

Que peut le numérique pour la transition écologique ?

État des lieux de l'empreinte écologique du numérique et étude de ses impacts positifs annoncés pour la transition

Mars 2021





Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons :

Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International

Sommaire

Résumé	4
Summary	7
Introduction	11
Point d'étape planétaire	12
Les émissions de gaz à effet de serre	13
Les projections de réchauffement	14
Les écarts d'émissions	15
L'empreinte matérielle et son intensité	16
L'évolution du mix énergétique	18
L'efficacité énergétique	20
Remarques générales	21
Peser le numérique : les différentes hypothèses de consommation d'énergie et d'émissions de GES du secteur	24
Andrae et Edler	25
Belkhir et Elmeligi	27
Malmodin et Lundén	28
Observations	30
Projeter le numérique : le calcul des effets positifs du numérique sur le climat	34
Analyse : 1g de CO2e investi dans le numérique représente 10g de CO2e évités dans les autres secteurs (GSMA)	35
Smart Buildings	39
Smart Energy	42
Smart Working, Living and Health	44
Smart Transport and Cities	48
Smart Agriculture	52
Smart Industry	54
Conclusion sur « The Enablement Effect » (GSMA)	56
Analyse : le numérique permet de réduire jusqu'à 20% les émissions de GES dans les autres secteurs (GeSI)	58
Télémédecine	61
Enseignement à distance	62
Smart Buildings	63
Smart Mobility	64
Smart Energy	66
Travail et Affaires	67
Smart Manufacturing	68
Conclusion sur « SMARTer2030 » (GeSI)	69
Prospecter le numérique : trouver les effets positifs dans les bons contextes	71
Conclusion générale	75
Crédits	76
Glossaire	77
Bibliographie	79

Résumé

Objectif du rapport

Évaluer l'empreinte environnementale du numérique est un exercice complexe, notamment en raison de l'absence de données ouvertes, de l'absence de méthodologie commune et à la nature transverse du numérique : à la fois un secteur en soi, tout en étant dispersé dans d'autres secteurs.

Nous commençons toutefois à avoir une meilleure vision du poids écologique du numérique. Il nous faut maintenant mieux étudier les impacts positifs potentiels du numérique. Même si nous formulons l'hypothèse que le numérique, tel qu'il est aujourd'hui, n'a aucun impact positif, il faudrait tout de même enquêter pour trouver dans quelles conditions cette infrastructure peut aider à la transition, car des ressources rares, de l'eau et de l'énergie, du travail humain ont déjà été investis dans celle-ci.

Il ne s'agit pas d'accepter sans interrogation les affirmations d'impacts positifs et il ne s'agit pas non plus de les disqualifier d'emblée mais plutôt de commencer un long processus d'enquête et de recherche.

Point d'étape planétaire

Avant d'analyser les impacts positifs potentiels il est important de faire un point de rappel sur les indicateurs macroscopiques concernant le climat, l'énergie et les ressources.

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) ont augmenté globalement pour atteindre la mesure record de 52,4 GtCO₂e en 2019 (hors changement d'utilisation des terres). Les émissions globales de GES auraient augmenté de 1,4% par an en moyenne depuis 2010

Les politiques actuelles nous amèneraient aujourd'hui à un réchauffement de +2,9°C d'ici la fin du siècle. Il est très improbable de respecter l'objectif de +1,5°C mais il reste encore une marge de manœuvre pour atteindre l'objectif de +2°C

Depuis 2000, le taux d'extraction des ressources naturelles a accéléré ; si aucune action n'est engagée, l'ONU projette une empreinte matérielle à hauteur de 190 Gt d'ici 2060, contre 92 Gt en 2017.

L'empreinte matérielle augmente maintenant plus vite que le PIB, et surtout bien plus vite que la population.

Le pétrole, le charbon et le gaz représentent toujours 80% de la consommation d'énergie mondiale. Toutefois le taux de croissance le plus élevé est celui des énergies renouvelables avec presque 12% de croissance en quatre ans. Malgré la croissance des EnR la consommation d'énergie fossile ne baisse pas. La réduction de la demande d'énergie est cruciale pour que la décarbonation soit possible.

Selon l'IEA, l'amélioration de l'efficacité énergétique n'aurait été que de 1,2% en 2018, le plus faible taux depuis 2010.

Peser le numérique : les différentes hypothèses de consommation d'énergie et d'émissions de GES du secteur

Les études globales offrent une version partielle de l'empreinte environnementale du numérique à cause d'une sous-estimation de l'impact de la fabrication, de l'absence de données de référence issues de l'écosystème asiatique et de l'omission de nouvelles tendances influant sur la croissance du secteur (IoT, Blockchain, ...).

Toutes les estimations globales prévoient une augmentation de la consommation d'énergie du numérique. Cela est très problématique dans le cadre des politiques de transition.

La focalisation sur l'énergie et les GES ne permet pas de voir comment l'empreinte matérielle augmente et dans quelle proportion, ni comment l'empreinte hydrique évolue.

Aujourd'hui, la focalisation par pays, là où les données peuvent être stabilisées, semble être une stratégie plus pertinente que l'estimation globale.

On peut estimer que l'empreinte carbone globale du secteur numérique serait aux alentours de 1,1 à 1,4 GtCO₂e en 2020.

Analyse : «1g de CO2e investi dans le numérique représente 10g de CO2e évités dans les autres secteurs »

Le rapport de la GSMA et Carbon Trust estime que les technologies mobiles ont permis d'éviter l'émission de 2,135 GtCO₂e en 2018 (2 135 millions de tonnes), soit 10 fois plus que l'empreinte des réseaux mobiles estimée à 0,22 GtCO₂e.

La méthodologie du rapport se base sur des études de cas fournies par les entreprises du secteur, de la littérature scientifique et grise, ainsi qu'un sondage d'opinion de 6 100 personnes fait pour l'occasion. Les hypothèses d'évitement sont formulées dans 6 secteurs et dans 14 pays différents puis extrapolées au niveau global.

Le ratio de 10:1 n'est pas valable car il consiste à prendre l'empreinte d'un sous-secteur (les réseaux de transmission) tout en réclamant l'effet d'évitement potentiellement permis par l'ensemble de l'infrastructure numérique.

Parmi les hypothèses du rapport les plus optimistes, les auteurs estiment que les systèmes intelligents de chauffage / ventilation / climatisation (HVAC) réduiraient de 25% la consommation électrique du bâti commercial ; que les réseaux mobiles favoriseraient le déploiement du parc photovoltaïque à hauteur de 30% ; que la télémédecine réduirait les admissions à l'hôpital de 45% en moyenne ; que les systèmes intelligents de gestion du trafic réduiraient les émissions de 8,5 à 10% ; que les technologies mobiles réduiraient l'usage de fertilisants chimiques de 40% et la consommation d'eau de 20 à 40%. Il est aussi estimé, à travers le sondage d'opinion fourni par la GSMA, que le partage d'habitation (CouchSurfing, AirBnB) réduirait les émissions à hauteur de 221,5 MtCO₂e, et que les conférences en ligne réduiraient les émissions à hauteur de 203,7 MtCO₂e.

La comparaison systématique des évitements d'émissions de la GSMA avec les émissions de GES au niveau mondial, européen, national et sectoriel (dans les 14 pays de l'échantillon) montre que les réductions liées au numérique ne sont pas visibles quand on passe à l'échelle ou ne sont pas suffisamment fortes pour compenser la croissance tendancielle. En l'occurrence, l'exercice de calcul proposé par la GSMA et Carbon Trust consiste à prouver que l'on a évité

théoriquement des émissions plutôt qu'à prouver que ces émissions aient existé en premier lieu.

Cette méthode de calcul consiste uniquement à estimer les émissions que les technologies numériques enlèvent dans tous les secteurs d'activité. Mais si le numérique permet de fluidifier et d'optimiser la production, la distribution et la consommation, il est alors nécessaire de quantifier les émissions potentiellement « ajoutées » par le numérique dans les mêmes secteurs afin d'avoir une balance nette.

Au vu de la méthodologie de l'étude et de son périmètre incertain elle ne peut pas être utilisée en l'état pour les décisions politiques concernant les technologies numériques pour le climat.

Analyse : «le numérique permet de réduire jusqu'à 20% les émissions de GES dans les autres secteurs »

Ce rapport de GeSI et Accenture fait l'hypothèse que le secteur de l'ICT (*Information and Communication Technologies*) peut réduire les émissions de GES de 20% d'ici 2030, maintenant ainsi les émissions à leur niveau de 2015.

Le rapport se base sur trois variables : les données de référence, le taux d'adoption des technologies numériques et leurs impacts d'évitement. 12 études de cas, fournies par des grandes entreprises du secteur numérique, ont été ensuite utilisées pour modéliser des résultats dans 9 pays : États-Unis, Royaume-Uni, Chine, Inde, Allemagne, Brésil, Australie et Kenya. Les résultats obtenus dans ces neuf pays ont été extrapolés pour obtenir des projections mondiales.

Parmi les hypothèses les plus optimistes du rapport, les auteurs estiment que l'enseignement à distance va réduire les trajets vers les lieux d'éducation de 30% ; que la consommation d'énergie des ménages va diminuer de 40% par les ménages grâce aux compteurs intelligents, et de 45% dans le bâti commercial ; que la numérisation va réduire de 65% la consommation d'énergie de l'agriculture, l'usage de fertilisants et les émissions liées à la digestion du bétail ; que la numérisation va réduire la production de voiture de 15% ; que la logistique intelligente va réduire le fret routier de 30%, le fret maritime de 20%, le fret ferroviaire de 25%, le fret aérien de 20% ; que la numérisation va réduire la production d'énergie de 20% ; que le télétravail va réduire les trajets

domicile-travail de 53%, les voyages d'affaires en voiture de 80% et les voyages d'affaires en avion de 80% ; que l'optimisation des machines va réduire les émissions du secteur industriel de 40%.

La comparaison systématique des évitements d'émissions de GeSI avec les émissions de GES au niveau mondial et sectoriel montre que les réductions liées au numérique ne sont pas visibles.

Les réductions d'émissions de GES sont calculées à partir de leviers et d'effets multiplicateurs qui sont aujourd'hui largement mis en défaut par la littérature scientifique existante.

Au vu de la méthode utilisée, des données de base et des hypothèses ultra-optimistes, les estimations proposées par GeSI et Accenture ne devraient pas être utilisées pour l'évaluation des impacts environnementaux positifs du numérique.

Prospecter le numérique : trouver les effets positifs dans les bons contextes

La numérisation semblerait être un facteur marginal dans la transition écologique des secteurs étudiés.

La pertinence de la numérisation dépend ainsi du contexte d'application : le passage à l'échelle d'une technologie n'est pas systématiquement pertinent pour la réduction de l'impact environnemental des activités humaines. Cela sera d'ailleurs un point de tension majeur entre les modèles économiques qui sous-tendent l'écosystème numérique actuel et les stratégies de transition écologique.

Aujourd'hui, il semble que les gains d'efficacité et d'optimisation permettent généralement d'augmenter la productivité et le flux de matière et d'énergie associé, pas de le stabiliser ou à plus forte raison de le réduire. L'écosystème numérique (industriels, opérateurs, États, fabricants, consommateurs, ...) doit être extrêmement vigilant à stabiliser et réduire sa consommation d'énergie en valeur absolue plutôt que de décarboner la croissance de celle-ci grâce à la monopolisation des capacités de production d'énergies renouvelables.

Conclusion

il est important à terme de comprendre ce que la numérisation peut et ne peut pas à l'égard de la transition écologique. Une posture agnostique est recommandée : il ne s'agit pas de partir du principe que plus de numérique permet forcément des gains environnementaux mais plutôt de comprendre précisément, à travers des exemples dans des territoires précis, les conditions qui permettent ces gains et à quel point elles sont reproductibles. Mettre à l'échelle des technologies numériques sans considération des spécificités territoriales semble contre-productif en termes de transition écologique.

Les technologies numériques ne remplacent pas des politiques concrètes d'aménagement du territoire, de programmation énergétique, d'investissement industriel, etc. La numérisation ne doit pas être une politique incantatoire ou une défausse des politiques nationales.

La numérisation n'est qu'un facteur parmi d'autres et il n'est généralement pas le plus important. Il semble contreproductif de surprendre l'effet de la numérisation et, ce faisant, de minorer d'autres facteurs bien plus efficaces.

Il ne semble pas pertinent de faire des extrapolations au niveau mondial au vu du manque de données. Il serait préférable que les prochaines estimations soient restreintes au niveau national tout en maintenant une analyse sectorielle.

Nous ne sommes qu'au tout début d'une longue enquête pour comprendre où est-ce que le secteur numérique présente un bénéfice environnemental net et dans quelles conditions, et où est-ce qu'il représente un fardeau écologique.

Summary

Purpose

Assessing the environmental footprint of digital technology is a complex exercise, particularly due to the lack of open data, the absence of a common methodology and the cross-cutting nature of digital technology: both a sector in itself, and scattered across other sectors.

However, we are beginning to get a better view of the ecological footprint of the digital sector. We now need to better study its potential positive impacts. Even if we were to hypothesize that the digital sector, as it is today, has no positive impact, we would still need to investigate under what conditions this infrastructure can help the transition, since scarce resources, water and energy, and human labor have already been invested in it.

It is not a question of accepting claims of positive impacts without question, nor is it a question of disqualifying them outright, but rather of beginning a long process of investigation and research.

Global milestone

Before analyzing the potential positive impacts it is important to recall the macroscopic indicators for climate, energy and resources.

Greenhouse gas (GHG) emissions have increased overall to a record 52.4 GtCO₂e in 2019 (excluding land use change). Global GHG emissions would have increased by 1.4% per year on average since 2010.

Current policies would lead us to a +2.9°C warming by the end of the century. It is very unlikely to meet the +1.5°C target, but there is still room for manoeuvre to reach the +2°C target.

Since 2000, the rate of extraction of natural resources has accelerated; if no action is taken, the UN projects a material footprint of 190 Gt by 2060, compared to 92 Gt in 2017.

The material footprint is now growing faster than GDP, and more importantly, much faster than population.

Oil, coal and gas still account for 80% of the world's energy consumption. However, the highest growth rate is that of renewable energies

with almost 12% growth in four years. Reducing energy demand is crucial for decarbonation to be possible.

According to the IEA, the improvement in energy efficiency would have been only 1.2% in 2018, the lowest rate since 2010.

Weighing up the numbers: the sector's different assumptions on energy consumption and GHG emissions

Global estimates provide a partial version of the digital environmental footprint because of an underestimation of the impact of manufacturing, the lack of baseline data from the Asian ecosystem and the omission of new trends affecting the growth of the sector (IoT, Blockchain, ...).

All global estimates predict an increase in energy consumption of the digital sector. This is very problematic regarding transition policies.

The focus on energy and GHG does not allow to see how the material footprint is increasing and in what proportion, nor how the water footprint is changing.

Today, focusing by country, where data can be stabilized, seems to be a more relevant strategy than the global estimate.

It can be estimated that the overall carbon footprint of the digital sector would be around 1.1 to 1.4 GtCO₂e in 2020.

Analysis: «1g of CO₂e invested in mobile technologies represents 10g of CO₂e avoided in other sectors»

The GSMA and Carbon Trust report estimates that mobile technologies have prevented the emission of 2.135 GtCO₂e in 2018 (2,135 million tonnes), 10 times more than the estimated mobile network footprint of 0.22 GtCO₂e.

The methodology of the report is based on case studies provided by leading companies in the sector, scientific and grey literature, as well as an opinion poll of 6,100 people carried out for the occasion. Avoidance hypotheses are formulated

in 6 sectors and in 14 different countries and then extrapolated to the global level.

The 10:1 ratio is not valid because it consists in taking the footprint of a sub-sector (mobile networks) while claiming the avoidance effect potentially allowed by the entire digital infrastructure.

Among the report's most optimistic hypotheses are that intelligent heating / ventilation / air conditioning (HVAC) systems would reduce the electricity consumption of commercial buildings by 25% ; that mobile networks would promote the deployment of photovoltaic energy systems by 30% ; that telemedicine would reduce hospital admissions by 45% on average ; that intelligent traffic management systems would reduce emissions by 8.5 to 10% ; that mobile technologies would reduce the use of chemical fertilizers by 40% and water consumption by 20 to 40%. It is also estimated, through the opinion poll provided by GSMA, that home sharing (CouchSurfing, AirBnB) would reduce emissions by 221.5 MtCO_{2e}, and that online conferencing would reduce emissions by 203.7 MtCO_{2e}.

Systematic comparison of GSMA emissions avoidance with GHG emissions at the global, European, national (in the 14 countries of their sample) and sectoral levels shows that digital-related reductions are not visible when scaling up or are not strong enough to offset trend growth. In this case, the calculation exercise proposed by GSMA and Carbon Trust is to prove that emissions have been theoretically avoided rather than to prove that they existed in the first place.

This method of calculation consists solely of estimating the emissions that digital technologies remove in all sectors. But if digital technology enables production, distribution and consumption to be fluid and optimized, then it is necessary to quantify the emissions potentially "added" by digital technology in the same sectors in order to have a net balance.

In view of the methodology of the study and its uncertain scope, it cannot be used as it stands for political decisions concerning digital technologies and sustainability.

Analysis: « digital technology can reduce GHG emissions up to 20% in other sectors »

This report by GeSI and Accenture hypothesizes that the ICT sector can reduce greenhouse gas

emissions by 20% by 2030, thereby maintaining emissions at their 2015 level.

The report is based on three variables: baseline data, the rate of adoption of digital technologies and their avoidance impacts. 12 case studies, provided by leading digital companies, were then used to model results in 9 countries: United States, United Kingdom, China, India, Germany, Brazil, Australia and Kenya. Results from these nine countries were extrapolated to obtain global projections.

Among the report's most optimistic assumptions, the authors estimate that online learning will reduce travel to educational facilities by 30% ; that household energy consumption will be reduced by 40% through smart metering, and by 45% in commercial buildings ; that digitization will reduce energy consumption in agriculture, fertilizer use and emissions from livestock digestion by 65% ; that digitization will reduce car production by 15% ; that smart logistics will reduce road freight by 30%, sea freight by 20%, rail freight by 25%, air freight by 20% ; that digitization will reduce energy production by 20% ; that teleworking will reduce commuting by 53%, business travel by car by 80% and business travel by air by 80% ; that machine optimization will reduce emissions from the industrial sector by 40%.

Systematic comparison of GeSI's emissions avoidance with global and sectoral GHG emissions shows that numerically related reductions are not visible.

GHG emission reductions are calculated using levers and multiplier effects that are now largely challenged by the existing scientific literature.

In view of the method used, the baseline data and the ultra-optimistic assumptions, the estimates proposed by GeSI and Accenture should not be used for the assessment of the positive environmental impacts of the numerical model.

Prospecting the digital sector: finding positive effects in the right contexts

Digitization would seem to be a marginal factor in the ecological transition of the sectors studied.

The relevance of digitization thus depends on the context of application: scaling up a technology is not systematically relevant for reducing the

environmental impact of human activities. Moreover, this will be a major point of tension between the economic models underlying the current digital ecosystem and ecological transition strategies.

