

Effets environnementaux de la 5G (partie 3)

Philippe Ciblat

LTCI, Telecom Paris, IP Paris, EcoInfo

Jacques Combaz

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

Marceau Coupechoux

LTCI, Telecom Paris, IP Paris, LinCS, EcoInfo

Kevin Marquet

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

Anne-Cécile Orgerie

Université de Rennes, Inria, CNRS, IRISA, EcoInfo

Ce document a pour objectif de rassembler les connaissances actuelles liées aux effets environnementaux de la 5G. Il s'articule autour de questions liées à ces effets. Pour cela, il est organisé en trois parties. La première donnait les bases nécessaires à la compréhension de la technologie elle-même, elle a été publiée en octobre 2022 [30]. La deuxième détaillait les services rendus possibles par la 5G, elle a été publiée en novembre 2024 [31]. La dernière partie, présentée ici, porte sur les effets environnementaux du déploiement de la 5G.

Effets environnementaux de la 5G

Après les deux premiers volets publiés précédemment ([30] et [31]), nous examinons ici l'impact environnemental de la 5G, ou plus exactement ses effets environnementaux puisque ceux-ci peuvent être de différentes natures comme nous allons le voir. La question des effets environnementaux de la 5G a occupé

plusieurs fois l'attention de la presse [29], [69], [83], [87] et des médias en général. L'essentiel des discussions sur ce sujet porte sur la consommation énergétique du réseau et plus précisément sur son *efficacité énergétique* qui s'annonce supérieure à celle de la 4G [26]. Mais, comme nous le verrons dans la suite, une meilleure efficacité énergétique ne garantit pas d'économie d'énergie.

De plus, la consommation électrique du réseau ne recouvre qu'une partie des impacts environnementaux de la 5G. Comme pour tout équipement informatique, les équipements de la 5G (smartphones, antennes, etc.) génèrent différents impacts tout au long de leur cycle de vie, tels que la déplétion des ressources, l'acidification des océans et des sols, etc. [100]. En particulier, pour les smartphones, la phase d'usage n'est très souvent pas prépondérante : la phase de fabrication concentre la majeure partie des impacts environnementaux (voir par exemple les analyses de cycles de vie fournies par Samsung pour les smartphones 4G et 5G [99]).

Parmi les arguments fréquemment employés en faveur du déploiement de la 5G, il y a celui de ses bénéfices environnementaux indirects : les applications qu'il sera possible de bâtir grâce à la 5G sont amenées à transformer les autres secteurs d'activité (transports, agriculture, industrie, etc.) et donc à modifier leurs impacts environnementaux [26]. Le bilan de ces transformations sera-t-il bénéfique ou néfaste d'un point de vue de l'environnement ? Il n'existe aujourd'hui pas de réponse définitive à cette question, pour la 5G en particulier comme pour la numérisation en général. En 2022, le GIEC indiquait dans son sixième rapport sur l'atténuation du changement climatique que les effets de la numérisation étaient mal compris à l'heure actuelle et que, sans une gouvernance appropriée, celle-ci conduirait probablement à augmenter la demande en énergie et les émissions de gaz à effet de serre [65 p.140]. C'est aussi ce que nous pourrions conclure à propos du développement de la 5G comme nous allons le voir dans la suite.

La figure 1 illustre le périmètre de cet article de manière exhaustive : les effets directs (consommation énergétique, émissions de gaz à effet de serre, épuisement des ressources naturelles, émissions de particules fines, etc.) des équipements numériques (terminaux, équipements réseau et centres de calcul) tout au long de leur cycle de vie (fabrication, distribution, installation, usage, maintenance et fin de vie), les effets indirects (obsolescence, effets rebond, effets de substitution, etc.) sur les autres secteurs (tels que l'agriculture ou le transport), les scénarios prospectifs qui explorent des futurs possibles de cette technologie et enfin les recherches en informatique menées dans le contexte actuel de l'anthropocène.

Les différentes sections et questions posées tout au long de cet article tentent de couvrir l'état des connaissances actuelles sur ce périmètre. Ces connaissances étant incomplètes, nous ne couvrons donc que partiellement la vue exhaustive de la figure 1.

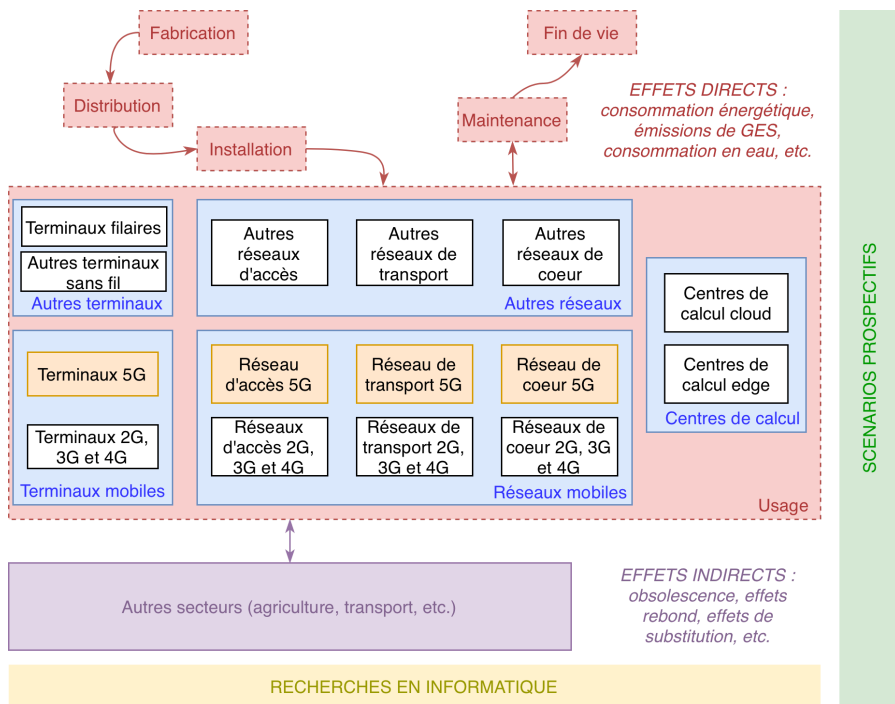


Fig. 1. Illustration du périmètre de cet article sur les effets environnementaux de la 5G incluant les effets directs sur tout le cycle de vie, les effets indirects, les scénarios prospectifs qui explorent les futurs possibles et les recherches en informatique menées dans le contexte de l'anthropocène.

Quelle est l'efficacité énergétique de la 5G ?

QU'EST-CE QUE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE D'UN RÉSEAU SANS FIL ?

L'*efficacité énergétique* d'un réseau désigne la quantité de bits d'information transmis par unité de consommation d'énergie. Elle peut donc s'exprimer en bits/J (ou Go/kWh). L'*intensité énergétique* désigne quant à elle exactement l'inverse : la quantité d'énergie qu'il faut pour transporter une certaine quantité de données. Elle est typiquement exprimée en J/bit (ou kWh/Go).

La consommation énergétique d'un équipement du réseau, typiquement une station de base, n'est généralement pas une fonction linéaire du trafic servi ou de sa charge (cette dernière est définie comme la proportion de ressources temps-fréquence utilisée, lissée sur une fenêtre de temps suffisamment grande). Le modèle affine est toutefois souvent utilisé par souci de

simplification, voir par exemple [13]. En effet, la consommation énergétique se compose :

- d’une partie dite statique, c’est-à-dire indépendante de la charge, il peut s’agir par exemple du système de refroidissement du site ou des traitements nécessaires à la transmission des signaux de synchronisation ;
- d’une partie dynamique qui croît avec le trafic réseau, par exemple la puissance de transmission, les opérations de codage et décodage, la modulation et démodulation ou autres traitements du signal qui requièrent une capacité de calcul croissante avec le débit.

On peut ajouter à cette fonction un point de discontinuité lorsqu’il n’y a pas de trafic pour prendre en compte l’effet d’une mise en veille de l’équipement comme illustré dans la figure 2.

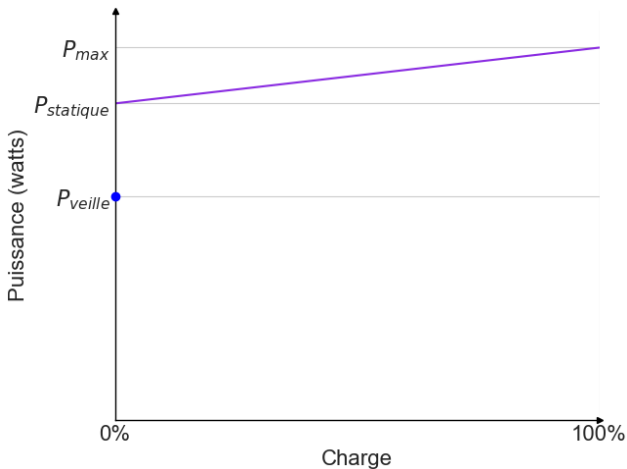


Fig. 2. Modèle simplifié de la consommation énergétique d’une station de base.

Ainsi, lorsque les auteurs de [11] indiquent que l’intensité énergétique du transfert de données via le réseau Internet est de 0,06 kWh/Go, il s’agit en fait d’estimations basées sur un trafic moyen. Du fait des coûts énergétiques fixes, ce chiffre augmente (respectivement diminue) si le trafic moyen diminue (respectivement augmente). En d’autres termes, plus le trafic est important, plus la partie fixe est proportionnellement faible dans la consommation totale et donc, plus l’efficacité énergétique est importante. De plus, les technologies radio ont évolué au cours du temps, soit pour réduire cette consommation fixe, par exemple en introduisant et en améliorant des modes de veille, soit pour augmenter la quantité de données par unité d’énergie dans la partie dynamique, par exemple en utilisant les MIMO massifs (voir

la section « *Comment (technologiquement) va-t-on atteindre ces performances?* » du premier volet de notre étude pour en savoir plus [30]) ou en améliorant l'efficacité des amplificateurs de puissance.

Lorsque des valeurs d'efficacité énergétique (ou de façon équivalente d'intensité énergétique) sont avancées, il convient donc de savoir à quelles conditions de trafic elles s'appliquent et quel est le périmètre des équipements réseau considéré. Très souvent, il s'agit du cas le plus favorable, c'est-à-dire lorsque le réseau est chargé au maximum de sa capacité, ce qui n'arrive jamais en conditions réelles. En effet, pour des raisons de performances, de qualité de service ou de tolérance aux pannes, les opérateurs préfèrent ne pas utiliser leurs équipements en limite de capacité et s'emploient plutôt à ajouter des équipements réseaux lorsque ceux-ci s'en approchent. Le fait que l'efficacité énergétique d'un réseau soit plus élevée que celle d'un autre dans ce cas théorique ne signifie pas forcément qu'elle le sera en pratique sur le trafic réellement observé.

La littérature scientifique s'est beaucoup intéressée par ailleurs à l'efficacité énergétique théorique d'une communication radio. Il existe un compromis intéressant qui relie l'efficacité et la puissance émise. En effet, le débit est une fonction croissante de la puissance reçue au récepteur et donc transmise par l'émetteur; on peut le constater par exemple avec la formule de Shannon. Mais quand la puissance émise augmente, c'est aussi la consommation énergétique qui augmente, de telle sorte qu'une puissance optimale peut apparaître pour maximiser l'efficacité énergétique (voir encart ci-dessous). Par exemple, les auteurs de [21] ont calculé l'efficacité théorique d'une communication radio en se basant sur les équations physiques de propagation d'onde et l'entropie de Shannon notamment. Ils indiquent que pour un nombre réaliste d'antennes et des gains de canaux réalistes, on peut espérer atteindre une efficacité énergétique de l'ordre de quelques Tbit/J.

Cependant, cette étude, et d'autres du même type, n'indiquent pas que l'on puisse atteindre cette efficacité dans des conditions de trafic réelles (notamment car le débit réel est plus petit que la capacité de Shannon et que le trafic est sporadique ou pas adapté à la valeur du débit obtenu en optimisant l'efficacité énergétique) ou avec des technologies économiquement viables. Comme dans l'exemple montré dans l'encart ci-dessous, on voit aussi que les gains théoriques les plus importants sont atteints en adaptant la puissance de transmission à la puissance statique, parfois au détriment du débit. Or, en pratique, certains opérateurs se contentent de configurer les stations de base pour qu'elles émettent à des puissances fixes en privilégiant les débits, sans considération pour l'efficacité énergétique [7].

QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE D'UNE LIAISON RADIO

On étudie succinctement dans cet encart le compromis entre débit et consommation énergétique sur un modèle théorique simplifié.

On se fixe une durée T_0 maximale pendant laquelle on peut transmettre un paquet de longueur L bits. Le temps effectif de la transmission est $T \leq T_0$ secondes et l'émetteur entre en mode veille pendant les $(T_0 - T)$ secondes restantes. Notons que la durée T dépend du débit et donc de la puissance d'émission de l'émetteur P via la relation $D(P) = L/T$. On supposera que le débit $D(P)$ est une fonction doublement dérivable, strictement croissante, strictement concave, et telle que $D(0) = 0$. La puissance consommée en mode veille est notée P_s . En supposant un amplificateur parfait on a alors l'efficacité énergétique suivante :

$$\mathcal{E}(P) = \frac{L}{(P + P_c)T + (T_0 - T)P_s} = \frac{D(P)}{(P + P_c) + (T_0 D(P)/L - 1)P_s} \quad (1)$$

où P_c est la puissance statique (c'est-à-dire de circuiterie), vérifiant $P_c \geq P_s$. Rappelons que $T \leq T_0$, c'est-à-dire que $L/D(P) \leq T_0$ ou que $P \geq P_{\min}$ avec $P_{\min} = D^{-1}(L/T_0)$. Par construction, l'énergie E utilisée par le réseau pendant la durée T_0 est :

$$E = L/\mathcal{E}(P) \quad (2)$$

On cherche à minimiser cette quantité d'énergie E ou, de manière équivalente dans ce modèle simplifié, à maximiser l'efficacité énergétique du réseau $\mathcal{E}(P)$. Puisqu'il faut assurer la transmission de l'intégralité du paquet pendant la durée T_0 , on cherche une puissance $P^* \geq P_{\min}$ maximisant $\mathcal{E}(P)$. Pour étudier les valeurs maximales de $\mathcal{E}(P)$, on étudie le signe de sa dérivée $\mathcal{E}'(P)$. Quand elle est définie, cette dernière a le même signe que l'expression suivante :

$$D'(P)(P + P_c - P_s) - D(P) \quad (3)$$

On peut montrer facilement qu'avec les hypothèses prises sur $D(P)$, fonction doublement dérivable, la quantité (3) est strictement décroissante. En particulier, si $\mathcal{E}(P)$ admet un maximum il est unique.

Cas 1 — Le réseau ne possède pas de mode veille, $P_s = P_c \geq 0$

Dans ce cas, puisque (3) est nulle pour $P = 0$, on a $\mathcal{E}'(P) < 0$ pour $P > 0$, ce qui veut dire que l'efficacité énergétique est strictement décroissante. La puissance optimale est donc $P^* = P_{\min}$. Par conséquent, il s'agit d'émettre à la puissance la plus faible possible, $P_{\min}$, c'est-à-dire au débit minimal L/T_0 . Notez que cette situation couvre en particulier le cas où la puissance statique est nulle, $P_c = P_s = 0$.

