

Réseaux du futur

Note n° 5 L’empreinte carbone du numérique

21 octobre 2019

Le cycle de réflexion et le comité scientifique « Réseaux du futur »

En septembre 2018, l'Arcep a ouvert un cycle de réflexion pour anticiper l'évolution des réseaux, avec un horizon de 5 à 10 ans. Les notes produites s'inscrivent dans ce travail de prospective et ont été réalisées sur la base d'échanges avec une diversité d'acteurs (opérateurs, équipementiers, fournisseurs de services, acteurs d'internet, académiques, etc.), de travaux de recherche et de l'expertise du comité scientifique constitué à cet effet.

Ces documents constituent un état des réflexions à date. Pour enrichir ces analyses, l'Arcep invite tous les acteurs qui le souhaitent à y contribuer en faisant part de leurs commentaires, à l'adresse suivante : « reseaux-du-futur@arcep.fr ».

Les notes de prospective publiées :

1. « [Virtualisation des réseaux – Architectures agiles](#) »
2. « [Les voitures connectées](#) »
3. [Enjeux de connectivité : l'exemple des territoires « intelligents »](#)
4. [La gestion dynamique du spectre](#)
5. **L'empreinte carbone du numérique**
6. [L'intelligence artificielle dans les réseaux de télécommunication](#)
7. [L'agriculture connectée](#)

1 Introduction

Les réseaux sont un des maillons essentiels de l'économie numérique et de l'accès à l'information. L'essor des communications électroniques fait reposer une importance croissante sur ces réseaux, tant d'un point de vue économique que social. L'impact croissant du numérique en termes d'émission de gaz à effet de serre (GES) est ainsi sujet d'attention¹. C'est à ce titre, dans le cadre de ses travaux à vocation prospective, que l'Arcep s'intéresse aux impacts environnementaux des réseaux et plus largement à ceux du numérique.

Les solutions numériques peuvent être généralement considérées comme un vecteur d'innovation permettant d'apporter des réponses concrètes aux défis environnementaux. En effet, en permettant

¹ <https://usbeketrica.com/article/paula-forteza-numerique-vert-smartphones-mails-datacenters>

une collecte de données et en développant des capacités d'analyse, le numérique favoriserait la quantification des impacts des différentes activités sur l'environnement². Le numérique contribue notamment à l'adaptation intelligente de la thermique des bâtiments, la détection et la mesure des pertes sur les réseaux d'électricité, de gaz ou d'eau ou encore la mutualisation des lieux de vie et de leurs fonctions³.

Toutefois, au-delà du potentiel de réduction des émissions de GES d'autres secteurs via les solutions numériques, peut se poser la question des émissions de GES du secteur numérique lui-même (c'est-à-dire des infrastructures et réseaux au sens large et des terminaux). Ce second sujet semble moins connu ; aussi cette note se concentre-t-elle plus spécifiquement sur les émissions de GES⁴ du numérique⁵ en considérant les émissions directes et indirectes⁶. Elle aborde dans une première partie les incitations qui peuvent amener les acteurs du numérique à limiter leurs émissions de GES et revient, dans une seconde partie, sur celles pour lesquelles il n'existe à ce jour que peu d'incitation à la réduction.

Ces travaux comprenant une dimension prospective, les effets potentiels des technologies et usages émergents seront également évoqués au fil de cette note.

2 Des enjeux énergétiques partiellement pris en compte par des acteurs du numérique

Malgré la faible intensité carbone de l'électricité disponible en France⁷, les émissions de gaz à effet de serre des opérateurs de télécom en France sont en majorité dues à la consommation électrique de leurs seuls réseaux (voir notamment référence [4]).

Les opérateurs télécoms peuvent être incités à améliorer l'efficacité énergétique des réseaux et des centres de données pour limiter leur facture énergétique. En effet, une estimation grossière situe la facture énergétique des opérateurs français de quelques dizaines à plusieurs centaines de millions d'euros⁸ en fonction de leur taille et du prix d'achat de l'électricité. Par exemple, pour les opérateurs mobiles, la consommation énergétique représenterait de l'ordre de 15 à 20 % des coûts d'exploitation⁹. Dans cette section sont ainsi présentés les impacts environnementaux (en matière d'émission de GES) du numérique que l'objectif de réduction de coûts d'exploitation peut conduire à rationaliser.

² Cf. Rapport *Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age* [1]

³ Cf. *Softplace, Scénarios extrêmes*, 2015. <http://reseau.fing.org/file/download/165306>

⁴ Cette note restreint volontairement son périmètre à l'émission de GES. Néanmoins, comme il a pu l'être indiqué au cours des auditions, ces émissions ne sont pas les seuls enjeux liés à l'empreinte écologique du numérique. D'autres enjeux pourraient être mentionnés tels que l'épuisement de ressources abiotiques, l'éco-toxicité, etc.

⁵ En effet, parmi ses attributions, l'Arcep doit prendre « des mesures raisonnables et proportionnées » en vue d'atteindre « un niveau élevé de protection de l'environnement » conformément à l'Article L32-1 du Code des postes et des communications électroniques.

⁶ C'est-à-dire les émissions de GES produites directement par le numérique ainsi que provenant de la production de l'électricité, de la chaleur ou de la vapeur importée et consommée par le numérique [2].

⁷ L'intensité carbone (ou facteur d'émission) de l'électricité est la quantité de gaz à effet de serre consécutive à la production d'un kilowattheure d'électricité. En France, elle a été en 2018 de 57 g/kWh en moyenne contre 420 en UE. Source : [3]

⁸ Estimation faite sur la base des bilans RSE des opérateurs et du coût de l'accès régulé à l'électricité.