Today, it seems that efficiency and optimization gains generally increase productivity and the associated flow of material and energy. The digital ecosystem (industries, operators, states, manufacturers, consumers, ...) must be extremely vigilant to stabilize and reduce its energy consumption in absolute terms rather than decarbonize its growth through the monopolization of renewable energy production capacities.

Conclusion

It is important in the long run to understand what digitization can and cannot do with respect to ecological transition. An agnostic stance is recommended: don't start from the principle that more digitization necessarily allows environmental gains, but rather try to understand precisely, through examples in specific territories, the conditions that allow these gains and to what extent they are reproducible. Scaling up digital technologies without considering territorial specificities seems counter-productive in terms of ecological transition.

Digital technologies are not a substitute for concrete policies for land use planning, energy policies, industrial investment, etc. Digitization must not be an incantatory policy or a defect of national policies.

Digitization is only one factor among others, and it is generally not the most important one transition-wise. It seems counterproductive to overstate the effect of digitization, especially when it means undermining the other, much more effective factors.

It does not seem relevant to extrapolate to the global level in view of the lack of data. It would be preferable that future estimates be restricted to the national level while maintaining a sectoral analysis.

We are only at the very beginning of a long inquiry to understand where the digital sector has a net environmental benefit and under what conditions, and where it represents an environmental burden.

Que peut le
numérique pour la
transition écologique ?

Introduction

Le rôle de l'écosystème numérique¹ dans la transition écologique a commencé à être débattu ces dernières années, autant dans la sphère scientifique que dans la sphère publique. Jusqu'alors très peu de données étaient disponibles pour évaluer les impacts positifs, comme négatifs, du numérique par rapport à la question environnementale. Ce jeune champ de recherche dispose maintenant d'un peu plus de données et les modèles sont en train d'évoluer depuis 2018. Toutefois, **évaluer l'empreinte environnementale du numérique reste toujours un exercice d'une incroyable complexité, notamment liée à l'absence de données ouvertes, l'absence de méthodologie commune et à la nature transverse du numérique : à la fois un secteur en soi, tout en étant dispersé dans d'autres secteurs.**

Différentes positions s'affrontent sur les impacts réels, estimés et projetés du numérique. Certains estiment qu'accélérer la numérisation aura forcément un impact positif car cela augmenterait l'efficacité et l'optimisation des processus de production et de distribution – permettant une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES). La question environnementale est alors intégrée en énonçant que, par défaut, le numérique peut réduire jusqu'à 20% des émissions de GES dans tous les autres secteurs. Les concepts d'efficacité énergétique et de substitution des équipements alimentent alors cet horizon. D'autres estiment plutôt que l'urgence climatique implique une réduction rapide de l'empreinte environnementale du numérique bien plus rapide. Dans cette optique, les taux de croissance annuelle estimés de son empreinte environnementale, et l'incertitude de ses impacts positifs, apparaissent comme un frein à la transition écologique. Cette position présente la trajectoire actuelle de développement du numérique comme une impasse – généralement à cause des effets rebond² et de l'empilement des équipements. Ces deux positions représentent au mieux des pôles avec différents niveaux de pesanteur avec un dégradé de positions intermédiaires, plutôt que deux blocs nets et distincts.

Réduire l'empreinte écologique des activités humaines est nécessaire et doit être placé au centre des arbitrages politiques plutôt qu'à la marge. Il nous faut alors évaluer avec précision les outils et les systèmes à notre disposition pour atténuer autant que possible la vitesse de transformation de nos milieux (réchauffement climatique, stress hydrique, pollutions, transformation des sols, etc.). Ceci étant énoncé, il nous faut également émettre une première constatation : l'infrastructure a été construite et des services numériques sont en fonctionnement, qu'on le veuille ou non. Du travail humain, des matières, de l'énergie ont été investis dans cet écosystème, il va donc falloir débattre de ce que nous pouvons en faire dans le cadre de la transition écologique. **Même si nous formulons l'hypothèse que le numérique, tel qu'il est aujourd'hui, n'a aucun impact positif, il faudrait tout de même enquêter pour trouver dans quelles conditions cette infrastructure peut aider à la transition, car l'investissement a été déjà fait et toutes les ressources disponibles doivent être mobilisées pour réduire notre empreinte.**

Afin de poser les premières pierres de cette enquête, ce rapport analyse une grande partie de la littérature mettant en avant les impacts positifs du numérique pour la transition écologique. Cela est d'autant plus important que l'estimation de l'empreinte environnementale du numérique est soumise à un vif débat mais les hypothèses d'impacts positifs sont rarement questionnées. Dans le contexte de la crise écologique, débattre efficacement de la trajectoire que doit prendre le numérique nécessite que tous les participants jouent cartes sur table. **Il ne s'agit pas d'accepter sans interrogation les affirmations d'impacts positifs et il ne s'agit pas non plus de les disqualifier d'emblée.** Plutôt, il semble important de comprendre comment sont formulés ces scénarios, sur quelles hypothèses, et quel niveau de confiance peut leur être accordé. Dans l'hypothèse d'une réorientation du numérique ces scénarios sont autant de pistes pour comprendre plus précisément comment cet écosystème peut être effectivement un accélérateur de transitions et là où il ne l'est pas.

¹ L'écosystème numérique inclut ici les infrastructures et les services numériques.

² « On appelle "effet rebond" la façon dont certains gains environnementaux obtenus grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique (isolation, chauffage plus performant, diminution des

consommations des véhicules, etc.) vont être annulés par une augmentation des usages », Alternatives Économiques, [Hors-série pratique n° 61](#), 1er mars 2013, consulté le 7 février 2021.

Point d'étape planétaire

Avant d'analyser la littérature énoncée il est important de constituer une base de référence sur les indicateurs climatiques et physiques qui vont être utilisés par la suite. Les données les plus récentes de sources officielles (disponibles en fin d'année 2020) –sur l'évolution des émissions de GES, de l'empreinte matérielle, du mix énergétique et de l'efficacité énergétique– ont été regroupées pour fournir un tableau de bord des facteurs prépondérants pour les politiques de transition et pour l'empreinte environnementale du numérique.

Les émissions de gaz à effet de serre

D'après le rapport « Emissions Gap 2020 » de l'UNEP (le Programme des Nations Unies pour l'Environnement) publié en novembre 2020, **les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté globalement pour atteindre la mesure record de 52,4 GtCO₂e (sans UTCATF) et 59,1 GtCO₂e (avec UTCATF) en 2019³**. Les UTCATF indiquent les émissions liées au changement d'affectation des terres et à la foresterie. Les émissions de chaque gaz (carbone, gaz fluorés, méthane, protoxyde d'azote) ont aussi augmenté individuellement. Les émissions de carbone, qui représentent 65% des émissions totales de GES, ont atteint le record de 38.0 GtCO₂ en 2019⁴.

En mettant de côté les UTCATF, les émissions de GES auraient augmenté de 1,3% par an en moyenne depuis 2010, et à hauteur de 1,1% en 2019 d'après les données préliminaires. En intégrant les émissions, difficiles à modéliser, liées aux UTCATF, **les émissions globales de GES auraient augmenté de 1,4% par an en moyenne depuis 2010** ; en 2019, elles auraient augmenté de 2,6% à cause des nombreux feux de forêts⁵.

³ « Emissions Gap Report 2020 », *United Nations Environment Programme*, 2020, p. XIV, consulté le 7 février 2021, <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>.

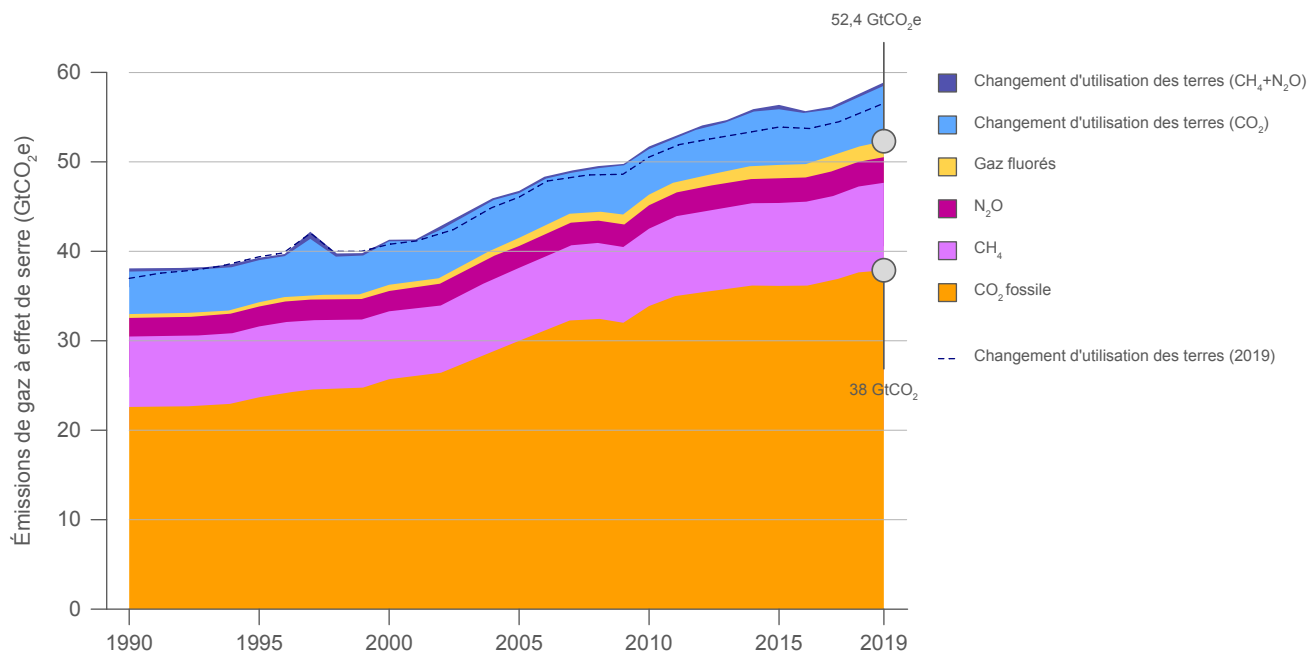
⁴ Ibid.,

⁵ Ibid., p. XIV-XV.

En somme, depuis 1990 les émissions de GES augmentent continuellement sauf lors d'événements particuliers comme la crise financière de 2008 et la crise de la COVID-19⁶. En 2019, les six plus gros émetteurs de dioxyde de carbone étaient la Chine (28%), les États-Unis (15%), l'EU27 (8%), l'Inde (7%), la Russie (5%) et le Japon (3%). Ils représentaient à eux six 65% des émissions globales de carbone⁷.

⁶ Les émissions de CO₂ auraient baissé de 7% en 2020, les émissions des autres gaz ont été moins affecté d'après « Emissions Gap Report 2020 », *Ibid.*, p. XV.

⁷ Pierre Friedlingstein et al., « Global Carbon Project 2020 », *Earth Syst. Sci. Data* n° 12, 2020, p. 26, consulté le 7 février 2021, https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/20/files/GCP_CarbonBudget_2020.pdf.



Note : La ligne pointillée montre les émissions globales depuis un jeu de données différent pour l'allocation d'utilisation des terres (Houghton and Nassikas 2017), utilisé dans le rapport précédent.

Source : traduit depuis "Emissions Gap Report 2020" UNEP, Crippa et al. (2020) ; Olivier et Peters (2020, en préparation); Friedlingstein et al. (2019)

Fig. 1 – Évolution des émissions globales de gaz à effet de serre de 1990 à 2019

Les projections de réchauffement

Les projections de réchauffement se basent sur l'évolution de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, généralement exprimé en parties par million (ppm). Cette accumulation entraîne un forçage radiatif qui va augmenter la température moyenne globale, c'est-à-dire, la moyenne des relevés de températures de l'année d'un réseau mondial de stations de mesure. Ce processus entraîne donc un réchauffement climatique exprimé par rapport au niveau des températures en 1800 (ère préindustrielle). Différents scénarios de réchauffement ont été calculés par rapport aux émissions annuelles et à leurs tendances. Le scénario de base (appelé *Business-as-Usual* (BAU)), montre l'évolution probable des températures entre +4,1 et +4,8°C de réchauffement planétaire d'ici 2100 si rien n'est fait pour inverser les tendances actuelles d'émissions. On projette ensuite le scénario de réchauffement avec les politiques de réduction des émissions actuelles, celui-ci nous amenant

plutôt de +2,7 à +3,1°C d'ici la fin du siècle. Ensuite, les projections prenant en compte les promesses de réduction des émissions de GES des États sont modélisées, allant de +2,3 à 2,6°C d'ici 2100. Certains types de programmes de réduction des émissions se rajoutent à cela, comme les objectifs de zéro émissions nettes (net-zero targets). La projection la plus optimiste, une fois ces objectifs inclus, ramène à +2,1°C d'ici 2100.

Finalement les projections visées sont celles statuées lors de l'Accord de Paris sur le Climat pour limiter le réchauffement planétaire à +2°C maximum d'ici la fin du siècle, selon les recommandations du GIEC⁸. Un scénario complémentaire à +1,5°C a été rajouté en octobre 2018 par le même groupe de travail du GIEC suite à la demande de certaines institutions politiques. Le scénario à +2°C amène un réchauffement moyen de +1,6 à +1,7°C à la fin du

⁸ « Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », IPCC, 2020, p. 11, consulté le 7 février 2021, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary_for-policymakers.pdf.

siècle. +2°C étant la limite à ne pas dépasser ce scénario tend à rester en dessous, notamment grâce à l'absence d'émissions nettes d'ici 2080. Le scénario à +1,5°C amènerait quant à lui à une température moyenne de +1,3°C, bien que celui-ci soit quasiment hors de portée maintenant. Il faut noter que c'est particulièrement la vitesse de ce réchauffement qui le rend très dangereux.

fournir. **Les politiques actuelles nous amèneraient aujourd'hui à un réchauffement de +2,9°C d'ici la fin du siècle.** Les conséquences d'un tel réchauffement sont difficiles à prédire mais ses effets influeraient sur la récurrence des vagues de chaleur, les réserves d'eau douce, l'intensité des pluies, les rendements agricoles, pour en citer quelques uns.

Ces différentes trajectoires permettent d'éclairer les choix gouvernementaux et surtout l'écart entre les politiques mises en vigueur et l'effort réel à

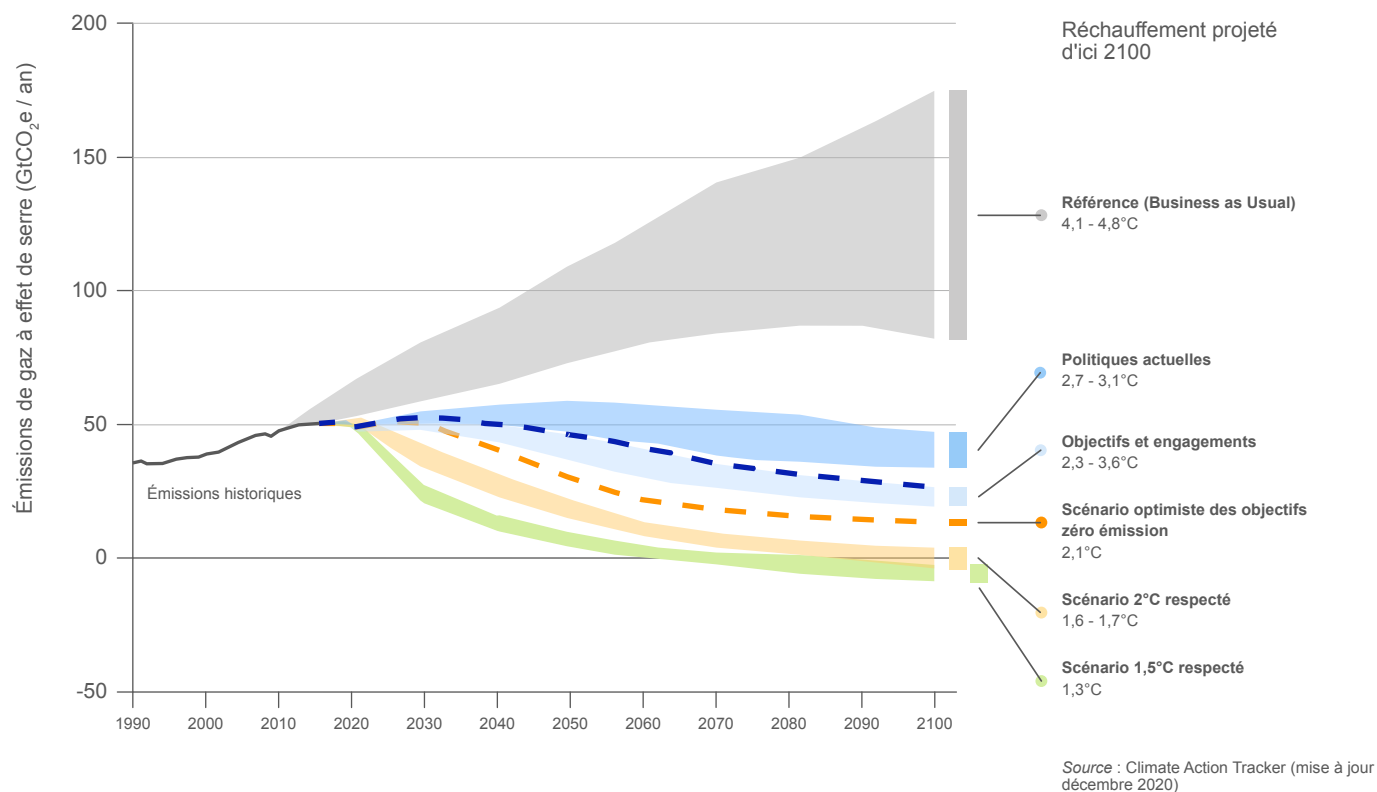


Fig. 2 – Différentes trajectoires de réchauffement global et d'émissions jusqu'en 2100

Les écarts d'émissions

Les écarts d'émissions montrent la différence entre les trajectoires nécessaires pour atteindre les objectifs de stabilisation de température et les trajectoires liées aux politiques actuelles. Les politiques de transition sont généralement liées aux contributions déterminées au niveau national : les CDN ou NDCs pour *Nationally Determined Contributions*. Les CDN indiquent de combien un pays est prêt à réduire ses émissions. Il existe deux types de CDN, celles inconditionnelles, c'est-à-dire, celles possibles avec seulement les ressources du pays en question, et les conditionnelles, c'est-à-dire, celles possibles si un soutien international d'ordre technique et financier est mis en place et si d'autres conditions sont réunies (ambition collective, mécanismes de marché, etc.). En résumé les CDN inconditionnelles sont le minimum à faire au niveau national ; les CDN conditionnelles sont ce qu'il est possible de faire grâce à une coopération internationale réelle.

