organisations, s'est aussi penchée sur ce sujet ([The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines – Analysis - IEA](https://www.iea.org/fr/publications/energy-efficiency-and-emissions-reports)) et il en ressort une variabilité assez forte des estimations entre les différentes études :

<sup>17</sup> [https://csr-datas.orange.com/downloads/2018-CSR\\_Orange-environnemental-fr.pdf](https://csr-datas.orange.com/downloads/2018-CSR_Orange-environnemental-fr.pdf)

CO2 emissions associated with a half-hour show on Netflix, 2019

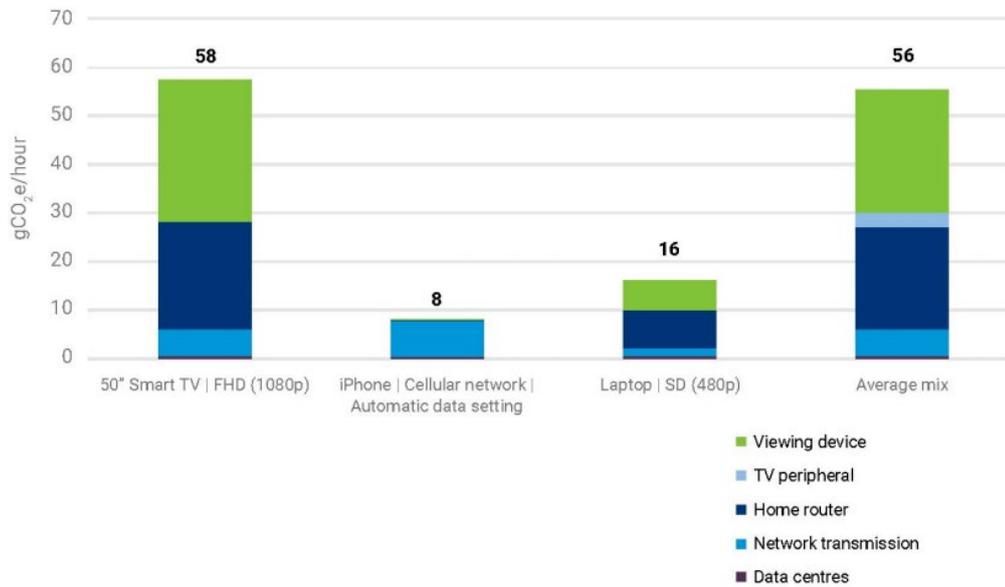


À noter que les chiffres dans cette figure sont obtenus pour le mix énergétique moyen au niveau mondial ; en France, où l'électricité est peu carbonée, les émissions liées à l'utilisation sont bien plus faibles.

Les chiffres estimés par l'AIE sont assez proches des chiffres de Carbon Trust, qui montrent :

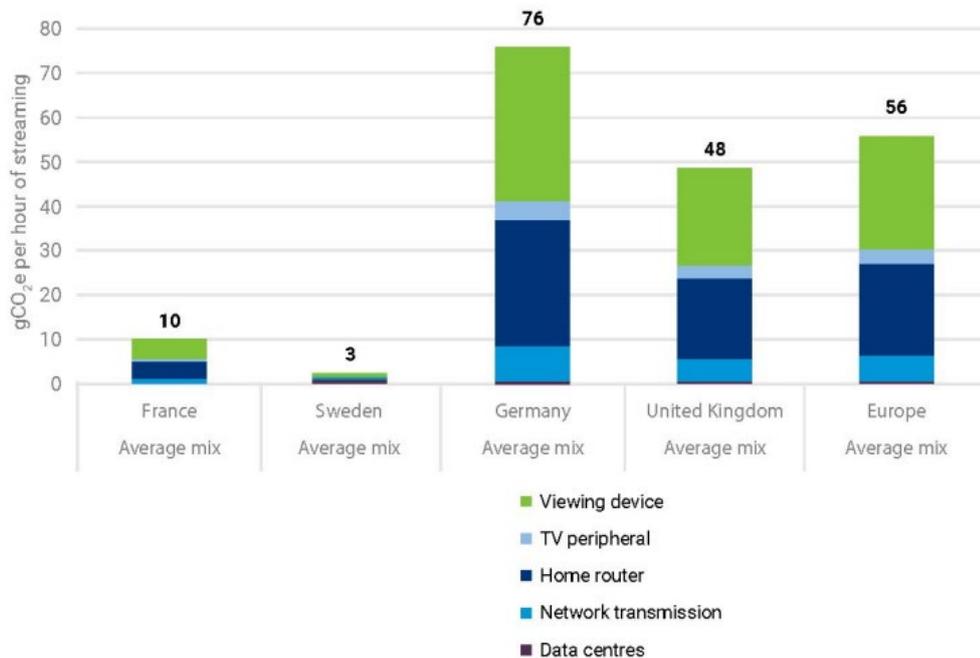
- L'importance du terminal (là aussi pour le mix énergétique moyen au niveau mondial ; en France, où l'électricité est peu carbonée, les émissions liées à l'utilisation sont bien plus faibles) ;

Emissions from video streaming by viewing device (European averages in 2020)



- Du mix électrique ;

Emissions from video streaming by region in 2020



Les conclusions de ce rapport de Carbon Trust nous semblent aussi assez éclairantes ;

- L'impact carbone d'une heure de streaming video est faible, autour de 56 g de CO2/heure en moyenne en Europe ;
- Le mix électrique entre pays a un poids important, et la décarbonation de l'électricité aura un impact majeur ;
- L'impact principal provient des terminaux (et en particulier de la taille des écrans) ;
- L'impact court terme et marginal du changement de la qualité vidéo est très faible ; sur le moyen et le long terme, l'impact de l'évolution du trafic de streaming sur l'accroissement de la capacité des réseaux est a contrario une question plus critique.

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.

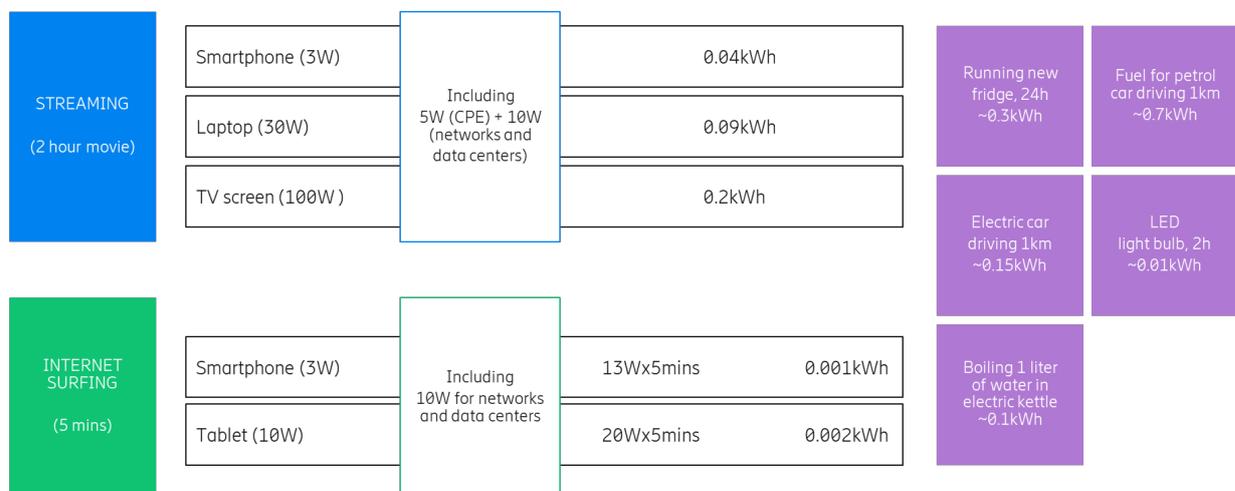


Figure 9. Consommations relatives du streaming, du surf et d'autres activités. Source : Ericsson – "A quick guide to your digital carbon footprint"

### Étude de cas n°2 : mobile vs. fixe

Un sujet qui remonte régulièrement porte sur la comparaison de l'impact carbone des communications mobiles par rapport aux communications fixes. De manière générale, en France et dans le monde, l'efficacité énergétique (en Go/kWh) des réseaux fixes est supérieure à celle des réseaux mobiles. De plus, les réseaux fixes écoulent en France un trafic bien plus important que les réseaux mobiles.

Il est à noter que les communications fixes ont un coût fixe plus élevé que le mobile, puisqu'un lien doit être déployé et alimenté en énergie pour chaque foyer abonné (qui peut comporter plusieurs utilisateurs). Le mobile fonctionne plus sur un mode mutualisé, puisque différents utilisateurs vont partager le même lien radio (et les infrastructures radio associées). A contrario, le coût variable sera plus élevé sur le mobile et plus faible (voire inexistant) pour le fixe, il y a donc un point de basculement, en fonction du trafic et des débits, à partir duquel le fixe sera en général plus intéressant que le mobile. Le tableau ci-dessous éclaire un peu ce paradigme :

#### Comparison based on subscribers:

- Mobile global RAN right now: 140 TWh, 8.2 B subs (only the human part) = 17 kWh/sub
- Fixed broadband + CPE: 40+102 = 142 TWh, 1.15 B households = 123.5 kWh/household, 62 kWh/person (2 p/house), 41 kWh/person (3 p/house) etc.
- PSTN+VoIP is about 53 TWh for 0.9 B subs including fixed phones = 59 kWh/sub

#### Comparison based on traffic:

- 0.2 kWh/GB for mobile
- 0.06 kWh/GB for fixed
- 0.01 kWh/GB for core (same for fixed and mobile)

#### But also with large variations:

- Finland with highest mobile data in the world and single out their 4G we get a figure of 0.05 kWh/GB which is then better than the fixed average.
  - Finland mobile subs use now >400 GB per year and the network consumes about 40 kWh/sub or about 20 kWh/sub for only 4G that carries most data
- ⇒ **5G and optimized dimensioning can improve ratios**

Figure 10 : Comparaison consommations électriques réseaux fixe et mobile (Source : Ericsson)

L'agence internationale de l'énergie propose également un outil en ligne de comparaison de l'impact carbone du streaming entre une connexion 4G et Wi-Fi ([The carbon footprint of streaming video : fact-checking the headlines – Analysis – IEA](#) ). Sans rentrer dans les détails, il en ressort que l'impact carbone du streaming est assez similaire et que le nombre de terminaux connectés simultanément à la borne Wi-Fi exerce une influence assez significative. La conclusion est plus probablement que la variable principale est plutôt le terminal et la taille de l'écran. Dans cette même logique, les effets induits peuvent être considérables, un streaming sur un réseau mobile se fera plus naturellement sur un petit écran de smartphone alors qu'un streaming sur réseau fixe peut se faire plus logiquement sur un des plus grands écrans du domicile.