⁹ <https://www.mobileworldlive.com/ict-ee-18-news/global-ict-energy-efficiency-summit-paves-way-for-5g/>

2.1 Des opérateurs de réseaux incités à l'efficacité énergétique

L'augmentation importante des usages numériques de ces dernières années devrait se poursuivre¹⁰. Or, **la consommation électrique des réseaux est, selon la technologie employée, variablement dépendante de leur utilisation**. Il ressort des auditions menées par l'Arcep que dans le cas particulier des réseaux mobiles, la consommation électrique d'une antenne en pic de trafic peut être jusqu'à trois fois supérieure à sa consommation au repos. Les équipements situés dans le cœur de réseau des opérateurs voient aussi leur consommation énergétique croître avec le trafic¹¹.

Dans ce contexte, afin de limiter les coûts d'exploitation de leur réseau dont la composante énergétique occupe une part importante, **les opérateurs sont incités à améliorer leur efficacité énergétique**, c'est-à-dire la consommation d'énergie nécessaire à la réalisation d'un usage donné.

2.2 Une différenciation concurrentielle des équipementiers intégrant la dimension d'efficacité énergétique

Les opérateurs, souhaitant améliorer l'efficacité énergétique de leurs réseaux ne serait-ce que pour réduire leurs coûts d'exploitation, répercutent cette contrainte sur les équipementiers. Ces derniers ont intégré cette exigence et cherchent à se démarquer en offrant des équipements optimisés. En particulier, ils intègrent des fonctionnalités visant à accroître l'efficacité énergétique des équipements qu'ils proposent : ces équipements peuvent désormais entrer en veille (en l'absence de sollicitation, notamment la nuit) ou désactiver certaines fonctionnalités en dehors des pics de demande (comme le MIMO¹²). Équipementiers et opérateurs contribuent également à des travaux visant à normaliser des mesures d'efficacité énergétique au sein d'organismes de standardisation internationaux. **Grâce à ces optimisations, il est attendu que les stations de base plus récentes offrent, à usages constants, des performances énergétiques par Mo transité sur le réseau meilleures que celles des précédentes générations.**

Pour autant, **les éventuels effets positifs de ces évolutions technologiques sont susceptibles d'être compensés par l'accroissement de la consommation** induite par celle des usages nouvellement permis : on parle ainsi d' « effet rebond » (cf. section 3.2 pour plus de détails).

2.3 Des technologies progressivement plus efficaces énergétiquement

Une grande partie du coût énergétique des échanges réseaux est attribuée au réseau d'accès, c'est-à-dire au lien entre le cœur de réseau de l'opérateur et le domicile de l'utilisateur¹³. Diverses technologies sont employées pour créer ce lien final : le cuivre (pour ADSL et VDSL), le câble, la fibre optique ou le réseau cellulaire. Sans que cela ait nécessairement constitué un objectif ayant motivé les innovations réalisées dans les technologies de réseaux de télécommunication, ces évolutions ont contribué à accroître l'efficacité énergétique du réseau d'accès fixe.

¹⁰ A titre illustratif, Cisco évoque un taux de croissance annuel moyen du trafic vidéo de 33 % par an entre 2017 et 2022 passant d'un peu plus de 50 exaoctets par mois en 2017 à près de 300 exaoctets par mois prévus en 2022. La vidéo, qui représentait 55 % du trafic internet en 2017, devrait représenter 75 % du trafic d'ici à 2022. Cf : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>

¹¹ Voir par exemple les articles [5] et [6].

¹² Le terme MIMO ("Multiple-input and multiple-output") désigne une technologie mobile pour les communications sans fil. Cette technique utilise plusieurs antennes d'émission et de réception pour augmenter le débit.

¹³ A titre indicatif, en 2017, 80% des consommations énergétiques du réseau de Free provenaient du réseau d'accès [7].

Concernant les réseaux fixes, un acteur a indiqué que la **fibre consomme en moyenne**¹⁴ un peu plus de **0,5 Watt** par ligne, soit trois fois moins que l'**ADSL (1,8 W)** et quatre fois moins que le **RTC (2,1 W) sur le réseau d'accès**. Les consommations énergétiques de ces technologies filaires dépendent assez peu des usages qui en sont fait, ces évolutions se traduisent donc par des gains de consommation en valeur absolue.

La **consommation des réseaux cellulaires est quant à elle davantage dépendante des usages**, la consommation se mesure donc en kWh par Go de données transmises (en moyenne **0,6 kWh/Go**¹⁵ d'après un des acteurs auditionnés).

En moyenne sur une année, en se fondant sur ces estimations et des hypothèses de consommation de données mobiles, un utilisateur de réseau 4G consommerait de l'ordre de 50 kWh¹⁶ d'électricité, contre 19 kWh pour une ligne RTC, 16 kWh pour de l'ADSL et 5 kWh pour une ligne fibre optique.

Cette évolution conduit notamment à s'interroger à long terme sur le maintien en service de technologies plus anciennes, comme certains éléments du réseau cuivre ou certaines technologies mobiles anciennes, dès lors qu'elles fournissent l'accès aux mêmes services pour l'utilisateur final *via* une technologie moins efficace sur le plan énergétique.

2.4 Des vertus environnementales de la mutualisation et du partage d'éléments de réseau

Afin d'améliorer leur bilan économique ou par contrainte réglementaire, les opérateurs de réseaux mutualisent pour partie leurs infrastructures. Cette mutualisation a un impact certain lors du déploiement même de l'infrastructure en évitant la duplication inutile de plusieurs éléments de réseaux. Concernant la phase d'exploitation, l'impact énergétique est difficile à évaluer et n'est pas documenté à la connaissance de l'Arcep.