Cas 2a — Le réseau possède un mode veille, $P_s < P_c$

Dans ce cas, sous quelques hypothèses peu restrictives en pratique, l'efficacité énergétique $\mathcal{E}(P)$ atteint une valeur maximale pour une puissance $\tilde{P} > 0$ annulant

l'expression (3). Cette puissance dépend uniquement de la fonction $D(P)$ et de la différence entre la puissance statique et la puissance en veille ($P_c - P_s$). La puissance optimale est obtenue alors en posant $P^* = \max(\tilde{P}, P_{\min})$. En fonction des valeurs des paramètres L et T_0 , on peut avoir $P^* = \tilde{P} > P_{\min}$, c'est-à-dire un débit optimal supérieur au débit minimal assurant la transmission du paquet. Néanmoins il convient de mentionner que la littérature ne considère généralement pas ce cas mais le cas particulier où $P_s = 0$, que nous développons dans ce qui suit.

Cas 2b — Le réseau possède un mode veille parfait, $P_s = 0$ et $P_c > 0$

Ce cas correspond aussi à un trafic continu qui ne nécessiterait jamais de mise en veille. La forme typique de la fonction $\mathcal{E}(P)$, en supposant $D(P) = \log_2(1 + P)$, est illustrée en figure 3 pour deux valeurs de P_c . On constate que le maximum de l'efficacité énergétique est plus élevé lorsque la puissance statique est plus faible, ce qui était bien sûr attendu. On voit également que l'efficacité énergétique maximale n'est pas obtenue à pleine puissance, c'est-à-dire au débit maximal. De plus, la puissance $\tilde{P}$ qui maximise l'efficacité énergétique (matérialisée par les traits en pointillés sur la figure) augmente avec P_c . Autrement dit, plus le coût statique est élevé et plus il est intéressant d'envoyer à forte puissance pour mettre rapidement le système en veille.

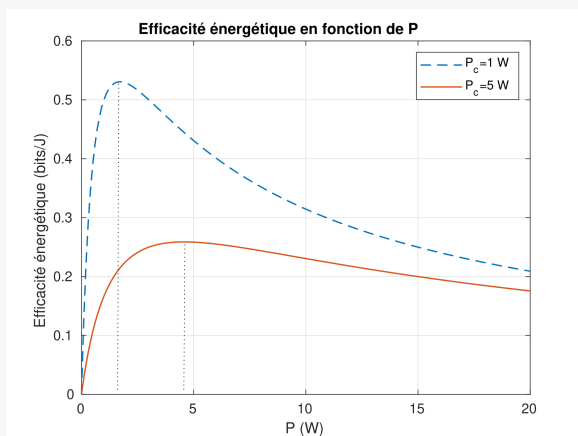


Fig. 3. Efficacité énergétique en fonction de la puissance émise.

En conclusion, dès que les puissances de veille (émission inactive) et de circuiterie (partie fixe quand émission active) ont la même valeur, le système le plus efficace énergétiquement induit l'utilisation de la puissance la plus petite autorisée ($P_{\min}$). En revanche dès que $P_c > P_s$ (qui peut correspondre à plusieurs cas de figure dont le cas traditionnel $P_c > P_s = 0$), le résultat de l'optimisation conduit à choisir une puissance potentiellement plus élevée que la puissance minimale et qui croît avec l'écart ($P_c - P_s$).

L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE L'INFRASTRUCTURE 5G EST-ELLE MEILLEURE QUE CELLE DE LA 4G ?

Nous l'avons vu, la technologie 5G propose plusieurs améliorations (modes veilles, meilleure efficacité spectrale, etc.) qui vont dans le sens d'une meilleure efficacité énergétique. Comme nous l'avons expliqué dans la première partie de notre étude [30], ces améliorations sont nécessaires afin de maintenir les coûts à des niveaux raisonnables dans le cas où le trafic continuerait à augmenter de façon importante (cf. deuxième partie de notre étude [31]), puisque la consommation électrique du réseau constitue une part non négligeable de ses coûts d'opération [95].

Puisque l'efficacité énergétique dépend notamment du trafic, pour comparer deux réseaux mobiles, il convient d'abord de préciser le niveau de trafic considéré. On pourrait par exemple s'intéresser à faire transiter le même volume de données sur différentes générations de réseaux (3G, 4G, 5G). Évidemment il s'agirait là d'une comparaison théorique puisque que chaque génération s'accompagne d'une augmentation du trafic du fait des nouveaux usages qu'elle apporte, comme détaillé dans la deuxième partie de notre étude [31].

D'après certains travaux, un réseau 5G devrait être plus efficace qu'un réseau 4G pour les niveaux de trafic attendus par les opérateurs [108], [109]. Il reste cependant encore beaucoup d'incertitudes sur les performances réelles qu'auront les réseaux 5G dans les années à venir, en partie parce que celles-ci vont dépendre des choix d'implantation (nombre et emplacement des stations, fréquences, fonctionnement des modes veilles, etc.), mais aussi parce qu'il n'est pas toujours aisé d'anticiper les progrès qui seront fait en la matière.

En se fondant sur des mesures effectuées sur des réseaux pilotes en Espagne et au Brésil, Ericsson et Telefonica affirment que la 5G est jusqu'à 90 % plus efficace que la 4G en termes de consommation énergétique par unité de trafic (en W/Mbps) [27]. Plusieurs études ont montré des gains significatifs en termes d'énergie émise en l'absence de trafic utilisateur. La suppression de certains signaux, dits de référence, consommant en 4G de l'énergie en permanence même en l'absence de trafic, permet en 5G d'émettre de 4 à 10 fois moins de puissance (en mode *idle* avec une périodicité du bloc de signaux de synchronisation SSB de 20 ms), selon les environnements et les configurations de station de base [46]. Les mêmes ordres de grandeurs se retrouvent dans le rapport de l'ARCEP sur l'efficacité énergétique de la 5G dont la figure 4 est tirée [32].

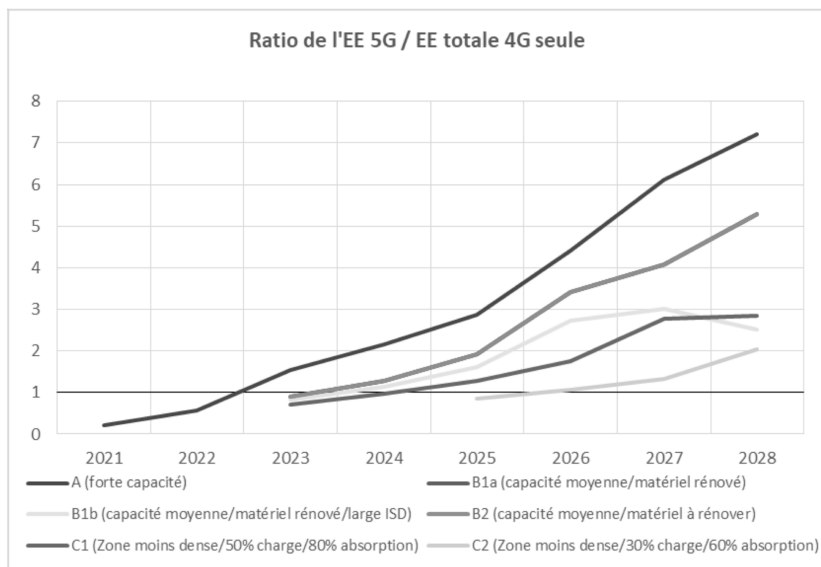


Fig. 4. Ratio de l'efficacité énergétique (EE) de la 5G sur celui de la 4G pour différents scénarios de déploiements fictifs explorés par l'ARCEP. Figure extraite de [32].

Elle montre le ratio entre l'efficacité énergétique de la 5G et celui de la 4G au cours du temps pour différents scénarios de déploiement d'un réseau fictif décrit dans le document. On remarque que les gains les plus importants ne seront atteints qu'après plusieurs années, c'est-à-dire quand la charge des cellules 5G sera importante. Pour la même raison, les gains sont moins importants en zones peu denses que dans les grandes villes. On observe même en début de déploiement une perte d'efficacité énergétique due au déploiement de stations de base desservant un très faible trafic. Ce phénomène a été également identifié en Chine par les auteurs de [73] qui parlent de *carbon efficiency trap* (la consommation électrique étant convertie en empreinte carbone). Enfin, on observe un facteur 7 dans le meilleur des cas en fin de période étudiée. En termes d'ordre de grandeur, [21] évalue, en se fondant sur [13], à environ 20 kbit/J l'efficacité énergétique de la 4G. Les auteurs de [54] proposent un ordre de grandeur similaire avec 15 kbit/J et estiment que la 5G a une efficacité 8 à 12 fois supérieure, soit au maximum 178 kbit/J (on est loin des valeurs théoriques obtenues dans la section précédente). Ces références permettent de conclure que dans un réseau réel, l'efficacité énergétique de la 5G est probablement supérieure d'environ un ordre de grandeur (10 fois supérieure) à celle de la 4G dans le meilleur des cas.

Dans tous les cas, une plus grande efficacité énergétique ne signifie pas nécessairement une consommation électrique globale plus faible, en valeur absolue, comme détaillé plus loin.

POURRAIT-ON SE CONTENTER D'AMÉLIORER LA 4G ?

Il faut d'abord rappeler que les réseaux mobiles ne restent pas figés pendant une génération avant de changer radicalement. La norme évolue continuellement de façon à améliorer et enrichir la technologie actuelle. La technologie EDGE avait permis de transmettre des données sur les réseaux 2G et la norme HSPA (3G+) avait constitué une évolution très significative de la 3G. La dernière version de la 4G, une sorte de 4G++, appelée LTE-Advanced Pro par le 3GPP (releases R13 et R14) vient enrichir le LTE-Advanced qui était déjà une évolution de la 4G. Grâce à ces évolutions successives, de nombreux concepts de la 5G avaient déjà été progressivement intégrés à la 4G. La 4G++ permet par exemple d'atteindre des débits de 3,9 Gbps grâce à de l'agrégation de porteuses et des MIMO massifs (certes dans des conditions bien particulières où l'opérateur dispose de nombreuses bandes 4G), mais aussi une latence de 2 ms. Elle inclut également des fonctionnalités dédiées à l'Internet des objets [84]. Pour bénéficier de cette norme, il faut bien sûr que l'opérateur ait mis à jour son réseau et que l'utilisateur ait un terminal compatible avec cette 4G++.

La différence entre la 4G++ et la 5G devient alors ténue. En fait, quand le 3GPP décide de changer de génération, il pousse un cran plus loin les performances en se dégageant des contraintes de rétrocompatibilité qui s'imposent à la 4G++. Les modes de microveilles de la 5G semblent par exemple difficilement compatibles avec la transmission continue des signaux de référence de la 4G. En réorganisant la transmission de ces signaux, la 5G permet donc d'améliorer l'efficacité énergétique. Le réseau cœur est également complètement repensé pour intégrer les contraintes de latences et les possibilités offertes par la virtualisation.

On voit donc qu'optimiser la 4G plutôt que de déployer la 5G comme le préconisait *The Shift Project* [106] n'a pas grand sens si l'on se place dans la perspective d'un accroissement illimité des performances en termes de débits et de latences, si on alloue de nouvelles bandes à la 4G et si l'on augmente de nombre d'antennes. La 5G est une refonte qui permet justement d'améliorer l'efficacité énergétique et l'efficacité spectrale (en bit par seconde et par hertz). Quant au renouvellement des équipements, il est difficile de trancher sur ce qui serait plus coûteux d'un point de vue environnemental : mettre à jour le réseau et les terminaux pour supporter la 4G++ ou bien la 5G.

En conclusion, optimiser la 4G pour en faire une 5G qui ne porte pas son nom, ne semble pas une piste prometteuse face aux défis environnementaux,

notamment si les objectifs qui guident l'évolution de la technologie mobile restent inchangés.

Quel est l'effet de l'introduction de la 5G sur la consommation électrique des réseaux mobiles ?

EFFETS SUR LES GÉNÉRATIONS PRÉCÉDENTES

Supposons dans un premier temps que l'introduction de la 5G n'ait aucun effet sur le volume total du trafic mobile (cet effet est abordé juste après). Dans ce cas une partie de ce trafic (ou de son augmentation) serait supportée par le réseau 5G, c'est-à-dire que l'introduction de la 5G permettrait au trafic transitant sur les générations 2G, 3G et 4G d'augmenter moins rapidement, voire de diminuer. Ceci conduirait à des économies sur la consommation électrique des générations 2G, 3G et 4G, mais celles-ci seraient faibles dans la mesure où ces générations sont reconnues pour avoir une faible proportionnalité énergétique, c'est-à-dire une consommation électrique statique très élevée par rapport à la partie dynamique (voir figure 2).

Pour obtenir des réductions importantes de consommation électrique sur ces réseaux, il faudrait tout simplement les décommissionner, à commencer par les réseaux 2G et 3G. Jusqu'à aujourd'hui, on a constaté un phénomène d'empilement plutôt que de substitution des couches réseau, comme nous l'avons illustré avec les déploiements en parallèle des réseaux 3G et 4G dans la deuxième partie de cette étude [31] (dans la section : «*La 5G va-t-elle induire une augmentation du trafic ?*»). Néanmoins, d'ici 2029 les réseaux 2G et 3G devraient être définitivement arrêtés en France [47]. Les ressources fréquentielles ainsi libérées pourront être utilisées par des générations plus récentes de réseaux.

Selon l'ARCEP [8], la consommation énergétique des réseaux 2G et 3G dans la bande 900 MHz représente environ 20 % de la consommation des réseaux mobiles, mais cette proportion est appelée à décroître avec le temps et la croissance de la 5G. L'arrêt de ces réseaux ne représentera pas cependant un gain net de 20 % car les fréquences seront réutilisées par les opérateurs pour la 4G ou la 5G.

Le déploiement d'une nouvelle génération de réseaux mobiles s'appuie en grande partie sur les générations précédentes, notamment en réutilisant les stations de base existantes. En effet, il est fréquent que plusieurs générations soient déployées sur un même site, permettant ainsi de mutualiser une partie des équipements de la station de base, la partie mutualisée dépend notamment des générations déployées et des bandes de fréquences utilisées [72]. Cette mutualisation de l'infrastructure atténue les coûts de déploiement par nouvelle génération, mais participe à l'empilement des générations plutôt qu'à leur substitution. La mutualisation des infrastructures

peut aussi se faire entre les opérateurs, ce qui permet potentiellement de limiter la consommation électrique des réseaux mobiles. Ce levier est surtout vu par le secteur comme un moyen de réduire les coûts [56] mais pourrait aussi être vu comme un frein à la concurrence.

CONSUMMATION ÉNERGÉTIQUE DES RÉSEAUX ACTUELS

L'enquête annuelle de l'ARCEP «*Pour un numérique soutenable*» parue en 2024 fournit la consommation des réseaux fixes et mobiles en France de 2017 à 2022 (figure 5). Il est à noter que ces données n'incluent pas la consommation des box (box fibres, DSL ou 5G). Ces données illustrent l'augmentation de la consommation totale des réseaux année après année sur cette période et le fait que cette consommation est en grande partie due aux réseaux mobiles. En effet, pour 2022, les réseaux mobiles représentent 63 % de la consommation totale, soit 2,6 TWh, avec une augmentation de 14 % par rapport à 2021 alors que l'augmentation était de 6 % l'année précédente. L'enquête indique que cette forte augmentation provient de la croissance de la consommation de données transitant sur les réseaux mobiles (+28 % en 2022) et du déploiement de sites mobiles (+7300 en 2022).