D'après le rapport le plus récent de l'UNEP, **les écarts d'émissions entre l'objectif de stabilisation à +2°C et les CDN inconditionnelles**

sont de l'ordre de 15 GtCO₂e et de 12 GtCO₂e pour les CDN conditionnels par rapport à l'année 2030. Pour atteindre l'objectif de stabilisation à +1,5°C, l'écart est de 32 GtCO₂e par rapport aux CDN inconditionnelles et de 29 GtCO₂e pour les CDN conditionnelles, toujours en référence à 2030.

En résumé, **il est très improbable de respecter l'objectif de +1,5°C mais il reste encore une certaine marge de manœuvre pour atteindre l'objectif de +2°C.** Le rapport des Nations Unies estime que : « Les CDN actuels restent très insuffisants pour atteindre les objectifs climatiques de l'accord de Paris et entraîneraient une augmentation de la température d'au moins 3°C d'ici la fin du siècle. Les objectifs d'émissions nettes zéro (*net-zero targets*) récemment annoncés pourraient réduire cette augmentation d'environ 0,5°C, à condition que les CDN à court terme et les politiques correspondantes soient conformes aux objectifs d'émissions nettes zéro.⁹ » Plus nous attendons, plus l'écart se creuse et plus il sera difficile de respecter l'objectif à +2°C car les réductions annuelles d'émissions seraient alors plus radicales.

⁹ « Emissions Gap Report 2020 », *United Nations Environment Programme*, 2020, p. XXI, consulté le 7 février 2021, <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>.

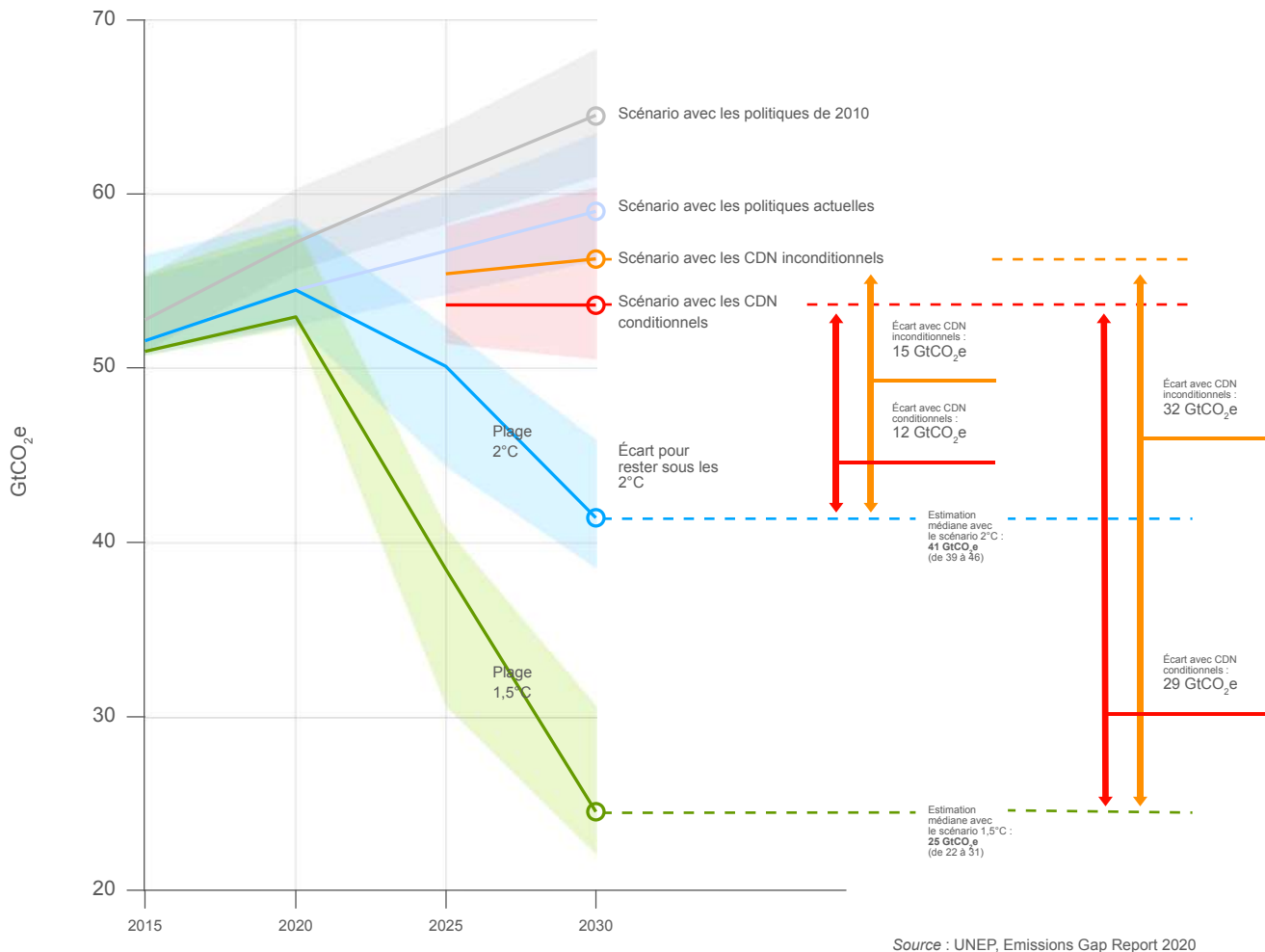


Fig. 3 – Écarts d'émissions entre les trajectoires actuelles, les engagements actuels et les scénarios à +1,5°C et + 2°C

L'empreinte matérielle et son intensité

L'empreinte matérielle est la somme des matières brutes extraites pour répondre à une consommation finale. Elle inclut principalement les métaux, les énergies fossiles, la biomasse et les minerais non-métalliques (sable, roche, etc.). D'après les données de l'Organisation des Nations Unies (ONU), l'empreinte matérielle était de 92 Gt en 2017. L'empreinte matérielle a augmenté de 70% depuis 2000 (54 Gt) ou de 113% depuis 1990 (43 Gt)¹⁰. **Depuis 2000, le taux d'extraction des ressources naturelles a accéléré ; si aucune action n'est engagée, l'ONU projette une empreinte matérielle à hauteur de 190 Gt d'ici 2060.** On observe depuis une vingtaine d'années que l'augmentation de l'empreinte matérielle est

corrélée à l'augmentation du PIB. Toutefois, **l'empreinte matérielle augmente maintenant plus vite que le PIB, et surtout bien plus vite que la population.** A priori, l'empreinte matérielle est bien plus liée à la croissance économique qu'à la croissance de la population.

L'ONU rappelle que les modes de vie des pays riches ou des catégories socio-professionnelles à revenu élevé dépendent largement des pays pauvres où sont extraites les ressources. **Alors qu'un individu à faible revenu n'aurait qu'une empreinte de 2 tonnes en 2017, un individu à fort revenu aurait plutôt une empreinte de 26,3 tonnes.**

¹⁰ « Goal 12 : Responsible Consumption and Production, Ensure sustainable consumption and production patterns », *Organisation des Nations Unies*, consulté le 7 février 2021, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-12/>.

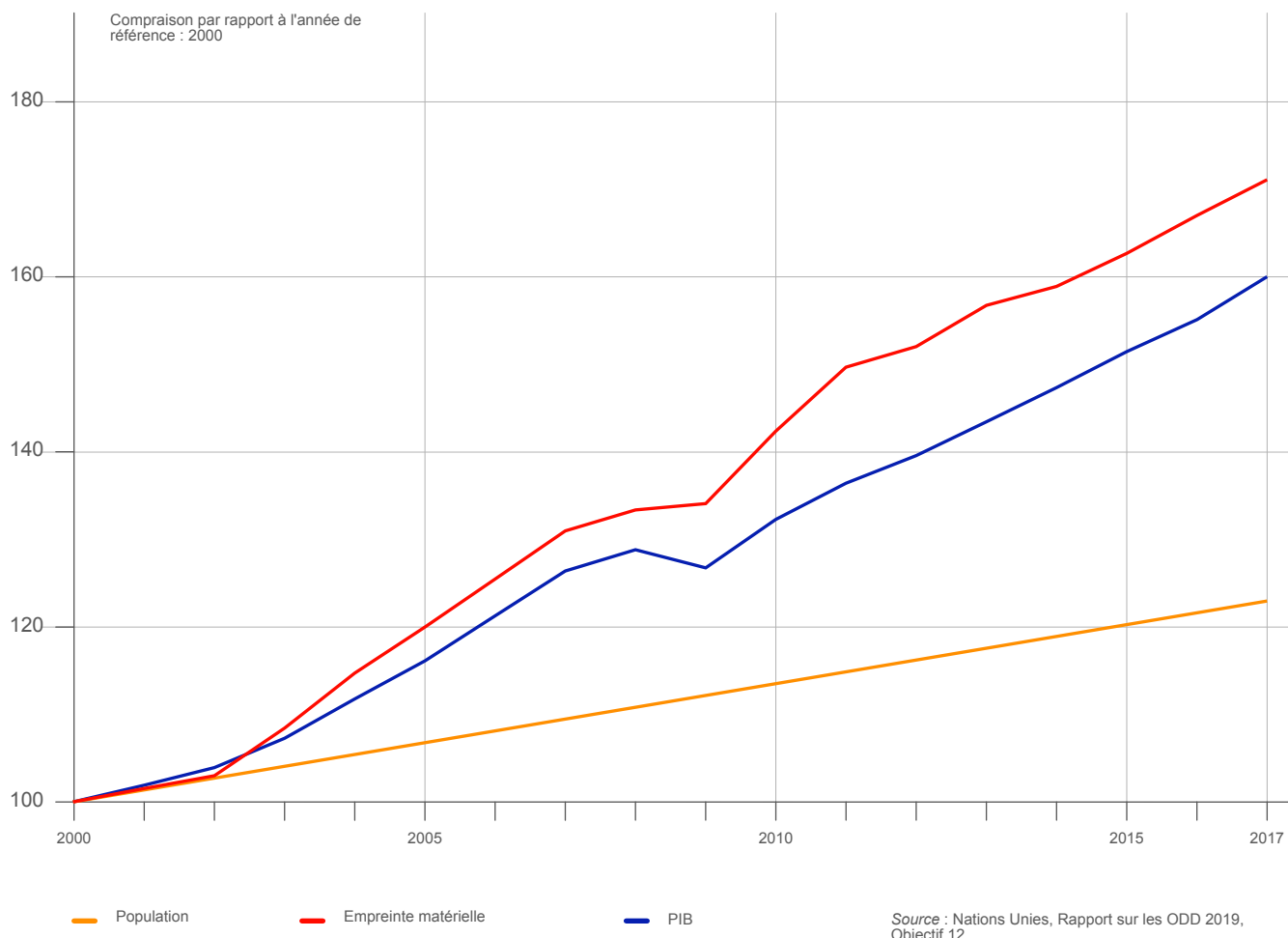


Fig 4 – Croissance du PIB, de l’empreinte matérielle et de la population, 2000-2017

L’OCDE a fait des projections plus précises sur les trajectoires de consommation de ressources d’ici 2060. **Elle estime, pour sa part, que l’empreinte matérielle atteindra 167 Gt en 2060 dont la moitié liée aux minerais non-métalliques (sable, roche, etc.)¹¹.** Il est intéressant de noter que l’empreinte matérielle projetée par l’OCDE en 2060 serait de 362 Gt mais des changements structurels réduiraient cette empreinte de 112 Gt et d’autres changements technologiques soustrairaient 84 Gt pour arriver au résultat final de 167 Gt en 2060.

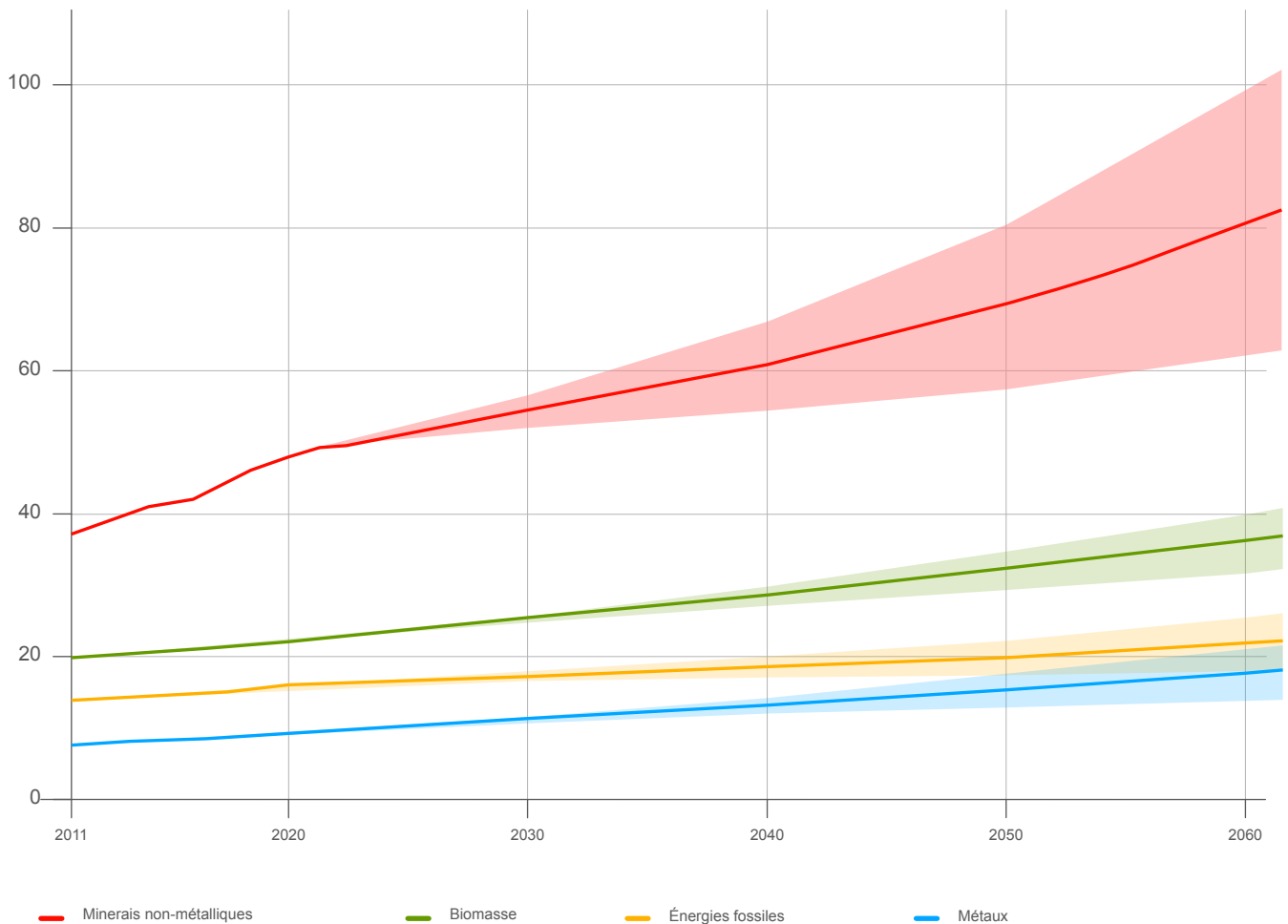
L’OCDE explique l’augmentation de l’empreinte matérielle par une augmentation encore plus forte du PIB entre 2011 et 2060. Par exemple, le PIB par habitant serait multiplié par 2,7 alors que

l’empreinte matérielle ne serait multipliée que par 2,1 et la population par 1,5 entre 2011 et 2060¹². L’OCDE mise sur une amélioration de l’intensité matérielle pour projeter une empreinte matérielle qui augmenterait moins vite que le PIB mondial. **Alors que l’intensité matérielle avait seulement été réduite de 1,1% entre 1980 et 2017, l’OCDE estime qu’elle pourrait être réduite de 1,3% entre 2017 et 2060¹³.** Cela veut dire qu’entre 2017 et 2060, il faudrait 1,3% moins de matières chaque année pour produire une unité de PIB. L’OCDE estime que cette amélioration continue ralentirait en partie l’augmentation de la consommation de ressources liée à la croissance économique et à l’évolution de la population.

¹¹ « Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic drivers and environmental consequences – Highlights », *OECD Publishing*, 2018, p. 11, consulté le 7 février 2021, <http://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>.

¹² *Ibid.*, p. 4.

¹³ *Ibid.*, p. 5.



Source : OCDE, Global Material Resources Outlook to 2060

Fig 5 – Croissance projetée de l'usage des matières premières jusqu'en 2060

L'évolution du mix énergétique

Le charbon, le pétrole et le gaz représentent 80% de la consommation énergétique mondiale où seul le charbon commence à décroître depuis les quatre dernières années. **Le pétrole et le gaz continuent leur progression, toutefois le taux de croissance le plus élevé est celui des énergies renouvelables avec presque 12% de croissance en quatre ans¹⁴.**

À part pour le charbon, les énergies fossiles continuent à prendre toujours plus de place dans le mix énergétique mondial. Bien que la croissance des renouvelables soit bienvenue elle

représente une part bien trop faible par rapport à la demande énergétique globale. L'évolution du mix énergétique est toujours surveillée de près car les politiques de transition (stratégie bas-carbone, scénario zéro-émissions nettes) s'appuient généralement sur plusieurs stratégies liées à l'énergie :

- réduction de la demande d'énergie (transition vers une consommation moins intensive en énergie, augmentation de l'efficacité énergétique) ;
- décarbonation du mix (décroissance des énergies fossiles et croissance des énergies renouvelables) ;

¹⁴ Pierre Friedlingstein et al., « Global Carbon Project 2020 », *Earth Syst. Sci. Data* n° 12, 2020, p. 42, consulté le 7 février 2021, https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/20/files/GCP_CarbonBudget_2020.pdf.