En France, l'étude d'Orange (selon l'option 1 ci-dessus) menée sur la consommation des réseaux fixes (incluant les boxes chez l'abonné) et mobiles d'Orange France pour un usage de streaming montre que le réseau fixe sur accès fibre consomme 20 fois moins d'énergie que le réseau mobile pour délivrer 1 Go de données.

On voit ainsi que la méthodologie utilisée et la zone géographique considérée peuvent affecter significativement les résultats de la comparaison entre réseau fixe et réseau mobile. Néanmoins, il est certain que lorsque le réseau fixe est disponible, on a intérêt du point de vue de la consommation énergétique de l'infrastructure réseau à l'utiliser de préférence au réseau mobile, car la consommation énergétique du réseau fixe est quasi-indépendante de son usage, au contraire du réseau mobile dont la consommation énergétique augmente avec l'usage.

En conclusion, les deux réseaux, fixes et mobiles sont évidemment complémentaires en termes d'usages et de performances, ils sont par ailleurs également de plus en plus imbriqués, cette « confrontation » entre les deux n'a donc pas lieu d'être. La 5G a par ailleurs des performances qui se rapprocheront progressivement du fixe avec l'introduction de la bande 26 GHz. Lorsque le réseau fixe

est disponible, son usage est cependant préférable à celui du mobile en termes de consommation électrique de l'infrastructure réseau.

### C. LES SPÉCIFICITÉS FRANÇAISES : CAS PRATIQUE DU RÉSEAU 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.

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).

À l'échelle des **terminaux** (qui représentent l'ensemble des équipements connectés et pas seulement les smartphones) 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). À 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'AIE) 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/Mo). 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/Mo en kg équivalent CO<sub>2</sub>/Mo.

La Figure 11 présente la répartition de l'impact carbone (kg équivalent CO<sub>2</sub>) à l'échelle des trois sous-ensembles **terminaux, infrastructures réseaux et data centers/plateformes de services**.

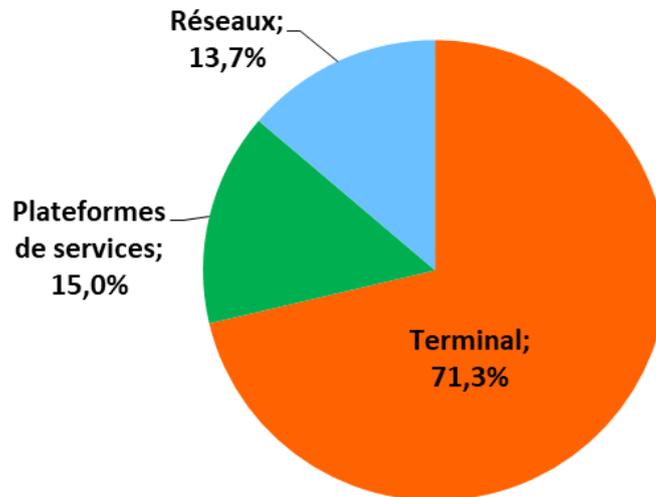


Figure 11. Source : Orange - Répartition de l'impact carbone entre terminaux, réseaux et data centers/plateformes de services en France (selon le mix énergétique français peu carboné pour l'utilisation des équipements).

Plusieurs points sont à noter :

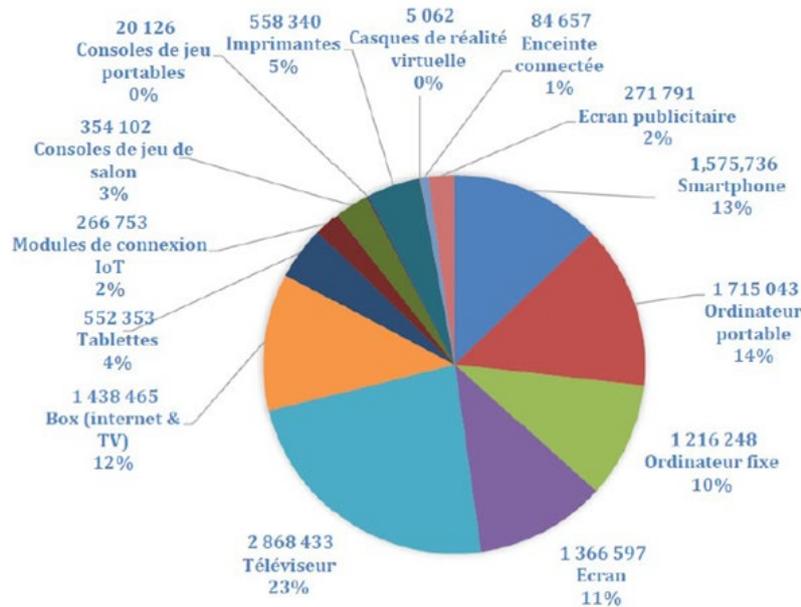
- L'impact carbone des terminaux compte pour 71% environ de l'impact global du triptyque « terminaux-réseaux-data centers ». Pour de nombreux terminaux, notamment les smartphones, la phase de fabrication est à l'origine de la majorité des impacts environnementaux. La durée d'usage du terminal va donc être un élément déterminant dans le calcul des impacts globaux. Dans la Fig. 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 %.
- Notons qu'ici un terminal désigne : smartphone, ordinateurs, imprimantes, tablettes, écrans d'ordinateurs, box, consoles de jeu, casques de réalité virtuelle, enceintes connectées, écran publicitaires et modules de connexion IoT.
- 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'IT<sup>18</sup>), vont directement impacter l'efficacité énergétique. En complément, le mix électrique (i.e. kg éq. CO<sub>2</sub>/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'installation 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 performance énergétique, les débits, les taux de charge des équipements, etc. Dans le 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

<sup>18</sup> Voir également le glossaire en fin de document

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.

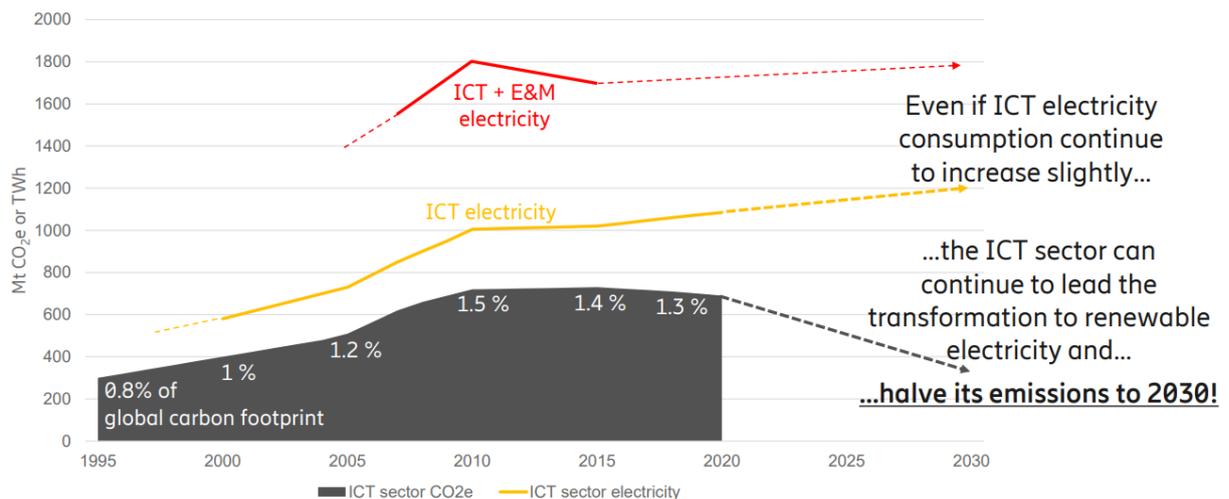
Le rapport du Sénat donne aussi une répartition évaluée en 2019 pour les terminaux. **On notera ici que la part des smartphones dans le paysage des terminaux ne représente que 13%.**



Émissions de gaz à effet de serre des principaux terminaux en 2019, en valeur absolue et en valeur relative

Les perspectives d'évolution des émissions sur la prochaine décennie sont incertaines et font débat.

Selon Ericsson, la consommation électrique des réseaux devrait continuer à croître modérément, mais les émissions carbone associées devraient baisser assez fortement (avec des énergies renouvelables et de l'électricité moins carbonée).



Un autre enjeu majeur porte sur l'évolution du trafic de données. Le schéma ci-dessous montre que les prévisions de croissance de trafic se tassent au fil des années :