L'ANFR (Agence nationale des fréquences) répertorie toutes les installations radioélectriques de plus de 5 Watts en France de façon mensuelle [2]. Ces données permettent de tracer les figures 6 et 7 grâce aux scripts fournis par [4]. La figure 6 représente l'évolution du nombre de stations de base en

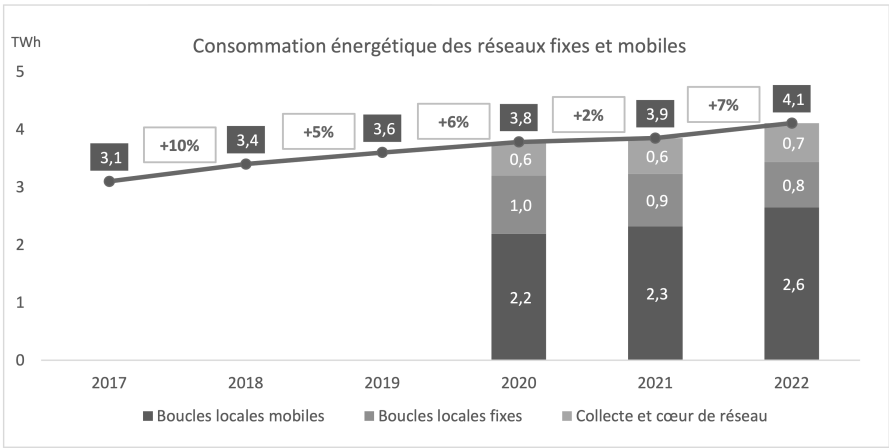


Fig. 5. Consommation énergétique des réseaux fixes et mobiles en France selon l'ARCEP. Figure extraite de [9].

service en France. Depuis l'introduction de la 5G, les sites n'offrant que de la 2G ou de la 3G ont quasiment disparu. Les sites combinant 2G, 3G et 4G ont beaucoup diminué, tandis que les sites 2G/3G/4G/5G, 3G/4G et 3G/4G/5G ont augmenté jusqu'à fin 2025. Fin 2025, les sites 3G/4G/5G ont fortement diminué pour être remplacés par des sites 4G/5G (ceci est probablement lié au décommissionnement des antennes 3G, c'est-à-dire à l'arrêt de l'exploitation des antennes 3G, et donc à leur démantèlement). Cependant, il est à noter que le nombre de sites n'offrant que la 3G et la 4G continue de progresser en 2026.

On peut également remarquer qu'en l'espace de 10 ans, le nombre de stations de base a doublé, passant de 59 150 en avril 2015 à 120 656 en avril 2025. L'introduction de la 5G ne semble pas avoir significativement modifié la tendance générale de déploiement en termes de nombre de stations de base (courbe « toutes générations »). La symétrie entre les courbes 2G/3G/4G et 2G/3G/4G/5G d'un côté et les courbes 3G/4G et 3G/4G/5G de l'autre indique que la 5G a été déployée depuis 2021 principalement sur des stations de base déjà existantes. Nous avons choisi de ne pas reporter sur la figure certaines combinaisons existantes (par exemple 3G/5G ou 2G/4G) car elles représentent chacune moins de 1 % des cas.

La figure 7 présente quant à elle le nombre d'émetteurs-récepteurs en service en France. En effet, comme on vient de le voir sur la figure précédente, une même station de base peut être équipée de plusieurs émetteurs-

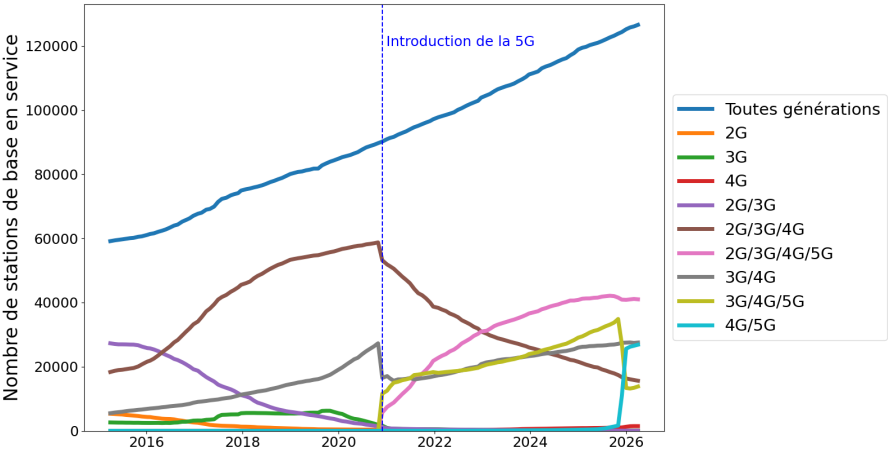


Fig. 6. Nombre de stations de base en service en France en fonction des technologies installées selon l'ANFR.

récepteurs offrant ainsi plusieurs technologies pour un même site. On observe que le déploiement des émetteurs-récepteurs 5G et 4G sont en augmentation, ces derniers représentant la moitié des équipements en service en 2025. On remarque également qu'en l'espace de 10 ans, le nombre d'émetteurs-récepteurs a été multiplié par quatre, passant de 471 605 en avril 2015 à 2 052 155 en avril 2025. Ces déploiements ont amélioré la couverture des opérateurs mobiles au niveau national ainsi que le débit offert aux utilisateurs et utilisatrices.

Sur la figure 7, on observe également que l'introduction de la 5G n'a pas infléchi le déploiement d'émetteurs-récepteurs 4G (i.e. la pente de la courbe n'a pas diminué). On peut également remarquer que la 4G a mis plusieurs années pour devancer la 2G et la 3G en termes de nombre d'émetteurs-récepteurs. En effet, la 4G a été introduite en France fin 2012 et le nombre d'émetteurs-récepteurs de la 4G n'a dépassé celui de la 2G qu'en 2017 (année où ce nombre commence à décroître pour la 2G) et celui de la 3G qu'en 2018 (ce nombre a, quant à lui, continué d'augmenter jusqu'en 2023 pour la 3G). Ainsi, le déploiement d'une nouvelle génération mobile met de nombreuses années à freiner le déploiement des générations précédentes et l'effet d'empilement des générations se poursuit bien après l'introduction d'une nouvelle génération.

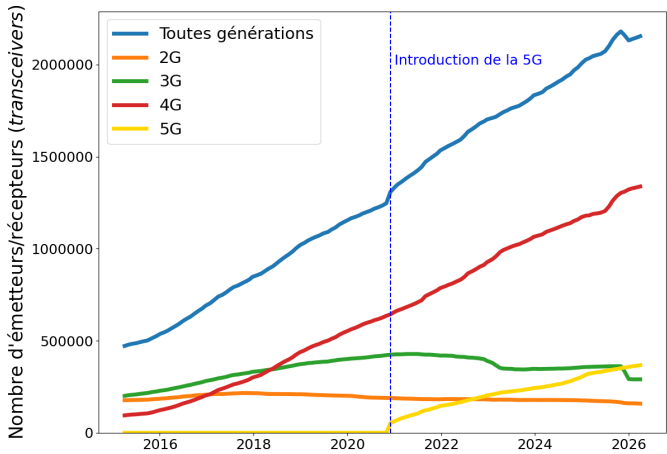


Fig. 7. Nombre d'émetteurs/récepteurs (*transceivers*) en service en France en fonction de la technologie selon l'ANFR.

En rapprochant les figures 5, 6 et 7, on peut remarquer qu'entre 2021 et 2022, soit au début de l'introduction de la 5G, la consommation énergétique des réseaux mobiles a augmenté de 13 %, le nombre de stations de base a

augmenté de 7% et le nombre d'émetteurs-récepteurs de 11%. Il semble ainsi que la consommation énergétique a cru plus fortement que le nombre de stations de base et que le nombre d'émetteurs-récepteurs.

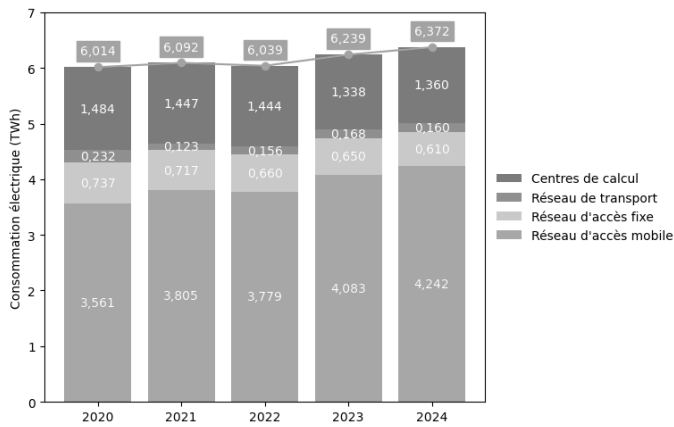


Fig. 8. Consommation énergétique de l'opérateur Vodafone à partir des données publiées dans l'addendum 2024 [110].

La figure 8 montre la consommation énergétique de l'opérateur Vodafone de 2020 à 2024 dans l'ensemble des 20 pays où il est implanté. On observe des proportions similaires à celles observées dans la figure 5 pour les opérateurs français. En effet, pour Vodafone en 2024, le réseau d'accès mobile représente 67 % de la consommation totale. Il est à noter que seules les proportions sont comparables d'une année sur l'autre sur cette figure car le périmètre n'est pas resté constant sur les 5 ans. En effet, Vodafone a évolué au travers d'acquisitions et de reventes de plusieurs opérateurs sur cette période.

Ces observations semblent conforter l'idée selon laquelle l'introduction d'une génération avec une meilleure efficacité énergétique ne conduit pas automatiquement à une réduction de la consommation énergétique totale des réseaux mobiles à moyen terme. D'une manière générale, les progrès en matière d'efficacité énergétique des réseaux mobiles ont permis au trafic mobile de croître plus rapidement que la consommation d'énergie des réseaux, cette dernière n'ayant toutefois cessé d'augmenter. Autrement dit, on assiste à un découplage relatif mais pas absolu entre trafic et consommation d'énergie.

ÉVOLUTIONS DU TRAFIC ET DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Certains travaux [32], [108], [109] montrent qu'il est préférable en termes de consommation énergétique d'empiler la 5G sur de la 4G existante plutôt que de développer l'infrastructure 4G pour répondre à une forte croissance du trafic (comme par exemple cette étude de l'ARCEP qui fait l'hypothèse d'un rythme annuel de croissance de 30 % par an entre 2021 et 2028 [32]). Il convient de nuancer ces conclusions dans la mesure où elles reposent sur l'hypothèse de l'indépendance entre la performance de l'infrastructure et le trafic, ce qui semble assez simpliste comme nous l'avons vu dans la deuxième partie de cette étude ([31] dans la section «*La 5G va-t-elle induire une augmentation du trafic ?*»).

En réalité, les études qui mettent en avant une forte croissance à venir du trafic s'appuient en général sur le scénario dans lequel la 5G est déployée [113]. Comme nous l'avons mentionné dans la deuxième partie de cette étude [31], l'observation des réseaux 5G déjà en place [70], [104], [105] semble indiquer que cette technologie *induit* une augmentation des volumes de données consommées par les utilisateurs et utilisatrices et qu'il n'y a pas report de trafic depuis les générations précédentes vers la 5G. D'une part, le développement de nouveaux usages, impossibles à réaliser en 4G, pourrait conduire à une forte augmentation du trafic (visionnage de vidéos très haute définition et même volumétriques, jeux en ligne, Internet des objets, véhicules autonomes, etc.). D'autre part, les performances de la 5G encouragent l'acheminement par les réseaux mobiles d'une partie du trafic Internet pour un usage fixe, soit parce que l'infrastructure filaire n'est pas disponible (par exemple en zone rurale isolée), soit en substitution à un abonnement fixe parfois plus coûteux. Ericsson prévoit ainsi une forte augmentation du trafic généré par le FWA (*Fixed wireless access*, c'est-à-dire l'accès fixe à Internet haut débit sans fil), qui pourrait représenter plus d'un tiers du trafic mobile d'ici 2030 ([41], p.9). Des données réelles de trafic mobile d'un opérateur français, observées entre mars 2023 et mai 2023, semblent confirmer que la 5G se substitue aux connexions filaires haut débit dans certaines zones [81].

Comme le notent L. Williams et ses coauteurs [113], la 5G est souvent présentée comme nécessaire pour rendre la croissance future du trafic environnementalement et économiquement soutenable, comme si cette croissance était indépendante de la 5G. Or, il existe une dynamique d'autorenforcement entre l'offre et la demande : la croissance du trafic pousse au développement de nouvelles infrastructures, mais ces dernières, en offrant de plus grandes capacités, suscitent de nouveaux usages ou intensifient les usages existants. Dans cette dynamique, les progrès en matière d'efficacité énergétique sont nécessaires pour que le réseau 5G soit économiquement viable (voir les parties précédentes de cette étude : [30] section «*Quelles sont les justifications techniques au développement de la 5G et de qui émanent-elles ?*» et [31]

section «*Quelles sont les justifications techniques au développement de la 5G et de qui émanent-elles ?*» et [31] section «*Qui va bénéficier du déploiement de la 5G ?*»), tandis que les progrès dans les autres domaines (débit, latence, etc.) rendent possible l'avènement de nouvelles applications à l'origine d'une augmentation du trafic. Ainsi, malgré sa plus grande efficacité énergétique, la 5G pourrait très bien être à l'origine d'une augmentation de la consommation électrique des réseaux mobiles par effet rebond.

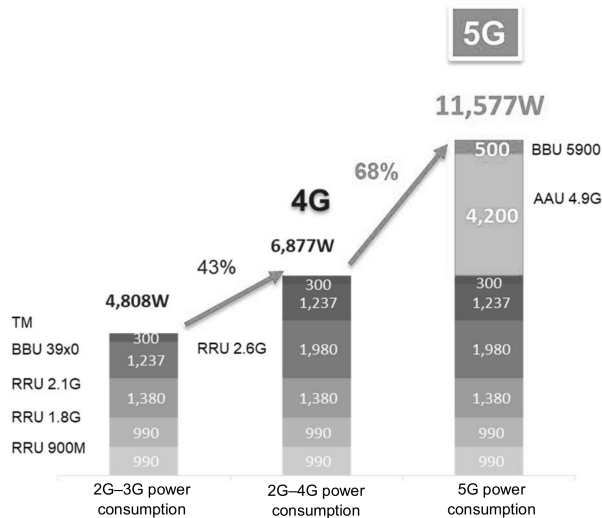


Fig. 9. Consommation énergétique maximale d’une station de base d’après Huawei. Figure extraite de [62].

À quel point doit-on s’inquiéter de cet effet rebond potentiel? En 2019, Huawei estimait que la consommation maximale d’une station de base 2G/3G en fonctionnement était de 4808 Watts, celle d’une station 2G/3G/4G de 6877 Watts et celle d’une station 2G/3G/4G/5G de 11577 Watts. Ainsi, même si l’efficacité énergétique d’une station 5G (calculée en considérant le débit maximal possible) est meilleure que celle d’une station 4G, chaque station 5G a le potentiel de consommer significativement plus qu’une station 4G comme illustré dans la figure 9 extraite de [62]. D’ailleurs, Huawei indique un coût financier considérable pour la mise à niveau des infrastructures existantes de chacune des 2,5 millions de stations de base en Chine afin de supporter la 5G [37]. En effet, une telle augmentation de la puissance brute par station nécessite une mise à niveau de la capacité du réseau électrique, de la capacité des batteries des stations de base (utilisées

en cas de coupure électrique) et du système de refroidissement des armoires. De plus, Huawei estime qu'en 2020, en Chine, la consommation électrique totale des réseaux de télécommunications dépasse 50 milliards de kWh, mais une fois les réseaux 5G déployés, elle pourrait dépasser 100 milliards de kWh, générant des émissions de carbone annuelles de 27,2 millions de tonnes [37].