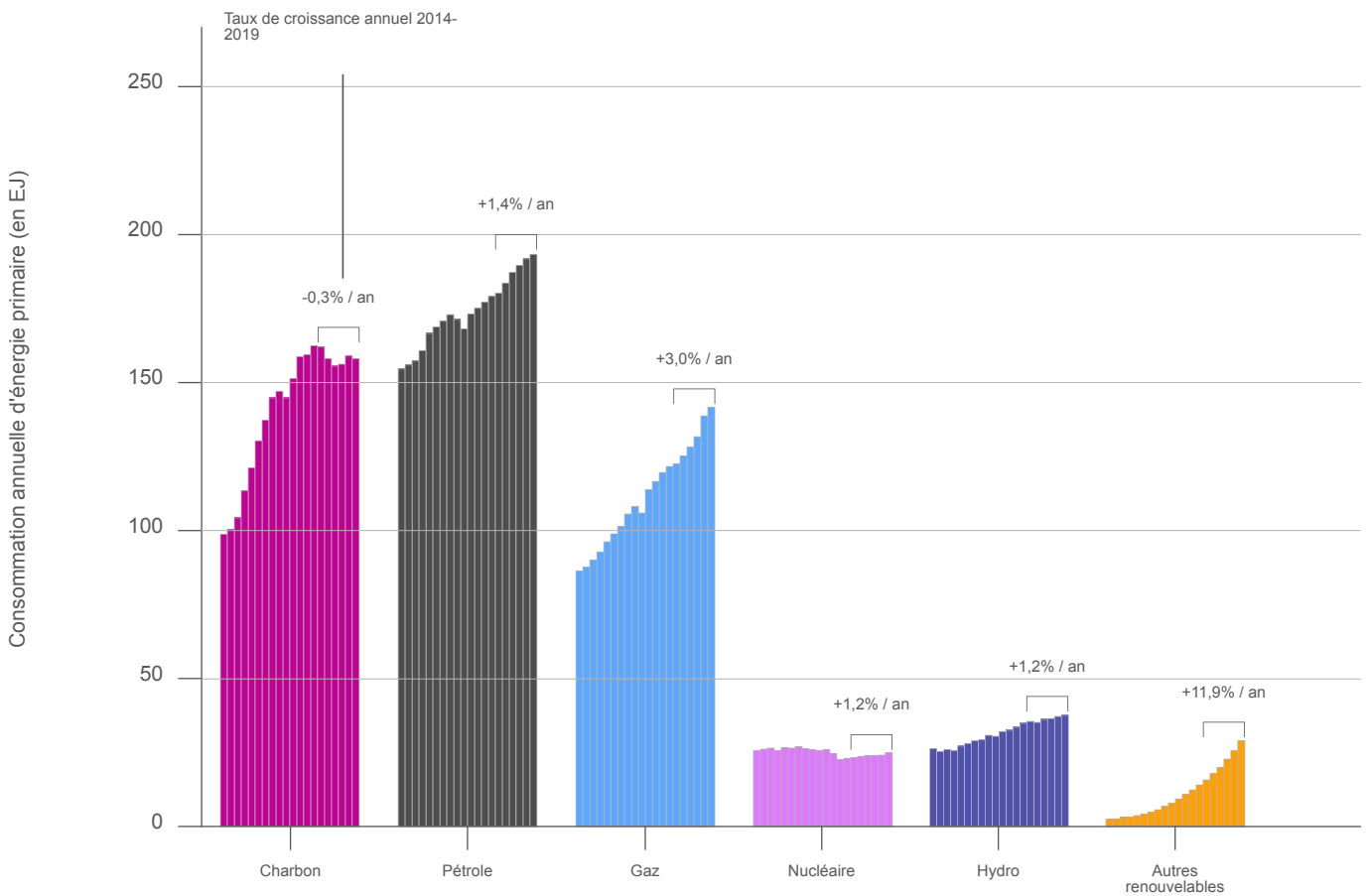
- électrification des secteurs consommateurs d'énergie fossile (voitures électriques, pompes à chaleur, etc.) ;
- décarbonation des usages non-électriques (chauffage urbain, raffinage, etc.) ;
- élimination du dioxyde de carbone (EDC ou Carbon Dioxide Removal en anglais) à travers la reforestation (UTCATF) et les techniques de capture de carbone¹⁵.

Même si la décarbonation du mix énergétique avance régulièrement la croissance de la consommation mondiale repose toujours en bonne partie sur la croissance de la production d'énergie fossile. De ce fait, les stratégies de

réduction de la demande d'énergie ne sont pas forcément perceptibles au niveau mondial. Par exemple, la croissance de la production d'électricité, entre 2015 et 2018, a inclus 949 TWh de gaz, 417 TWh de charbon et 1405 TWh d'énergie renouvelable¹⁶. Au final, autant d'énergies fossiles que d'énergie renouvelable ont été rajoutées de même manière pour accompagner l'augmentation de la consommation¹⁷. **La réduction de la demande d'énergie est cruciale pour que la décarbonation soit possible.**

¹⁵ « Net-zero Pathways for Industrialized Countries », *Climate Scenarios*, consulté le 7 février 2021, <https://climatescenarios.org/countries-pathways>.

¹⁶ « Energy Efficiency 2019 », *International Energy Agency*, consulté le 7 février 2021, <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2019>.
¹⁷ 1405 – (949+417) = 39 TWh d'EnR dans le mix initial.



Source : traduit depuis "Global Carbon Budget 2020", BP 2020, Jackson et al. 2019.

Fig 6 – Évolution de la consommation d'énergie primaire de 2000 à 2019

L'efficacité énergétique

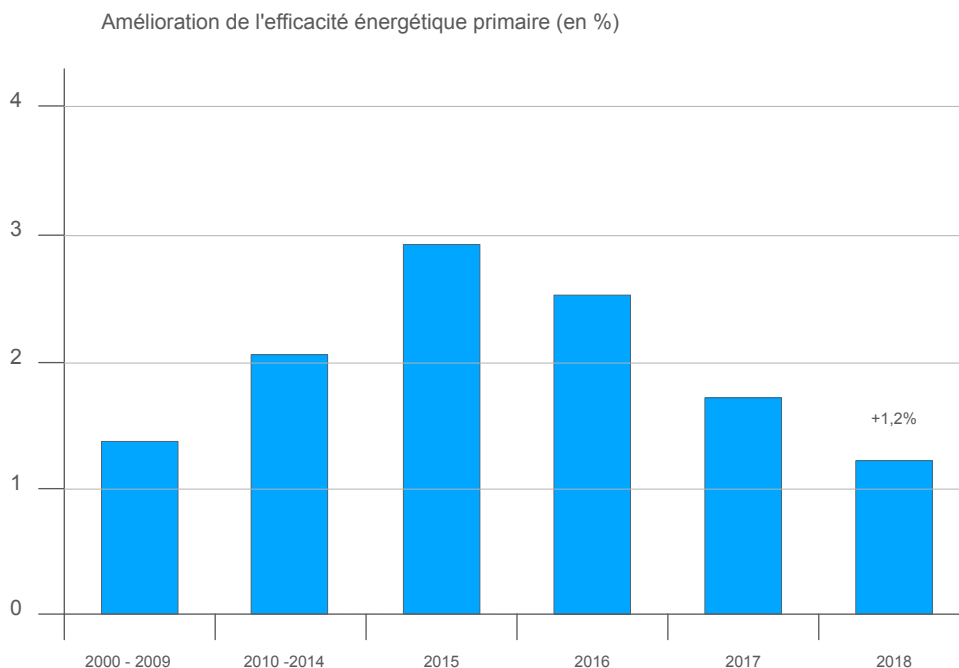
Face à l'augmentation de la consommation d'énergie en valeur absolue, l'efficacité énergétique permet d'estimer si l'énergie est utilisée de façon plus « productive », c'est-à-dire, combien d'énergie primaire est nécessaire pour produire une unité de PIB. L'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) estime que l'amélioration de l'efficacité énergétique est en déclin depuis 2015¹⁸. Cela indique que les secteurs d'activité arrivent toujours à utiliser efficacement de l'énergie mais que cette dynamique s'essouffle. **Selon l'IEA, l'amélioration de l'efficacité énergétique n'aurait été que de 1,2% en 2018, le plus faible**

taux depuis 2010¹⁹. Ce même organisme et les Nations Unies estiment qu'une amélioration de l'efficacité énergétique de 3% est nécessaire pour maintenir le niveau de croissance de PIB projeté et pour stabiliser en même temps les émissions de GES²⁰.

¹⁸ « Energy Efficiency 2019 », *International Energy Agency*, consulté le 7 février 2021, <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2019>.

¹⁹ Ibid.,

²⁰ « Rapport sur les objectifs de développement durable 2020 », Organisation des Nations Unies, 2020, p. 39, consulté le 7 février 2021, https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_French.pdf.



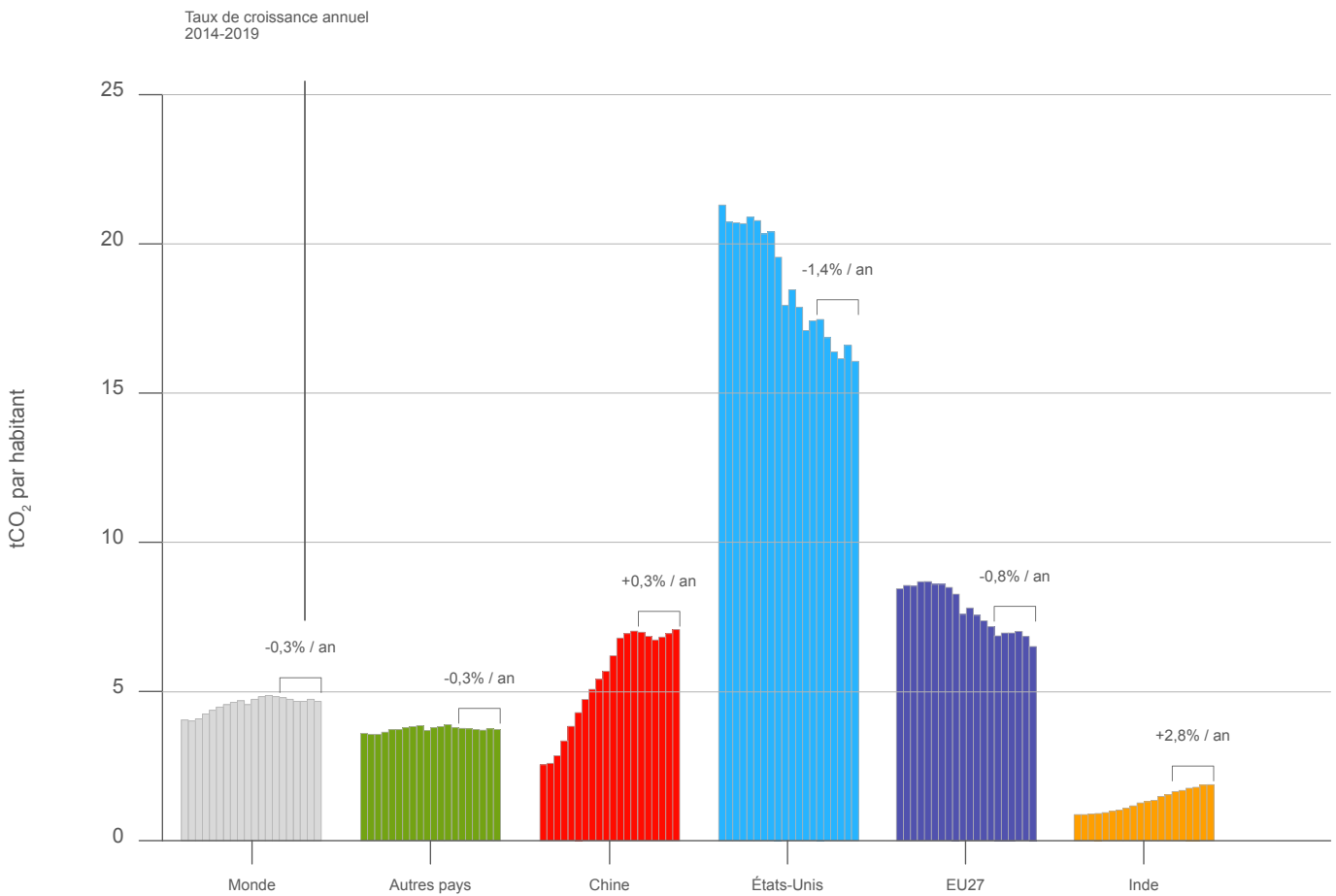
Source : IEA 2018

Fig 7 – Évolution de l'efficacité énergétique primaire de 2000 à 2018

Remarques générales

Il est nécessaire d'observer avec prudence ces données moyennes globales car elles ne donnent pas à voir les évolutions propres à chaque pays et à chaque secteur d'activité (transport, agriculture, énergie, industrie, etc.). **Chaque pays n'évolue pas à la même vitesse et n'a pas la même responsabilité.** Au fur et à mesure de ce rapport les données nationales seront mises en avant lorsque cela est nécessaire pour éviter toute erreur d'analyse. Par exemple, les émissions par habitant des États-Unis témoignent d'un mode de vie très intense en carbone, et supposément en énergie et en matière, loin devant les autres grands émetteurs mondiaux.

Toutefois, **ces données globales montrent que les trajectoires de réduction des émissions de GES ne sont pas encore respectées.** Plus l'écart se creuse entre ces trajectoires et nos émissions réelles et plus il sera difficile de stabiliser la température sur Terre. La consommation d'énergie continue à augmenter réduisant l'impact de la décarbonation, au moment même où l'efficacité énergétique commence à stagner. Un indicateur non-climatique est souvent associé à ces projections et dans un des rapports analysés plus bas : la croissance du PIB. Il s'agit bien là d'une pomme de discorde parmi la communauté des



Source : traduit depuis "Global Carbon Budget 2020", Jackson et al. 2019, (CDIAC/ UNFCCC/BP/USGS/UN)

Fig 8 – Évolution de l'empreinte carbone nationale par habitant de 2000 à 2019

économistes et au-delà : pouvons-nous réduire nos émissions et notre empreinte tout en maintenant la croissance de cet indicateur – ce qu'on appelle le découplage. Il existe plusieurs façons d'envisager et d'invoquer le découplage : relatif / absolu, local / global, GDP / ressources & impacts, temporaire / permanent, suffisant / insuffisant²¹.

En juin 2020, Haberl et al ont publié une revue systématique de toutes les publications scientifiques étudiant les découplages, soit 835 publications dans des journaux à comité de lecture et des chapitres de livres²². Ils concluent leur revue en estimant que la poursuite des tendances observées dans le passé ne permet pas de découplage absolu. Les découplages observés sont soit relatifs à des contextes très

particuliers, soit insuffisants par rapport aux efforts de transition à fournir en valeur absolue. En somme, un découplage PIB / ressources & impacts ne serait pas suffisant pour atteindre les objectifs fixés par l'Accord de Paris. La prudence impose alors d'envisager des scénarios de réduction du PIB afin de réduire les émissions. Il ne s'agit pas ici de formuler un avis sur le débat croissance / décroissance. Néanmoins, le secteur numérique sera amené tôt ou tard dans ce débat dont il faut commencer à tracer les contours. De même, il semble pertinent de considérer l'ensemble des stratégies à notre disposition et leur effet possible dans le secteur qui nous intéresse : le numérique.

²¹ Timothée Parrique, « Decoupling debunked: Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability », European Environmental Bureau, 2019, p.11-16, consulté le 7 février 2021, <https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>.

²² Haberl et al., « A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights », Environ. Res. Lett. n°15, 2020, consulté le 7 février 2021, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab842a/meta#erlab842as5>.

**Peser
le numérique**

Peser le numérique : les différentes hypothèses de consommation d'énergie et d'émissions de GES du secteur

Relativement peu de chercheurs se sont lancés dans l'estimation globale de la consommation énergétique et des émissions de GES du numérique : **c'est un sujet complexe avec pas suffisamment de données disponibles**. C'est un fait saillant de ce champ de recherche : la recherche manque cruellement de données. Celles-ci sont confidentielles, pour raison de secret industriel, soit les mesures n'ont jamais été faites et il n'y a pas de données existantes, soit les données sont de trop mauvaise qualité, ou incertaines, pour être utilisées.

Sur la question de l'estimation globale, trois équipes développent des modèles différents : il y a Jens Malmodin (Ericsson) et Dan Lundén (Telia) ; Anders S.G. Andrae (Huawei) et Tomas

Edler (ancien Ericsson, devenu Huawei) ; Lotfi Belkhir et Ahmed Elmeligi (McMaster University). Chacune de ces équipes a publié un ou des articles de référence sur l'estimation globale et ses projections dans le futur.

L'estimation des impacts environnementaux du numérique se découpe en trois pôles : centres de données, réseaux, équipements utilisateurs. Pour chacun de ces pôles on estime aussi l'empreinte pour la phase de fabrication et d'usage. Aujourd'hui on ne sait pas encore intégrer les impacts liés à la fin de vie car ils seraient marginaux sur les émissions et la consommation d'énergie (mais très importants sur d'autres facteurs : ecotoxicité, biodiversité, etc.). Selon

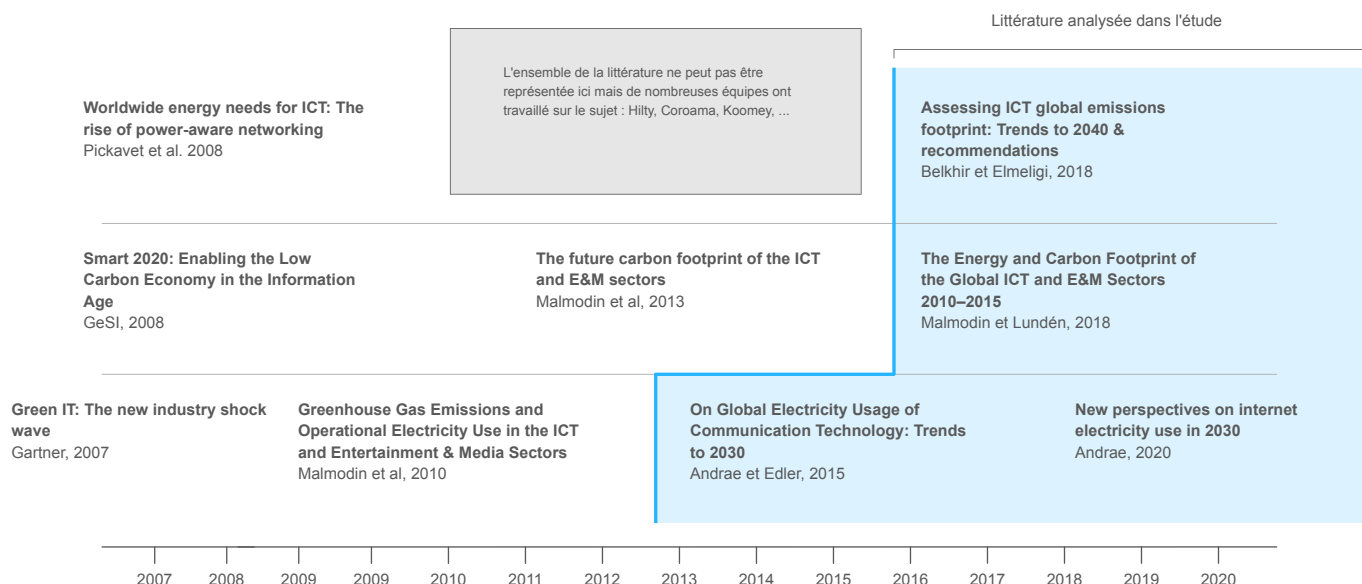


Fig 9 – Littérature étudiée sur l'estimation globale de consommation d'énergie et d'émissions de GES du numérique

une méthodologie d'analyse de cycle de vie simplifiée (ACV), l'empreinte est estimée selon 4 facteurs : consommation d'énergie primaire, consommation de ressources abiotiques (métaux, etc.), consommation d'eau douce, émissions de gaz à effet de serre. Les trois équipes mentionnées utilisent des ACV dans leur bibliographie mais ne partent pas d'une méthodologie ACV dans le sens où ils n'étudient pas un service ou un produit en détail. Ils utilisent des méthodes d'estimation appelées top-down et bottom-up qui se concentrent uniquement sur la

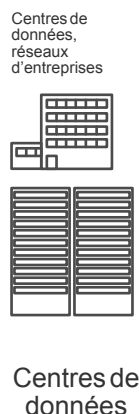
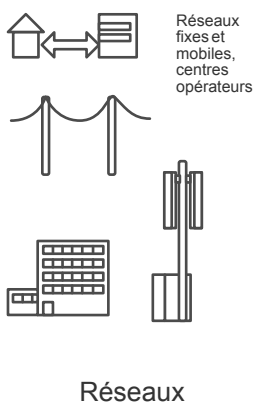
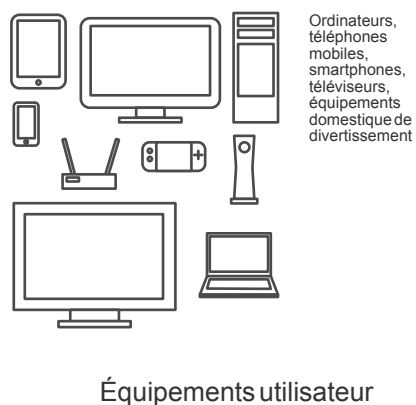
consommation d'énergie (sous forme d'électricité) et les émissions de gaz à effet de serre. Les facteurs liés à la consommation de ressources (métaux, eau, etc.) et les pollutions ne sont pas étudiés. Les trois études exposées se concentrent uniquement sur la consommation d'énergie, non-exhaustive, et sur les émissions de gaz à effet de serre, avec une grande focalisation sur le carbone. **Ces études offrent donc une version partielle de l'empreinte environnementale du numérique.** Les raisons de cette focalisation seront explicitées par la suite.