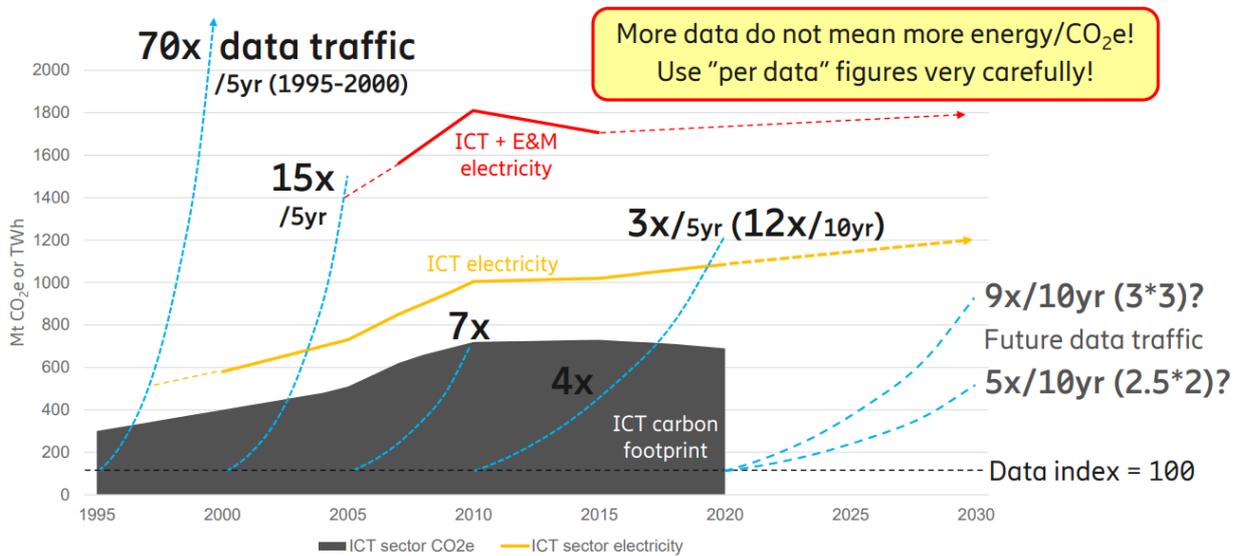


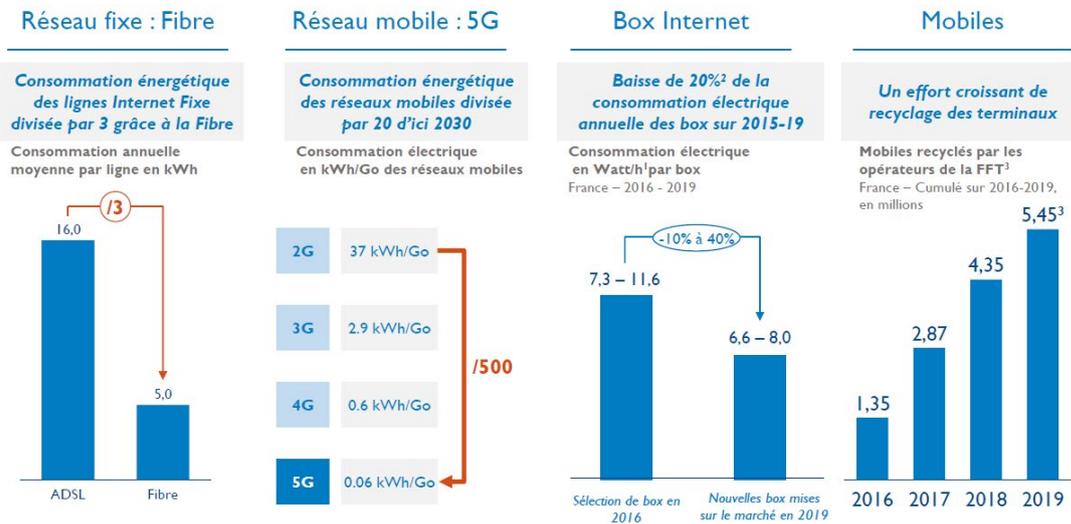
Figure 12 : Evolutions émissions carbone, consommations électriques et projections de trafic de données (Source : Ericsson).

Cette augmentation du trafic de données sera compensée par une meilleure efficacité énergétique des réseaux. Ainsi, un rapport de la Fédération Française des Télécommunications construit à partir des données du terrain des réseaux existants montre que l'efficacité énergétique des réseaux n'a cessé de s'améliorer :

- d'un facteur 10 entre chaque génération de technologie mobile ;
- d'un facteur 3 entre la fibre et l'ADSL ;
- de 10% à 40% pour les box entre 2016 et 2019.

Des réseaux télécoms essentiels face aux défis environnementaux

## Des investissements des opérateurs télécoms qui ont un rôle central pour un numérique soutenable en France



Source : Arcep Note n°5 « L'empreinte carbone du numérique », Notices techniques des box opérateurs, Communiqué de presse Orange, Données agrégées FFT, Analyse Arthur D. Little  
Notes : (1) En mode veille, avec maintien de la connexion Internet ; (2) 3,9TWh en 2019 versus 4,9TWh en 2015 alors que le parc de box Internet a augmenté de 11% sur la période  
(3) Le nombre de mobiles repris/recyclés représente 18,2% des mobiles neufs mis en marché depuis 2016

Arthur D Little 24

Figure 13 : Des réseaux télécoms essentiels face aux défis environnementaux. Source : Arcep cité par la FFT

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

- Actuellement, l'impact du numérique (resp. TIC) au niveau mondial est évalué aux alentours de 2% (resp. 1,4%) des GES dans le monde. Ce chiffre peut cependant varier selon les études et le périmètre retenu ;
- La tendance sur les années précédentes est à la stabilité des émissions de GES des TIC, en dépit d'une légère augmentation de la consommation d'électricité ;

La déclinaison des études au niveau mondial sur l'impact des TIC doit prendre en compte le mix énergétique de chaque pays. Cela induit une différence notable dans les calculs d'émissions en phase d'utilisation (pour une consommation d'énergie donnée, les émissions peuvent varier d'un facteur 10).

## 5. LA 5G ET SON RÔLE DANS L'ÉVOLUTION DE L'IMPACT DU NUMÉRIQUE

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 ÉNERGÉTIQUES

#### 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 3GPP<sup>19</sup>, 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)<sup>20</sup> qui sera finalisée au cours de l'année 2021 (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)<sup>21</sup>. Ces mécanismes devraient conduire dès 2025 à une efficacité énergétique<sup>22</sup> de la 5G améliorée d'un facteur x10 par rapport à la 4G, pour une amélioration à terme (2030) d'un facteur 20 ou plus<sup>23 24</sup>. 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.

<sup>19</sup> Voir le glossaire en fin de document

<sup>20</sup> Ibid. – voir « RGPP Releases » dans le glossaire

<sup>21</sup> 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.

<sup>22</sup> 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.

<sup>23</sup> 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/optimisation-energetique-de-la-5g/>

<sup>24</sup> "5G : energy efficiency by design"

Sur les terminaux, certains constructeurs annoncent pouvoir réduire la consommation de moitié<sup>25</sup>.

## B. LES IMPACTS ACTUELS ET FUTURS DE LA 5G SUR LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES RÉSEAUX

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.

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 faisceaux. Les premiers modèles de ces antennes n'étaient pas optimisés sur le plan de la 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 dans ce domaine sont rapides.

Ainsi, si une antenne 5G pas encore optimisée en 2020 consommait trois fois plus d'énergie que la mise en œuvre d'une antenne 4G mono-bande, la consultation des fournisseurs d'antennes montre que dès 2021, la consommation d'une antenne 5G descend à 1,5 fois celle d'une antenne 4G mono-bande et en 2023 elle ne sera plus que 1,3 fois supérieure<sup>26</sup>. Dans le même temps, cette antenne 5G gère une largeur de bande 5 fois plus importante qu'une antenne 4G mono-bande<sup>27</sup> et met en œuvre le Beamforming<sup>28</sup>, 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.

---

<sup>25</sup> [Accurately assessing EMF exposure from 5G - Ericsson](#)

<sup>26</sup> 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.

<sup>27</sup> 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.

<sup>28</sup> Voir glossaire à la fin du document

### 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 ne soient pas compensés par une hausse trop importante du trafic, un usage plus sobre du numérique doit être encouragé. Ceci peut être fait sans effort de la part des utilisateurs, par exemple en utilisant le pouvoir du « par défaut ». Comme peu de gens changent les paramètres « par défaut », ceux-ci sont de fait largement prédominants : si le fournisseur de service ou de bien implémente les options « par défaut » les plus économes (par exemple : une vidéo qui se lance par défaut en SD plutôt qu'en HD), des gains substantiels peuvent être réalisés. Cela rejoint la notion d'écoconception logicielle, qui encourage 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.

Il est également possible de réduire la consommation d'énergie induite par les usages simplement en modifiant certains comportements : par exemple, il n'est pas indispensable de lancer une vidéo musicale si l'on souhaite seulement en écouter la musique, et une application de streaming audio sera moins consommatrice.

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, outre l'écoconception logicielle, 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. Pour les équipements de réseau, une vue d'ensemble des procédures d'écoconception peut être trouvée dans le rapport récent du NGMN<sup>29</sup>.

Le cadre réglementaire de la loi AGEC, relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire du 10 février 2020<sup>30</sup>, vise à diminuer l'impact environnemental du numérique et de la 5G à travers deux leviers : mieux informer les consommateurs d'une part, et prolonger la durée de vie des équipements d'autre part (voir plus bas).

Dans le volet « informations au consommateur », depuis le 01/01/21, un indice de réparabilité est affiché (sur la forme d'une note sur 10) pour les smartphones et ordinateurs (art. 16). A partir du 01/01/24, cet indice de réparabilité sera complété ou remplacé par un indice de durabilité, qui prendra en compte des critères tels que la fiabilité et la robustesse. En outre, à partir du 01/01/22, les consommateurs bénéficieront d'informations sur la réparabilité et la durabilité, l'incorporation de matière recyclée, la recyclabilité, la présence de métaux précieux ou de terres rares, la présence de substances dangereuses, la compostabilité, l'emploi de ressources renouvelables et les possibilités de réemploi (art. 13 I). Enfin, c'est également à partir du 01/01/22 que **les consommateurs seront**

<sup>29</sup> [NGMN](#),

<sup>30</sup> Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759/>

informés du coût en émission de CO<sub>2</sub>eq de leurs usages des réseaux, ce qui peut les inciter à les modérer (art. 13 III). Pour les réseaux mobiles, la modélisation sera sous la forme Ax+B, où x est la consommation data réelle du client en giga-octets, A est un facteur d'émission en kg CO<sub>2</sub>eq/Go et B une constante correspondant aux émissions du réseau en l'absence de tout trafic. Le facteur d'émission est dans un premier temps moyenné sur l'ensemble des données France recueillies par l'ARCEP, puis sera calculé spécifiquement pour chaque opérateur à compter du 01/01/24.

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. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS AUX TERMINAUX 5G

La Figure 14. présente l'impact environnemental du smartphone pour 3 indicateurs environnementaux :

- ✓ L'épuisement des ressources naturelles, qui prend principalement en compte les métaux rares tels que l'or, l'argent ou les platinoïdes. Comme le démontre la Figure 14., la phase de fabrication et notamment la production de l'écran, de la dalle tactile, des cartes électroniques ainsi que du câble USB et du chargeur sont à l'origine de la majorité de l'impact. Les métaux, comme l'or sous forme de finition de surface, de fil de câblage dans les circuits intégrés, sont en effet utilisés lors de cette phase du cycle de vie ;