La recommandation ITU (Union internationale des télécommunications) L.1210 de 2019 annonce des chiffres similaires : une puissance crête de 10kW pour un site 5G typique et jusqu'à 20kW pour un site 5G avec 10 bandes de fréquences [67]. Il est également précisé que ces chiffres pourraient être doublés dans le cas d'un site partagé entre plusieurs opérateurs mobiles. La 5G a donc le potentiel de faire exploser la consommation électrique des opérateurs et leurs émissions de gaz à effet de serre associées. Ainsi, améliorer l'efficacité énergétique par équipement n'offre aucune garantie contre ce scénario.

Quels sont les impacts environnementaux liés à la production des stations de base 5G ?

Outre l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement, les équipements réseau ont aussi des impacts environnementaux lors de leur production, sous la forme de pollution de l'eau, de l'air et du sol à cause de l'extraction de matériaux et des usines de fabrication. Les dizaines de métaux utilisés dans ces équipements ont différents niveaux de rareté géologique, de criticité ou d'importance stratégique. Dans ce qui suit, nous nous intéressons uniquement aux stations de base qui permettent aux terminaux de se connecter en mode sans fil et non aux infrastructures filaires auxquelles ces stations sont elle-même raccordées.

En 2023, une étude de l'ADEME a quantifié les impacts des réseaux fixes et mobiles par étape du cycle de vie [12]. La figure 10 est extraite de cette étude. L'étude, fondée sur l'analyse du cycle de vie (ISO 14040 et ISO 14044) et exploitant des données des fournisseurs d'accès à Internet français, porte sur six indicateurs environnementaux qui illustrent la diversité des effets environnementaux :

- ADPe : épuisement des ressources naturelles, minérales et métaux (exprimé en kg éq. Sb);
- AP : acidification (exprimée en mol éq. H+);
- GWP : changement climatique (exprimé en kg éq. CO₂);
- IR : radiations ionisantes (exprimée en kBq éq. U₂₃₅);
- PM : émissions de particules fines (exprimée en occurrences de maladies);
- TPE : consommation d'énergie primaire (exprimée en MJ).

Réseau mobile - Méthode des flux

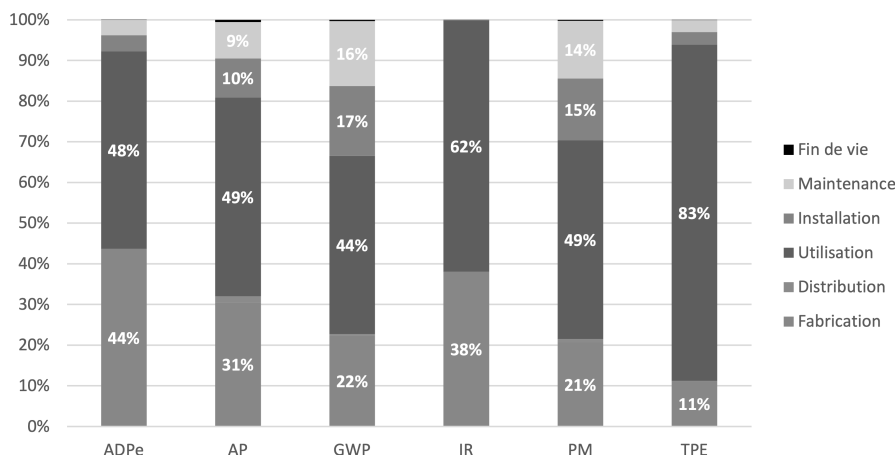


Fig. 10. Répartition des impacts du réseau mobile par étape du cycle de vie, avec la méthode des flux. Figure extraite de [12].

La figure 10 montre que, pour les réseaux mobiles, la phase d'utilisation est prépondérante (44 % à 83 % suivant les indicateurs), contrairement aux réseaux fixes pour lesquels c'est la phase de fabrication. Cette étude suppose que la durée de vie des équipements réseau est de 7 ans pour l'ensemble des réseaux mobiles (incluant les réseaux d'accès, d'agrégation et le backbone). Le principal contributeur aux impacts environnementaux est le réseau d'accès radio (87 % à 94 %), très loin devant les réseaux de transport et de cœur (pour les réseaux mobiles). Concernant les équipements, les amplificateurs sont les premiers contributeurs (39 % à 53 %), devant les antennes actives, les unités de bande de base (BBU), les routeurs de collecte et les antennes passives multibandes [12].

Plusieurs autres études [28], [53], [58], [78], [112] rapportent que les impacts environnementaux de la production sont soumis à d'importantes incertitudes mais sont loin d'être négligeables. Elles considèrent des durées de vie de 5 à 20 ans pour les équipements du réseau mobile et 20 % à 40 % des émissions au cours du cycle de vie de ces équipements au niveau mondial sont dues à leur phase de fabrication. Ces chiffres cachent de grandes disparités entre les pays, notamment à cause des différents mix énergétiques (par exemple, [78] mentionne une part à 20 % au niveau mondial, mais à 70 % en Suède où la production d'électricité est peu carbonée).

Lorsque l'on s'intéresse à l'effet de la 5G sur ces impacts environnementaux de production, des incertitudes s'ajoutent, liées à l'ampleur et à la

nature du déploiement de la 5G (optimisations implémentées, par exemple *sleep modes*). Cependant, deux phénomènes importants nous permettent d'affirmer que les impacts environnementaux liés à la fabrication des équipements réseaux vont augmenter. D'une part, la première partie de notre étude [30], ainsi que les études susmentionnées, montrent que le nombre de stations de base sera en augmentation sur les zones couvertes. C'est aussi ce que dit une étude de 2022 [54], qui considère en outre que les infrastructures 5G vont s'ajouter aux infrastructures 4G, pendant un temps indéterminé. D'autre part, la littérature récente [58], [117] indique que les performances accrues des équipements 5G se feront en partie grâce à l'usage de quantité de matériaux supplémentaires (l'article mentionne l'aluminium, le cuivre, le gallium, le germanium, l'or, l'yttrium et le baryum) et qu'il est impossible de simplement mettre à jour certains composants d'une station 4G et qu'il faut donc les remplacer complètement. Cela est dû à deux facteurs : davantage d'antennes par station de base (*massive MIMO*) et les bandes de fréquence millimétriques.

Les études susmentionnées rapportent que les impacts environnementaux de la production des équipements sont dominés par la phase d'extraction des matériaux (en comparaison des phases d'assemblage, transport ou recyclage). Ceci est cohérent avec ce que dit la littérature scientifique sur la fabrication des équipements numériques en général. En effet, l'extraction minière, présente en amont de très nombreuses chaînes de valeur, est une des industries les plus polluantes. Elle constitue d'ailleurs la première source de conflits environnementaux dans le monde [101] et a de nombreux impacts sur la biodiversité [16]. Les quantités de métaux utilisées par le numérique peuvent paraître faibles au regard d'autres usages, mais il convient de rappeler que les pollutions liées à l'industrie minière dépendent non seulement des quantités de métaux extraites, mais aussi de la nature des minerais et de leur concentration en éléments métalliques. Estimer la part que représente le numérique dans les impacts de l'extraction minière pose aussi des questions d'attribution dans la mesure où les métaux concernés sont le plus souvent des coproduits [85]. En 2018, une étude estimait que les principales sources de toxicité potentielle liées aux matières premières nécessaires aux appareils et infrastructures numériques étaient le cuivre et l'or [76]. Concernant les équipements 5G, la tendance est à la hausse (davantage d'antennes, davantage de stations de base). De plus, dans la quantité de cuivre consommée directement par la production des infrastructures, il faudrait également inclure une fraction du cuivre utilisé pour produire et transporter l'électricité, activités à l'origine de près de la moitié de la demande mondiale en cuivre [43]. Pour le cas particulier de la 5G, ce dernier point paraît non négligeable si le nombre de stations de base à relier au réseau électrique augmente.

Quel est l'effet de l'introduction de la 5G sur les terminaux ?

TERMINAUX 5G

Les terminaux des utilisateurs et utilisatrices permettent d'illustrer, de nouveau, le problème à considérer l'efficacité maximale plutôt que l'efficacité pour un usage réel. En effet, des mesures sur les premiers appareils 5G [114] indiquent que l'efficacité énergétique est quatre fois meilleure par rapport à un appareil 4G quand le débit est au maximum des capacités du module radio, mais que les terminaux 5G consomment davantage que les terminaux 4G car le module radio 5G consomme au moins deux fois plus en débit moyen. Cela est dû au fait que l'électronique embarquée pour supporter certaines optimisations de la 5G (e.g. convertisseurs large bande et MIMO) est plus consommatrice. Cette tendance est confirmée par des mesures de Qualcomm [71] sur deux smartphones identiques avec la même capacité de batterie, mais l'un avec un module 4G et l'autre avec un module 5G. L'expérience réalisée est la suivante : télécharger au maximum de la bande passante possible jusqu'à épuisement de la batterie. Pour le smartphone 4G, une charge complète de batterie permet ainsi de télécharger 91,9 Go de données, tandis que le smartphone 5G peut lui télécharger 276 Go de données. Le smartphone 5G est donc jugé plus efficace : il est 3 fois meilleur en bit/Ah. Cependant, on peut faire une autre expérience avec les mêmes smartphones, mais avec cette fois, une charge de travail différente qui est plus représentative et inclut un usage typique journalier (transfert de données à des vitesses variables à différents moments de la journée, utilisation d'autres applications nécessitant l'allumage de l'écran, temps de veille, etc.). Dans ce cas d'une utilisation moyenne typique, une charge de batterie complète permet au smartphone 4G d'être actif pendant 31 h 30 environ, tandis que le smartphone 5G atteint à peine 14 h (soit moins d'une journée complète) [91]. Ainsi, le smartphone 5G, bien que plus efficace pour une utilisation maximale, consomme en pratique plus pour une utilisation moyenne.

D'autres études académiques confirment que le module 5G des smartphones est gourmand en énergie et qu'il devient le principal élément consommateur devant l'écran, bien que l'efficacité (en bit/J) soit 4 fois plus grande avec un module 5G par rapport à un smartphone avec un module 4G [114]. Les auteurs essaient une optimisation simple : désactiver le module 5G lorsqu'il est inutile. Cela permet de bénéficier des avantages du module 5G pour les gros débits : la consommation du téléphone est réduite de 60 % lors d'un transfert de fichier (–40 % en visionnage vidéo) et de l'avantage du module 4G pour les faibles débits : la consommation est celle de l'appareil 4G en cas de simple navigation web. Ainsi, pour des applications gourmandes en données, l'efficacité est meilleure avec la 5G, mais pas pour les autres applications.

Une autre étude plus récente, publiée en 2022, se penche sur la consommation énergétique de 22 millions de smartphones en conditions réelles, représentant 29 modèles différents de 4 constructeurs (Huawei, Vivo, Oppo et Apple), lors de leur utilisation d'une application de streaming vidéo [115]. Les auteurs observent la charge de la batterie des téléphones lors du visionnage ou de la diffusion de vidéos en fonction de la technologie utilisée : 4G, Wifi, 5G (*standalone* et *non-standalone*, sur des bandes à 2,6 GHz et 3,5 GHz). Ils remarquent que pour 7 des 29 modèles, la consommation est un peu moindre en moyenne avec la 5G qu'avec la 4G (jusqu'à 5 % de consommation énergétique en moins), alors que pour les 22 modèles sur 29 restants, la consommation est supérieure en 5G (jusqu'à 18 % plus élevée). La consommation en Wi-Fi est quant à elle dans tous les cas la plus basse (en moyenne 20 % de consommation en moins par rapport à la 4G sur l'ensemble des modèles). Cette étude est réalisée en conditions réelles, ainsi les débits de communication et les résolutions des vidéos varient en fonction des conditions d'accès des smartphones, les données présentées étant des moyennes sur les données collectées. Ceci tend à montrer que la consommation énergétique des terminaux 5G dépend surtout de l'utilisation qui en est faite, des applications utilisées et des débits employés.

Les appareils connectés, aussi nommés « Internet des objets », font partie des objectifs de déploiement de la 5G (voir la deuxième partie de cette étude [31], section « À quelles applications va servir la 5G ? »). Ces objets connectés sont très divers et ont donc des consommations énergétiques très variées. Les véhicules autonomes sont parmi les plus gourmands et la 5G pourrait permettre leur développement. Une étude récente sur une voiture électrique citadine équipée de capteurs et calculateurs pour la conduite autonome indique que ces éléments informatiques représentent 12 % de la consommation de la voiture [23]. Certains acteurs prédisent une explosion du nombre d'objets connectés : ils seraient environ 25 millions à 175 millions d'ici 2027 selon les prévisions [90]. Dans le cas où les prévisions hautes seraient atteintes, avec le déploiement massif d'objets connectés complexes (drones, assistants à commande vocale, montres connectées, etc.), les émissions de gaz à effet de serre pour l'IoT pourraient atteindre les 1 GtCO₂eq par an en 2027, c'est à dire à 1,6 % des émissions mondiales annuelles tous secteurs confondus [90].

TERMINAUX 2G, 3G ET 4G

L'apparition du réseau 5G risque de provoquer un effet d'obsolescence avec des smartphones qui seront potentiellement remplacés plus tôt qu'ils ne l'auraient été sans la 5G. Il est cependant difficile de quantifier cet effet d'obsolescence, tout comme il est difficile de prévoir une éventuelle modification du taux de pénétration du smartphone qui se situait en 2022 en France à environ 83 % avec une légère augmentation annuelle [102].

L'effet d'obsolescence est toutefois bien réel à partir de fin 2025 avec l'extinction progressive des réseaux 2G, puis à partir de fin 2028 avec celle des réseaux 3G [10]. Cette obsolescence ne concernera pas uniquement les smartphones de ces deux générations, mais également tous les terminaux (ascenseurs, interphones, systèmes de téléassistance, etc.).

Quel est l'effet de l'introduction de la 5G sur le reste de l'infrastructure numérique ?

Nous avons déjà évoqué l'augmentation de trafic liée aux nouvelles applications permises par la 5G dans la section « *Quel est l'effet de l'introduction de la 5G sur la consommation électrique des réseaux mobiles ?* », ainsi que dans la deuxième partie de cette étude [31]. Ces données supplémentaires vont générer une pression accrue sur l'ensemble de l'infrastructure numérique, notamment sur le réseau Internet filaire et sur les serveurs de stockage et de traitement hébergés dans les centres de données, encourageant ainsi à déployer de nouveaux équipements pour augmenter la capacité globale des infrastructures. Il est difficile de quantifier les effets de la 5G pour les années futures sur le reste de l'infrastructure numérique, notamment parce que, comme on l'a vu dans les sections précédentes, de nombreuses augmentations sont déjà en cours : augmentation du nombre de stations de base, augmentation du nombre de terminaux, augmentation du volume de données par terminal, etc.