On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 ; New Perspectives on Internet Electricity Use in 2030

Andrae et Elder, 2015

Andrae, 2020

Inclut



N'inclut pas



Périmètre

L'étude d'Andrae et Edler a été publiée en 2015²³, elle se concentre sur un périmètre incluant les équipements utilisateurs principaux (ordinateurs, téléphones mobiles, smartphones, téléviseurs et équipements domestiques de divertissement), les réseaux télécom, les centres de données. L'étude n'inclut pas : les imprimantes, les appareils photo et caméra, les baladeurs audio et vidéo, les objets connectés (thermostats connectés, etc.), les systèmes de sécurité, les satellites, les drones personnels, les robots, les véhicules autonomes et les batteries portatives.

Facteur d'intensité carbone du mix électrique

630gCO₂e / kWh (2010)

590gCO₂e / kWh (2020)

580gCO₂e/kWh (2030)

Influence

Cette étude a été publiée avec l'ensemble des données utilisées, ce qui doit être noté tant le geste est rare, et a un périmètre d'analyse très large. Cette étude a permis au think tank The Shift Project de produire à partir de 2019 un modèle simplifié (1byte) et plusieurs rapports qui ont rencontré un écho important en France, ainsi qu'à d'autres chercheurs de partir sur une

²³ Anders S. G. Andrae et Tomas Edler, « On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 », Challenges n° 6, 2020, pp. 117-157 .

		2015	2020	2030
Consommation d'énergie (TWh) <i>Étude 2015</i>	Meilleur	1 509	1 507	2 698 (8%)
	Attendu	2 312	2 878	8 265 (21%)
	Pire	3 677	5 976	30 715 (51%)
Émissions de GES (GtCO ₂ e) <i>Étude 2015</i>	Meilleur	0,9	0,9 (1,6%)	1,5 (2,2%)
	Attendu	1,4	1,7 (3%)	4,8 (6,7%)
	Pire	2,3	3,6 (6,2%)	19,9 (23%)
Consommation d'énergie (TWh) <i>MàJ 2020</i>	Meilleur	1 350	1 204	1 357 (4%)
	Attendu	1 938	1 988	3 218 (9%)
Émissions de GES (GtCO ₂ e) <i>MàJ 2020</i>	Meilleur	0,8	0,7 (1,9%)	0,7 (1,8%)
	Attendu	1,1	1,1 (3%)	1,7 (4,2%)

nouvelle base de données qu'il est difficile de critiquer. Ce qui sera d'ailleurs fait en 2018 par Belkhir et Malmodin.

Résultats

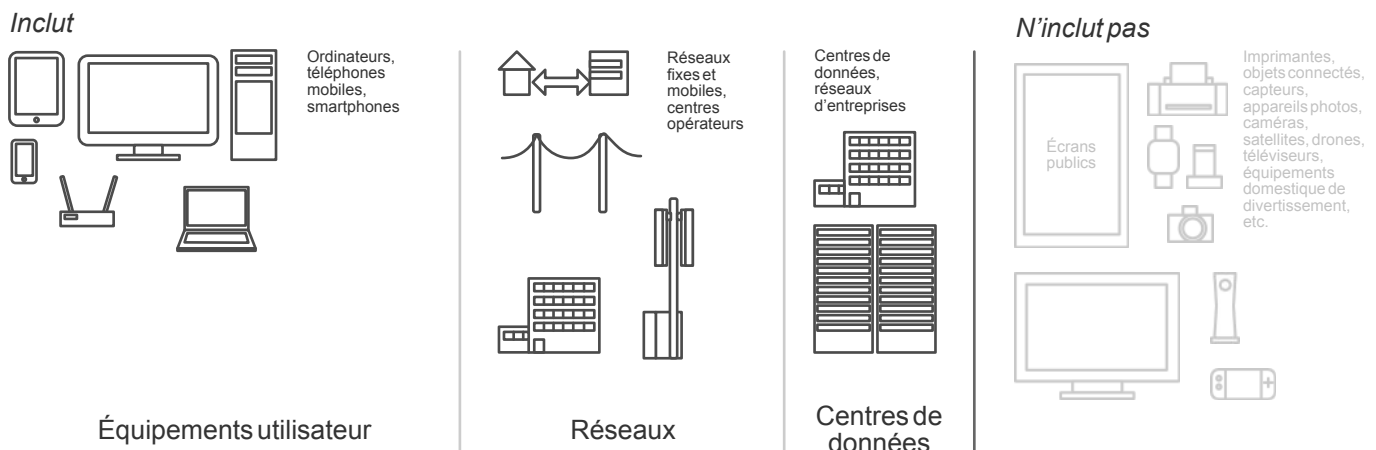
Andrae et Edler estiment que la consommation électrique du numérique pourrait représenter entre 8 et 21% de la consommation globale en 2030. En 2020, Andrae corrige ses estimations pour un nouveau scénario médian à 9% d'ici 2030²⁴. Dans l'étude de 2015 les auteurs estiment la part des émissions de GES du numérique entre 2,2 et 6,7% d'ici 2030. La mise à jour de 2020 propose 1,8 à 4,2% des émissions du numérique rapportées aux émissions globales d'ici 2030.

Critique

Andrae et Edler intègrent la consommation d'énergie et les émissions de GES à l'usage et à la fabrication. Cette étude comporte des erreurs connues, corrigées en 2020. Les auteurs ont

surestimé la consommation de la partie Réseaux (RAN) et, dans une moindre mesure, celle de la partie Centres de données. Cette erreur est liée au manque de données disponibles au moment de la publication et à la sous-estimation de l'efficacité énergétique des réseaux et des centres de données. De plus, Andrae et Edler ont utilisé des fonctions non linéaires pour faire leurs projections à horizon 2030, donc les erreurs de départ ont été amplifiées par la suite. Le pire scénario projeté par cette étude n'est donc pas pertinent et ne peut pas être utilisé en l'état.

²⁴ Anders S. G. Andrae, « New perspectives on internet electricity use in 2030 », Eng. Appl. Sci. Lett. n° 3, 2020, pp. 19-31.



Périmètre

L'étude de Belkhir et Elmelegi²⁵ intègrent les centres de données, les réseaux et les équipements de type ordinateurs fixes et portables, écrans CRT et LCD, smartphones et tablettes. Elle n'intègre pas les équipements de télévision (décodeurs), les imprimantes, les « smart » TVs, les consoles de jeux et les objets connectés. L'étude utilise une méthode bottom-up pour les équipements utilisateurs et une méthode top-down pour les centres de données et les réseaux.

Facteur d'intensité carbone du mix électrique
500gCO₂e / kWh

Influence

L'étude de Belkhir et Elmelegi relèvera que l'étude de Malmodin de 2010²⁶ sous-estime largement la part de la fabrication dans la consommation d'énergie et les émissions de GES. Elle indiquera aussi qu'Andrae et Edler surestiment la consommation électrique de la partie Réseaux et utilise des durées de vie d'équipements trop courtes par rapport à la littérature.

Résultats

Belkhir et Elmelegi estiment qu'en 2020 les émissions de GES du secteur représentent 3,06 à 3,6% des émissions globales. Ils mettent en avant l'accélération de la contribution des smartphones,

représentant plus de 50% de l'empreinte des équipements utilisateurs. Ils estiment aussi que les centres de données représentent 45% des émissions du secteur en 2020. En tendant les scénarios jusqu'en 2040 avec une progression linéaire puis exponentielle, les auteurs de l'étude estiment que, dans sa dynamique actuelle, les émissions du secteur représenteraient 6 à 7% des émissions globales en progression linéaire et 14% en progression exponentielle. À partir des scénarios utilisés, cette étude estime la croissance annuelle des émissions de GES à 7,3%.

		2020
Émissions de GES (GtCO ₂ e)	Linéaire (Min)	1,10 (1,7%)
	Linéaire (Max)	1,30 (2,2%)
	Exponentielle (Min)	1,85 (3%)
	Exponentielle (Max)	2,2 (3,6%)

Critique

Les limites de ces résultats sont liées au fait qu'ils utilisent la croissance historique observée pour extrapoler la croissance future, ce qui ne permet pas d'intégrer les gains en efficacité énergétique. Ils utilisent aussi un périmètre (« scope ») assez restreint sur les équipements utilisateurs qui amène à une sous-estimation de l'empreinte générale. De

²⁵ Lofti Belkhir et Ahmed Elmeligi, « Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations », Journal of Cleaner Production n° 177, 2018, pp. 448-463.

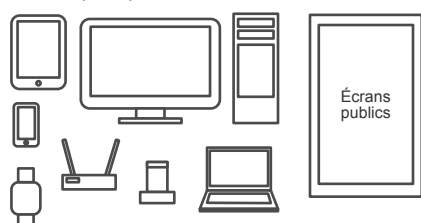
²⁶ Jens Malmodin, "Greenhouse gas emissions and operational electricity use in the ICT and entertainment & media sectors », J. Ind. Ecol. n° 14, 2020, pp. 770-790.

plus, l'estimation de la consommation électrique des centres de données semble trop élevée par rapport à la littérature, cela peut être dû à l'intégration de données venant des centres asiatiques.

The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015

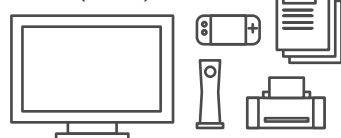
Malmodin et Lundén, 2018

Inclut (ICT)



Ordinateurs, téléphones mobiles, smartphones, objets connectés (grand public), capteurs

Inclut (E&M)



Téléviseurs, équipements domestique de divertissement, imprimantes, média papier,

Équipements utilisateur

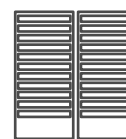


Réseaux fixes et mobiles, centres opérateurs



Réseaux

Centres de données, réseaux d'entreprises



Centres de données

N'inclut pas



Capteurs, appareils photos, caméras, objets connectés (professionnels), satellites, drones, etc.

Périmètre

Le périmètre de l'étude²⁷ présente un découpage peu commun entre ICT (Information Communication Technologies) et E&M (Entertainment & Media). La partie ICT regroupe les réseaux d'accès, les centres de données, les équipements utilisateurs, les activités des opérateurs (voyages des employés, bureaux, équipements professionnels, etc.), les écrans publics, tous types de téléphones, les routeurs et modems (CPE). La partie E&M regroupe les téléviseurs, les réseaux télé, les périphériques télé, les consoles, les imprimantes, l'impression papier, les activités liées à la création de contenu pour l'ICT et l'E&M. Les émissions de GES et la consommation d'énergie sont divisés entre ces deux pôles en incluant ou en excluant parfois certaines sections comme l'impression papier.

Facteur d'intensité carbone du mix électrique 600gCO₂e/kWh (2007-2015)

Influence

Jens Malmodin et Dag Lundén publient leurs premières études sur le sujet dès 2010, puis en 2013 et en 2015, mais c'est finalement leur étude de 2018 qui est la plus poussée et qui va être de fait la plus utilisée. L'étude de 2018 a pour but de répondre à un des défis sur le sujet : le manque de données. Malmodin et Lundén vont réussir à obtenir des données confidentielles d'au moins 10 opérateurs. De plus ils vont s'appuyer sur les données publiques de 36 opérateurs télécom, 31 fabricants et 10 opérateurs de centres de données, ainsi que les ACV d'une trentaine d'études. De toutes les études présentées c'est la seule qui est utilisée par les professionnels des télécommunications et de l'ICT.

Résultats

Les auteurs de l'étude essaient de favoriser les approches *bottom-up* mais intègrent aussi quelques approches *top-down* pour vérifier des hypothèses. Au final, cette étude présente une

²⁷ Jens Malmodin et Dag Lundén, « The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015 », Sustainability 10, n° 9, 2018, p. 3027.

consommation d'énergie des *ICT* qui représenterait 3,6% de la consommation mondiale (805 TWh), l'*E&M* qui représenterait 2,8% (585 TWh) ou un peu moins en excluant l'impression papier (510 TWh). En termes d'émissions des GES, Malmodin et Lundén estiment que l'*ICT* représente 1,4% des émissions mondiales (730 Mt) et l'*E&M* 1,2% (640 Mt), ou 0,78% en excluant le papier (420 Mt). Si on présente une somme totale de l'*ICT* et de l'*E&M* (en excluant le papier), cela revient à 1315 TWh, soit 6,05% de la consommation d'énergie mondiale, et 1150 Mt de GES, soit 2,18% des émissions globales.

	2015	2020
Consommation d'énergie (TWh) hors papier	1 315 (6%)	-
Émissions de GES (GtCO ₂ e) hors papier	1,153 (2,2%)	1,087

Critique

Les résultats de l'étude de Malmodin et Lundén présentent l'estimation la plus basse en termes d'émissions. Les auteurs estiment que l'empreinte énergétique et carbone du secteur a diminué entre 2010 et 2015 et projettent une tendance à la diminution dans les années à venir. Ils étayaient cette hypothèse par une grande amélioration de l'efficacité énergétique des équipements, la baisse des ventes de TV et d'ordinateurs, la dématérialisation de certains équipements par des applications (radio-réveil, etc.), et la baisse de la consommation de papier grâce au numérique. L'étude finit d'ailleurs avec une note positive : "At least for the ICT and E&M sectors, it seems that the age of dematerialization has finally arrived"²⁸.

Cependant cette étude fait des hypothèses qui peuvent être questionnées. Premièrement, **les auteurs ne souhaitent pas travailler depuis des données d'énergie primaire et n'intègrent donc pas l'ensemble de la consommation d'énergie primaire, comme les autres études**

présentées. Ils justifient leur choix par le manque de données sur l'énergie primaire durant la phase de production et la complexité de la vérification des données. **Là où une analyse de cycle de vie va prendre en compte l'ensemble de la consommation d'énergie primaire à la fabrication et à l'usage, l'étude se concentre plutôt sur les données de la phase d'usage et réintègre la phase de fabrication en estimant que celle-ci représente en moyenne 20% de la consommation d'énergie totale. Les études d'Andrae et Edler partent d'ailleurs de la même hypothèse. L'impact de la phase de fabrication semble donc sous-estimé par rapport aux résultats d'ACV d'équipements électroniques : la fabrication d'un smartphone représente en moyenne 80 à 90% de la consommation d'énergie de l'appareil, 70% pour un ordinateur portable.** Par exemple, les auteurs estiment que l'empreinte carbone d'un smartphone est de 45kgCO₂e²⁹ sur une durée de vie de 3 ans, alors que les modèles de smartphones sur le marché depuis 2013 affichent généralement une empreinte carbone supérieure à 50 kgCO₂e et une durée de vie de 2 ans³⁰.

De même, comme le soulèvent les auteurs, les données sur lesquelles s'appuie l'étude peuvent être potentiellement biaisées car les acteurs qui les fournissent ont déjà entamé des démarches d'efficacité et de transition. Notamment les jeux de données utilisés pour estimer la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ des centres de données proviennent en partie des acteurs américains et allemands. L'absence de données provenant notamment des centres de données asiatiques est problématique. Il est possible que l'extrapolation au niveau global que propose Malmodin et Lundén soit basée sur des chiffres optimistes, malgré le soin qu'ont pris les auteurs à réduire ce risque. **Une des conclusions intéressantes proposée par cette étude est que la consommation d'énergie de l'ICT augmente bien mais qu'elle n'est peut-être pas corrélée au flux de données (trafic) mais plutôt au volume d'abonnements.**

²⁸ Traduction personnelle : « Au moins dans le secteur de l'ICT et l'E&M, il semblerait que l'âge de la dématérialisation a finalement commencé. »

²⁹ Jens Malmodin et Dag Lundén, « The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015 – Supplementary Material », Sustainability 10, n° 9, 2018, p. 3.

³⁰ « iPhone 5s Environmental Report », Apple, consulté le 7 février 2021, https://www.apple.com/environment/pdf/products/archive/2013/iPhone5s_PER_sept2013.pdf ; « Life Cycle Assessment for Mobile Products », Samsung, consulté le 7 février 2021, <https://www.samsung.com/us/smg/content/dam/samsung/us/aboutsamsung/2019/2018-Life-Cycle-Assessment-for-HHP-and-Display.pdf>.

Observations

Ces trois études montrent la complexité à estimer l'empreinte environnementale du secteur numérique au niveau mondial et cela sur deux facteurs : la consommation d'énergie et les émissions de GES. Les périmètres d'analyse ne sont pas les mêmes, les jeux de données sont différents ainsi que les hypothèses de projection.

Il est primordial de rappeler que les impacts du numérique vont bien au-delà de la consommation d'énergie et des émissions de GES. La consommation de ressources non-renouvelables (métaux, etc.) et la consommation d'eau sont des facteurs cruciaux avec des impacts réels sur les communautés et les territoires où se situent l'extraction et la transformation de la matière. **La focalisation sur l'énergie et les GES ne permet pas de voir si l'empreinte matérielle augmente et dans quelle proportion, ni comment l'empreinte hydrique évolue.** Ainsi, les transferts de consommation et de pollution sont pour l'instant invisibles dans ces études. De même, les impacts de la fin de vie ne sont pas intégrés pour l'instant.