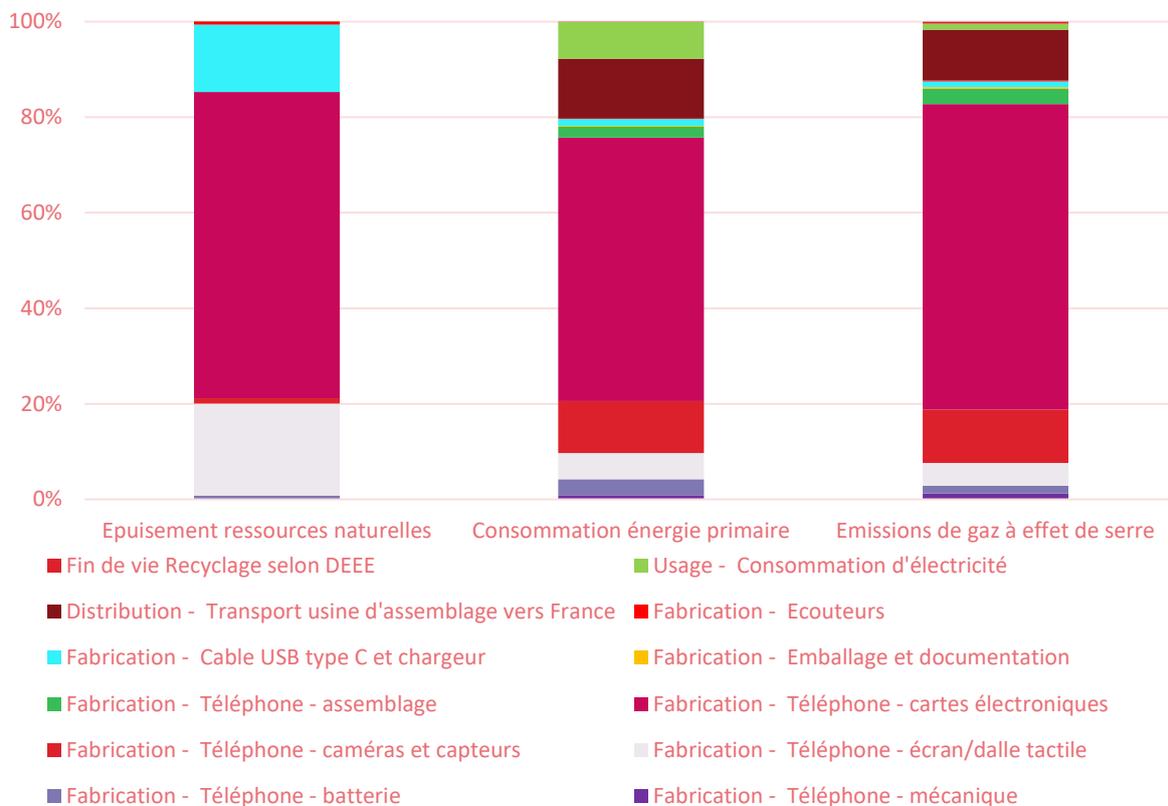


Figure 14. Impact environnemental du smartphone sur l'ensemble de son cycle de vie

- ✓ La consommation d'énergie primaire, qui prend en compte toute forme d'énergie utilisée lors du cycle de vie (combustion de kérosène pour un avion-cargo, utilisation de gaz naturel pour

- produire de l'électricité ou de la chaleur, etc.). La fabrication des cartes électroniques domine à nouveau cet indicateur d'impact, suivi par la fabrication des caméras et des capteurs, mais la distribution du produit effectuée en avion-cargo a également un impact significatif. L'électricité consommée lors de la phase d'usage a aussi un effet notable sur cet indicateur, du fait du scénario d'usage avec une recharge de l'équivalent de 70% de la batterie par jour ;
- ✓ Les émissions de gaz à effet de serre (également noté empreinte carbone) qui regroupent un ensemble de 977 gaz ayant un potentiel de réchauffement climatique plus ou moins élevé. La production des cartes électronique domine également cet indicateur avec un impact significatif lié à la fabrication des caméras et des capteurs. La distribution, via l'étape de transport en avion-cargo, a aussi un impact significatif.

Il est à noter que l'impact du packaging est négligeable sur ces trois indicateurs, celui-ci étant composé en majorité de carton et de papier. Le casque fourni avec l'appareil est très simple, ce qui explique son faible impact.

La Figure 15 présente la répartition des impacts à l'échelle de la fabrication du smartphone (le chargeur, le câble, le casque et le packaging sont donc exclus). Pour les trois indicateurs, la très forte contribution des circuits intégrés, qu'ils soient situés sur la carte électronique principale (en pourpre sur la Figure 15), sur la carte RF (en bleu primaire sur la Figure 15) ou sur les cartes secondaire (USB, microphone ou boutons en vert sur la Figure 15) se détache nettement. Cet impact est lié à la consommation d'énergie des salles blanches (nécessaire pour contrôler la température, le taux d'humidité et assurer un taux de particules dans l'air proche de zéro) pour les indicateurs de consommation d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre. Dans le cas de l'indicateur d'épuisement des ressources naturelles, les métaux rares utilisés dans les circuits intégrés, par exemple l'or pour les fils de câblage ou l'argent et l'étain pour les billes de connexion (cas des circuits intégrés sur matrice de billes de type BGA), sont la source de cet impact.

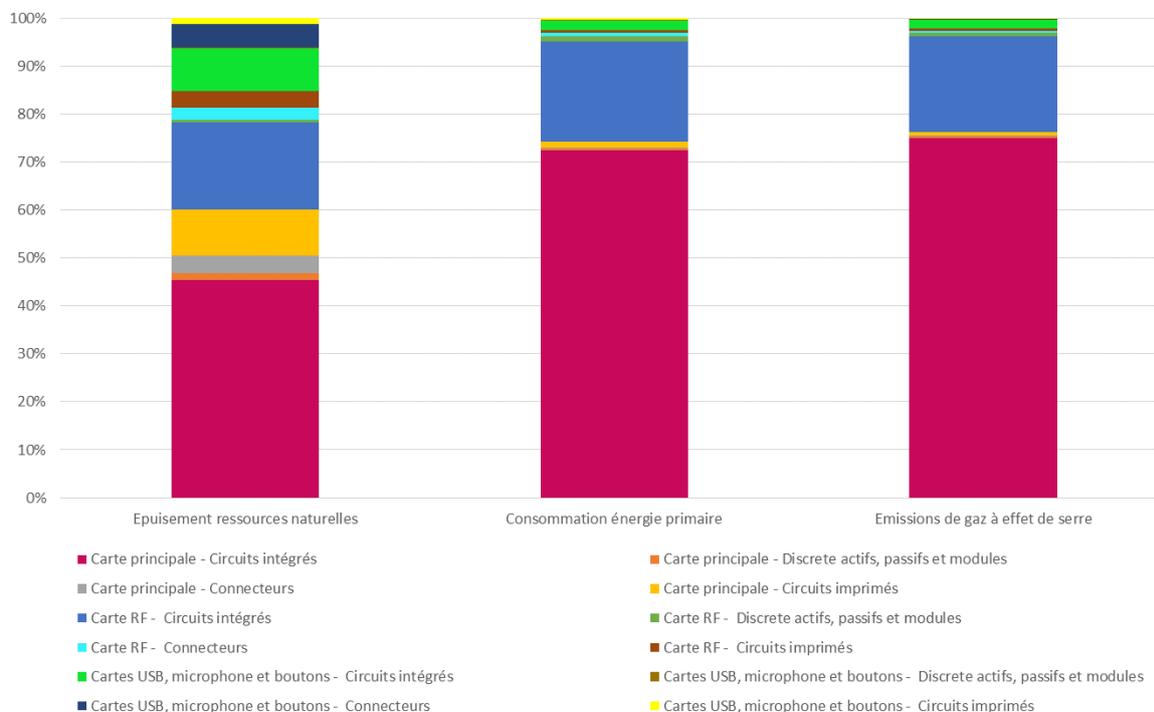


Figure 15. Détail de l'impact sur la phase de fabrication du smartphone

À l'échelle des circuits intégrés, la majorité de l'impact est lié à 3 composants : le processeur, la RAM et la mémoire de stockage NAND. Ces composants combinent en effet des paramètres comme une

surface de semi-conducteur élevée (la RAM et la NAND représentent respectivement 22 et 23,90 % de la surface totale de semi-conducteur contenue dans le smartphone) ou un niveau de complexité élevé (processeur gravé en 7 nm). L'impact des circuits intégrés liés à la 5G (modem 5G, 5G envelope power tracker, 5G frontend module et 5G MB RF LNA) ne représente que 0,3% ; 3% et 4% de l'impact de la fabrication du smartphone (respectivement pour les indicateurs d'épuisement des ressources, de consommation d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre).

En remontant au niveau du smartphone, il est possible de modéliser un équipement similaire doté uniquement des fonctions 2G/3G/LTE (autrement dit un équipement dans lequel les circuits intégrés, antennes, surface de circuits imprimés, etc. dédiés à la 5G ont été retirés). La différence d'impact entre la fabrication du smartphone 5G et cet hypothétique smartphone LTE serait de 5% ; 4% et 4% (respectivement pour les indicateurs d'épuisement des ressources, de consommation d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre).

Il est cependant à noter que ce delta d'impact n'intègre pas les améliorations à l'échelle des composants électroniques qui sont susceptibles d'être implémentées par le constructeur entre 2 générations de produits. Par exemple si le smartphone LTE avait été mis sur le marché sur l'année N et le smartphone 5G sur l'année N+1 ce second modèle pourrait par exemple bénéficier de puces mémoire (RAM et NAND) ayant une meilleure densité (en GB/mm<sup>2</sup> de semi-conducteur). À titre d'exemple, si la surface de semi-conducteur du smartphone 5G était réduite de 10% pour le processeur principal, les mémoires RAM/NAND ainsi que les circuits intégrés dédiés à la RF, alors l'impact carbone de la fabrication de ce smartphone serait similaire à celle du smartphone LTE. Sur la faisabilité de cette réduction de surface l'évaluation sur une gamme de smartphones d'un autre constructeur montre par exemple une réduction de la surface de semi-conducteur allant de 2% (mémoire NAND) à 11% (processeur principal) pour deux générations de produits mis sur le marché respectivement en 2019 et en 2020 (NB : ces 2 produits sont dotés de la même capacité en RAM et en NAND).

Pour plus de détails sur le recueil de données pour l'analyse de cycle de vie du terminal 5G et sur la modélisation des semi-conducteurs, le lecteur est invité à se reporter aux annexes 1 et 2.

[1] Gjinko21. Comparative Life Cycle Assessment of the Neva Leaf smartphone and its "Business As Usual". 2021

[2] Andrae, A.S.G.; Vaija, M.S. Precision of a Streamlined Life Cycle Assessment Approach Used in Eco-Rating of Mobile Phones. *Challenges* 2017, 8, 21. <https://doi.org/10.3390/challe8020021>

[3] Ercan, Mine & Malmodin, Jens & Bergmark, Pernilla & Kimfalk, Emma & Nilsson, Ellinor. (2016). Life Cycle Assessment of a Smartphone. 10.2991/ict4s-16.2016.15.

[4] Scotten W. Jones. Economics in the 3D Era. 2020 Lithovision

## E. LE REMPLACEMENT DES RÉSEAUX 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 gaz à effet de serre 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.

Par ailleurs, la loi AGEC (voir plus haut) comporte plusieurs dispositions visant à prolonger la durée de vie des équipements grand public. Ainsi, une obligation de mise à disposition de pièces détachées pendant au moins 5 ans pour certains équipements informatiques est mise en place (article 19). De plus, la garantie légale de conformité est étendue de 6 mois pour les appareils ayant fait l'objet d'une réparation dans le cadre de la garantie légale de conformité (article 22). Enfin, les fabricants et les vendeurs de biens comportant des éléments numériques ont désormais l'obligation d'informer sur la durée au cours de laquelle les mises à jour des logiciels fournis lors de l'achat du bien restent compatibles avec un usage normal de l'appareil (article 27).