2.5 Des exploitants de centres de données également incités à l'efficacité énergétique

Comme les réseaux, les centres de données¹⁷ ont vu leur efficacité énergétique s'améliorer, **les exploitants de centres de données étant incités à réduire leurs coûts d'exploitation** ; cela se traduit par une réduction de leur indicateur d'efficacité énergétique (PUE pour *Power Usage Effectiveness*¹⁸). Les opérateurs de centres de données, qu'ils soient opérateurs de télécommunications ou fournisseur de services, cherchent notamment à réduire les coûts liés à la climatisation. Ainsi, des solutions de circulation de l'air extérieur (dite *free cooling*) permettent de réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation et donc de réduire le PUE. Elles pourraient être complétées par le

¹⁴ Il s'agit là de la puissance estimée à partir de la consommation énergétique à l'année. En effet, pour les technologies filaires, la puissance varie peu en fonction de l'usage.

¹⁵ Une étude estimait qu'en Finlande la consommation était de 0,46kWh/Go en 2016 [8].

¹⁶ En considérant une consommation moyenne mensuelle de 6,7 Go. Source : <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/observatoire-des-marches-des-communications-electroniques-en-france/obs-marches-2018-prov.html>

¹⁷ Les centres de données sont des infrastructures composées d'un réseau d'ordinateurs et d'espaces de stockage qui permettent à des entreprises ou des particuliers d'entreposer ou de traiter leurs données.

¹⁸ Cet indicateur représente le rapport entre l'énergie totale consommée par un centre de données et l'énergie consommée par les seuls équipements informatiques qui le constituent. Plus ce rapport est élevé, plus la quantité d'énergie utilisée par le centre de données est mobilisée par des équipements annexes tels que ceux de climatisation, d'éclairage ou de sécurité. Un PUE de 1 signifie que toute l'énergie du centre de données est consommée par ses serveurs.

développement d'équipements plus résilients à des températures élevées et nécessitant donc moins de refroidissement¹⁹.

En 2017, la consommation électrique associée à l'exploitation de l'ensemble des centres de données dans le monde était légèrement supérieure à celle nécessaire au fonctionnement des réseaux [9]. En outre, la localisation géographique de ces centres de données étant indépendante du lieu d'exploitation de ces données, il conviendrait de tenir compte des caractéristiques locales de l'électricité utilisée lorsque ces centres de données sont situés hors du territoire français, en particulier en matière d'intensité carbone.

Par ailleurs, une solution pour améliorer l'efficacité énergétique des centres de données est de réutiliser la chaleur dégagée par les serveurs pour chauffer des habitations ou d'autres équipements (piscines, etc.) situés à proximité des data-centers. Cette piste est explorée par différentes entreprises et pourrait permettre à terme d'obtenir un PUE très proche de 1 quand la chaleur peut être réutilisée pour d'autres usages.

A plus long terme, la frontière entre les centres de données et les réseaux de télécommunications est susceptible de s'estomper davantage dans les prochaines années. Ainsi le **Multi-Access Edge Cloud** (ou MEC) permet de **déplacer une partie des fonctionnalités des centres de données dans le réseau** des opérateurs pour qu'elles soient au plus près des utilisateurs (cela permet de limiter la latence²⁰) ; l'impact sur les émissions de GES d'un tel développement est encore incertain²¹. A l'inverse, le développement de la **virtualisation**²², qui **déplace une partie du réseau dans les centres de données**, est susceptible de réduire le besoin de renouvellement des équipements de réseau physique. Une même machine pouvant être utilisée pour supporter plus de fonctions réseaux, **cette standardisation pourrait contribuer à une amélioration de la réparabilité et de la recyclabilité de ces équipements**.

2.6 Une amélioration de l'efficacité énergétique qui compense, à ce stade, l'effet de l'explosion de trafic

Les données disponibles semblent montrer une stabilisation des émissions de GES des opérateurs de télécommunications français sur l'ensemble de leur périmètre d'activité²³. **Les mesures mises en œuvre par les opérateurs pour limiter les dépenses énergétiques de leurs réseaux semblent ainsi avoir jusque-là compensé l'accroissement des usages**, évitant une augmentation des émissions de GES des réseaux **sans toutefois conduire à une décroissance de celle-ci**. Pour autant, l'amélioration de l'efficacité énergétique pourrait ne pas suffire à absorber la très forte croissance des usages attendue dans les prochaines années.

¹⁹ Néanmoins, le respect des normes de santé pour les personnes travaillant dans les centres de données limitera les possibles élévations de température que les équipements seront amenés à supporter ; les gains attendus de telles évolutions devront donc nécessairement être plafonnés.

²⁰ C'est-à-dire le délai entre opérations.

²¹ En effet, le déploiement de cette technologie pourrait avoir à la fois des effets positifs (e.g. réduction du transport de données) ainsi que des effets négatifs (e.g. des centres de données moins optimisés et dont le PUE serait supérieur).

²² C'est-à-dire la capacité de simuler le comportement matériel de certains équipements spécialisés par des logiciels fonctionnant sur des équipements informatiques génériques.

²³ Ces données sont à interpréter avec précaution du fait de l'évolution des périmètres d'activité de certains opérateurs sur la période considérée et de l'utilisation d'un facteur d'émission du kWh électrique plus faible, ce qui contribue à la baisse observée en 2017.