Une meilleure intégration de la consommation d'énergie primaire semble nécessaire pour mieux comprendre l'impact de la phase de fabrication. De plus, les jeux de données utilisés aujourd'hui sont souvent issus d'Amérique du Nord ou d'Europe mais rarement d'Asie où l'écosystème est gigantesque. Alibaba a une clientèle deux fois supérieure à celle d'Amazon et déploie des centres de données partout en Chine où le mix énergétique reste fortement carboné. L'obtention et l'intégration de données asiatiques vérifiées vont être une prochaine clé pour mieux mesurer l'empreinte environnementale du numérique au niveau mondial. **Aujourd'hui, la focalisation par pays, où les données peuvent être stabilisées, semble être une stratégie plus pertinente.**

L'approche en ACV prônée par le collectif GreenIT en France pourrait permettre de mieux piloter l'empreinte nationale afin de répondre aux défis de la transition écologique. Dans l'étude « iNum » sur les impacts environnementaux du numérique en France³¹, le collectif GreenIT estime que le numérique représentait en 2020 : 6,2% de la

consommation d'énergie primaire nationale, 3,2% des émissions de GES françaises, 2,2% de la consommation en eau et l'excavation de 4 milliards de tonnes de terre. Une part importante de ces impacts se font en dehors du territoire national, notamment lors de l'extraction des matières et de leur transformation. Elles sont néanmoins directement liées à la consommation française de numérique.

En conclusion, **l'estimation de l'empreinte environnementale du numérique est toujours incertaine car il manque de nombreuses données représentatives de toutes les zones de fabrication et d'usage du numérique, notamment l'Asie.** Il manque aussi des données clés des constructeurs. Cette analyse de l'état de l'art pointe vers deux angles morts : l'écosystème asiatique et le secteur de la fabrication des équipements numériques. De plus, des facteurs d'impacts clés ne sont pas encore intégrés comme la consommation de ressources et d'eau. Il est donc nécessaire d'améliorer les processus de production, de structuration et de partage des données. En attendant, une focalisation par pays semble plus appropriée pour stabiliser nos jeux de données et informer les politiques nationales.

Addendum

En février 2021, au moment de la relecture de ce rapport, des chercheurs de l'université de Lancaster et le cabinet de consultation Small World se sont associés pour faire une revue des estimations globales présentées ici. Leurs travaux sont liés à une commande de la *Royal Society of Technology* concernant la place du numérique dans la transition écologique. **Leurs conclusions par rapport aux travaux d'Andrae et Elder, de Malmodin et Lundén et de Belkhir et Elmeligi sont similaires à celles présentées ici. Les auteurs concluent aussi que l'empreinte carbone du numérique est systématiquement sous-estimée jusqu'à 25% à cause d'une mauvaise intégration des impacts de la fabrication.** De plus, ils estiment que l'empreinte carbone du numérique va continuer à augmenter

³¹ Collectif GreenIT, « iNum : Impacts environnementaux du numérique en France », GreenIT, 31 janvier 2020, consulté le 28 février 2021, <https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2021/02/2021-01-iNum-etude-impacts-numerique-France-rapport-0.8.pdf>.

pour trois raisons : historiquement, les gains d'efficacité permis par l'ICT sont allés de pair avec des augmentations de la consommation d'énergie et des émissions de GES autant dans le secteur de l'ICT que dans l'économie en général ; les études actuelles font plusieurs omissions importantes concernant les tendances de croissance de l'ICT (Blockchain, IA, IoT) ; des investissements importants sont consentis pour développer et accroître l'utilisation de ces technologies. Nous encourageons vivement le lecteur à aller lire leur rapport et leurs analyses vis-à-vis de nombreux points qui ne sont pas abordés ici.

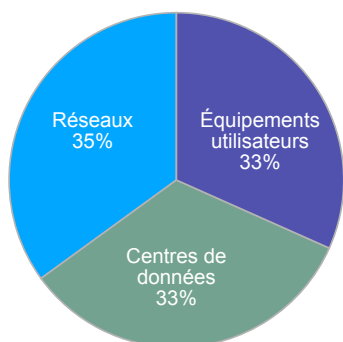
De plus, l'équipe de recherche propose une représentation visuelle des hypothèses ainsi qu'une uniformisation des scopes utilisés pour avoir des estimations comparables pour l'année 2020. Nous reproduisons et complétons un de leurs graphiques récapitulatifs ici.

Voir :

Freitag et al., « The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations », Physics and Society, consulté le 3 mars 2021, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2102/2102.02622.pdf>.

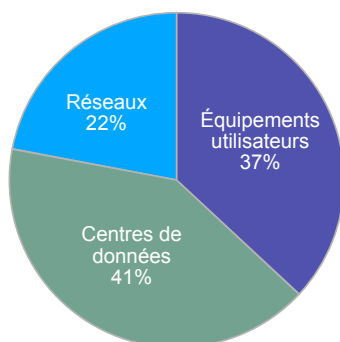
« Digital technology and the planet: Harnessing computing to achieve net zero », Royal Society of Technology, consulté le 3 mars 2021, <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/digital-technology-and-the-planet/digital-technology-and-the-planet-report.pdf>.

Andrae & Edler (Best) (2015)
623 MtCO₂e



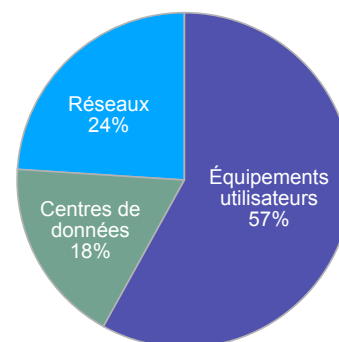
- Impact de la fabrication sous-estimé

Belkhir & Elmeligi (Moy.) (2018)
1 207 MtCO₂e



- Impact de la fabrication sous-estimé
- Impacts des Centres de données sur-estimés

Malmodin (2020)
690 MtCO₂e



- Impact de la fabrication sous-estimé
- Impacts des Réseaux et Centres de données sous-estimés

Note : L'impact des TV n'est pas inclus dans ces estimations. Le meilleur scénario d'Andrae & Edler est retenu car il semble le plus plausible d'après les auteurs. La part des équipements utilisateurs est plus importante chez Malmodin car la part estimée des Réseaux et Centres de données est la plus basse parmi toutes les études présentées.

Source : d'après Freitag et al., « The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations »

Fig 10 – Récapitulatif des estimations de l'empreinte carbone du numérique en 2020 (TV exclus) d'après Freitag et al

Part des émissions globales en 2020

1,9%

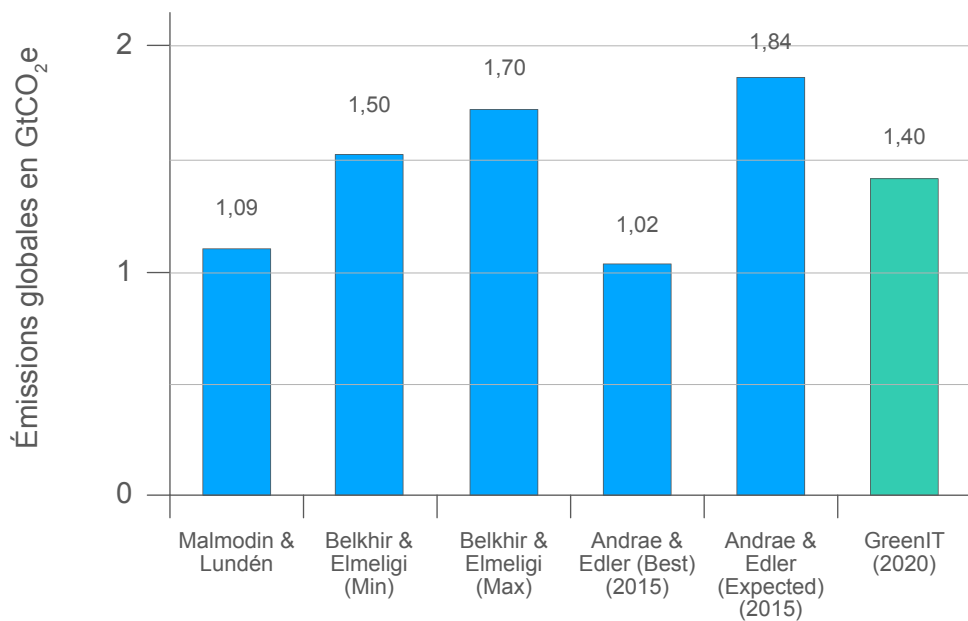
2,6%

2,9%

1,8%

3,2%

-



Note : l'estimation de GreenIT est portée sur les émissions de 2019

Source : d'après Freitag et al., « The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations »

Fig 11 – Estimations de l'empreinte carbone du numérique en 2020 ajustées sur le même périmètre (TV et électronique inclus) d'après Freitag et al

Projeter le numérique

Projeter le numérique : le calcul des effets positifs du numérique sur le climat

Lors des discussions et débats autour de l’empreinte environnementale du numérique, l’impact positif du numérique sur les politiques de transition est généralement mis en avant par deux chiffres. Le premier, issu d’un rapport de la GSMA, consiste à dire que 1g de CO₂ investi dans le numérique représente 10g de CO₂ évités dans les autres secteurs. Le second, issu d’un rapport de GeSI, avance que le numérique peut réduire jusqu’à 20% des émissions de CO₂ dans les autres secteurs. Ces chiffres représentent des ordres de grandeur assez conséquents, qui constituent potentiellement des stratégies supplémentaires pour aider à la transition écologique. Au vu de l’importance de ces ordres de grandeur il est nécessaire de comprendre comment ils sont calculés (dans quel contexte, à partir de quels scénarios, quelles hypothèses,

quelles données de référence) afin d’estimer leur fiabilité (conditions de réussite et d’échec).

Une majeure partie de la littérature grise (rapports de cabinets et d’organismes professionnels) ainsi que la littérature scientifique, sur laquelle la première s’appuie, ont été analysées afin de déterminer les publications les plus souvent mobilisées et les plus fournies en termes de données. Le découpage de la bibliographie étudiée est présenté ci-dessous par ordre chronologique de parution et par type de littérature.

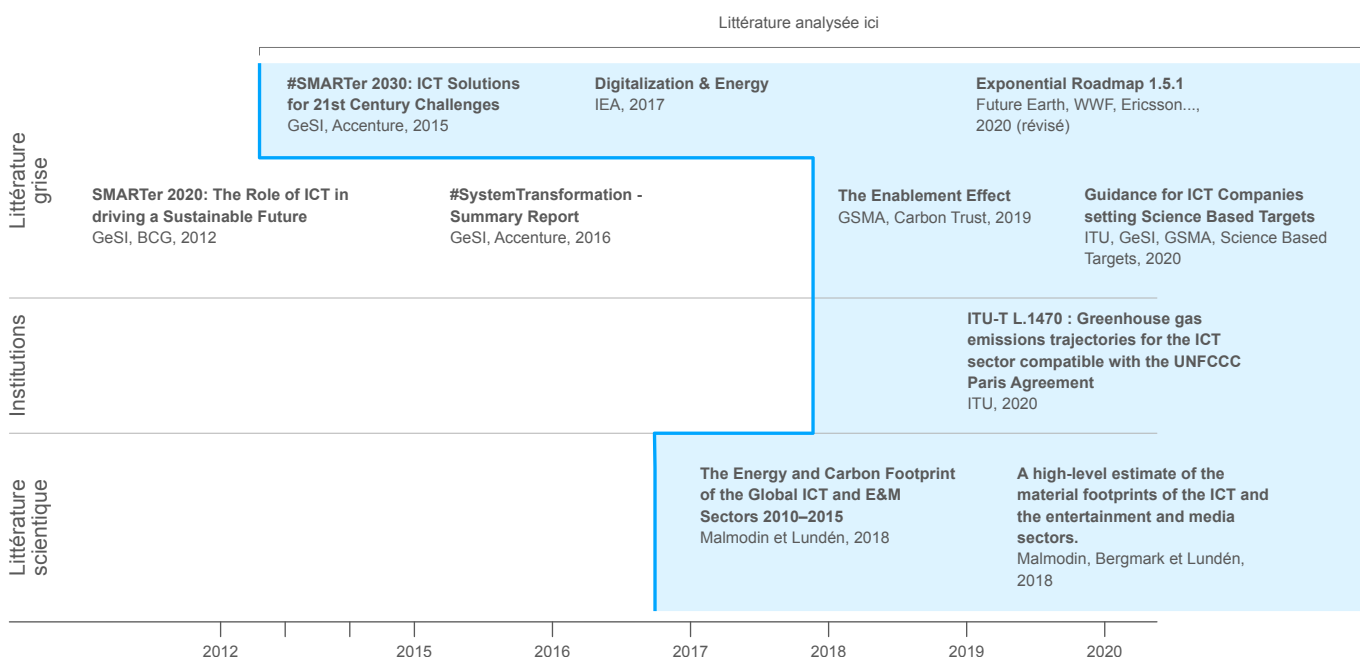


Fig 12 – Littérature étudiée pour analyser les impacts positifs possibles du numérique pour la transition écologique

Analyse : « 1g de CO2e investi dans le numérique représente 10g de CO2e évités dans les autres secteurs »

Cette première affirmation provient d'un rapport rédigé par « Carbon Trust » pour la GSMA (*Global System for Mobile Communications*) intitulé « The Enablement Effect : The impact of mobile communication technologies on carbon emission reduction »³². La GSMA est « une association professionnelle représentant les intérêts de plus de 750 opérateurs et constructeurs de téléphonie mobile de 220 pays »³³. La GSMA conduit différents groupes de travail pour participer à la définition et la publication des normes de téléphonie mobile. La GSMA est aussi un lobby qui représente et défend les intérêts des industriels de la téléphonie mobile. La présidence tournante de la GSMA est occupée par Stéphane Richard, le PDG d'Orange, depuis 2019. « Carbon Trust » est une agence de conseil qui travaille avec de nombreux gouvernements et institutions afin de produire des plans de transition bas carbone couplés à un programme de développement économique. Ce rapport a été publié en décembre 2019 et comprend 31 pages de synthèse et d'études de cas et 59 pages d'annexes expliquant la méthodologie de calcul.

« L'Enablement effect » soutient l'hypothèse que l'investissement dans le secteur des technologies mobiles permet de réduire les émissions de GES dans les autres secteurs. **Ce rapport estime que les technologies mobiles ont permis d'éviter l'émission de 2,135 Gigatonnes de GES en 2018 (2 135 millions de tonnes), soit 10 fois plus que l'empreinte des réseaux mobiles estimée à 220 millions de tonnes de GES**³⁴. Une connectivité accrue, une amélioration de

l'efficacité et l'aide au changement de comportement expliqueraient ce phénomène que le rapport nomme l'*Enablement Effect*, qui pourrait être traduit par l'effet d'activation ou l'effet d'évitement. Un exemple d'effet d'évitement donné par le rapport est l'usage des banques mobiles via smartphones qui évite les émissions liées au transport jusqu'à un bureau de banque. Le directeur général de la GSMA estime d'ailleurs que les connexions *machine-to-machine* (M2M) et l'internet des objets (IoT) permettront d'aller plus loin dans cette tendance³⁵. Ce n'est pas la première fois qu'un effet d'évitement est annoncé. Un rapport de 2015 publié par GeSI (*Global e-Sustainability Initiative*) estimait que le secteur numérique pourrait permettre un *Enablement effect* de 5:1³⁶. Toutefois, cette publication se concentrait uniquement sur le périmètre nord-américain et européen pour faire une extrapolation globale et doit être utilisée avec une extrême prudence.

Avant d'analyser comment est estimé le phénomène d'évitement de 2 135 millions de tonnes de GES, il est important de définir comment est estimé l'empreinte du secteur numérique étudié. Comme vu précédemment, le secteur numérique est souvent découpé en trois pôles : les équipements utilisateurs, les réseaux de transmission et les centres de données. L'empreinte carbone utilisée dans ce rapport ne représente que les réseaux de transmission. Son chiffrage provient des travaux de Malmudin et Lundén, et de l'ITU³⁷, qui estiment l'empreinte carbone des réseaux à 220 MtCO₂e en 2018³⁸.

³² Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019 ; L'effet d'activation : L'impact des technologies des communications mobiles pour permettre la réduction des émissions de carbone.

³³ « GSM Association », Wikipedia, consulté le 8 février 2021, https://fr.wikipedia.org/wiki/GSM_Association.

³⁴ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 6.

³⁵ Ibid., p. 7

³⁶ Carbon Trust, « Mobile Carbon Impact How mobile communications technology is enabling carbon emissions reduction », GeSI, 2016, p. 3, consulté le 8 février 2021, https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2016/11/GeSI-Mobile-Carbon-Impact-study_Presentation-for-GSMA-Latam-webinar_20161129.pdf.

³⁷ « Recommendation ITU-T L.1470 – Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement », ITU, 2020.

³⁸ Jens Malmudin et Dag Lundén, « The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015 – Supplementary Material », Sustainability 10, n° 9, 2018.

³⁹ Lofti Belkhir et Ahmed Elmeligi, « Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations », Journal of Cleaner Production n° 177, 2018, pp. 448-463.

Les travaux de Belkhir et Elmeligi proposent plutôt 243,2 MtCO₂e³⁹. Dans sa mise à jour de 2020, le scénario attendu (expected) d'Andrae estime la partie réseaux à 284 MtCO₂e en 2018⁴⁰. Malmodin et Lundén ont l'estimation la plus basse sur la partie réseaux et aucune autre estimation n'est intégrée pour fournir une médiane dans le rapport de la GSMA.

Une fois l'empreinte des réseaux estimée nous pouvons revenir au phénomène d'évitement. Dans l'annexe méthodologique, les auteurs indiquent que l'hypothèse de 2 135 MtCO₂e intègre toutes les émissions évitées grâce aux technologies numériques⁴¹ : « *Il est donc courant d'affirmer simplement que la technologie permet d'éviter la totalité des émissions, et de ne pas tenter de procéder à une allocation arbitraire. Le test étant que si la technologie joue un rôle fondamental dans l'obtention du résultat, on peut dire qu'elle permet d'éviter les émissions* »⁴². Suivant cette logique on peut affirmer que les réseaux de transmission jouent un rôle fondamental pour permettre au secteur numérique de fonctionner. Ainsi, les réseaux peuvent revendiquer l'ensemble des émissions évitées grâce au numérique. Toutefois, les auteurs de ce rapport mettent en garde contre la possibilité de double comptage. En effet, si le secteur des centres de données procède au même exercice, il pourra lui aussi revendiquer 2 135 Mt d'émissions évitées, de même pour le secteur des équipements utilisateurs. En théorie, tout le secteur numérique pourrait revendiquer jusqu'à 6,4 Gt d'émissions évitées. Cela voudrait dire que sans un évitement de 10 à 11% permis par le numérique, les émissions globales de GES auraient atteint 61,7 Gt en 2018⁴³. Cela

impliquerait un taux de croissance des émissions mondiales de bien plus de 5% par an. Dans ce cas, secteur numérique ou pas, cette croissance serait bien trop importante pour espérer activer une stratégie de transition quelconque. Si on reste sur l'hypothèse initiale que le numérique aurait évité 2 135 Mt cela représenterait 3,7% des émissions globales en 2018⁴⁴.