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 rajoutées. Dans le cas contraire, les anciens équipements devront être remplacés par des équipements de dernière génération, qui seront également plus économes énergétiquement.

## F. 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 SG5<sup>31</sup> 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.

---

<sup>31</sup> <https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2017-2020/05/Pages/q9.aspx>

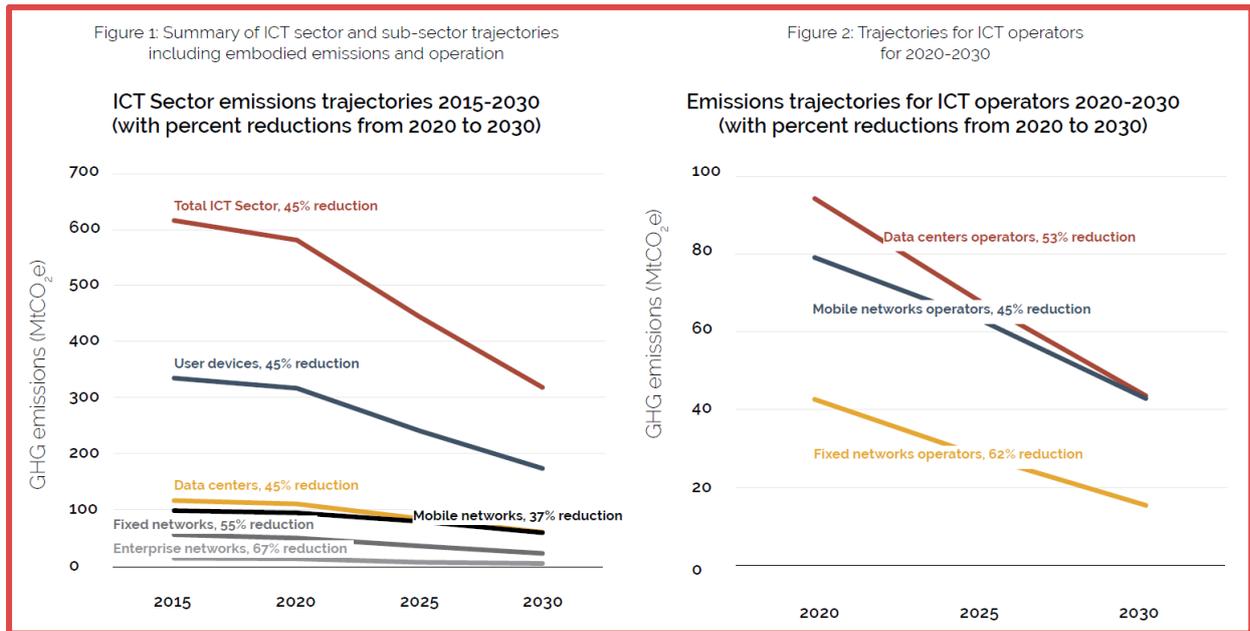


Figure 16. CDP, GSMA and The Carbon Trust, « An Introduction to Setting Science-based Targets »

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

## G. LES INFRASTRUCTURES DE CALCUL (DATA CENTERS)

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 data center, 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 aux 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.

## H. LES ORCHESTRATEURS DE SERVICES OPEN SOURCE

Pour atteindre leurs objectifs, les infrastructures numériques s'appuient en grande partie sur des progrès logiciels, notamment ceux relatifs aux outils d'orchestration open source. Ces derniers sont les seuls à pouvoir raisonner les consommations de ressources à grande échelle, proposer des améliorations et les appliquer. L'évolution récente des technologies de virtualisation associée à l'orientation Cloud Native de la 5G, définie par l'Open Networking Foundation, permet d'envisager des optimisations fortes de la consommation énergétique globale par orchestration logicielle.

Aujourd'hui le panorama des solutions d'orchestration est fortement fragmenté, entre différentes générations de virtualisation, différents types et versions des logiciels. Cette fragmentation entraîne une dispersion des efforts d'équilibrage des ressources par les logiciels d'orchestration.

La numérisation des équipements Telecom, dont la norme 5G marque une étape importante, offre une opportunité d'unifier les méthodes d'orchestration des équipements Cloud aux équipements Telecom, dans une logique dite de Cloud-Edge Continuum, où l'orchestration prend en compte les deux types d'équipements, distants comme les datacenters ou fermes de calcul, et proches comme les antennes GSM ou routeurs Wi-Fi. Cette vision globale permet de faciliter l'optimisation des échanges de données entre utilisateurs, ainsi que l'optimisation des ressources consommées par ces échanges.

Pour limiter la fragmentation technologique, les outils d'orchestration open source permettent d'appliquer les standards définis par les régulateurs et de les rendre disponibles publiquement, afin de faciliter leur intégration par les équipementiers. Au-delà de faciliter la mise sur le marché de nouveaux services, l'intégration de produits open source améliore l'interopérabilité des plateformes et des produits logiciels.

Pour résumer, nous avons vu que l'impact carbone des TIC 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 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.

## 6. LES USAGES

Après une étude approfondie de la consommation des TIC et de la 5G, la dernière partie de ce document porte plus spécifiquement sur les interrogations soulevées par l'impact possible des usages.

Deux considérations doivent 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 BÉNÉFICES POUR D'AUTRES SECTEURS

Les études montrent que jusqu'à 15% des émissions de carbone globales pourraient être évitées grâce au numérique<sup>32</sup> (voir également l'illustration ci-dessous)<sup>33</sup>.

## ICT as a driver for a more sustainable future



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

Figure 17. Source : Malmodin and Bergmark, Exploring the effect of ICT solutions on GHG emissions in 2030, 2015

À la suite de la crise du Covid, la 5G est 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

<sup>32</sup> European Commission, « [Supporting the Green Transition](#) », February 2020,

<sup>33</sup> Malmodin and Bergmark, Exploring the effect of ICT solutions on GHG emissions in 2030, 2015, <https://download.atlantis-press.com/article/25836149.pdf>

« 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 numérisation. 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>

Par ailleurs, 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 continûment : 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.

Au total, d'après le Global e-Sustainability Initiative (GeSI), la réduction des émissions de carbone permise par les communications mobiles est environ cinq fois supérieure aux émissions de carbone des réseaux mobiles et permet une économie annuelle de plus de 180 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>éq. Toujours d'après le GeSI, 70% de cette réduction serait liée à l'utilisation des technologies machine-to-machine et 20% seraient liés aux changements de mode de vie consécutif au développement de l'usage de smartphones<sup>34</sup>.

De son côté, la GSMA se base sur un mode de calcul similaire mais avec des hypothèses différentes, et évoque une réduction des émissions 10 fois supérieure aux émissions du réseau lui-même<sup>35</sup>. Dans son rapport The Enablement Effect, il précise néanmoins que les effets rebond n'ont pas été quantifiés dans ces calculs or il est possible que les usages poursuivent une croissance exponentielle, notamment avec l'augmentation des applications basées sur la réalité augmentée.

En France, le Haut Conseil pour le Climat estime que l'impact carbone du déploiement de la 5G pourrait contribuer à ajouter annuellement en France à la consommation actuelle des TIC entre 2,7 millions de tonnes (Mt) et 6,7 M CO<sub>2</sub>e à horizon 2030<sup>36</sup>. Dans le même temps, l'étude OMDIA<sup>37</sup> estime que la 5G aidera à réduire les émissions de GES en France en 2030 de 10.1MtCO<sub>2</sub>e, soit 2.4% des 416MtCO<sub>2</sub>e d'émission de GES prévues en France à cet horizon. Les secteurs qui bénéficieront le plus des émissions évitées sont les transports (38% des émissions évitées), suivis de l'industrie manufacturière, de la construction et des procédés industriels (20%), puis des bâtiments (18%), de l'énergie (11%) et de l'agriculture (10%).

Il est à noter que suivant les sources, les hypothèses retenues sont aussi à moduler en fonction des pays pour lesquels la vitesse de déploiement de la 5G diffère, ainsi que les priorités en termes de

---

<sup>34</sup> [Étude du GeSI](#)

<sup>35</sup> [https://www.gsma.com/betterfuture/wp-content/uploads/2019/12/GSMA\\_Enablement\\_Effect.pdf](https://www.gsma.com/betterfuture/wp-content/uploads/2019/12/GSMA_Enablement_Effect.pdf)

<sup>36</sup> [https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2020/12/rapport-5g\\_haut-conseil-pour-le-climat\\_etude-exterieure-2.pdf](https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2020/12/rapport-5g_haut-conseil-pour-le-climat_etude-exterieure-2.pdf)

<sup>37</sup> <https://omdia.tech.informa.com/commissioned-research/articles/5g-impact-2030>

marché vertical, dont certains auront un plus grand impact sur les réductions d'émissions de CO2 à l'échelle d'un pays.

| Target: Commercial roll-out in 2020 and coverage of main urban and transpor

	France	Germany	Italy	
Regulatory/network backdrop: roadmap				
Regulatory/network backdrop/frequency assignment				
5G launch/tentative date			2020	
Vertical targets	Media & Entertainment Automotive & Transport, Industry	Future Media and eHealth Intelligent Mobility.	Media/virtual reality, Also: smart port, smart city, smart agriculture, public safety, industry 4.0, health 5.0, road	Media Entert Also: Transp

Nul doute que nombre d'études viendront affiner dans les années à venir les mesures d'impacts de la 5G en termes de gaz à effet de serre. A date il est déjà possible d'appréhender les bénéfices et les risques de cette technologie en matière de réduction des émissions de CO2 pour certains grands secteurs économiques en tentant de les détourner de l'apport des TIC d'un point de vue plus global.

Nous pouvons mentionner :

### Collectivités

En fonction de leur taille et de leurs compétences, les collectivités pourraient avec l'adoption progressive de la 5G devenir des utilisatrices importantes de cette technologie pour leurs besoins propres dans le cadre de projets de « territoires intelligents » : assainissement et gestion de l'eau, gestion de la pollution, caméras d'analyse atmosphérique, gestion des déchets... L'objectif de tous ces services numériques est bien de limiter la production d'énergies fortement émettrices de gaz à effet de serre, d'augmenter l'efficacité des services rendus par les collectivités, de réduire l'utilisation des ressources naturelles, de suivre et surveiller des périodes de pollution afin de pouvoir les anticiper.

### Industrie

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 considérablement les pertes de production en supervisant en temps réel la production. Avec un volume estimé en France à 65 000 kt CO2e par an, le potentiel d'économie est considérable, tant sur le plan financier qu'en matière d'émission de GES.