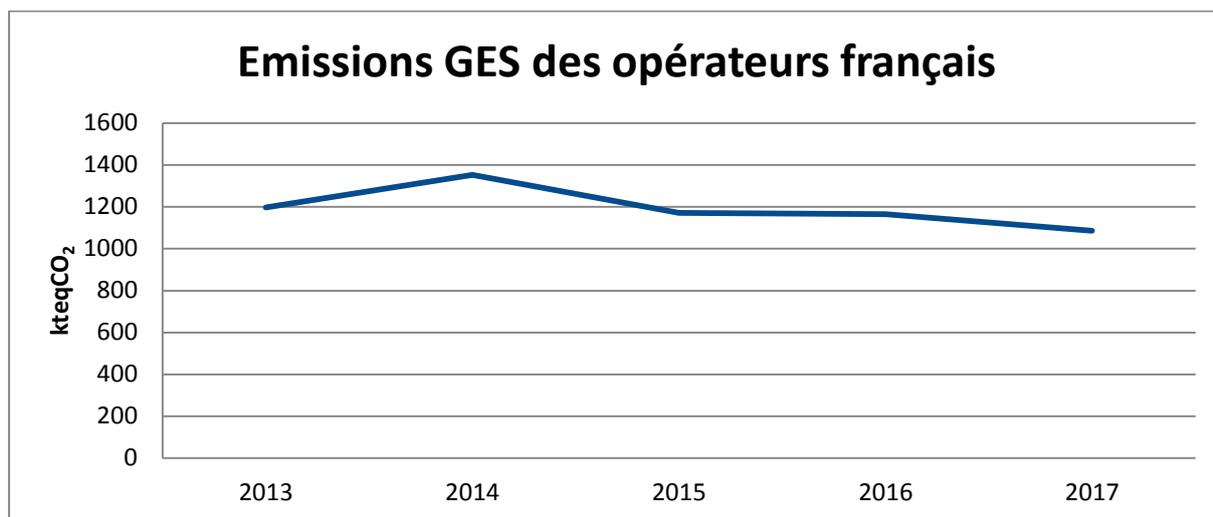


Figure 1 : Emissions carbone des opérateurs de télécommunications français. Source : réf. [4], [7] et [10] à [17], compilation des auteurs

Par ailleurs, bien que des analyses complémentaires soient nécessaires pour caractériser les émissions associées aux phases de production et de destruction ou recyclage des équipements de réseau, **les émissions de GES de ces infrastructures semblent assez largement imputables à leur consommation électrique pendant leur phase d'utilisation**. Cette répartition varie néanmoins d'un pays à l'autre en fonction des modes de production d'électricité.

En effet, sur la phase d'exploitation, la consommation imputable aux réseaux représente environ un tiers de la consommation énergétique de l'ensemble du secteur numérique. Cette part diminue de moitié lorsque la production des équipements est incluse²⁴.

2.7 Des évolutions technologiques qui promeuvent de nouveaux usages

Avec l'explosion du trafic, les enjeux de consommation énergétique deviennent de plus en plus prégnants et sont désormais pris en compte lors de la définition de nouvelles normes. La 5G pourrait offrir, à usages constants, une meilleure efficacité énergétique que la 4G. Cependant, l'évolution des usages, qui va souvent de pair avec l'évolution technologique, pourrait remettre en question ces gains.

D'une part, elle pourrait engendrer une augmentation des émissions de GES des opérateurs puisqu'il a été estimé au cours d'une audition que **l'amélioration de l'efficacité énergétique ne suffira pas, à long terme, à contrebalancer l'augmentation du trafic**. Ainsi, par effet rebond (dont le mécanisme est développé en partie 3.2), une évolution technologique qui s'avère permettre une réduction des émissions de GES à usage constant est susceptible de produire en fait un accroissement global des émissions en raison de la multiplication des usages qu'elle permet.

D'autre part, les évolutions des réseaux sont souvent suivies **par des évolutions importantes des usages qui requièrent que les utilisateurs renouvellent leurs équipements pour en bénéficier**. Ainsi, les générations successives de réseaux mobiles ont encouragé un **renouvellement du parc des terminaux** ; les augmentations de débits ont aussi permis d'afficher des contenus en plus haute résolution sous réserve d'avoir la télévision permettant d'en bénéficier. Comme il sera vu en section 3.3, cet effet est susceptible d'avoir un effet important en termes d'émissions de GES.

²⁴ D'après le rapport [9], l'énergie monopolisée par le numérique est principalement utilisée par les consommateurs (20%), la production et l'utilisation des *data-centers* (19%), la production et l'utilisation des réseaux (16%) et par la production (uniquement) des ordinateurs (17%), smartphones (11%) et télévisions (11%).

Enfin, par souci d'économie, les opérateurs pourraient préférer déployer des accès très haut débit en recourant à des technologies sans fil plutôt qu'en déployant de la fibre, voire à les proposer en complément de l'ADSL. Cela est notamment justifié par l'augmentation des débits permis par la 4G et la 5G. Or ce type de technologie d'accès consomme plus d'énergie que la fibre, surtout lorsque les usages évoluent grâce à la montée en débit permise.

3 Certains effets du numérique sont trop diffus pour faire l'objet naturellement d'une optimisation énergétique

Comme indiqué plus haut, certains acteurs ont un intérêt significatif à maximiser l'efficacité énergétique de leurs équipements et processus afin de limiter les coûts d'exploitation associés (en particulier les opérateurs de réseaux et de centres de données, dont l'exploitation représente en environ un tiers de la consommation énergétique du secteur). Cependant, **il apparaît d'une part que ces acteurs n'ont pas nécessairement intérêt à limiter les consommations électriques lorsque celle-ci ne leur est pas facturée, et d'autre part que la fragmentation des acteurs (souvent les consommateurs finaux) concernés par ces consommations induit un impact au niveau individuel négligeable alors qu'il représente au niveau agrégé une part substantielle de la consommation énergétique du secteur.**

3.1 Des équipements terminaux dont le coût énergétique est principalement transféré aux consommateurs

Les constructeurs et opérateurs n'ont pas d'incitation économique directe à réduire la consommation électrique des équipements lorsque celle-ci est facturée à l'utilisateur. Or, bien que les box opérateurs, téléviseurs, consoles et autres équipements soient généralement allumés en continu, ce n'est que récemment que la consommation électrique de ces équipements (notamment les box) commence à être perçue comme un critère de choix par les utilisateurs et est ainsi susceptible de devenir un enjeu concurrentiel. Dans le cas des terminaux mobiles, les utilisateurs tiennent essentiellement compte de l'autonomie²⁵ dans leurs choix mais la tendance semble plus être à l'accroissement des capacités des batteries [9] plutôt qu'à la réduction de la consommation énergétique des smartphones²⁶.

Le saviez-vous ?