De nombreux usages reposent sur le traitement lointain de données locales, par exemple pour le traitement de flux vidéos provenant de caméras de surveillance [74]. De telles caméras peuvent par exemple être utilisées pour détecter automatiquement la présence de piétons sur des autoroutes et prévenir des accidents. Dans ce cas, la consommation électrique — liée à l'acheminement des données (via des réseaux de communication) et à leur traitement dans des centres de calcul — peut être 2 à 3 fois plus importante que l'objet connecté en lui-même, c'est-à-dire la caméra [74]. Pour certaines applications, comme la réalité virtuelle en temps-réel par exemple [114], où la latence et le temps de calcul sont des paramètres cruciaux, le déploiement d'infrastructures de *edge computing* est primordial. Il s'agit d'infrastructures de calcul et de stockage distribuées en bordure des réseaux de communication (i.e. au plus près des stations de base de téléphonie mobile). Ce type d'infrastructure est fortement distribué par nature et constitué d'une multitude de petits centres de données dont les capacités de calcul varient fortement d'un centre à l'autre. D'un point de vue énergétique, une telle architecture complètement distribuée peut avoir une consommation énergétique meilleure qu'un centre de calcul centralisé si elle le remplace complètement grâce à une utilisation plus faible des réseaux de communication de cœur de l'Internet notamment [5]. Cependant, cela suppose que la dissipation de chaleur dans ces

petits centres de calculs soit autant optimisée que dans les grands centres de calculs, ce qui est rarement le cas en pratique à l'heure actuelle [74]. En effet, les grands centres de calculs (plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de serveurs) s'appuient souvent sur des mécanismes de refroidissement par eau qui sont très efficaces, mais nécessitent une infrastructure complexe et volumineuse qui n'est pas adaptée à de petits centres de données. Ainsi, les centres de données continuent à faire des progrès en terme d'efficacité énergétique. Cependant, ces améliorations sont compensées par l'augmentation effrénée des nouvelles données à traiter comme évoqué précédemment. Concernant le *edge computing* et sa consommation énergétique, les arguments favorables concernent souvent l'utilisation de sources d'énergie renouvelable, l'optimisation du transport des données, tandis que les arguments défavorables concernent la multiplication des infrastructures avec une augmentation des ressources de calcul du fait du morcellement des ressources (et donc augmentation de l'impact lié à leur fabrication) et les frais de déploiement associés (infrastructure électrique, réseau haut débit, refroidissement, etc.) [59].

La 5G permet-elle une baisse des émissions de GES dans des secteurs autres que le numérique ? À quel point ?

Certaines études indiquent que la 5G permettrait de transformer profondément les autres secteurs (transports, agriculture, industrie, etc.), avec potentiellement des bénéfices environnementaux à la clé [18]. La littérature scientifique qualifie ces effets d'*indirects* ou *second* et *troisième ordre* [61], [113]. Ils sont induits par les applications et les services qui seront rendus possibles grâce à la 5G. La figure 11 donne une classification des effets directs et indirects des technologies de l'information et de la communication. Les effets indirects correspondent à des transformations de la société à des échelles plus ou moins larges et peuvent être bénéfiques comme néfastes d'un point de vue environnemental. Par exemple, le véhicule autonome est souvent présenté comme ayant le potentiel de réduire les impacts environnementaux des transports [103] (en favorisant le partage de véhicule, en permettant le *platooning* c'est-à-dire le groupement en flottes de véhicules, etc.). Toutefois en fonction des comportements utilisateurs, il peut aussi encourager l'autosolisme (se déplacer seul avec un véhicule) au détriment d'autres modes de transport plus écologiques [34].

À notre connaissance, une seule publication académique fournit une estimation des effets indirects de la 5G sur les émissions [116], les autres estimations disponibles étant issues de rapports de cabinets de conseils ou d'experts pour le compte d'industriels des télécom, d'associations représentant leurs intérêts [1], [18], [25], [48], [86], ou de l'Union Européenne [42].

LA 5G, LA VILLE INTELLIGENTE ET LA SOUTENABILITÉ ÉCOLOGIQUE

Nous avons évoqué dans la deuxième partie de cette étude [31] le concept de « ville intelligente » (*smart city*). Ce concept est fréquemment associé à une notion de *développement durable* du territoire considéré, associant des considérations sociales, économiques et environnementales. Cependant, dans la littérature, la définition de développement durable est plurielle et l'importance donnée aux considérations sociales, économiques et environnementales dépend de la notion de soutenabilité retenue [107].

Des articles montrent comment certaines techniques au cœur du concept de ville intelligente *pourraient* être bénéfiques d'un point de vue écologique, parmi elles les véhicules intelligents [52] ou les bâtiments intelligents [63] connectés par la 5G. Mais la littérature pointe aussi les limites du concept. Ainsi, dans une revue de littérature [80], les auteurs montrent un certain antagonisme dans les principes qui sous-tendent *ville intelligente* et soutenabilité. Ils rapportent que :

- la croissance économique, un des objectifs central des *villes intelligentes*, ne semble pas écologiquement durable ;
- la numérisation d'un territoire risque d'accroître les inégalités sociales au sein de ce territoire ;
- les innovations numériques risquent d'instrumentaliser les habitants plutôt que de les encapaciter (leur donner la capacité et les moyens nécessaires pour agir) ;
- les mécanismes par lesquels la numérisation d'un territoire permettrait de diminuer la pression environnementale ne sont pas définis ;
- la numérisation a tendance à développer un certain consumérisme.

On peut citer aussi l'article [66] qui montre que les solutions numériques ont rendu Copenhague plus énergivore (mais indique qu'un choix avisé dans les solutions numériques pourrait peut-être avoir un effet bénéfique), ou encore l'article [6] qui révèle que de nombreux travaux ne considèrent pas ou pas assez l'aspect énergétique des solutions numériques mises en place dans une *smart city*. Enfin, l'article [36] conclut d'une revue de littérature que les considérations écologiques ne sont pas centrales dans le concept de ville intelligente. Par conséquent, « intelligent » n'est pas forcément synonyme de « durable ».

Taxonomy described in this paper			Alternate taxonomies			
Effect	Scope	GPS System Example	Hilty	Berkhout & Hertin	Williams	Rattle
Embodied energy	Direct	Energy to produce a GPS system	1 st -order	Direct effects	ICT infrastructure and devices	
Operational energy		Energy to operate a GPS system				
Disposal energy		Energy to dispose of a GPS system at end-of-life				
Efficiency	Indirect: Single-service	More efficient traffic flow due to GPS-enhanced routing	2 nd -order	Indirect effects	Applications	Optimization
Substitution		Replacement of paper-based maps				Substitution
Direct rebound		More travel due to lower cost of traffic congestion				Induction
Indirect rebound	Indirect: Complementary services	Energy consumed during time saved by more efficient travel	3 rd -order	Structural & behavioral effects	Effects on economic growth and consumption patterns	Supplementation
Economy-wide rebound (Structural change)	Indirect: Economy-wide	GPS enables autonomous vehicles and causes growth of intelligent transportation system manufacturing				Creation
Systemic Transformation	Indirect: Society-wide	Autonomous vehicles alter patterns in where people choose to live and work			Systemic effects on technology convergence & society	

^a Alternate taxonomies are from Hilty *et al* (2006), Berkhout and Hertin (2004), Williams (2011), and Rattle (2010).

Fig. 11. Effets directs et indirects des TIC. Figure extraite de [61].

Toutes ces études reprennent la méthode de calcul de la *Global enabling sustainability initiative*, la GeSI, un consortium d’industriels du numérique [49], [50], [51]. C’est aussi sur cette méthode que s’est appuyée la *Global System for Mobile Communications Association* (la GSMA, une association d’entreprises de la téléphonie mobile) pour évaluer les effets indirects des réseaux mobiles [57]. D’ailleurs, près de la moitié des études précitées [1], [25], [116] se basent directement sur les valeurs produites par la GSMA en 2019 (donc pour les générations antérieures à la 5G), dont il a été montré que leur fiabilité était très incertaine [96], [97].

La méthode de la GeSI consiste à quantifier les émissions évitées pour des cas d’application spécifiques (relevant généralement de la dématérialisation ou de l’amélioration d’efficacité et souvent qualifiés de *smart*), c’est-à-dire à estimer un facteur d’émissions évitées pour chaque cas d’application et à extrapoler ces valeurs à l’échelle d’un pays ou au niveau mondial en multipliant simplement

ces facteurs par des quantités caractérisant le niveau d'utilisation de la solution. Pour illustrer cette méthode, considérons l'exemple des plateformes de partage de logements telles que AirBnB. Le rapport de la GSMA calcule les émissions évitées simplement en multipliant le nombre d'utilisateurs de smartphone par le facteur d'émissions évitées (les émissions évitées en moyenne par utilisateur pour ce cas d'étude). Ce facteur est lui-même estimé en multipliant la proportion d'utilisateurs de smartphones ayant recours aux plateformes à la place de l'hôtellerie classique, issue d'une enquête auprès de 6000 personnes, une estimation grossière du nombre de nuits séjournées annuellement dans ces logements partagés pour un client moyen, les émissions moyennes d'une nuit en hôtellerie classique et enfin, la proportion de ces émissions qui est évitée d'après AirBnB sur la base d'une enquête auprès de 8000 de ses clients et qui n'est plus accessible à ce jour. Cet exemple illustre bien la fragilité de la méthode de la GeSI, qui reporte la difficulté sur le calcul des facteurs d'émissions évitées. D'une part, les données ayant servi à estimer le facteur d'émissions évitées correspondent à des contextes et des hypothèses bien spécifiques (par exemple, elles ne concernent que quelques pays et ne devraient pas être extrapolées à l'échelle mondiale comme le fait la GSMA dans son rapport). D'autre part, le résultat final dépend entièrement d'une valeur produite par AirBnB qu'il nous est impossible de vérifier.

Dans ce qui suit, nous présentons d'autres biais méthodologiques qu'ont en commun les études discutées ici et qui donnent ainsi à voir, en conséquence, une image exagérément optimiste des effets de la 5G sur les émissions de GES des autres secteurs. Ces problèmes ont été relevés à plusieurs reprises dans la littérature scientifique [17], [19], [33], [39], [45], [55], [75], [77], [93], [97].

SEULS LES CAS D'APPLICATION FAVORABLES SONT RETENUS

Les études se concentrent, explicitement ou implicitement, seulement sur des cas d'application susceptibles d'engendrer des réductions importantes d'émissions (télétravail, *smart grids*, bâtiments intelligents, etc.). Pourtant, en tant que technologies généralistes, le numérique et plus spécifiquement la 5G ont des applications dans pratiquement tous les domaines et peuvent conduire ainsi à des augmentations d'émissions [22], [45]. Par exemple, les écrans publicitaires numériques remplacent, voire s'ajoutent, aux écrans classiques. L'Agence internationale de l'énergie indique que la numérisation permettrait d'abaisser les coûts d'exploitation et d'accroître les taux de récupération des hydrocarbures, notamment du pétrole et du gaz naturel non conventionnels [64]. Le numérique développe de nouvelles opportunités de consommation, en facilitant l'achat ou permettant de mieux cibler les préférences des consommateurs [35], [55]. Ces exemples ne sont pas des cas d'application spécifiques de la 5G, mais ils pourraient être facilités par cette

nouvelle technologie. C'est aussi vrai de l'essentiel des cas favorables retenus par les études. Cet effet de facilitation est rediscuté plus loin.

ABSENCE DE VISION SYSTÉMIQUE

Les études se limitent généralement à des effets de substitution et d'optimisation bénéfiques pour l'environnement. Pour l'illustrer, nous considérons dans ce qui suit l'exemple du transport, secteur dont les études attendent d'importants bénéfices. S'il est vrai que les moyens de communication (téléphonie, visioconférence, commerce en ligne, télétravail, etc.) permettent de remplacer certains déplacements, ils sont tout autant susceptibles de générer des trajets supplémentaires (en permettant de maintenir des relations distantes [3], en incitant et en facilitant le tourisme international [82], etc.). D'ailleurs, dans de nombreuses études, les télécommunications et les transports sont vus comme *complémentaires* plutôt que *substituables* [82]. Ainsi, la saturation, voire le recul, observé dans certains pays développés, de l'usage de la voiture (qui a conduit à formuler l'hypothèse d'un pic automobile [44]), ne s'expliquerait pas par le développement des technologies numériques, mais par les facteurs socio-économiques habituels (temps de transport, revenus, coûts, etc.) [20], [79]. De plus, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de saturation des distances parcourues par personne si on considère l'ensemble des modes de transport. Celles-ci sont en effet toujours en forte croissance, notamment à cause du développement du trafic aérien international [14], [20], [40], [111].

En plus d'agir directement sur la demande de transport, les télécommunications permettent aussi d'améliorer les systèmes qui y répondent (calcul du meilleur itinéraire en fonction des conditions réelles de circulation, gestion intelligente des feux de circulation, groupement en flottes de véhicules [103], etc.). Ces effets d'optimisation permettent potentiellement de réduire la congestion et/ou les émissions de GES, mais aussi d'augmenter globalement le trafic routier en exploitant au mieux les infrastructures existantes. C'est ce que relève, dès les années 80, la littérature sur les liens télécommunications-transport qui considère en général l'optimisation comme un cas particulier de complémentarité [98]. Autrement dit, optimiser les systèmes de transport conduirait inévitablement à accroître la demande en transport, par effet rebond systématique, comme cela semble être le cas à chaque fois qu'on augmente la capacité routière [38]. Il est donc possible que le développement d'Internet et plus particulièrement de la 5G, ait pour effet d'augmenter les émissions du transport plutôt que de les réduire.

Au niveau macroéconomique, l'agrégation de l'ensemble de ces effets rebond dans les différents secteurs se traduit par une augmentation de l'activité économique, notamment du fait des gains de productivité, qui s'accompagne d'émissions supplémentaires. De ce point de vue, les études sur les effets indirects de la 5G manquent de cohérence : d'un côté, elles n'intègrent pas les

effets rebond lorsqu'il s'agit d'estimer les émissions de gaz à effet de serre (seule l'étude [18] tente de les intégrer); de l'autre, ces effets rebond sont pris en compte au niveau macroéconomique lorsqu'il s'agit de mettre en avant (voire de quantifier pour certaines études) les effets de la 5G sur la croissance économique. Il s'agit donc davantage de proposer une vision avantageuse, dans laquelle seuls les effets favorables sont retenus, plutôt que de développer une compréhension complète et systémique des effets potentiels de la 5G.

INCERTITUDES SUR L'EFFET DE FACILITATION

La 5G ne semble indispensable à aucun des cas d'application présentés dans les différentes études : le télétravail est possible avec le réseau fixe ou le réseau 4G, il existe d'autres types de réseaux pour l'industrie, la 5G n'est pas indispensable au véhicule autonome, etc. Les études indiquent que la 5G devrait faciliter leur développement, mais puisqu'il est extrêmement difficile de déterminer à quel point, elles se contentent d'émettre des hypothèses sur l'augmentation de l'usage des cas d'applications cibles, au mieux en considérant plusieurs scénarios [18], ou plus simplement en appliquant un facteur multiplicatif sur l'effet de facilitation proposé par la GSMA pour les autres générations de réseaux mobiles [1], [25], [116]. Les sources d'incertitude proviennent donc non seulement des cas d'application et des effets non pris en compte par les études, mais aussi de l'évaluation de cet effet de facilitation.