Grace à sa connectivité de masse et à sa faible latence, la 5G va par ailleurs promouvoir des technologies susceptibles d'avoir un impact favorable sur le plan environnemental même si ce dernier semble encore difficile à évaluer. Nous pouvons citer le déploiement de la réalité augmentée, des véhicules autonomes guidés ou encore des drones. Enfin, la connectivité de masse doit permettre des économies de CO2 substantielles en optimisant les opérations de logistique et de transports ainsi qu'en simplifiant les inventaires.

L'Europe, d'après Mobile Carbon Impact<sup>38</sup>, pourrait économiser annuellement plus de 800 kt CO<sub>2</sub>eq par an dans ce secteur. Cette économie doit cependant être modulée par l'impact de la production des équipements et des capteurs servant de socle à cette infrastructure numérique.

### Tertiaire

La couverture 5G indoor des immeubles de bureaux va considérablement modifier les pratiques des services généraux ainsi que celles des salariés. De l'IoT pour piloter la gestion technique du bâtiment aux visioconférences immersives pour les collaborateurs en passant par la sécurisation des lieux et des personnes, cette révolution sera rapide et visible dans le grand tertiaire, plus lente dans le reste du parc d'immobilier de bureaux. Mais les économies de CO<sub>2</sub> susceptibles de découler de technologies pouvant être adossées uniquement aux réseaux 5G ne semblent pas majeures au regard des enjeux pour le Tertiaire en termes d'isolation des immeubles ou de production locale d'énergie.

### Transport

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 quelques mètres sur l'autoroute ce qui permet de réduire les émissions carbone associées (les camions suivant le premier véhicule consommant moins de carburant). Voir plus particulièrement les bénéfices environnementaux des communications vers les véhicules (V2X) à la section B de ce chapitre

### Santé

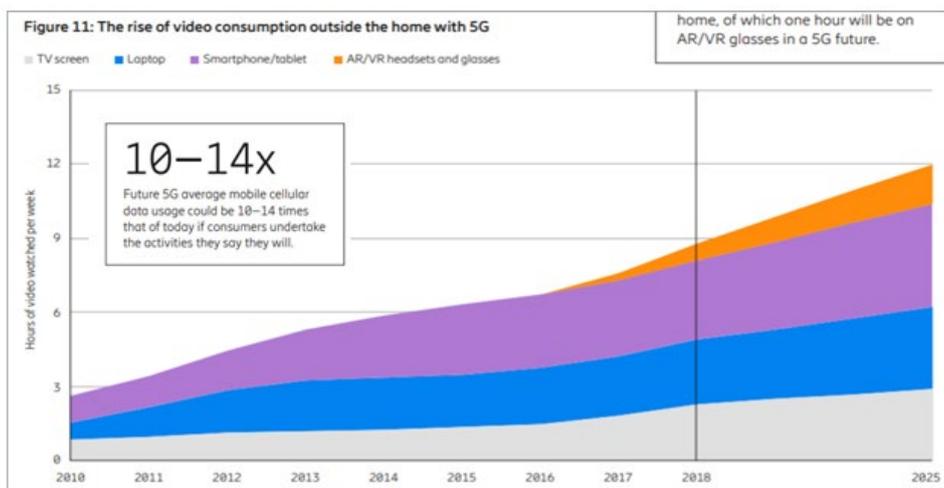
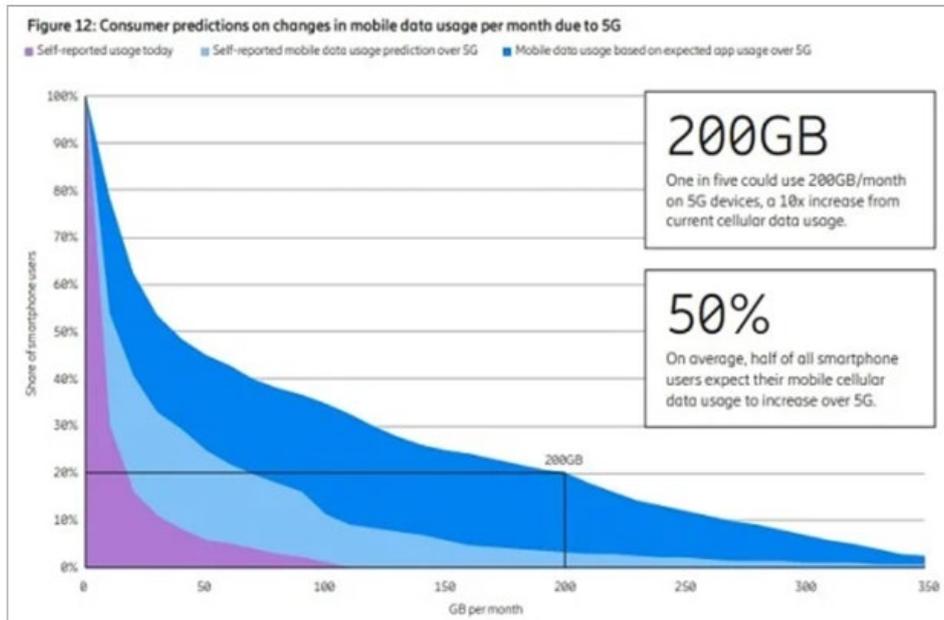
Dans la santé, les débits accrus, la réactivité des réseaux 5G (faible latence) et la fiabilité des communications contribueront à démocratiser la télémédecine. La téléconsultation et la télé-expertise bénéficieront des possibilités d'échanges de contenus haute-définition en temps réel sécurisés. Cela 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, ou encore la réduction du nombre de câbles qui diminuera le temps de désinfection entre chaque opération. Enfin, l'usage d'objets connectés sécurisés permettra le suivi de données de santé dans l'hôpital ou dans le cadre d'hospitalisation à domicile ou de maintien à domicile.

### Usages grand public

En matière d'émission de GES, les économies sont potentiellement moins quantifiables dans ce secteur quand bien même la 5G contribuera à réduire les déplacements. Les modélisations ci-dessous proposées par Ericsson font état d'un accroissement significatif des volumes de données échangées par le grand public, en lien avec la diffusion à large échelle de nouveaux usages tel que la vidéo immersive, la réalité augmentée et le streaming vidéo en 4K.

---

<sup>38</sup> Source GeSI.



## B. BÉNÉFICES ENVIRONNEMENTAUX DES COMMUNICATIONS V2X

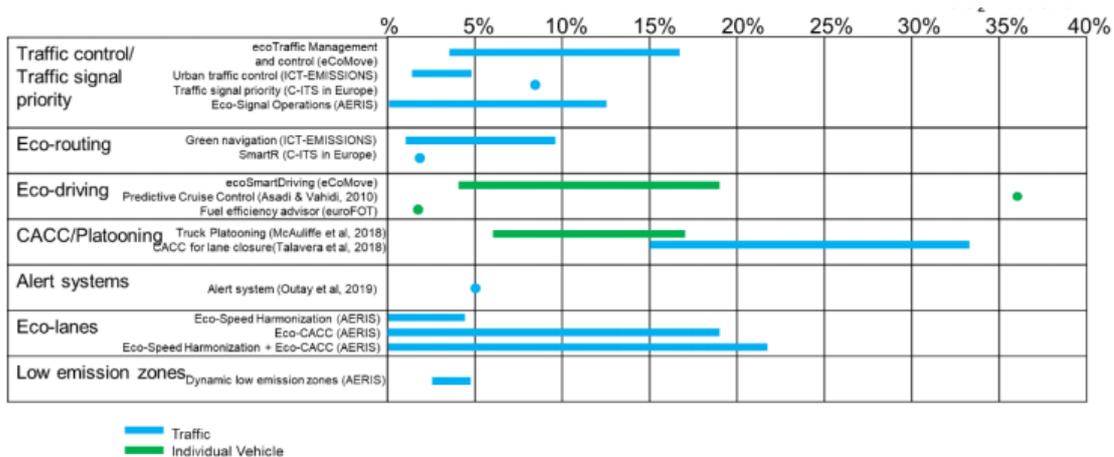
L'association 5GAA (5G Automotive association) a confié à l'organisme de recherche Néerlandais TNO une étude sur l'impact environnemental des communications V2X pour le véhicule connecté<sup>39</sup>. L'étude se base sur une analyse bibliographique (données de simulateurs et d'expérimentations pilotes), sur des entretiens pour identifier les cas d'usages principaux, et sur des simulations conduites par TNO pour quantifier les impacts en termes de réduction de CO<sub>2</sub>. Nous résumons ici les points saillants du rapport.

Les 4 cas d'usages les plus prometteurs en matière d'impact sur les émissions CO<sub>2</sub> qui ont été identifiés sont les suivants :

<sup>39</sup> <https://5gaa.org/wp-content/uploads/2020/11/Environmental-Benefits-of-C-V2X.pdf>

1. Le contrôle de vitesse coopératif adaptatif permettant des choix de vitesse optimale réduisant les accélérations/décélérations, incluant les convois automatisés de poids lourds (« platooning ») ;
2. La réduction des congestions ;
3. Les intersections intelligentes réduisant les arrêts de véhicules ;
4. Le scénario « everything connected to everything » où tous les utilisateurs de la route et les systèmes de gestion de trafic sont connectés pour optimiser les flux de trafic.

Des réductions de 5% à 20% des émissions ont été rapportées dans la littérature, comme indiqué dans la figure ci-dessous.



Les calculs réalisés par TNO ont montré que la diminution des arrêts de véhicules entraîne des réductions de 13 à 45% des émissions selon les limitations de vitesse et le nombre d'arrêts par km. En réduisant les variations de vitesse (accélérations/décélérations) et les congestions par une fluidification du trafic, les émissions diminuent de 3 à 7%. Passer du contrôle de vitesse individuel au contrôle de vitesse coopératif adaptatif a montré une réduction de 6%.

Si certains scénarios sont déjà possibles avec les générations de communication antérieures, les apports de la 5G sont clefs en particulier pour

- le passage à l'échelle, impliquant à la fois des serveurs centralisés et en périphérie,
- le déploiement concomitant de services avec des exigences diversifiées tels que bande passante augmentée, latence réduite et garanties de performance (à travers le slicing qui permet une meilleure qualité de service sans interférence avec les autres services)

Dans le scénario « everything connected to everything », une connectivité haut débit basse latence permettant des services de logistiques et de « mobility as a service » (MaaS) peut aider les voyageurs et les compagnies de logistiques à optimiser les modes ou les horaires des déplacements. Le MaaS et les services de mobilité partagés ainsi rendus possibles sont aussi générateurs de réduction des émissions.