Utilisées quelques heures par jour en moyenne, les box internet allumées en permanence ont en Europe une consommation équivalente à la production de deux à trois réacteurs nucléaires. Cela peut s'expliquer par l'absence d'incitation suffisante, tant pour les utilisateurs finals que pour les opérateurs, à limiter la consommation de tels équipements et à les éteindre lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

Par ailleurs, **contrairement aux réseaux, la phase d'utilisation des terminaux ne représente qu'une composante minoritaire de leurs émissions de GES.** En effet, les impacts associés à la production de ces équipements sont particulièrement élevés et il n'existe pas de filière de recyclage réellement développée à ce stade. Suite aux auditions menées par l'Arcep, sur une analyse de cycle de vie, il apparaît que la phase d'utilisation ne représenterait, au niveau mondial²⁷, qu'environ 20 %²⁸ de leur

²⁵ Voir par exemple <https://www.frandroid.com/produits-android/smartphone/408620-lautonomie-et-les-performances-sont-les-principaux-criteres-dachat-de-nos-lecteurs>

²⁶ Notamment car la consommation des écrans augmente avec leur résolution https://www.washingtonpost.com/technology/2018/11/01/its-not-your-imagination-phone-battery-life-is-getting-worse/?utm_term=.b0a58edce648

²⁷ Comme pour les équipements réseaux, cette répartition varie en fonction des modes de production d'électricité dans le pays où le terminal est utilisé.

émissions de GES. Une telle répartition pourrait signifier que les fabricants de terminaux optimisent cette dépense énergétique, tout comme le font les opérateurs de télécommunications. Toutefois :

- Contrairement à d'autres produits de consommation courante, il est probable que le coût des terminaux ne soit pas piloté au premier ordre par celui des matières qui le constituent mais plutôt par les questions de recherche et développement technologiques ou de marketing. Or, les émissions de GES de ces terminaux sont principalement dues aux étapes de production (énergie mobilisée pour l'extraction de ces matières premières, consommation électrique nécessaire à l'assemblage...) qui se déroulent essentiellement dans des zones géographiques où l'électricité peut être très carbonée. Dès lors, pour un fabricant, les incitations à réduire les émissions de GES pourraient être marginales relativement au coût total du produit. Cependant, à la connaissance l'Arcep, il n'existe pas d'évaluation publique sur ce sujet
- Il convient de noter que les terminaux ont en moyenne une faible durée d'utilisation (de l'ordre d'une vingtaine de mois – cf. [20]). Cela peut expliquer la forte contribution de la phase de production des terminaux dans leurs émissions globales de GES.

Faute de documentations plus détaillées sur le sujet à la connaissance de l'Arcep, il n'est cependant pas possible de définitivement trancher les motifs d'une telle répartition des GES entre phase de production et d'utilisation des terminaux.

Plusieurs solutions sont néanmoins envisagées pour réduire les émissions de GES imputables aux terminaux en dehors de leur utilisation : la réutilisation des terminaux et équipements permet d'allonger leur cycle de vie et peut s'inscrire dans une plus large démarche d'écoconception²⁹. Ainsi, dans un souci d'optimisation des coûts, certains opérateurs recyclent les boxes de leurs abonnés, ce qui contribue également à allonger leur durée de vie dans la mesure où elles peuvent servir à de nouveaux abonnés. Par ailleurs, certains constructeurs de terminaux réduisent les émissions de GES liées à la fabrication des équipements en recourant autant que possible à des énergies renouvelables et en les recyclant³⁰. Enfin, certains constructeurs mettent en avant la réparabilité et la modularité de leurs terminaux afin d'en réduire la fréquence de renouvellement³¹. En effet, le niveau de réparabilité varie significativement d'un terminal à un autre et certains terminaux sont en pratique jugés quasi-irréparables³².

3.2 Les centres de données et réseaux : une consommation énergétique moins contrôlée sur la phase de production, résiduelle par rapport à la phase d'exploitation

La phase d'exploitation des centres de données et des réseaux est relativement longue ; dès lors, la réduction de l'empreinte carbone liée à la fabrication et à la mise au rebut des équipements qui composent les centres de données et les infrastructures réseaux est moins sujette à des incitations financières significatives que pour l'empreinte résultant de leur utilisation. A la connaissance de l'Arcep, actuellement peu d'éléments sont toutefois disponibles concernant des éventuelles Analyses de Cycle de Vie des équipements qui composent les centres de données et les réseaux.

²⁸ A titre indicatif, d'après Apple, l'utilisation du dernier iPhone ne représenterait que 17% de son empreinte énergétique totale [18] et une étude d'Ericsson aboutissait à un ordre de grandeur similaire pour les autres smartphones [19].

²⁹ Voir par exemple <https://bienvivreledigital.orange.fr/etiquettes/reflexes-verts-ainsi-que-les-smartphones-recertifiés> tels que <https://e.foundation/e-pre-installed-smartphones/>

³⁰ <https://www.apple.com/environment/our-approach/>

³¹ Voir par exemple <https://shop.fairphone.com/en/> et <https://www.shiftphones.com/en/>

³² <https://fr.ifixit.com/smartphone-repairability>

3.3 Une difficulté croissante à réduire, voire à stabiliser l'impact énergétique du numérique du fait de l'accroissement des usages

Le défi de l'effet rebond : l'exemple du cloud gaming

L'effet rebond désigne l'augmentation de consommation liée aux différentes innovations technologiques (*i.e.*, baisse des coûts, amélioration de l'efficacité énergétique, etc.). Il est pour la première fois mis en évidence par W. Stanley Jevons (« paradoxe de Jevons », [21]) puis actualisé par les économistes Daniel Khazzoom et Leonard Brookes (« postulat de Khazzoom-Brookes », [22]). Il représente un « paradoxe » dans la mesure où toute évolution d'un usage ou d'une technologie qui s'avère améliorer l'efficacité énergétique d'une activité devrait impliquer, *a priori*, une réduction de l'impact énergétique total de cette activité. Cependant, si cette amélioration engendre (ou se produit) en parallèle (d') une baisse du coût de production du service considéré, cette baisse de coût permet alors de produire une plus grande quantité du bien ou service pour un prix inférieur et a pour effet d'en stimuler la demande. Jevons estime ainsi que « l'idée selon laquelle un usage plus économe du combustible équivaudrait à une moindre consommation est une confusion totale. C'est l'exact contraire qui est vrai. »³³