SYNTHÈSE

Les études existantes sur les effets indirects de la 5G se concentrent, presque exclusivement, sur ses potentiels effets bénéfiques sur les émissions des autres secteurs, omettant notamment les cas d'application défavorables et les effets rebond. De plus, compte tenu des fortes incertitudes qui concernent, en particulier, les facteurs d'émissions évitées et l'effet de facilitation, aucune étude n'est en mesure de démontrer que la 5G aura comme effet net de réduire les émissions globales. Comme nous l'avons illustré avec l'exemple du transport, on peut même légitimement penser le contraire, c'est-à-dire qu'en améliorant la productivité dans la plupart des secteurs économiques, en accélérant l'ensemble des flux matériels et en offrant de nouvelles opportunités de consommation et de production, le déploiement de la 5G conduira à une augmentation des émissions.

Quel futur pour les réseaux mobiles face aux enjeux écologiques ?

Nous avons vu que les impacts environnementaux de la 5G sont potentiellement nombreux et significatifs, ce qui soulève naturellement plusieurs

questions : Le déploiement de la 5G est-il compatible avec les enjeux environnementaux auxquels nous faisons face ? Et plus généralement, quelle place pour le numérique face à ces enjeux ?

Rappelons tout d'abord qu'indépendamment du numérique et des réseaux mobiles en particulier, il n'existe à ce jour pas de proposition consensuelle sur l'ensemble des mesures que nos sociétés devraient prendre face aux enjeux écologiques (même la sortie des énergies fossiles est sujet à débat dans la société). La soutenabilité est de fait un concept à dimension normative : il fait intervenir, en plus des connaissances scientifiques notamment dans le domaine de l'écologie, nos valeurs et ce que nous jugeons souhaitable pour les générations actuelles et futures. Ainsi, plusieurs visions de la soutenabilité s'opposent : la soutenabilité faible, par exemple, fait l'hypothèse que le capital artificiel peut se substituer au capital naturel, autrement dit qu'on peut légitimement comparer la valeur apportée par l'installation d'une station 5G avec celle des perturbations environnementales qu'elle est susceptible d'engendrer, alors que la soutenabilité forte soutient au contraire que ces deux formes de capital ne sont pas substituables mais complémentaires et donc non comparables [60].

La notion de développement durable portée par l'ONU et présente dans le droit de l'environnement français vise un équilibre entre des objectifs économiques, sociaux et environnementaux. Les limites planétaires, la théorie du Donut qui s'appuie sur ces dernières, ou encore les objectifs climatiques tels que la limitation du réchauffement climatique à +2°C, articulent eux aussi résultats scientifiques et dimension normative et donc politique [15], [94]. Ces différents concepts ont en commun d'avoir une portée globale sur les enjeux environnementaux, c'est-à-dire qu'on ne peut pas les appliquer directement à un produit ou à une technologie, comme le rappelaient L. Hilty et B. Aebischer en 2015 au sujet des technologies numériques dans un ouvrage fondateur de la communauté de recherche *ICT for sustainability (ICT4S)* [60].

Pour savoir si une technologie particulière de réseau mobile est compatible avec les enjeux environnementaux, il faut donc non seulement spécifier la vision de la soutenabilité par rapport à laquelle on l'évalue, mais aussi dans quelle organisation économique et sociale elle s'inscrit. En effet, d'une part les impacts environnementaux des réseaux mobiles, qu'ils soient directs ou indirects, dépendent de l'ensemble du système sociotechnique puisqu'ils résultent des interactions complexes entre les processus socio-économiques. D'autre part, le respect d'objectifs environnementaux globaux, tels que les cibles climatiques, suppose de faire des arbitrages parmi les activités. Par exemple, faut-il allouer un budget carbone plus important à la mobilité ou aux services numériques ? Nos moyens d'action étant limités, des arbitrages devront potentiellement être faits entre des mesures d'atténuation (réduction

des émissions de gaz à effet de serre) et d'adaptation (limitation des conséquences du changement climatique sur les sociétés).

Pour aider à éclairer ces enjeux, différents travaux de scénarisation prospective donnent des pistes intéressantes à propos de trajectoires possibles pour le numérique et les réseaux mobiles face aux enjeux environnementaux. Le premier d'entre eux est celui de l'ARCEP et de l'ADEME [88] qui se base sur une méthodologie d'analyse de cycle de vie et qui présente cinq scénarios pour l'avenir du numérique en France :

- *tendanciel* — ce scénario prolonge les tendances actuelles, notamment en termes de volume de trafic et nombres d'équipements, sans remise en cause des modes de production et de consommation des services numériques ;
- *pari réparateur* — la transition est guidée par l'idée que la société va réussir à gérer et réparer les impacts environnementaux. Nos modes de vie ne changent pas. La numérisation est la norme dans tous les secteurs de l'économie. Le nombre d'équipements et de terminaux explose. Les réseaux mobiles connaissent des déploiements importants et la 6G est déployée ;
- *technologies vertes* — la transition est guidée par la technologie et les gains d'efficacité énergétique. Le numérique est présent dans tous les secteurs de la société. Le nombre de terminaux continue d'augmenter mais à un rythme plus lent. Le déploiement des réseaux mobiles se concentre sur la 5G ;
- *coopérations territoriales* — il s'agit d'un scénario intermédiaire guidé par la sobriété. Il y a une croissance modérée des services numériques et des terminaux. La durée de vie des terminaux augmente d'une année en moyenne. Le nombre de stations de base reste stable par rapport à 2020 ;
- *génération frugale* — la transition est guidée par une frugalité contrainte (réglementaire) et une sobriété volontaire. La production est fondée sur le *low-tech*, c'est-à-dire que les technologies sont simplifiées, robustes et peuvent être contrôlées par les citoyens et citoyennes. L'écoconception des logiciels et des matériels est généralisée. La durée de vie des terminaux s'en trouve augmentée de deux ans. Le nombre de terminaux est stable.

Les opérateurs partagent leurs infrastructures.

L'étude a évalué l'empreinte carbone du numérique à l'horizon 2050 pour les cinq scénarios prospectifs et l'a comparée à l'empreinte en 2020 (voir figure 12). Parmi les scénarios étudiés, seul le scénario « génération frugale » permet de diminuer l'empreinte du numérique. Ces chiffres sont bien sûr à prendre avec précaution car ils dépendent des hypothèses formulées et de l'imprécision des données utilisées, ils ne prennent pas non plus en compte les effets indirects. Ils ne considèrent que les infrastructures en France et négligent les infrastructures situées à l'étranger mais à usage en France (les centres de données notamment).

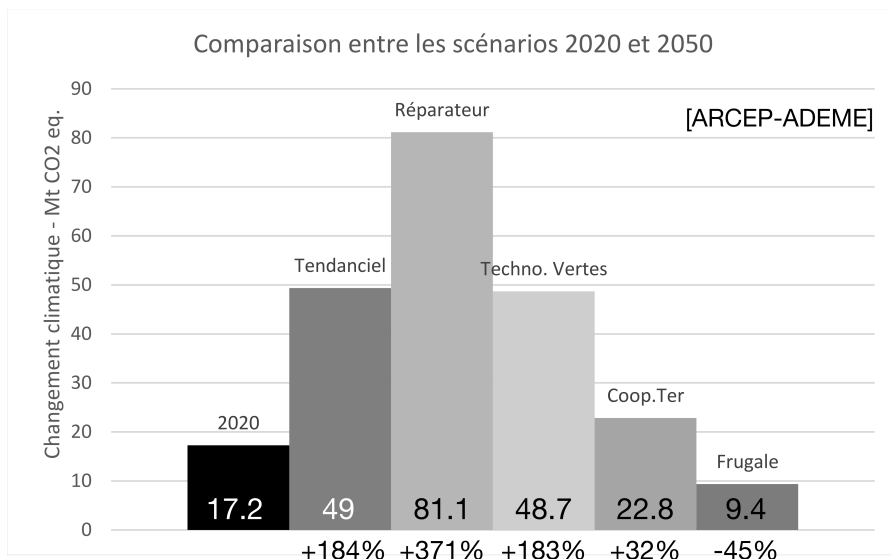


Fig. 12. Empreinte carbone du numérique en France en 2020 et en 2050 selon l'ARCEP et l'ADEME. Figure extraite de [88].

Bien que l'étude concerne l'ensemble du numérique, les réseaux mobiles et la 5G jouent un rôle central pour la définition des scénarios prospectifs. Le développement accéléré de nouvelles technologies (scénarios «tendanciel», «technologies vertes» et «pari réparateur») est présenté comme un facteur d'augmentation du trafic. L'augmentation des débits et de la qualité d'expérience accroît en effet la demande et diminue le coût par Mo transmis. Une part croissante du trafic Internet est appelée à transiter via les smartphones. Dans le scénario «tendanciel», la consommation énergétique des réseaux mobiles est multipliée par 2,4 entre 2020 et 2050.

Le scénario «génération frugale» dessine ce que pourrait être un usage sobre du numérique et des réseaux. Il suppose un changement assez radical de notre façon de produire et d'utiliser les services et matériels numériques. On y trouve par exemple un essor du *low-tech*, c'est-à-dire de technologies plus simples, plus robustes et qui puissent être contrôlées par les citoyens et citoyennes. L'écoconception est généralisée de façon à allonger la durée de vie des équipements, à pouvoir facilement les reconditionner et à assurer une grande réparabilité. L'obsolescence logicielle est fortement réduite grâce à une optimisation des systèmes d'exploitation et des mises à jour assurées sur le long terme. Les administrations et les entreprises freinent leurs usages connectés en interrogeant l'utilité des données. Les services et matériels

numériques sont mutualisés. Les citoyens et citoyennes ont par exemple pris conscience de la nécessité de faire converger les équipements vers le smartphone ou l'ordinateur portable. Le taux d'équipement des téléphones est de 1 par habitant. Les principaux flux de données passent par la fibre. Tout le monde a accès au minimum de services numériques pour des besoins fondamentaux liés par exemple à la santé ou à l'éducation et de façon plus générale, les services jugés utiles pour la société sont priorités. Ces mesures doivent ainsi permettre de stabiliser le nombre d'objets connectés (à part pour la santé), de diminuer la consommation énergétique des équipements (divisée par 3) et d'allonger leur durée de vie (de 2 ans). Pour les réseaux mobiles, le partage d'infrastructure et les accords d'itinérance sont favorisés. La société s'habitue à préférer le Wifi et à limiter les usages en mobilité.

Dans le scénario «coopérations territoriales», l'optimisation logicielle permet d'accéder à des services même à débit faible ou modéré. L'acquisition de nouveau matériel est toujours interrogée vis-à-vis des besoins, de la possibilité de maintenir l'existant ou de solutions alternatives non-numériques. L'IoT est principalement utilisé pour des gains énergétiques, par exemple dans le bâtiment.

Une deuxième étude prospective est celle issue du groupe de réflexion «*The shift project*» qui a également proposé une étude prospective à l'horizon 2035, spécifique aux réseaux mobiles [24]. Elle insiste d'abord sur l'importance de l'accroissement du trafic et montre par exemple comment l'hypothèse d'un déploiement à grande échelle du métavers pourrait entraîner une multiplication par quatre des émissions de gaz à effet de serre en 2035 par rapport à 2020. Quatre scénarios sont proposés :

- *cahier des charges* — ce scénario prend en compte les contraintes réglementaires liées aux licences 5G, suppose le déploiement de la 6G en 2030, gèle le taux de partage des infrastructures au niveau de 2024 et considère une augmentation du trafic en ligne avec les prévisions actuelles (jusqu'à 150 Go par mois et par habitant en 2035) ;
- *usage avec croissance maîtrisée* — les hypothèses sont les mêmes mais la croissance du trafic est maîtrisée. L'évolution du trafic est prolongée de manière linéaire pour atteindre 45 Go par mois et par habitant en 2035 ;
- *écoconception systémique* — dans ce scénario, la couverture n'est assurée qu'avec les bandes de fréquence basses. Les contraintes de régulation sont gelées en 2024. Le déploiement de la 6G est suspendu. L'écoconception permet d'allonger la durée de vie des équipements de 2 ans. Les gains d'efficacité énergétique sont plus rapides. Les volumes de trafic sont réduits de 20 % par rapport au scénario de référence ;
- *écoconception et sobriété* — le scénario précédent est combiné à une plus faible augmentation du trafic de données pour atteindre 45 Go par mois par habitant en 2035 (contre 20 Go en 2024).

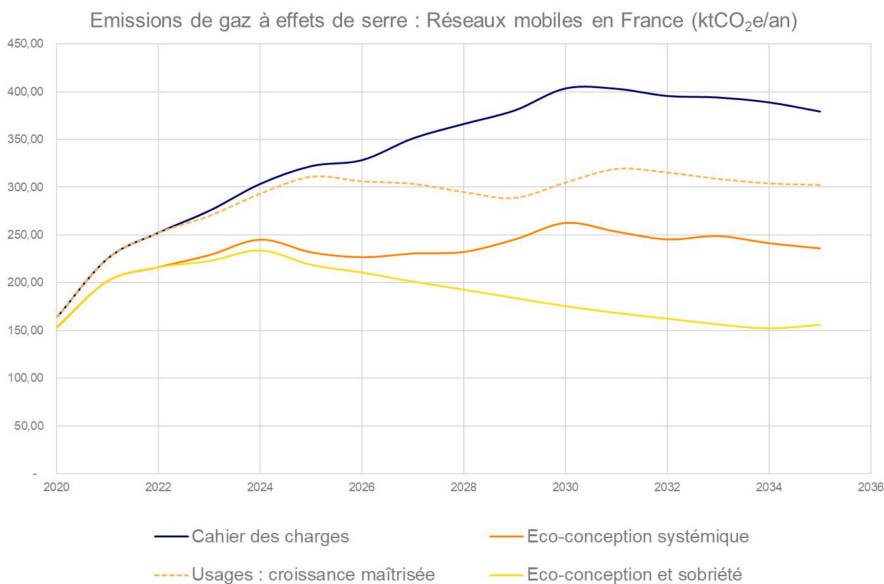


Fig. 13. GES des réseaux mobiles en France entre 2020 et 2035 selon le Shift Project. Figure extraite de [24].

La figure 13 montre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre des réseaux mobiles en France entre 2020 et 2035 suivant les scénarios de cette étude [24]. Si le scénario d'écoconception systémique permet de stabiliser les émissions autour de leur niveau de 2024, seul de scénario incluant la sobriété permet de revenir aux chiffres de 2020. À titre de comparaison, l'ITU a fixé un objectif de -45 % en 2030 par rapport à 2020 pour le secteur du numérique [68].

Que faut-il retenir des effets environnementaux de la 5G ?

Tout d'abord, malgré les progrès apportés par la 5G en matière d'efficacité énergétique, son déploiement n'empêchera pas, au moins à court et moyen termes, une augmentation de la consommation énergétique des réseaux mobiles. D'une part, du fait de l'empilement des générations de réseaux, l'introduction de la 5G ne devrait pas freiner le déploiement de la 4G avant plusieurs années. D'autre part, une amélioration de l'efficacité énergétique du réseau ne signifie pas une réduction de sa consommation énergétique globale, dès lors que celui-ci est dimensionné pour accueillir un trafic nettement plus important. C'est aussi ce que nous enseigne l'étude du déploiement des générations antérieures de réseaux en France : l'efficacité

énergétique croît à chaque génération mais moins rapidement que le trafic, si bien que la consommation énergétique des réseaux mobiles est en croissance continue. L'empilement des réseaux et l'augmentation de la capacité globale expliquent aussi que le nombre de stations de base ait doublé ces dix dernières années en France et que le nombre d'émetteurs-récepteurs ait quadruplé pendant la même période, malgré l'amélioration de l'efficacité spectrale et l'augmentation des largeurs de bande de fréquence.