Suite à ces observations, on peut estimer que le ratio de 10:1 n'est pas valable car cela consiste à prendre l'empreinte d'un sous-secteur (les réseaux de transmission) tout en réclamant l'effet d'évitement de tout le secteur (le numérique). Si on regarde l'ensemble des émissions du secteur en 2018 alors Malmodin et Lundén proposent un chiffre aux alentours de 1 100 MtCO₂e ; Belkhir et Elmeligi, 1 100 Mt (en fonction linéaire, ou 1 750 MtCO₂e en exponentiel) ; Andrae et Edler (2015), 1 600 Mt ; et Andrae (2020) à 1 100 MtCO₂e. En prenant l'hypothèse la plus optimiste de 1100 Mt alors le ratio serait plus proche de 2:1, l'hypothèse la plus pessimiste amène à un ratio de 1,22:1. Les limites de l'exercice fait par Carbon Trust et la GSMA sont visibles : c'est le premier exercice du genre avec les données qu'ils ont à leur disposition, les auteurs confirment que c'est un exercice périlleux⁴⁵. Allouer tout le phénomène d'évitement potentiel à un seul sous-secteur n'est pas pertinent et déforme largement le ratio d'évitement possible. Finalement, **cette allocation ne permet pas de définir quels sous-secteurs, quels usages de l'infrastructure globale ou quels contextes sont les plus importants pour faire advenir ce phénomène d'évitement.**

³⁹ Lofti Belkhir et Ahmed Elmeligi, « Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations », Journal of Cleaner Production n° 177, 2018, pp. 448-463.

⁴⁰ Anders S. G. Andrae, « New perspectives on internet electricity use in 2030 », Eng. Appl. Sci. Lett. n° 3, 2020, pp. 19-31.

⁴¹ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 50.

⁴² "It is therefore common to simply state that the technology enables the full avoided emissions, and not attempt any arbitrary allocation. The test being that if the technology plays a fundamental role in delivering the outcome then it can be said to enable the avoided emissions", Ibid.,

⁴³ Les émissions totales de GES, y compris celles issues du changement d'affectation des terres, ont atteint 55,3 Gt CO₂e en 2018, 37,5 GtCO₂e pour le carbone seul. « Emissions Gap Report 2019 – Executive Summary », United Nations Environment Programme, 2019, p. IV, consulté le 8 février 2021, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30798/EGR19ESEN.pdf?sequence=13>.

⁴⁴ Cette estimation implique que les émissions globales auraient été de 57,435 Gt sans l'évitement de 2,135 Gt (55,3+2,135).

⁴⁵ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 10.

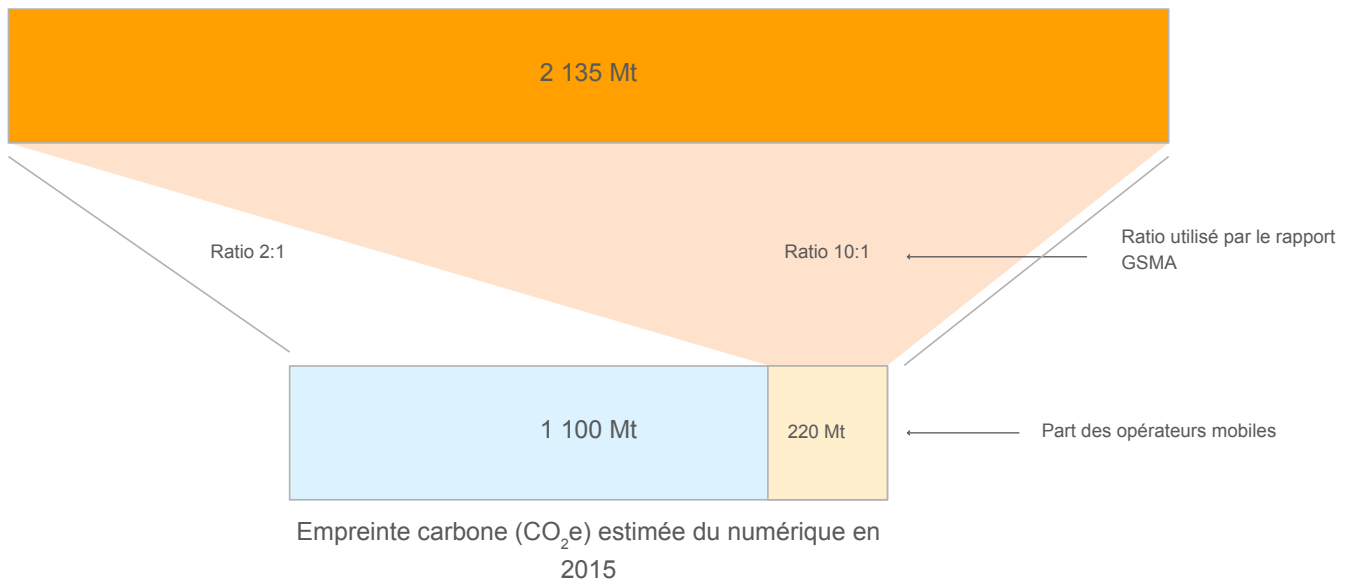


Fig 13 – Explication du ratio 10:1, minimisation de l'empreinte de départ et revendication de toutes les émissions évitées.potentielles

Méthodologie

Il est maintenant nécessaire de comprendre comment sont calculées les émissions évitées à hauteur de 2 135 MtCO₂e. Le rapport se base sur un échantillon de 14 pays pour ensuite extrapoler à l'échelle globale. Le continent européen est représenté par la France, le Royaume-Uni, l'Espagne, l'Allemagne ; le continent africain est représenté par le Kenya, l'Égypte, l'Afrique du sud ; le continent asiatique est représenté par la Corée du sud, la Chine, l'Inde ; le continent américain est représenté par : le Brésil, le Mexique, les États-Unis ; le continent océanien est représenté par l'Australie.

Pour mieux qualifier les changements de comportement liés aux smartphones Carbon Trust a commandé une étude globale visant un échantillon de plus de 6 000 utilisateurs de smartphones au Royaume-Uni, en Chine, en Inde, aux États-Unis, au Mexique, au Brésil et en Afrique du sud, soit la moitié des pays de l'échantillon général.

Carbon Trust et la GSMA identifient six catégories où les émissions peuvent être évitées : le secteur du bâti résidentiel et tertiaire (*Smart Buildings*), celui de l'énergie (*Smart Energy*), un secteur transverse du travail, vie quotidienne et santé

(*Smart Living, Working and Health*), le secteur des transports et des villes intelligentes (*Smart Transport and Cities*), le secteur de l'agriculture (*Smart Agriculture*) et finalement le secteur de l'industrie (*Smart Manufacturing*). Ces six catégories principales se divisent ensuite en 33 sous-catégories que nous allons étudier par la suite.

Dans un deuxième temps, les auteurs estiment qu'il y a deux types d'évitement possibles : les connexions entre machines (M2M) qui ont plus trait à l'augmentation de l'efficacité et de l'optimisation, et les changements de comportement individuel, notamment liés à l'usage des smartphones.

En additionnant les deux types d'évitement possibles, le rapport conclut que le secteur *Smart Living, Working and Health* représente 39% des émissions évitées potentielles grâce au numérique (833 Mt), le secteur *Smart Transport and Cities* représente quant à lui 30% (640 Mt), le secteur *Smart Manufacturing* 11% (235 Mt), le secteur *Smart Buildings* 10% (214 Mt), le secteur *Smart Energy* 7% (149 Mt), et le secteur *Smart Agriculture* 3% (64 Mt)⁴⁶. Nous pouvons maintenant analyser en détail les hypothèses et les calculs dans chacun de ces secteurs.

⁴⁶ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 16.

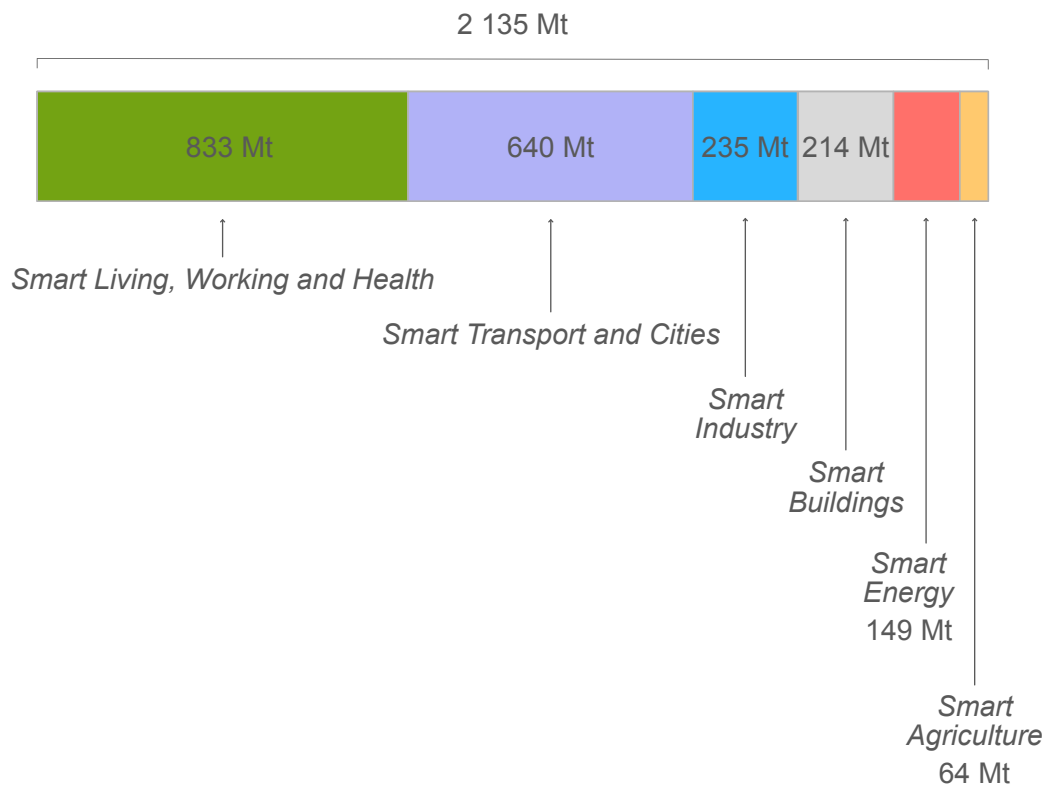


Fig 14 – Décomposition par secteurs des émissions évitées potentielles en 2018 selon « Enablement Effect » par la GSMA / Carbon Trust

Smart Buildings

Le secteur *Smart Buildings* couvre le bâti résidentiel, commercial, public, ainsi que les services qui y sont liés. Les émissions de GES liées à la construction ne sont pas comptabilisées dans ce secteur. L'empreinte de ce secteur intègre la consommation d'énergie finale, principalement le chauffage et la consommation d'électricité.

Les auteurs du rapport suggèrent que les technologies mobiles peuvent faciliter la réduction des émissions du secteur, car celles-ci permettent des améliorations concernant l'efficacité énergétique et des changements de comportement réduisant la consommation de gaz et d'électricité. Les technologies citées comme exemple sont les systèmes informatiques de gestion technique des bâtiments (*Building Management Systems*), les compteurs intelligents et les systèmes de contrôle de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC). Les auteurs avancent que les connexions entre capteurs et systèmes de contrôle (M2M) permettraient de réguler automatiquement la température, la ventilation, la climatisation en fonction de la température intérieure et de l'occupation. Cette automatisation permettrait alors une optimisation de consommation d'énergie. L'évitement potentiel est estimé à 103 Mt CO₂e en 2018, soit la moitié des émissions évitées potentielles dans ce secteur⁴⁷. **Les Smart Buildings représenteraient 10% des émissions évitées potentielles selon la GSMA.**

De façon globale, le rapport indique que les technologies mobiles aideraient le secteur du bâti résidentiel et tertiaire à réduire sa consommation d'énergie et donc ses émissions de GES, même dans les pays où moins de capital est disponible pour des bâtiments à haute efficacité énergétique. Une étude de cas est présentée pour démontrer les effets possibles : Telefonica a équipé un hôtel de capteurs et d'un système de contrôle pour réguler la climatisation et le chauffage. L'optimisation permise par ce système aurait réduit la consommation d'électricité de l'hôtel de 12%⁴⁸.

⁴⁷ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 16.

⁴⁸ Ibid., p. 17.

Hypothèses

Les hypothèses du rapport de la GSMA suggèrent qu'un compteur électrique intelligent permet de réduire la consommation électrique du bâti commercial de 14,3%, et de 7% pour la consommation de gaz. De même, les systèmes intelligents de chauffage / ventilation / climatisation permettrait de réduire d'à peu près 25% la consommation d'énergie dans le secteur commercial. La dernière hypothèse suggère que les compteurs intelligents résidentiels pourraient réduire la consommation d'électricité de 3%⁴⁹.

Hypothèses de la GSMA pour le secteur <i>Smart Buildings</i>	
Compteurs intelligents	
Réduction de la consommation électrique du bâti commercial	-14,3%
Réduction de la consommation de gaz du bâti commercial	-7%
Réduction de la consommation électrique du résidentiel	-3%
Systèmes intelligents de chauffage / ventilation / climatisation	
Réduction de la consommation électrique du bâti commercial	-25%

Observations macroscopiques

Dans un premier temps, il est utile de regarder si cette tendance est visible au niveau macroscopique. D'après le rapport spécial de 2019 des Nations Unies, les émissions globales du secteur du bâti résidentiel et tertiaire auraient augmenté de 2% en 2018, l'année étudiée par le rapport de la GSMA, et la consommation d'énergie aurait augmenté de 1%⁵⁰. Les émissions du secteur représenteraient 36% des émissions globales en 2018. Cette croissance est principalement due à l'augmentation des surfaces d'habitation et de la population, et à l'augmentation de la consommation d'électricité de la climatisation (+8% en 2018) qui représente une part croissante de la consommation d'énergie

⁴⁹ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, pp. 55-56.

⁵⁰ « 2019 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector », Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2019, p. 9.

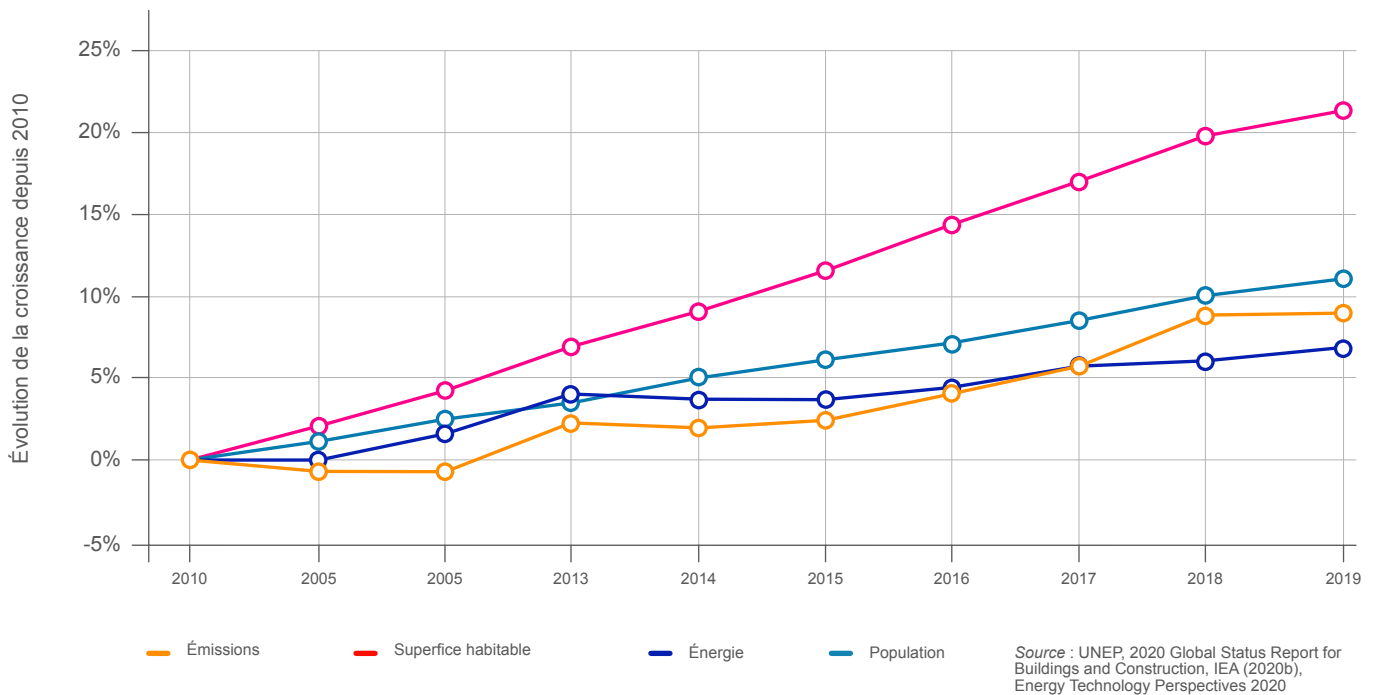


Fig 15 – Variation des facteurs d'évolution de la consommation d'énergie et des émissions du secteur « Bâti » entre 2010 et 2019

du secteur. Entre 2017 et 2018, l'intensité énergétique du chauffage, l'énergie nécessaire pour chauffer un m², et l'éclairage se sont améliorés, respectivement à -2% et -1,4%⁵¹. La nouvelle édition du rapport des Nations Unies de 2020 montre que les émissions n'ont que peu augmenté entre 2018 et 2019 ; par contre la consommation d'énergie a encore augmenté. La tendance s'est poursuivie alors que la croissance du secteur s'était ralentie à 2,6%⁵². La politique la plus importante pour réduire la consommation d'énergie et les émissions du secteur reste l'isolation thermique, devant l'amélioration du chauffage/climatisation et l'efficacité des équipements domestiques. On peut conclure de façon préliminaire que **les effets de la numérisation ne sont pas visibles au niveau macroscopique**, soit parce qu'ils ne sont pas assez importants pour contrebalancer la croissance du secteur, soit parce que la moyenne globale cache les améliorations permises dans des pays plus numérisés, soit parce que les

émissions évitées sont surestimées, soit les trois à la fois avec des variabilités différentes.

Observations à l'échelle nationale

Afin de mieux observer le phénomène d'évitement il est nécessaire d'étendre la recherche aux pays présents dans l'échantillon du rapport de la GSMA. L'Union Européenne fournit une base de données permettant d'observer la variation des émissions de CO₂ fossile entre 2005 et 2017⁵³, nous pouvons retenir cet intervalle car il correspond à peu près au développement du secteur numérique, notamment avec l'arrivée massive des smartphones à partir de 2007. Cette base de données sera utilisée dès que possible tout au long de cette étude. Il est important de noter que ces données sont en CO₂ fossile et non pas en équivalent carbone, nous les utilisons uniquement pour observer une possible tendance.

⁵¹ « 2019 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector », Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2019, pp. 9-10.

⁵² «Ibid., p.18.

⁵³ Marilena Muntean et al., « Fossil CO2 emissions of all world countries - 2018 Report », Publications Office of the European Union, 2018.