Les services de cloud gaming illustrent cette idée. En effet, **le cloud gaming permet une mutualisation des ressources informatiques dédiées aux jeux vidéo et allonge donc la durée de vie des terminaux** (consoles et ordinateur), en réduisant ainsi le coût de fabrication et de recyclage. Le cloud gaming, à niveau d'usage constant, **permettrait de réduire l'empreinte énergétique** des activités vidéo-ludiques grâce à une réduction du nombre de terminaux produits.

Néanmoins, pour évaluer l'effet total sur la consommation énergétique, **il est nécessaire de prendre en compte plus largement tous les effets de ce type de service**. Par exemple des entreprises comme Blade (Shadow), Google (Stadia) et Microsoft (xCloud) proposent des offres de jeux dans le cloud promettant des performances similaires à celles obtenues sur des consoles et ordinateurs haut de gamme à moindre coût³⁴, rendant ainsi le service abordable auprès d'un plus grand nombre d'utilisateurs, et leur permettant une utilisation plus intensive avec un accès abordable à un plus grand nombre de jeux. En particulier, les modèles économiques qui s'appuient principalement sur la publicité et l'exploitation de données peuvent proposer des services présentés comme « gratuits » et pourraient entraîner une stimulation plus importante du niveau de la demande. Dans ce contexte, **le passage au cloud gaming pourrait conduire à une augmentation d'usage susceptible de contrebalancer les éventuels gains énergétiques** qu'il aurait permis d'exploiter³⁵.

Pour comprendre l'effet d'une amélioration de l'efficacité énergétique, et plus largement d'une innovation dans le cadre de l'économie numérique, **il est nécessaire d'adopter une approche globale prenant à la fois en compte les conséquences de cette innovation sur les terminaux, les réseaux, les centres de données et sur l'ensemble des usages associés**³⁶ et qui se développent.

Tendances à l'accroissement potentiel des émissions de GES lié à la multiplication des usages

Les assistants intelligents embarqués dans les smartphones et enceintes vocales permettent des interactions simplifiées, voire automatisées, avec les équipements domotiques (machine à café,

³³ "It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth."

³⁴ Via les synergies que ces entreprises peuvent exploiter et grâce aux business model de plusieurs d'entre elles (plateformes bifaces, écosystème fermés, etc).

³⁵ «Google's Stadia is the future of gaming, and that's bad news for Earth»: "<https://www.digitaltrends.com/gaming/google-stadia-is-the-future-of-gaming-and-thats-bad-news-for-earth/> / <https://www.digitaltrends.com/gaming/google-stadia-is-the-future-of-gaming-and-thats-bad-news-for-earth/>

³⁶ Plusieurs travaux académiques s'intéressent aux sens causals de la croissance de la demande dans le contexte de l'économie numérique (Voir notamment [23] et [24]).

télévision, réfrigérateur, lampes). Interagir avec une lampe en passant par un assistant intelligent engendrera plusieurs connexions avec les serveurs distants du fabricant de la lampe³⁷ et de l'assistant³⁸. **En conséquence, si l'automatisation de la gestion de certains équipements** (par exemple le chauffage) **peut réduire la consommation énergétique d'un foyer, l'utilisation des assistants vocaux pour piloter des équipements pourrait entraîner à l'inverse des inefficacités.**

3.4 Les bonnes pratiques à promouvoir pour minimiser les impacts du numérique

Les enjeux de l'éco-conception des services numériques

Avec le développement des terminaux et des réseaux, les développeurs d'applications et services sont moins contraints que dans un passé récent dans leur utilisation des ressources (bande passante, puissance de calcul, stockage). Ils peuvent donc être **moins vigilants que par le passé sur l'utilisation de ces ressources et enrichissent les applications de fonctionnalités potentiellement accessoires** (on parle de création « d'obésiciels »). Ces applications qui consomment plus de ressources posent plusieurs problèmes:

- Elles augmentent le trafic de données résultant de leur utilisation et induisent une plus forte consommation des réseaux
- Elles augmentent l'utilisation des ressources (notamment des processeurs) et donc la consommation des équipements terminaux.
- Elles peuvent causer des ralentissements sur les terminaux plus anciens, moins performants, et donc inciter leurs utilisateurs à s'en séparer. Ce phénomène peut ainsi accélérer le renouvellement des terminaux.

Ces services et applications pourraient être proposés dans une version allégée de certaines fonctionnalités et moins gourmande en ressources. Ainsi, dans les pays où les smartphones disposent de moins de mémoire³⁹ (notamment dans certaines zones d'Asie du Sud-Est), Google propose des déclinaisons épurées de ses services sous l'appellation « Go »⁴⁰. Maps Go, Youtube Go et les autres services de la gamme offrent les mêmes fonctionnalités principales que les applications smartphones dites *natives* tout en étant plus légères. Certaines de ces applications sont en fait des Progressive Web Apps (PWAs) : des applications s'exécutant dans un navigateur.

Ce type de démarche s'inscrit dans l'approche de **l'éco-conception des services numériques** qui a pour objectif d'offrir à l'utilisateur final un **service de qualité sensiblement équivalente en mobilisant significativement moins de ressources**. Les bonnes pratiques qui s'inscrivent dans cette démarche sont par exemple valorisées par le « collectif conception numérique responsable »⁴¹ qui a pu mettre en évidence que des résultats importants pouvaient être obtenus en matière de réduction des ressources à mobiliser pour un service rendu⁴².