On pourrait penser que l'introduction d'une nouvelle génération est nécessaire pour limiter la croissance de la consommation énergétique face à l'explosion du trafic. Mais, en réalité, chaque nouvelle génération vient alimenter la dynamique de croissance, dans la mesure où elle s'accompagne systématiquement de plus grandes capacités et de meilleures performances, suscitant ainsi de nouveaux usages ou intensifiant les usages existants. Compte tenu des applications envisagées (visionnage de vidéos très haute définition et même volumétriques, jeux en ligne, Internet des objets, véhicules autonomes, etc.), la 5G ne devrait pas faire exception. Le trafic supplémentaire qu'elle va engendrer s'accompagnera aussi d'une pression accrue sur le reste de l'infrastructure numérique (centres de données, réseaux filaires). Pour finir, ses impacts environnementaux ne se limitent pas à sa consommation électrique : la production des équipements réseau et des terminaux supplémentaires (smartphones et appareils connectés) est aussi source d'impacts environnementaux, mais ces derniers sont difficiles à évaluer faute de données.

Les effets de l'introduction de la 5G sur les autres secteurs (transport, bâtiment, agriculture, industrie, etc.) sont eux aussi difficiles à évaluer. Certaines études mettent en avant des bénéfices environnementaux, mais elles sont essentiellement produites par les industriels du numérique et, comme nous l'avons vu, ne constituent pas des sources fiables du fait de leurs nombreux biais. Compte tenu de l'état des connaissances, notre point de vue est, qu'au contraire, en améliorant la productivité dans la plupart des secteurs économiques, en accélérant l'ensemble des flux matériels et en offrant de nouvelles opportunités de consommation et de production, sans régulation, le déploiement de la 5G risque avant tout de conduire à une augmentation des émissions et des impacts environnementaux. Notre propos n'est pas de nier l'existence d'effets bénéfiques actuels ou futurs de la 5G. Cependant, sans mesures de régulation, les effets précédents risquent de l'emporter. Cette conclusion se rapproche de celle que le GIEC avait formulé en 2022 sur les effets de la numérisation en général. Au-delà des caractéristiques de la technologie 5G elle-même, ce sont donc surtout les projets dans lesquels elle s'inscrit et les trajectoires environnementales qu'ils déterminent qu'il faudrait interroger.

Quelles recherches en informatique... ?

En tant que chercheur ou chercheuse en informatique, nous avons parfois du mal à resituer notre travail dans l'anthropocène et ses défis que sont, par exemple, le changement climatique ou encore la sixième extinction de masse des espèces. Il s'agit pour les chercheurs et les chercheuses de s'emparer de questions telles que

comment notre activité de recherche s'intègre-t-elle dans les sociétés actuelles et dans la part destructrice de leur fonctionnement et comment l'intégrer dans les scénarios prospectifs à moyen et long terme ?

ou encore

est-ce que les résultats de nos recherches participent à la construction d'un monde qui correspond à nos valeurs ?

(ainsi qu'elles sont formulées dans l'atelier SENs [92]). Ces questions sont inhabituelles pour le chercheur et la chercheuse en informatique, qui sont plus habitués à traiter des questions techniques bien identifiées, formalisables mathématiquement, et admettant souvent une unique solution. Elles révèlent non seulement les difficultés que nous avons à établir un lien entre nos recherches et les grandes questions de société, mais aussi à problématiser nos questions de recherche. Il s'agit en particulier d'explicitier chacune des étapes du processus qui mène aux contributions de recherche, en précisant non seulement la voie qui a été prise, mais aussi celles qui n'ont pas été retenues. Par exemple, dans quelle trajectoire s'inscrivent mes recherches ? Celle-ci est-elle liée à la SNBC (*Stratégie nationale bas carbone*, la feuille de route que s'est fixée la France pour honorer ses engagements en matière de décarbonation) ou explore-t-elle une trajectoire alternative ? Dans le cadre de la réduction des impacts environnementaux des réseaux mobiles, pourquoi ai-je choisi tel levier (mesure, optimisation énergétique, etc.) plutôt qu'un autre ? À quelles conditions sera-t-il efficace ? Mieux travailler la problématisation est bénéfique à plus d'un titre. Cela permet non seulement de s'assurer qu'un travail de recherche est pertinent face au problème qu'il entend aborder, mais aussi de mettre en lumière les pistes qui ont été sous-explorées.

Une des questions ouvertes et très peu discutée dans les cercles académiques est de savoir comment construire des technologies différentes, en accord avec les objectifs environnementaux que la France s'est fixée. Ces objectifs peuvent être ceux de la *Stratégie nationale bas carbone* ou ceux des stratégies de diminution de la consommation en eau, comme soutenue par les agences de l'Eau, ou bien encore des stratégies de non-artificialisation, comme la loi « Zéro artificialisation nette » (ZAN). Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, la SNBC fixe notamment des plafonds d'émissions de gaz à effet de serre à ne pas dépasser au niveau national dans chaque secteur. Comme l'indique l'ARCEP dans une note de synthèse à propos de son étude prospective sur les impacts environnementaux du numérique en France [89], pour

atteindre de tels objectifs *le numérique doit prendre la part qui lui incombe* et réduire son empreinte environnementale. Pour l'ARCEP le premier levier d'action est *la mise en œuvre de politiques de sobriété numérique qui commencent par une interrogation sur l'ampleur du développement des nouveaux produits ou services et une réduction ou stabilisation du nombre d'équipements*. Dans ce contexte, des réflexions sur une génération de réseaux mobiles pourraient prendre les formes suivantes :

1. comprendre et étudier les impacts environnementaux du numérique qu'ils soient directs ou indirects : cette forme est déjà largement entamée comme cette étude l'a démontré. Évidemment, des précisions peuvent encore être apportées sur les systèmes existants mais la forme la plus intéressante serait de s'occuper des systèmes en phase de recherche et de développement et donc de procéder à des évaluations en amont, c'est-à-dire, avant la décision de lancement de nouvelles technologies afin d'éclairer le débat public ;
2. garantir la réduction des impacts environnementaux des réseaux mobiles par construction en intégrant des contraintes strictes dès la conception :
 - un premier point de vue serait de se donner des contraintes environnementales strictes pour les impacts d'une nouvelle technologie. En suivant notre exemple, cela revient à allouer un montant maximal énergétique pour un réseau mobile et ainsi voir à quoi pourrait ressembler ce réseau et notamment quelle nouvelle génération serait à construire en relation avec les générations précédentes. En effet, se demander après coup si une génération mobile est à impact environnemental réduit est une question très différente de concevoir *a priori* un réseau à impact prédéfini. Dans sa conception, des contraintes énergétiques fortes à la fois sur la fabrication, sur les puissances de transmission, sur l'ordonancement des trafics, sur les puissances consommées par des dispositifs physiques devraient être intégrées dans un unique calcul et conduiraient à de nouveaux problèmes mathématiques ainsi qu'à de nouveaux défis dans la conception du matériel. La réflexion sur la durée de vie ferait partie intégrante de la conception. Et évidemment, les usages à conserver ou à rejeter dynamiquement voire définitivement seraient aussi des éléments cruciaux à considérer,
 - un second point de vue serait de réfléchir en amont aux seules applications qui seraient considérées comme utiles et non satisfaites par la génération actuelle et qui pourraient bénéficier de la nouvelle génération. En limitant d'office (et non par un calcul comme dans l'item précédent) l'usage de la nouvelle génération, sa conception technique et sa consommation énergétique totale en seraient radicalement modifiées. Certes, l'utilité d'une application est une notion difficile à mesurer et imposer, et le rôle joué par les différents acteurs (État, entreprises, etc.) dans cette décision est un problème de société ouvert ;

3. consacrer ses travaux scientifiques à des domaines ou des actions jugées plus utiles pour l'environnement que le développement de nouvelles technologies. En effet, le temps et l'argent utilisés pour concevoir et déployer de nouvelles technologies sont et resteront colossaux, et ces moyens ont été mis au service d'une technologie qui pour l'instant n'a pas été conçue pour être à impact environnemental faible et qui par conséquent, n'a que peu de chance de l'être réellement si des restrictions ne viennent pas entraver son utilisation. De plus, il y aura des dépenses supplémentaires liées à de nouveaux usages permis par cette nouvelle technologie si on suit la manière actuelle de la concevoir et de la commercialiser. Donc, certaines transformations sociétales qui nécessitent encore des recherches scientifiques seraient certainement plus utiles d'un point de vue environnemental : isolation des bâtiments, transformation de l'agriculture, réduction des inégalités, etc. Cependant, faire des substitutions de moyens financiers, techniques et humains n'est pas simple. Chaque système technique dépend en effet d'une multitude d'acteurs.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier (par ordre alphabétique) : Louis Golard, Yohan Lanier et Loutfi Nuaymi, pour leurs relectures attentives et leurs commentaires constructifs.

Références

- [1] Accenture. 2020. Accelerating 5G in Canada: The Role of 5G in the Fight Against Climate Change. https://canadatelecoms.ca/wp-content/uploads/2023/03/5G_Role_In_Fight_Against_Climate_Change.pdf.
- [2] ANFR. 2025. Données sur les installations radioélectriques de plus de 5 watts. <https://www.data.gouv.fr/en/datasets/donnees-sur-les-installations-radioelectriques-de-plus-de-5-watts-1/>.
- [3] A. Aguiléra, C. Guillot & A. Rallet. 2012. Mobile ICTs and physical mobility: Review and research agenda. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46, 4: 664-672. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.01.005>.
- [4] A. Ahmed et M. Coupechoux. 2023. ANFR Dataset Processing - Source Code. https://github.com/arsalanqasimahmed/ANFR_Dataset_Processing_Codes/tree/main.
- [5] E. Ahvar, A.-C. Orgerie & A. Lebre. 2022. Estimating Energy Consumption of Cloud, Fog and Edge Computing Infrastructures. *IEEE Transactions on Sustainable Computing* 7: 277-288. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2905900>.
- [6] H. Ahvenniemi, A. Huovila, I. Pinto-Seppä & M. Airaksinen. 2017. What are the differences between sustainable and smart cities? *Cities* 60: 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.009>.
- [7] C. Andersson, J. Bengtsson, G. Byström et al. 2022. Improving energy performance in 5G networks and beyond. *Ericsson Technology Review*. <https://www.ericsson>

- .com/4a485f/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2022/improving-energy-performance-in-5g-networks-and-beyond.pdf.
- [8] ARCEP. 2023. Evaluation de l'impact carbone de l'extinction des réseaux mobiles 2G/3G. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/comite-experts-mobile/evaluation-impact-carbone-extinction-reseaux-mobiles-2g-3g.html>.
 - [9] ARCEP. 2024. Enquête annuelle «Pour un numérique soutenable» - édition 2024 (données 2022). <https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/impact-environnemental/enquete-annuelle-pour-un-numerique-soutenable-edition-2024.html>.
 - [10] ARCEP. 2025. Fermeture des réseaux mobiles 2G et 3G : ce qu'il faut anticiper. <https://www.arcep.fr/mes-demarches-et-services/consommateurs/fiches-pratiques/extinction-reseaux-mobiles-2g-3g.html>.
 - [11] J. Aslan, K. Mayers, J. G. Koomey & C. France. 2018. Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates. *Journal of Industrial Ecology* 22, 4: 785-798. <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>.
 - [12] L. Aubet, A. Rabot, L. Bitard & C. Riolo. 2023. *Empreinte environnementale de la fourniture d'accès internet en France*. ADEME - groupe RCP FAI (Référentiel de Catégorie de Produit Fourniture d'Accès à Internet)).
 - [13] G. Auer, V. Giannini, C. Desset et al. 2011. How much energy is needed to run a wireless network? *IEEE Wireless Communications* 18, 5: 40-49. <https://doi.org/10.1109/MWC.2011.6056691>.
 - [14] Autorité de régulation des transports. 2022. Le transport de voyageur en France, État des lieux des mobilités courte et longue distance (volume 2) : Évolutions des mobilités depuis 2008 et pendant la crise sanitaire au regard de leur impact environnemental. <https://www.autorite-transport.fr/wp-content/uploads/2022/12/rapport-multimodal-2022-pdf-final-2.pdf>.
 - [15] S. Aykut & A. Dahan. 2011. Dossier «Adaptation aux changements climatiques» - Le régime climatique avant et après Copenhague : sciences, politiques et l'objectif des deux degrés. *Natures Sciences Sociétés* 19, 2: 144-157. <https://doi.org/10.1051/nss/2011144>.
 - [16] V. Barbarossa, A. M. Schipper, I. Andringa et al. 2026. The Many Pathways of Mining Impacts on Biodiversity. *Conservation Letters* 19, 1. <https://doi.org/10.1111/con4.70000>.
 - [17] P. Bergmark, V. C. Coroama, M. Höjer & C. Donovan. 2020. A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services: Part II: Multiple Services and Companies. In *International Conference on ICT for Sustainability*, 46-55. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401711>.
 - [18] J. Bieser, B. Salieri, R. Hischier & L. Hilty. 2020. *Next generation mobile networks: Problem or opportunity for climate protection?* Technical report, University of Zurich.
 - [19] J. C. T. Bieser, R. Hintemann, L. M. Hilty & S. Beucker. 2023. A review of assessments of the greenhouse gas footprint and abatement potential of information and communication technology. *Environmental Impact Assessment Review* 99: 107033.
 - [20] A. Bigo. 2020. Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement. Theses, Institut Polytechnique de Paris.
 - [21] E. Björnson & E. G. Larsson. 2018. How Energy-Efficient Can a Wireless Communication System Become? *Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*: 1252-1256. <https://arxiv.org/pdf/1812.01688.pdf>.

- [22] I. Brooks, M. L. Thorslund & A. Biørn-Hansen. 2023. Tech4Bad in the Oil and Gas Industry: Exploring Choices for ICT Professionals. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 142-153. <https://doi.org/10.1109/ict4s58814.2023.00023>.
- [23] N. E. Brown, F. Motallebiaraghi, J. F. Rojas et al. 2023. Evaluation of Autonomous Vehicle Sensing and Compute Load on a Chassis Dynamometer. In *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1989-1995. <https://doi.org/10.1109/ITSC57777.2023.10422013>.
- [24] I. Buquicchio, M. Coupechoux, M. de Bank et al. 2024. *Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients*. The Shift Project.
- [25] Cambridge Econometrics & Analysys Mason. 2021. Realising the Benefits of 5G. <https://www.gov.uk/government/publications/realising-the-benefits-of-5g>.
- [26] C. Cano & H. March. 2025. Problematising the sustainability of 5G/6G networks and devising alternative ways forward. *ACM Journal on Responsible Computing* 2, 1.
- [27] R. Cardone. 2021. *Achieving sustainability with energy efficiency in 5G networks*. Ericsson. Consulté à l'adresse <https://www.ericsson.com/en/blog/3/2021/1/achieving-sustainability-with-energy-efficiency-in-5g-networks>.
- [28] C. A. Chan, A. F. Gygax, C. Leckie et al. 2016. Telecommunications energy and greenhouse gas emissions management for future network growth. *Applied Energy* 166: 174-185. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.007>.
- [29] A. Charnay. 2020. Pourquoi la 5G est une mauvaise nouvelle pour l'environnement. <https://www.01net.com/actualites/pourquoi-la-5g-est-une-mauvaise-nouvelle-pour-l-environnement-1846716.html>,
- [30] P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux et al. 2022. *Effets environnementaux de la 5G – partie 1*. Research report. EcoInfo.
- [31] P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux et al. 2024. Effets environnementaux de la 5G – partie 2. *Bulletin 1024*, 24 : 99-127. DOI:10.48556/SIF.1024.24.99.
- [32] Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles. 2022. *Évaluation de la consommation énergétique d'un déploiement 4G vs 5G*. Technical report. ARCEP.
- [33] V. C. Coroama, P. Bergmark, M. Höjer & J. Malmödin. 2020. A Methodology for Assessing the Environmental Effects Induced by ICT Services: Part I: Single Services. In *International Conference on ICT for Sustainability*, 36-45.
- [34] V. C. Coroamă & D. Pargman. 2020. Skill Rebound: On an Unintended Effect of Digitalization. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 213-219.
- [35] F. Creutzig, D. Acemoglu, X. Bai et al. 2022. Digitalization and the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources* 47, 1: 479-509.
- [36] M. de Jong, S. Joss, D. Schraven et al. 2015. Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization. *Journal of Cleaner Production* 109: 25-38.
- [37] C. Dongxu. 2020. 5G Power: Creating a green grid that slashes costs, emissions & energy use. <https://www.huawei.com/en/technology-insights/publications/huawei-tech/89/5g-power-green-grid-slashes-costs-emissions-energy-use>.
- [38] G. Duranton & M. A. Turner. 2011. The fundamental law of road congestion: Evidence from US cities. *American Economic Review* 101, 6: 2616-2652.
- [39] D. Ekchajzer, L. Bornes, J. Combaz et al. 2024. Decision-making under environmental complexity: the need for moving from avoided impacts of ICT solutions to systems thinking approaches. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*.