Le taux de pénétration des technologies de communication et d'automatisation, le cadre réglementaire, les changements de comportements des utilisateurs, la définition de modèles économiques (entre constructeurs automobiles, opérateurs télécom et opérateurs routiers) sont les facteurs principaux qui sont jugés déterminants pour les impacts futurs de la mobilité connectée intelligente en termes énergétiques et environnementaux.

## C. D'UNE COUVERTURE TOTALE À UNE COUVERTURE ADAPTÉE 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 2nde, 3ème et 4ème génération a été d'étendre progressivement la couverture du territoire, avec pour cible une couverture quasi-totale de la population<sup>40</sup>. La densification des sites radioélectriques a ainsi été permanente, avec pour maître mot le très haut débit pour tous.

La 5ème 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 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 spécifiques.**

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 sollicitées ; 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.

---

<sup>40</sup> 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.

Flux de personnes et flux de données : coexistence et optimisation



Figure 18. 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 instantané 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 26 GHz 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.

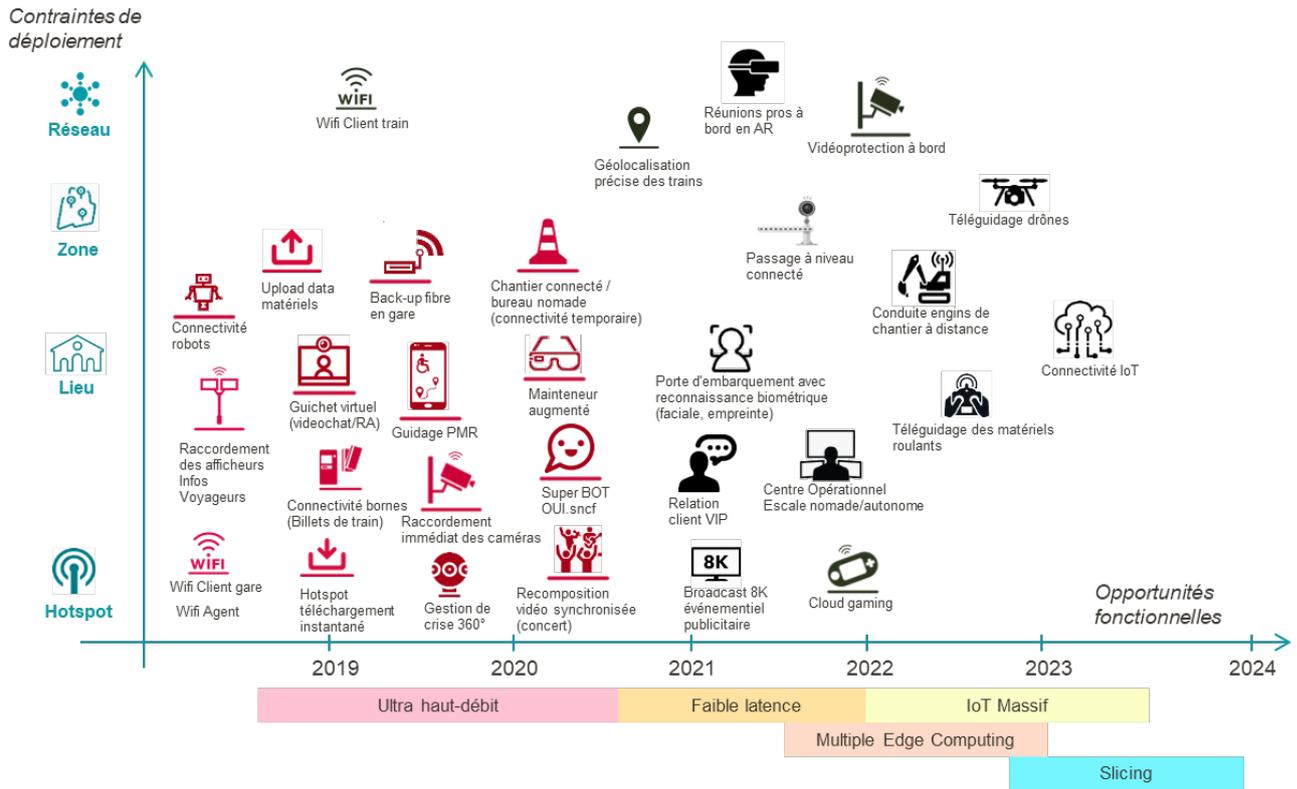


Figure 19. Cas d'usage 5G SNCF

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 peut citer comme exemples :

- Le contrôle et la commande de robots industriels dans des cloud de proximité (edge cloud)
- Le contrôle de certains processus industriels (comme le fraisage de rotors d'avion) qui 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](https://youtu.be/tBiCbQ_F21s)

#### D. LES EFFETS REBONDS

L'ambition n'est pas de présenter une vue exhaustive de la question de l'effet rebond mais d'introduire le concept et d'apporter quelques éléments d'analyse.

L'idée générale de l'effet rebond est, dans notre cas, qu'une technologie plus efficace (4G, 5G, fibre...) pourrait rendre possibles/pertinents de nouveaux usages dont la consommation énergétique serait finalement bien supérieure au gain apporté par la nouvelle technologie.

Le rapport de l'université de Zurich<sup>41</sup> apporte quelques exemples concrets d'effets rebonds négatifs :

- Pour les automobiles connectées, un effet rebond pourrait être que les performances de ces voitures permettent de les renvoyer à vide au domicile (s'il n'y a pas de places de parking près du lieu de travail) et de les rappeler pour le retour au domicile... ce qui doublerait le nombre de kilomètres parcourus et l'encombrement des routes.
- Pour le télétravail des effets pourraient être un chauffage plus important du foyer ou encore un éloignement plus grand entre le lieu de travail et le domicile.
- Pour les smart grids, certains projettent par exemple que la consommation de l'électricité autoproduite (panneaux solaires...) pourrait être plus importante que celle fournie par le réseau
- Pour l'agriculture connectée et de précision, les gains de productivité pourraient être compensés par une plus forte consommation de protéines animales.

Nous voyons donc que cet effet rebond est assez inhérent à tout gain de productivité et non pas spécifiquement lié à la 5G. Face à cet effet rebond possible, entre deux réactions extrêmes telles que le déni ou le gel des évolutions, nous pensons qu'il y a une voie médiane à poursuivre. Il convient de viser les progrès et les gains d'efficacité, mais en même temps chercher à réduire au maximum ces effets rebonds par diverses incitations, informations et régulations. Notons que les gains de productivité/efficacité sont parfois plus importants que l'amplitude de l'éventuel effet rebond. Pour preuve, la consommation électrique associée à une terminaison fibre FTTH est 3 fois moindre que celle liée à une terminaison ADSL, et ce en dépit de l'augmentation importante du volume de données transférées, imputable à un plus grand débit permis par la fibre.

---

<sup>41</sup> Next generation mobile networks Problem or opportunity for climate protection? », Octobre 2020  
(PDF) [Next generation mobile networks: Problem or opportunity for climate protection? \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/354844444)

## E. USAGES ET SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE

La sobriété numérique est une démarche qui consiste à diminuer l'impact environnemental des applications de réseaux, en évitant la multiplication de matériels électroniques et en limitant les usages du numérique. Du point de vue de l'utilisateur, le matériel, dans sa phase de fabrication en particulier, et dans sa phase d'usage, est énergivore par construction. Mais l'immatériel - ou si l'on préfère la gestion du transfert de données dans les infrastructures télécoms, dans les data centers, dans le « cloud » - consomme également de l'énergie. La sobriété numérique vise également à réduire les usages qui sont source d'impacts sociétaux négatifs. Il s'agit donc de prendre le meilleur de ce que nous permet le numérique (modernisation des entreprises et administrations publiques, communication entre particuliers...), d'éviter les aspects sociétaux néfastes (addiction, fake news, harcèlement, surconsommation...) et de minimiser l'impact environnemental du numérique.

La crise du Covid-19 a positionné le secteur des télécommunications et du numérique comme stratégique à l'échelle de l'économie mondiale, notamment par le passage au télétravail de la majorité des salariés du secteur tertiaire de la plupart des pays de l'OCDE. La crise a été révélatrice de l'arbitrage complexe entre la croissance des usages positifs du numérique (divertissement et loisirs avec Netflix, rompre l'isolement avec WhatsApp ou le téléphone) et la croissance des impacts environnementaux du secteur : consommation de ressources (matière, énergie), pollutions directes et indirectes générées par les usages et la fabrication des produits et équipements de télécommunications/numériques.

La sobriété, numérique mais pas uniquement, est avec l'efficacité et le mix énergétique décarboné l'un des piliers de la transition énergétique et écologique vers une moindre empreinte carbone. D'autres rajoutent les questions de modèle économique, d'ordre plus politique, c'est le débat entre décroissance et croissance verte. Au-delà du modèle économique, d'autres ajoutent encore des paramètres d'ordre structurel en interrogeant l'économie servicielle (économie de l'usage, économie de la fonctionnalité), où le matériel prend un rôle secondaire, ce qui autorise des scénarii de partage des biens, pouvant être notamment mis en place grâce à des outils numériques.

Afin de minimiser l'impact d'activités susceptibles d'atteintes à l'environnement, la séquence « Eviter, Réduire, Compenser » (ERC) est inscrite dans la loi. Ce principe est censé animer les réflexions sur les impacts d'un projet, qui ne doivent pas être sous-estimés. Il consiste tout d'abord à éviter autant que faire se peut les impacts du projet, puis à réduire ceux qui n'ont pu être évités et compenser le solde. Le plus vertueux est d'éviter, puis réduire, puis compenser : les actions de compensation, comme libérer ou conserver des zones sensibles pour la biodiversité, ou planter des arbres, ou simplement financer des actions positives pour l'environnement ne peuvent être le credo de l'action environnementale d'un projet ou d'une entreprise, surtout lorsqu'elles ne servent qu'à verdir le bilan de telle ou telle (« greenwashing »). À noter que si cette séquence doit s'appliquer davantage à tous les projets de développement du numérique, celui-ci a aussi le pouvoir d'aider les autres secteurs à implémenter la séquence « ERC » pour leurs propres projets.

Aujourd'hui, la question de l'évitement, c'est-à-dire finalement l'abandon d'une technologie aux impacts environnementaux qui seraient négatifs, n'est pas réellement posée dans le secteur numérique. Cela a notamment été au cœur de la polarisation entre la société civile et les acteurs de la 5G. Pour autant, s'il est possible d'effectuer des études d'impact avant déploiement, il semble difficile de quantifier tous les effets à venir, tant positifs que négatifs, d'une technologie dont les applications sont à inventer.