³⁷ Voir p.17,[25] concernant la consommation d'une lampe. Plus largement sur la smart home : <https://gizmodo.com/the-house-that-spied-on-me-1822429852>

³⁸ <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-02-12/your-smart-light-can-tell-amazon-and-google-when-you-go-to-bed>

³⁹ Ou lorsque les forfaits d'accès à internet sont plus contraints ou que la qualité du réseau est moins bonne.

⁴⁰ <https://www.android.com/versions/go-edition/>

⁴¹ <http://collectif.greenit.fr>

⁴² <http://www.innovergne.fr/sites/www.innovergne.fr/files/webmaster/transfert/Fichiers-JTT/2017-03-innovergne-conf-eco-all-in-on-v1.1-part2.pdf>

Enfin, dans ce contexte de valorisation de démarches de conception numérique vertueuse, certains interlocuteurs déplorent le cloisonnement académique qui peut exister dans les formations, notamment les écoles d'ingénieurs, entre les disciplines associées au domaine environnemental et celles associées aux technologies de l'information et de la communication, les secondes pouvant nécessiter une sensibilisation aux premières. Cette interdisciplinarité nécessaire commence doucement à se développer : certaines formations courtes, par exemple au sein de l'Université de La Rochelle⁴³, introduisent aux fondamentaux du numérique dits responsables.

Utiliser les atouts de la régulation par la donnée

Certains acteurs économiques ont des incitations (la limitation de leurs coûts d'exploitation en premier lieu) à maximiser l'efficacité énergétique de leurs processus. Pour autant, compte tenu de la croissance des usages, de telles pratiques pourraient ne pas être suffisantes pour réduire durablement l'empreinte énergétique du numérique. Il pourrait ainsi être pertinent d'engager une démarche, fondée sur les principes de régulation par la donnée, qui viserait :

1. **à rendre l'information en matière d'impacts associés aux usages du numérique disponible et compréhensible par le public, ce qui implique la mise en place d'un référentiel métrologique partagé.** Dans ce contexte, un meilleur accès à des informations ouvertes et aisément réutilisables concernant les émissions de GES des acteurs du numérique, sur l'ensemble de leur périmètre d'activité et de manière standardisée (par exemple l'ensemble des scopes 1, 2 et 3 du GHG Protocol – cf. [23]) permettrait de faciliter l'expertise et de favoriser le dialogue sur des bases communes⁴⁴ ;
2. **à favoriser l'émergence de services appréhendables par le grand public, par exemple en utilisant les données ouvertes** ainsi créées, sur le modèle de l'écosystème applicatif utilisant la base Open Food Fact⁴⁵. **Les informations de consommations énergétiques et d'impacts environnementaux ainsi que la réparabilité⁴⁶** pourraient être ainsi facilement **accessibles au consommateur au final** au moment opportun. Un tel indice de réparabilité est proposé dans le cadre du projet de loi relatif à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire⁴⁷ ;
3. **à favoriser les approches de types nudges** ([27] et [28]) et les apports des sciences humaines sur les déterminants de la motivation des utilisateurs dans leurs choix de consommation. Par exemple, les applications de streaming pourraient indiquer la consommation évitée en téléchargeant le contenu en WiFi plutôt que via un réseau mobile ; l'interface de gestion des box internet fixe pourrait également, par la mise en place d'API idoines, contribuer à informer l'utilisateur final⁴⁸ des conséquences de ses actes de consommation numérique ;
4. **à évaluer les effets de telles pratiques.**

4 Éléments de conclusion

Le numérique est devenu un maillon essentiel de l'économie et est un vecteur d'innovations disposant d'un potentiel de décarbonation de plusieurs secteurs d'activité⁴⁹. Malgré ce potentiel

⁴³ <https://www.greenit.fr/formations/>

⁴⁴ A noter dans cet esprit le « Digital Environmental Repository » du Shift Projet, voir p.27[9]

⁴⁵ A titre d'exemple, l'application Yuka, qui permet d'obtenir des informations sur un aliment en scannant le code-barres du produit, utilise la base Open Food Facts <https://world.openfoodfacts.org/>

⁴⁶ Voir par exemple le score de réparabilité de iFixit : <https://www.ifixit.com/smartphone-repairability>

⁴⁷ Voir la version adoptée en première lecture par le Sénat : <https://www.senat.fr/leg/tas18-148.html>

⁴⁸ Il serait toutefois nécessaire de faire une évaluation coût/bénéfice pour s'assurer que le recours à de tels outils générerait bien une réduction nette de la consommation énergétique

⁴⁹ <https://www.theverge.com/2019/6/25/18744034/ai-artificial-intelligence-ml-climate-change-fight-tackle>

pour les autres secteurs, qu'il conviendrait de valoriser et soutenir, il est constaté que le numérique reste émetteur net⁵⁰ de GES. Ce secteur représente **aujourd'hui environ 3 % des émissions mondiales de GES**⁵¹. Afin de limiter leurs coûts d'exploitations, certains acteurs du numérique ont su optimiser, pour partie, la consommation énergétique d'équipements et services. Cependant, une telle démarche n'a pu, seule, enrayer la **croissance de ces émissions qui, selon certaines sources [9], pourrait atteindre 8% par an**⁵², compte tenu de l'accroissement des usages tant internes au numérique que ceux proposés au service d'autres secteurs. Ces deux aspects amènent à considérer qu'au-delà de l'enjeu d'efficacité, voire pour y contribuer, **une certaine forme de sobriété pourrait constituer une réponse aux nouveaux enjeux** auxquels doit faire face le numérique.

En sus de la recherche d'efficacité énergétique spontanée de la part des acteurs industriels du numérique et motivée par des questions principalement économiques, **la question du maintien de certaines technologies, de moins en moins utilisées, se pose** : en effet, elles engendrent des consommations énergétiques potentiellement significatives en contrepartie d'un bénéfice faible du fait du déploiement de réseaux de nouvelle génération.