- [40] J. Eliasson. 2022. Will we travel less after the pandemic? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 13: 100509.
- [41] Ericsson. 2024. Ericsson Mobility Report. <https://www.ericsson.com/4adb7e/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2024/ericsson-mobility-report-november-2024.pdf>.
- [42] European Commission. Directorate General for Communications Networks, Content and Technology, Tech4i2, Real Wireless, CONNECT, Trinity College Dublin & Inter-Digital. 2016. *Identification and quantification of key socio-economic data to support strategic planning for the introduction of 5G in Europe: final report*. Publications Office, LU.
- [43] F. Flipo & J. Combaz. 2024. Le numérique face à ses responsabilités planétaires - Un état des lieux. *Techniques de l'Ingénieur*.
- [44] Forum International des Transports - OCDE. 2014. *Usage de la voiture particulière : Les tendances à long terme*. OCDE.
- [45] C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks et al. 2021. The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns* 2, 9.
- [46] P. Frenger & R. Tano. 2019. More Capacity and Less Power: How 5G NR Can Reduce Network Energy Consumption. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, 1-5.
- [47] Fédération française des télécoms. 2024. Questions / réponses sur la fermeture 2G/3G. <https://www.fftelecoms.org/app/uploads/2023/10/FAQ-fin-2G-3G-1.pdf>.
- [48] C. Gabriel, A. Hansang & A. Chern. 2020. Green 5G: building a sustainable world. Analysys Mason, <https://www.huawei.com/en/public-policy/green-5g-building-a-sustainable-world>.
- [49] GeSI. 2008. *SMART 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*. The Global e-Sustainability Initiative.
- [50] GeSI. 2015. *SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges*. The Global e-Sustainability Initiative.
- [51] GeSI. 2019. *Digital with Purpose: Delivering a SMARTer2030*. The Global Enabling Sustainability Initiative.
- [52] A. Gohar & G. Nencioni. 2021. The Role of 5G Technologies in a Smart City: The Case for Intelligent Transportation System. *Sustainability* 13, 9.
- [53] L. Golard, R. Dethienne, J. Louveaux & D. Bol. 2026. A parametric life-cycle model for assessing environmental impacts of 4G and 5G cellular base stations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- [54] L. Golard, J. Louveaux & D. Bol. 2023. Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints: the case of Belgium for 2020–2025. *Annals of Telecommunications* 78, 5: 313-327.
- [55] D. Gritsenko, J. Aaen & B. Flyvbjerg. 2024. Rethinking digitalization and climate: don't predict, mitigate. *npj Climate Action* 3, 1: 43.
- [56] GSMA. 2019. Infrastructure Sharing: An Overview. https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/gsma_resources/infrastructure-sharing-an-overview/.
- [57] GSMA. 2019. The Enablement Effect. The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions. https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2019/12/GSMA_Enablement_Effect.pdf.
- [58] J. Guérid, J.-B. Doré, J. Reverdy et al. 2022. Toward Eco-Design of a 5G mmWave Transmitarray Antenna Based on Life Cycle Assessment. In *Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC / 6G Summit)*, 440-445.

- [59] A. Hamm, A. Willner & I. Schieferdecker. 2020. Edge Computing: A Comprehensive Survey of Current Initiatives and a Roadmap for a Sustainable Edge Computing Development. In *Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik (WI)*, 694-709.
- [60] L. M. Hilty & B. Aebischer. 2015. ICT for Sustainability: An Emerging Research Field. In *ICT Innovations for Sustainability*, 3-36.
- [61] N. Horner, A. Shehabi & I. L. Azevedo. 2016. Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*.
- [62] Huawei. 2019. 5G Power Whitepaper. <https://carrier.huawei.com/~media/CN BG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf>.
- [63] G. F. Huseien & K. W. Shah. 2022. A review on 5G technology for smart energy management and smart buildings in Singapore. *Energy and AI* 7.
- [64] International Energy Agency. 2019. Digitalisation and Energy. <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>.
- [65] IPCC. 2023. *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [66] K. L. Ipsen, R. K. Zimmermann, P. S. Nielsen & M. Birkved. 2019. Environmental assessment of Smart City Solutions using a coupled urban metabolism—life cycle impact assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24, 7: 1239-1253.
- [67] ITU. 2019. Sustainable power-feeding solutions for 5G networks. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.1210-201912-I!!PDF-E&type=items.
- [68] ITU. 2020. ICT industry to reduce greenhouse gas emissions by 45 per cent by 2030 – ITU, GeSI, GSMA & SBTi set science-based pathway in line with Paris Agreement. Press release. <https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR04-2020-ICT-industry-to-reduce-greenhouse-gas-emissions-by-45-percent-by-2030.aspx>.
- [69] D. Johnson. 2018. The 5G Dilemma: More Base Stations, More Antennas - Less Energy? *IEEE Spectrum*. <https://spectrum.ieee.org/energywise/telecom/wireless/will-increased-energy-consumption-be-the-achilles-heel-of-5g-networks>.
- [70] F. Jungerman. 2020. Nine Months with 5G: 4.7 Million Subs – Each Using 27 GB per Month. <https://tefficient.com/nine-months-with-5g-4-7-million-subs-each-using-27-gb-per-month/>.
- [71] M. Al Khairy. 2019. Benchmark global study proves 5G performance, coverage and power-efficiency. <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/10/benchmark-global-study-proves-5g-performance-coverage-and-power-efficiency>.
- [72] M. Klapez, C. A. Grazia & M. Casoni. 2021. The Energy Footprint of 5G Multi-RAT Cellular Architectures. *IEEE Access* 9.
- [73] T. Li, L. Yu, Y. Ma et al. 2023. Carbon emissions of 5G mobile networks in China. *Nature Sustainability* 6: 1620-1631.
- [74] Y. Li, A.-C. Orgerie, I. Rodero, B. Lemma Amersho et al. 2018. End-to-end Energy Models for Edge Cloud-based IoT Platforms: Application to Data Stream Analysis in IoT. *Future Generation Computer Systems* 87: 667-678.
- [75] J. Malmodin, P. Bergmark, N. Lövehagen et al. 2014. Considerations for macro-level studies of ICT's enablement potential. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)* (ict4s-14).
- [76] J. Malmodin, P. Bergmark & S. Matinfar. 2018. A high-level estimate of the material footprints of the ICT and the E&M sector. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 168-186.

- [77] J. Malmodin & V. Coroama. 2016. Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation — The example of smart metering. In *Electronics Goes Green (EGG)*, 1-9.
- [78] J. Malmodin, D. Lundén, A. Moberg et al. 2014. Life Cycle Assessment of ICT. *Journal of Industrial Ecology* 18, 6: 829-845.
- [79] M. Manville, D. A. King & M. J. Smart. 2017. The Driving Downturn: A Preliminary Assessment. *Journal of the American Planning Association* 83, 1: 42-55.
- [80] C. J. Martin, J. Evans & A. Karvonen. 2018. Smart and sustainable? Five tensions in the visions and practices of the smart-sustainable city in Europe and North America. *Technological Forecasting and Social Change* 133: 269-278.
- [81] S. Mishra, A. F. Zanella, O. E. Martínez-Durive et al. 2024. Characterizing 5G Adoption and its Impact on Network Traffic and Mobile Service Consumption. In *Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 1531-1540.
- [82] P. Mokhtarian. 2009. If telecommunication is such a good substitute for travel, why does congestion continue to get worse? *Transportation Letters* 1, 1: 1-17.
- [83] Patrick Nelson. 2019. La 5G sera-t-elle plus économe en énergie que la 4G? <http://www.reseaux-telecoms.net/actualites/lire-la-5g-sera-t-elle-plus-econome-en-energie-que-la-4g-27752.html>,
- [84] Nokia. 2015. *LTE-Advanced Pro - Pushing LTE capabilities towards 5G*. Technical report. Nokia.
- [85] P. Nuss & M. J. Eckelman. 2014. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLOS ONE* 9, 7: 1-1.
- [86] OMDIA. 2021. 5G Impact 2030: The impact of 5G on the economy, employment, and emissions in France, Spain, Poland, Belgium, and Romania in 2030.
- [87] B. Partridge. 2019. Telco Industry Hopes and Fears - From Energy Costs to Edge Computing Transformation.
- [88] E. L. Perasso, C. Vateau, F. Domon et al. 2022. *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective*. ARCEP-ADEME.
- [89] E. L. Perasso, C. Vateau, F. Domon et al. 2023. *Note de synthèse de l'ARCEP sur l'étude prospective 2030-2050*. ARCEP-ADEME. Consulté à l'adresse https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/note-synthese-Arcep-gouvernement-prospective-2030-2050_mars2023.pdf.
- [90] T. Pirson & D. Bol. 2021. Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach. *Journal of Cleaner Production* 322: 128966.
- [91] Qualcomm - Signals Research Group. 2019. A Global Perspective of 5G Network Performance.
- [92] S. Quinton & É. Tannier. 2020. Atelier Sciences Environnements Sociétés.
- [93] A. Rasoldier. 2024. Comment évaluer le potentiel d'une solution numérique face à l'urgence écologique? Application aux plateformes de covoiturage régulier à l'échelle locale. Université Grenoble Alpes. Consulté à l'adresse <https://theses.hal.science/tel-04702139>.
- [94] J. Rockström, W. Steffen, K. Noone et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 7263: 472-475.
- [95] G. Roussilhe. 2020. La controverse de la 5G. <https://gauthierroussilhe.com/pdf/5G-Juillet2020.pdf>.
- [96] G. Roussilhe. 2021. Que peut le numérique pour la transition écologique? <https://gauthierroussilhe.com/ressources/que-peut-le-numerique-pour-la-transition-ecologique>.

- [97] G. Roussilhe, A.-L. Ligozat & S. Quinton. 2023. A long road ahead: a review of the state of knowledge of the environmental effects of digitization. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 62: 101296.
- [98] I. Salomon. 1986. Telecommunications and travel relationships: a review. *Transportation Research Part A: General* 20, 3: 223-238.
- [99] Samsung. 2025. Life Cycle Assessment For Mobile Phones. <https://www.samsung.com/global/sustainability/policy-file/AYVhR1k6BicAIx95/LCAResultsforSmartphones.pdf>.
- [100] W. Scharnhorst, L. M. Hilty & O. Jolliet. 2006. Life cycle assessment of second generation (2G) and third generation (3G) mobile phone networks. *Environment International* 32, 5: 656-675.
- [101] A. Scheidel, D. Del Bene, J. Liu et al. 2020. Environmental conflicts and defenders: A global overview. *Global Environmental Change* 63: 102104.
- [102] Statista. 2023. Prévision du taux de pénétration du smartphone en France de 2013 à 2028. <https://fr.statista.com/previsions/531119/taux-de-penetration-du-smartphone-france>.
- [103] M. Taiebat, A. L. Brown, H. R. Safford et al. 2018. A Review on Energy, Environmental, and Sustainability Implications of Connected and Automated Vehicles. *Environmental Science & Technology* 52, 20: 11449-11465.
- [104] Tefficient. 2019. Mobile data consumption continues to grow – a majority of operators now rewarded with ARPU. <https://tefficient.com/wp-content/uploads/2019/09/tefficient-industry-analysis-3-2019-mobile-data-usage-and-revenue-1H-2019-per-operator-5-Sep.pdf>.
- [105] Tefficient. 2020. The gig economy: 58% more gigabytes generated 0.4% more revenue 5G monetisation lessons from China and Korea. <https://tefficient.com/wp-content/uploads/2020/04/tefficient-industry-analysis-1-2020-mobile-data-usage-and-revenue-FY-2019-per-operator.pdf>.
- [106] The Shift Project. 2021. Impact environnemental du numérique : tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G. <https://theshiftproject.org/article/impact-environnemental-du-numerique-5g-nouvelle-etude-du-shift/>.
- [107] A. M. Toli & N. Murtagh. 2020. The Concept of Sustainability in Smart City Definitions. *Frontiers in Built Environment* 6.
- [108] S. Tombaz, P. Frenger, F. Athley et al. 2015. Energy Performance of 5G-NX Wireless Access Utilizing Massive Beamforming and an Ultra-Lean System Design. In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 1-7.
- [109] S. Tombaz, P. Frenger, M. Olsson & A. Nilsson. 2016. Energy performance of 5G-NX radio access at country level. In *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 1-6.
- [110] Vodafone. 2024. Environmental, Social and Governance Addendum. <https://investors.vodafone.com/~media/Files/V/Vodafone-IR/documents/esg/vodafone-esg-addendum-2024/>.
- [111] Z. Wadud, M. Adeel & J. Anable. 2024. Understanding the large role of long-distance travel in carbon emissions from passenger travel. *Nature Energy*.
- [112] M. Wagih, A. Bainbridge, B. Alsulami & J. Kettle. 2024. Environmental Life-Cycle Assessment (LCA) of Wireless RF Systems: A Comparative Sustainability Analysis and a Microwave Engineers' Guide to LCA. *IEEE Journal of Microwaves* 4, 4: 987-1000.
- [113] L. Williams, B. K. Sovacool & T. J. Foxon. 2022. The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157: 112033.

- [114] D. Xu, A. Zhou, X. Zhang et al. 2020. Understanding Operational 5G: A First Measurement Study on Its Coverage, Performance and Energy Consumption. In *ACM SIGCOMM Conference*, 479-494.
- [115] X. Yuan, M. Wu, Z. Wang et al. 2022. Understanding 5G performance for real-world services: a content provider's perspective. In *ACM SIGCOMM Conference*, 101-113.
- [116] J. Zagdanski & P. Castells. 2023. The impact of spectrum policy on carbon emissions. In *European Conference of the International Telecommunications Society (ITS)*.
- [117] Z. Zhang, L. Scola & A. Schulman. 2023. Investigating the Sustainability of the 5G Base Station Overhaul in the United States. In *International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*, 53-62.