Il semble crucial d'intégrer la réflexion sur la sobriété dans les futurs développements (ondes millimétriques avec le 26 GHz, 6G en cours d'étude avec installation à horizon 2030...), afin d'établir comment les nouvelles avancées pourront contribuer à tirer le meilleur du numérique tout en

diminuant les effets néfastes et l'impact environnemental du numérique et des autres secteurs. Cette sobriété devra être adoptée par les acteurs de la 5G (et plus largement du numérique) et par les consommateurs. Pour ces derniers, la sobriété matérielle et numérique procède d'un changement de normes sociales, d'un changement d'habitudes, de comportements. Cela commence par l'éducation à la sobriété, tout au long de la vie mais d'abord pour les plus jeunes, en expliquant que les réseaux sociaux, le numérique, sont énergivores malgré leur immatérialité.

## 7. CONCLUSIONS

Les points suivants nous paraissent cruciaux :

- Les émissions de gaz à effet de serre des TIC sont stables ces dernières années, même si la consommation électrique des réseaux est en légère croissance, et ceci alors que le trafic de données est en croissance exponentielle.
- Il est possible qu'une forte croissance du trafic compromette cette stabilité de l'impact des TIC. Par ailleurs, les objectifs climatiques de la conférence de Paris doivent aussi nous amener à envisager des pistes de baisse de la consommation énergétique et des émissions du numérique et des réseaux. Néanmoins, notons aussi que ces enjeux climatiques, avec les risques de dérèglements associés, renforcent les enjeux de résilience des réseaux (et résilience signifiant parfois par exemple redondance, l'impact sur la consommation des réseaux n'est pas à exclure). 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 énergétique et carbone 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. Par ailleurs, 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. En effet, il est illusoire de penser que le trafic cessera d'augmenter si on reste en 4G ;
- Pour autant, 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 sa globalité 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 continus. 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** : (Long Term Evolution) évolution des normes de téléphonie mobile GSM/EDGE, CDMA2000, TD-SCDMA et UMTS, commercialisées sous l'appellation « 4G » par les opérateurs de nombreux pays. 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<sup>[1]</sup> qui permet des capacités de cloud computing et un environnement de service informatique à la périphérie du réseau cellulaire<sup>[2][3]</sup> 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<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> génération.

**PUE** - Power Usage Effectiveness : 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).

**Territoire intelligent** - « [D'après la Banque des Territoires], un territoire intelligent est d'abord un territoire « connecté » qui s'appuie sur 4 briques complémentaires : des réseaux, des objets connectés, de la data et des services. Ce territoire est qualifié d'intelligent lorsque ces briques de bases fonctionnent ensemble pour répondre aux besoins des parties prenantes autour de dimensions sociales, économiques et environnementales et que ce territoire anime son écosystème citoyen pour répondre aux enjeux de politique publique. »

## ANNEXES

### 1. RECUEIL DE DONNÉES POUR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DU TERMINAL 5G

Afin d'estimer les impacts environnementaux liés à l'introduction de nouveaux terminaux 5G une analyse de cycle de vie a été réalisée sur un modèle haut de gamme ayant les caractéristiques

principales suivantes : écran LCD et dalle tactile de 6,7 pouces, 12 Go de RAM, 256 Go de mémoire de stockage NAND. L'unité fonctionnelle, soit le service rendu par le smartphone, est la suivante :

« Assurer un service de communication voix et données (vidéo, applications, etc.) équivalent à une consommation de 70% de la batterie par jour, en France et pendant 2 ans »

Cette unité fonctionnelle est identique à celle choisie pour l'analyse de cycle de vie du téléphone sous marque Orange Neva Leaf [1], qui a fait l'objet d'une recherche bibliographique poussée pour établir le scénario d'usage et notamment le pourcentage de consommation journalier sur la batterie.

Le téléphone est produit dans le sud-est asiatique, acheminé jusqu'en France en avion-cargo (en suivant les routes proposées par les compagnies assurant le fret) et est recyclé en fin de vie selon les directives DEEE (déchets d'équipement électrique et électroniques – imposant par exemple un recyclage de la batterie et des cartes électroniques).

Un smartphone haut de gamme étant composé de milliers de pièces, des données technico-économiques fournies par le cabinet TechInsights® ont été utilisées pour établir l'inventaire de cycle de vie. Ces analyses comportent notamment les données suivantes :

- ✓ Circuits intégrés : identification du composant, nombre de pins, type de boîtier (ex. BGA pour un boîtier sur matrice de billes), taille du boîtier et dimensions de la/les puce(s) en semi-conducteur
- ✓ Composants discrets (actifs et passifs) et modules : nombre de pins, dimensions du boîtier et technologie (ex. condensateur tantale/niobium)
- ✓ Circuits imprimés : matériau (ex. FR4), nombre de couches de cuivres et surface
- ✓ Pièces mécaniques : dimensions, masse, processus de fabrication (ex. moulage par injection) et indication du type de matériau (plastique, métal, verre, etc.)

Le recours à cette documentation permet ainsi de grandement accélérer le temps requis pour le recueil de données. Il est cependant nécessaire de collecter des informations complémentaires, notamment pour les circuits intégrés. A l'échelle de chacun de ces composants une fiche de déclaration matières (sous le format IPC 1752A class D par ex.) a été collectée sur le site des fabricants de composants. Pour les circuits intégrés ces fiches permettent, par exemple, de disposer des informations suivantes :

- ✓ Masse exacte du composant. Les circuits intégrés les plus petits, notamment ceux dotés d'un boîtier de type WL-CSP (wafer level chip scale package) peuvent avoir une masse inférieure à 1 mg, ce qui rend leur pesée difficile (dessaouder le composant et le peser implique d'avoir une erreur significative due à la présence de crème à braser résiduelle sur le composant)
- ✓ Information sur la nature du semi-conducteur utilisé : la plupart des puces contenues dans les circuits intégrés sont produites avec du silicium mais certains composants radio peuvent être basés sur d'autres matériaux comme de l'arséniure de gallium (AsGa) ou du nitrure de gallium (GaN).

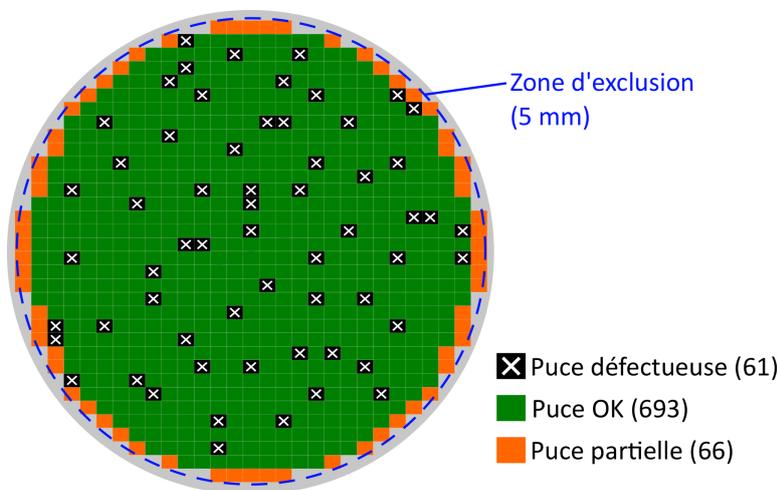
À l'échelle des éléments mécaniques les déclarations matières permettent également de compléter l'analyse technico-économique. Par exemple avec les éléments suivants :

- ✓ Détail sur les matériaux utilisés : type de polymère (ex. polyamide, polymère à cristaux liquides - LCP pour liquid crystal polymer), additifs (ex. fibre de verre en renfort, noir de carbone en tant que pigment, etc.) ou identification des alliages métalliques (ex. nuances d'aluminium ou d'acier inoxydable)
- ✓ Indication de la structure du composant. Les déclarations matières comportent des détails sur le type de procédés pour lesquels les matériaux sont utilisés. Par exemple, une mention « gold

plating » permet d'intégrer à la fois à la composante matériau et l'impact environnemental lié à l'effort de production lié à ce processus industriel.

## 2. MODÉLISATION DU SEMI-CONDUCTEUR

Les précédentes analyses de cycle de vie sur les smartphones menées par Orange en collaboration avec des industriels [2] ou par les industriels eux-mêmes [3] ont démontré la forte contribution du semi-conducteur sur l'impact environnemental de la fabrication d'un smartphone. La production de ces puces est réalisée sur des disques (nommés wafer), ce qui entraîne inévitablement des pertes par effet de bord (agencement de puces rectangulaires sur un disque). Le processus de fabrication n'est pas non plus exempt de défauts, ce qui augmente d'autant la surface nécessaire initialement. La Figure 1 présente le positionnement de la puce du processeur sur un wafer de 300 mm de diamètre (taux de défaut réglé à 0,1 par cm<sup>2</sup>, zone d'exclusion de 5 mm et largeur de découpe de 0,2 mm).



*Figure 1 : visualisation du positionnement de la puce du processeur du smartphone haut de gamme sur un wafer de 300 mm*

Pour un wafer permettant potentiellement de produire 820 puces de processeur, seules 693 sont actuellement utilisables. A l'échelle de l'analyse de cycle de vie ce taux de perte est appliqué à la surface de semi-conducteurs nécessaire pour fabriquer cette puce.

A l'échelle du smartphone cet exercice est effectué pour l'ensemble des puces se trouvant dans des circuits intégrés, en ajustant la taille du wafer (par exemple 200 ou 300 mm) en fonction du type de composant. Les puces en semi-conducteurs se trouvant dans les composants discrets actifs sont cependant exclues de cet ajustement.

En complément de cette prise en compte des pertes par découpe, la complexité du semi-conducteur, reflétée par le nombre de masques nécessaire à sa production, a également été prise en compte pour les 13 puces ayant les plus grandes surfaces (processeur, RAM, mémoire de stockage NAND, capteurs des appareils photos, etc.). Cet ajustement a été réalisé en combinant 3 sources d'informations :

- ✓ Les paramètres complémentaires fournis dans l'analyse de TechInsights®, comme la finesse de gravure (ex. processeur principal en 7 nm) ou le nombre de couches dans la mémoire NAND (92)
- ✓ Les données d'IC Knowledge [4] sur le nombre de masques par type de composant et par finesse de gravure ou par nombre de couches
- ✓ Les informations environnementales contenues dans le rapport RSE du fondeur TSMC sur l'impact environnemental (carbone et consommation d'énergie par ex.) de la fabrication d'un niveau de masquage à l'échelle d'un wafer de 200 mm (« 200 mm equivalent wafer mask layer »)

Le modèle d'impact environnemental pour la fabrication de semi-conducteur contenu dans le logiciel d'analyse de cycle de vie EIME® dans sa base de données de décembre 2020 a ainsi été ajusté, avec un impact à la hausse (par mm<sup>2</sup>) pour les composants complexes comme le processeur et à la baisse pour la RAM ou la mémoire de stockage NAND.