De plus, le **développement de formations et de bonnes pratiques** tendant à favoriser la **création d'équipements et de services numériques « éco-conçus »** représente également un axe à mobiliser.

Enfin, **informer les citoyens** sur les effets de leur consommation numérique dans l'esprit de la régulation par la donnée prônée par l'Arcep permettrait à chacun d'adopter des démarches d'éco-consommation et contribuer à maximiser des usages vertueux du numérique ; la puissance publique pourrait contribuer à ces leviers importants.

⁵⁰ C'est-à-dire en comparant les émissions propres du secteur et les émissions évitées dans d'autres secteurs par le numérique – cf. [29].

⁵¹ Les estimations de la part du numérique dans les émissions de GES varient de 2% à 3,9% selon les études et le périmètre considéré. L'UIT (Union Internationale des Télécommunications) estime que le numérique représente de 2% à 2,5% [30] des émissions de GES alors que le ShiftProject [9] et GreenIT [31] situent respectivement cette part 3,7% et 3,9%.

⁵² Une autre étude estime toutefois que cette croissance est significativement plus faible sur la période 2010-2015 [32]

5 Références

- [1] Rapport *Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*, The Climate Group and Global e-Sustainability Initiative, 2008.
- [2] ADEME, *Lignes directrices pour le développement d'un guide sectoriel bilan d'émission de gaz à effet de serre*, <http://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/ADEME%20lignes%20directrices%20guides%20sectoriels%20bilans%20GES.pdf>
- [3] *Bilan GES*, ADEME, <http://www.bilans-ges.ademe.fr>
- [4] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2016.
- [5] Hinton, Kerry & Baliga, Jayant & Feng, Michael & Ayre, R.W.A. & Tucker, Rodney. (2011). *Power Consumption and Energy Efficiency in the Internet. Network*, IEEE. 25. 6 - 12. 10.1109/MNET.2011.5730522.
- [6] Alharbi, Hatem & Musa, Mohamed & El-Gorashi, Taisir & Elmighani, Jaafar. (2018). *Real-time Emissions of Telecom Core Networks*
- [7] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2017
- [8] *Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking*, Hanna Pihkola, Mikko Hongisto, Olli Apilo and Mika Lasanen, 2018
- [9] *Lean ICT – Pour une sobriété numérique*, The Shift Project, Octobre 2018.
- [10] Base de données environnementales d'Orange, années 2013 à 2017. <https://www.orange.com/fr/Human-Inside/Reporting/Folder/base-de-donnees-RSE>
- [11] *Document de référence– Activité et RSE – Rapport financier annuel*, Groupe Bouygues, 2014.
- [12] *Document de référence– Activité et RSE – Rapport financier annuel*, Groupe Bouygues, 2015.
- [13] *Document de référence– Activité et RSE – Rapport financier annuel*, Groupe Bouygues, 2016.
- [14] *Document de référence– Activité et RSE – Rapport financier annuel*, Groupe Bouygues, 2017.
- [15] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2013.
- [16] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2014.
- [17] *Rapport sur la responsabilité sociale, environnementale et sociétale du groupe Iliad*, 2015.
- [18] *iPhone Xs Max Environmental Report*, https://www.apple.com/environment/pdf/products/iphone/iPhone_XS_Max_PER_sept2018.pdf

- [19] *Life Cycle Assessment of a Smartphone, Mine Ercan, Jens Malmodin, Pernilla Bergmark, Emma Kimfalk and Ellinor Nilsson*
<https://www.ericsson.com/assets/local/publications/conference-papers/life-cycle-assessment-of-a-smartphone.pdf>
- [20] <https://fr.kantar.com/tech/mobiles/2017/smartphones-une-croissance-au-point-mort/>
- [21] *The Coal Question; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*, W. Stanley Jevons, 1865.
- [22] *The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth*. The Energy Journal. 13 (4): 131–148, Saunders, Harry D., 1992.
- [23] *The Impact and Implications of the Growth in Residential User-to-User Traffic*, Cho et al, 2006.
- [24] *Understanding the demand growth for digital connectivity*, Van der Vorst & Brennenraedts, 2018.
- [25] *La face cachée du numérique*, ADEME, Novembre 2018.
- [26] *A Corporate Accounting and Reporting Standard – Revised edition*, The Greenhouse Gas Protocol, 2004.
- [27] *Les nudges dans la régulation environnementale : alternative ou complément aux instruments monétaires ?*, thèse doctorale de Benjamin Ouvrard, 2016.
- [28] *Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness*, Thaler et Sunstein, 2009
- [29] *ICT Sector Helping to Tackle Climate Change, Nations Unies sur le changement climatique*, Août 2016. Voir: <https://unfccc.int/news/ict-sector-helping-to-tackle-climate-change>
- [30] *ICTS and Energy Efficiency*,
https://www.itu.int/en/action/climate/Pages/energy_efficiency.aspx
- [31] *Etude "Empreinte environnementale du numérique mondial"*, GreenIT.fr, Octobre 2019
- [32] *The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015*, [Malmodin](#) et [Lundén](#)

6 Annexe : personnes auditionnées

- Jean-Marc Jancovici, Carbone 4, membre du Haut conseil pour le climat.
- Liliane Dedryver, France Stratégie.
- Hugues Ferreboeuf, The Shift Project.
- Raphaël Guastavi, Erwan Autret, Alain Anglade, ADEME.
- Frédéric Bordage, GreenIT.
- Philippe Tuzzolino, Jean-Manuel Canet, Hervé Mallet, Orange.
- Christophe Grangeat, Joel Leclair, Denis Blavette, Gilbert Buty, Nokia.
- Jacques-François Marchandise, Fondation Internet Nouvelle Génération.