Évolution des émissions de CO ₂ fossile entre 2005 et 2017 dans le secteur <i>Smart Buildings</i>	
France	-28%
Royaume-Uni	-28%
Espagne	-9%
Allemagne	-17%
Kenya	+55%
Égypte	+16%
Afrique du sud	+19%
Corée du sud	-14%
Chine	+40%
Inde	+41%
Brésil	+8%
Mexique	+5%
États-Unis	-10%
Australie	+18%

La différence de variation peut être expliquée par différents facteurs. Le plus important est la météo : des hivers doux réduisent l'usage du chauffage et donc les émissions de GES du secteur. Des étés de plus en plus chauds vont accroître l'usage de la climatisation et les émissions de GES qui y sont liées. Ensuite, les pays en train de s'urbaniser rapidement augmentent aussi leur consommation d'énergie et leurs émissions : plus de surface habitable construite induit plus de surface à chauffer ou à refroidir. En ce sens, l'augmentation de la population est un facteur à prendre en compte mais complexe à analyser. Le niveau de numérisation semble être un facteur moins important pour expliquer la variation, un pays fortement numérisé mais subissant des étés de plus en plus chauds, comme l'Australie, a augmenté ses émissions de 18% entre 2005 et 2017. Un autre pays très numérisé mais plus froid, comme la Corée du sud, a réduit ses émissions de 14% sur la même période. Il semble évident que de nombreux progrès ont permis de

réduire les émissions liées au chauffage du bâti. Par contre, il paraît impossible de savoir dans quelle mesure la réduction des émissions est due à une optimisation permise par le numérique, par rapport à une stratégie mieux comptabilisée comme l'isolation thermique.

Vérification à l'échelle européenne

En 2005, le secteur du résidentiel et du tertiaire en UE28 représentait 691 MtCO₂e et, en 2018, 568 MtCO₂, soit 123 Mt en moins en 12 ans⁵⁴. Le rapport de la GSMA estime que la numérisation aurait évité 27,8 MtCO₂e en 2018 dans ce secteur⁵⁵. Cette estimation ne paraît pas cohérente par rapport à la tendance observée entre 2005 et 2017 en Europe car l'évitement annoncé est trop élevé par rapport à une réduction annuelle moyenne de 10 Mt, et parce que la numérisation est un facteur marginal pour la réduction des émissions de ce secteur. **Les chiffres de la GSMA reposent sur des hypothèses trop optimistes pour qu'elles soient alignées avec l'évolution des émissions dans une zone pourtant fortement numérisée comme l'UE28.**

Conclusion

Bien qu'une optimisation grâce à un système numérique soit visible au cas par cas, **il ne semble pas que cela soit un facteur de réduction absolue des émissions**, l'usage croissant de la climatisation reste un problème et le meilleur facteur d'efficacité dans ce secteur reste majoritairement l'isolation thermique. Les systèmes numériques visant à réduire l'utilisation de la climatisation pourraient avoir un effet potentiellement très positif. De même, des systèmes numériques visant à réduire l'étalement urbain auraient potentiellement de larges impacts positifs. À première vue, il ne semble pas que ce type de services existe.

⁵⁴ « Greenhouse gas emissions by aggregated sector », European Environment Agency, 2019, consulté le 8 février 2021, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/ghg-emissions-by-aggregated-sector-5#tab-dashboard-02>.

⁵⁵ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 38.

Smart Energy

Le secteur *Smart Energy* intègre la production d'électricité, la génération de chaleur et tous les usages non-électriques du secteur. Cela n'intègre pas la consommation d'énergie liée au transport (consommation d'essence, kérosène, etc.).

Le rapport suggère que la numérisation peut rendre la distribution d'électricité plus efficace et accélérer le déploiement des énergies renouvelables et leur pilotage. Cela serait notamment permis par la communication de machine-à-machine (M2M) et la possibilité de connecter des petits réseaux au réseau national. Le rapport met en avant que les technologies mobiles permettent de créer des réseaux d'énergie distribués, d'autant plus importants pour les pays émergents qui voient leur demande d'énergie augmenter rapidement. L'étude de cas présentée décrit un système de panneaux photovoltaïques et de lampes LED loué à des foyers sans accès au réseau électrique général. Le système est loué à hauteur de 0,45\$ par jour avec un paiement initial de 33\$. Ce paiement est possible via un service mobile GSM/M2M. L'utilisation du système aurait réduit l'utilisation des génératrices de kérosène et les coûts associés, à hauteur de 750\$ par an et par foyer⁵⁶.

La *Smart Energy* représenterait 7% des émissions évitées potentielles selon la GSMA

Hypothèses

Les réseaux intelligents (*Smart grids*) facilitent la charge des véhicules électriques, favorisant ainsi le changement des véhicules thermiques vers les modèles électriques. La connexion entre machines (M2M) facilite le déploiement de panneaux solaires et leur interconnexion au réseau. Il est fait l'hypothèse que 30% du parc photovoltaïque peut être piloté à distance grâce aux réseaux télécom, leur attribuant ainsi la réduction d'émissions obtenues. La même hypothèse est faite avec le parc éolien avec un taux d'attribution de 5%. Il est finalement estimé que 100% du réseau électrique sera *smart* d'ici 2050 permettant ainsi de réduire les pertes d'énergie liées à la transmission et à la distribution électrique de 7,5%.

⁵⁶ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 19.

Hypothèses de la GSMA pour le secteur <i>Smart Energy</i>	
Pilotage à distance via réseaux telecom	
Développement du parc photovoltaïque	30%
Développement du parc éolien	5%
Réseaux d'énergie intelligents	
Réduction des pertes d'énergie liées à la transmission et de distribution électrique	-7,5%

Observations macroscopiques

La première partie du présent rapport intitulé « Point d'étape planétaire » traite largement de l'évolution du mix énergétique au niveau mondial. Le secteur *Smart Energy* est le premier secteur mondial en termes d'émissions de GES⁵⁷. Pour rappel, entre 2014 et 2019, la consommation d'énergie issue du charbon a réduit de 0,3% au niveau mondial. Par contre, sur la même période la consommation de pétrole a augmenté de 1,4%, celle du gaz de 3% et celles des énergies non-renouvelables de 11,9%. **La consommation d'énergie augmente donc globalement.** Un des facteurs déterminants de la croissance des EnR est l'augmentation de l'investissement par les gouvernements et les acteurs privés. Il est extrêmement complexe de déterminer dans quelle proportion la hausse des EnR est liée au développement des réseaux de télécommunication (M2M, etc.).

Observations à l'échelle nationale

Il semble plus intéressant de regarder de possibles effets à l'échelle nationale. Il est difficile d'obtenir les émissions globales du secteur de l'énergie pour chaque pays, nous pouvons nous concentrer sur les émissions liées à la production d'électricité. Celle-ci représente généralement

⁵⁷ Hannah Ritchie et Max Roser, « Annual greenhouse gas emissions by sector », Our World in Data, consulté le 8 février 2021, <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#annual-greenhouse-gas-emissions-by-sector>.

Émissions de CO ₂ fossile entre 2005 et 2017 de la production d'électricité (génération de chaleur et usages non-électriques exclus)	
France	-42%
Royaume-Uni	-28%
Espagne	-27%
Allemagne	-7%
Kenya	-19%
Égypte	+75%
Afrique du sud	+15%
Corée du sud	+54%
Chine	+77%
Inde	+107%
Brésil	+147%
Mexique	+10%
États-Unis	-23%
Australie	-6%

une grande partie des émissions du secteur et peut-être, dans une certaine mesure, représentative de l'évolution globale du secteur.

Une nouvelle fois, il est très complexe de conclure sur la pertinence des technologies numériques dans la transformation du secteur de l'énergie. Le choix du mix énergétique de chaque pays dépend de nombreux facteurs impossibles à isoler. L'augmentation des émissions est généralement corrélée à l'intégration de nouvelles énergies fossiles au mix, comme le charbon pour l'Inde et la Chine, ou le pétrole pour le Brésil. **Les pays dont les émissions se réduisent sont des pays moins industrialisés et avec un large investissement des pouvoirs publics dans les énergies bas-carbone (incluant le nucléaire).**

Vérification à l'échelle européenne

En 2005, les émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'énergie dans l'UE28 étaient de 1,71 GtCO₂e, puis de 1,26 GtCO₂e en 2017, soit une baisse de 450 MtCO₂e en 12 ans. Sachant que cela correspond à une réduction 37,5 Mt en moyenne par an, le rapport de la GSMA estime que le numérique aurait évité 19,8 Mt dans l'Union Européenne. Le chiffre de la GSMA représenterait alors plus de la moitié de la réduction annuelle de la zone Europe. Est-ce que les technologies numériques seraient

responsables d'autant d'évitement, et est-ce qu'elles peuvent être désignées comme un des facteurs principaux du développement des EnR ?

Pistes de réflexion et de réorientation

Si certaines technologies rendent plus efficaces la transformation et la distribution d'énergie, notamment renouvelable, cela peut aussi s'appliquer aux énergies fossiles. Il serait alors intéressant de déterminer l'effet « d'activation » des technologies numériques sur le secteur charbon / gaz / pétrole. De nombreuses grandes entreprises du numérique sont connues pour fournir des services d'optimisation et d'efficacité (cloud, machine learning, IA) à des entreprises pétrolières. Néanmoins, les technologies numériques ont un rôle à jouer dans la transformation du secteur de l'énergie. **La décarbonation aura un réel effet seulement si la demande d'énergie baisse rapidement. Alors, les systèmes numériques qui visent concrètement à réduire la demande d'énergie globale vont être importants.** Piloter un réseau distribué d'énergies intermittentes va aussi nécessiter l'intégration de systèmes numériques ouverts, auditables et eux-mêmes distribués.

Smart Living, Working and Health

Les auteurs du rapport structurent une catégorie autour de nombreux phénomènes et activités hétérogènes qui ne correspondent pas à une catégorie officielle de calcul des émissions de GES. Cette catégorie regroupe cinq activités qui permettraient d'éviter des émissions : le commerce en ligne, les services bancaires en ligne, les appels vidéo avec les amis et la famille, les conférences en ligne audio, le partage d'habitations. **Ces activités compteraient pour 39% des émissions évitées potentielles grâce au numérique.** Selon la GSMA, les activités présentées sont reliées à l'usage massif des smartphones pour accéder à différents services et modifier certains comportements et usages. Un des plus gros gains estimés dans ce « secteur » est l'évitement de trajets toutes distances confondues : trajet à la banque, conférences et séminaires dans d'autres villes, voyages familiaux, etc. Le second gain estimé est lié à l'économie du « partage » : partage d'habitations, d'objets et divers biens. En l'occurrence, **le partage d'habitations représente la plus grande part d'émissions évitées selon le rapport (10,4% sur les 39% du « secteur »)**⁵⁸.

Concernant les activités professionnelles, les technologies numériques permettent de faire du télétravail et ainsi de réduire les déplacements, les surfaces de bureaux et la consommation d'énergie qui y est liée. Dans les activités de santé, l'utilisation de smartphones permettrait de réduire les visites à l'hôpital en ayant accès à une consultation en ligne. De plus, les patients peuvent être suivis à distance grâce à des capteurs remontant des données directement aux systèmes de suivi dédiés dans les hôpitaux.

Plusieurs exemples sont présentés sur le télétravail. Le gouvernement de l'Utah aurait réduit ses émissions de 1,3 tCO₂e par mois et ses coûts fonciers en permettant le télétravail pour ses employés. De même, Dell estime que le télétravail a réduit l'empreinte annuelle de ses employés de 1 tCO₂e. Xerox aurait réduit de 40 894 tCO₂e ses émissions en 2014 en permettant à 8000 employés de travailler à distance⁵⁹. Dans le volet santé, deux études de cas sont présentées, Hello Doctor, un service de consultation médicale en ligne sud-africain, mais

aucune estimation de réduction des émissions n'est proposée. Le réseau télécom du NHS est aussi mis en avant car il permet la prise de rendez-vous, la prescription d'ordonnances en ligne et différents services de vidéo-conférence. Cette mise en réseau aurait permis de réduire les émissions du NHS de 2 100 tCO₂e grâce à la réduction des trajets⁶⁰.

Hypothèses

Les calculs d'évitement sont basés en grande partie sur le sondage de plus de 6000 participants mis en place pour le rapport. Concernant les conférences en ligne audio, si les participants déclarent utiliser ce service alors on suppose que cela remplace un trajet vers une réunion en présentiel, l'évitement est calculé à partir de la distance moyenne entre le domicile et le lieu de travail et le type de transport utilisé. Vis-à-vis des appels vidéo en ligne avec les amis et la famille, les participants ont déclaré s'ils avaient des amis proches et de la famille à plus de deux heures de distance et s'ils faisaient des appels vidéo en ligne avec eux. Il a été ensuite demandé aux participants combien de fois ils visitent physiquement ces proches et par quel moyen de transport et, si les smartphones n'existaient pas, combien de fois ils iraient les voir. La même logique est appliquée aux services de banque en ligne : combien de fois les participants vont à la banque, s'il y a un bureau à proximité, et combien de fois ils utilisent une application en ligne et combien de fois la consultation en ligne remplace un trajet à la banque locale. Les mêmes questions ont été posées pour le commerce en ligne, en intégrant cette fois la visite en magasin.

Ensuite il est estimé qu'un smartphone se substitue à de nombreux autres appareils (baladeur, console de jeu, navigation GPS) et réduit ainsi les émissions liées à tous les appareils substitués. Un évitement a aussi été calculé en estimant le partage d'objets (perceuses, tondeuses, etc.) permis par le numérique et réduisant les émissions liées à l'achat de ce type d'équipements.

Il est fait l'hypothèse que le suivi des patients à distance réduit le nombre de nuits à l'hôpital, donc le nombre de trajets jusqu'à celui-ci. Il est

⁵⁸ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 20.

⁵⁹ Ibid., p. 21.

⁶⁰ Ibid., pp. 22-23.

estimé que la télémédecine réduirait de 45% les admissions à l'hôpital au Royaume-Uni, 41,75% aux États-Unis, 49,5% en France.

Dans la sphère domestique, il est suggéré que le contrôle des appareils domestiques via un

Hypothèses de la GSMA pour le secteur <i>Smart Living, Working and Health</i>	
Massification de l'usage des smartphones	
Réduction des émissions liée au partage d'habitation (AirBnB, CouchSurfing, etc.) (en MtCO ₂ e)	-221,5*
Réduction des émissions des trajets liée aux conférences en ligne audio (en MtCO ₂ e)	-203,7*
Réduction des émissions des déplacements personnels grâce aux appels vidéo (en MtCO ₂ e)	-149,2*
Réduction des émissions des trajets à la banque grâce à la banque en ligne (en MtCO ₂ e)	-48,5*
Réduction des émissions des trajets grâce au commerce en ligne (en MtCO ₂ e)	-104,3*
Substitution et partage des équipements grâce au smartphone	
Réduction des émissions liée à l'économie de partage via application (en MtCO ₂ e)	-2,8*
Réduction des émissions liée à la baisse d'achat d'équipements électroniques grâce au multi-fonctions d'un smartphone (réveil, baladeur, etc.) (en MtCO ₂ e)	-7,5*
Télémédecine	
Réduction des admissions à l'hôpital grâce à la télémédecine (UK, USA, FR)	Moy. -45,4%
Domestique	
Réduction d'énergie grâce au <i>smart thermostat</i>	-12,5%
Réduction des émissions liée au télétravail (en MtCO ₂ e)	-47*
* Hypothèses issues d'un questionnaire en ligne de la GSMA complété un échantillon de 6100 personnes	

smartphone (thermostat, etc.) réduit la consommation d'énergie à hauteur de 12,5%. Finalement, les smartphones permettraient de travailler à distance et donc de réduire les besoins de trajets professionnels. La même logique de calcul pour la banque et le commerce en ligne est appliquée. La consommation d'énergie liée au chauffage de la maison et aux équipements électroniques domestiques est réintégrée pour comparer aux gains d'énergie liés à l'absence de trajet vers le lieu de travail : 20W de puissance électrique additionnelle pendant 8 heures par jour, 1,5 kW pour le chauffage / climatisation pendant 8 heures (pendant 6 mois par an).

Observations générales

Le caractère hétérogène des activités présentées dans cette section ne permet pas de faire une comparaison macroscopique. Le secteur présenté ici n'est pas compatible avec une catégorie précise de calcul des émissions de GES au niveau international. Nous pouvons toutefois reprendre les études de cas présentées pour mieux les comprendre et les remettre en perspective. Par exemple, Dell aurait réduit ses émissions de 9 800 tCO₂e grâce à son programme de télétravail. Si on reporte cela à ses émissions internes (scope 1 et 2), cela représenterait une baisse de 3,2% de ses émissions. Ce type de réduction est plutôt encourageante, notamment dans un pays comme les États-Unis où les trajets domicile-lieu de travail sont plus élevés et émetteurs de carbone. Toutefois, **si on reporte cette réduction aux émissions globales de Dell (scope 1, 2 et 3) alors cela représente une réduction de 0,06%**⁶¹. Dans le cas du National Health System (NHS), **le système informatique connecté aurait permis d'éviter 50 000 tCO₂e et d'économiser 926 millions de livres sterling en presque 10 ans. Ces émissions évitées représenteraient 0,25% de l'empreinte totale du NHS**⁶².

⁶¹ « Progress Made Real FY20 Social Impact report – Striving to create a positive and lasting impact on humankind and the planet », Dell Technologies, 2019, pp. 58-59, consulté le 8 février 2021 <https://corporate.delltechnologies.com/en-us/social-impact/reporting/fy20-progress-made-real-report.htm#overlay=/content/dam/delltechnologies/assets/corporate/pdf/progress-made-real-reports/delltechnologies-fy20-progress-made-real-report.pdf>.

⁶² « Delivering a 'Net Zero' National Health Service », NHS, 2020, p. 12, consulté le 8 février 2021, <https://www.england.nhs.uk/greenernhs/wp-content/uploads/sites/51/2020/10/delivering-a-net-zero-national-health-service.pdf>.

Concernant le partage d'habitation, il est nécessaire de différencier les différents types de services gratuits (Couchsurfing, Warm Showers), les services réciproques (Home Exchange, My Twin Place, etc.) et les locations (Airbnb). Les effets de ces services sont rarement étudiés, même pour le cas d'Airbnb. L'entreprise avance que la location d'un domicile permet de réduire la consommation d'eau, d'énergie et d'émissions par rapport à un hôtel. Toutefois, de nombreux effets rebond sont envisagés face à l'expansion d'Airbnb : l'augmentation des voyages touristiques due à un prix de séjour moins cher, le déplacement des logements des habitants usuels vers la périphérie face à la montée de loyers, etc.⁶³. **Même s'il n'est aujourd'hui pas possible de connaître l'impact environnemental réel d'un service comme Airbnb, les autres types de partage semblent moins enclins aux effets rebond.**

L'impact du télétravail sur la consommation d'énergie et les émissions de GES a fait récemment l'objet d'une étude systématique de la part de Hook et al. Sur 9000 articles publiés, seulement 39 études ont été jugées pertinentes et suffisamment structurées pour une analyse poussée. Parmi les 39 études, 26 indiquent que le télétravail cause une réduction de la demande d'énergie, 8 indiquent une augmentation. La principale cause de réduction de la demande d'énergie provient de la réduction de la distance parcourue en véhicule chaque semaine. Les 26 articles indiquant une réduction, suggèrent que la réduction de la demande d'énergie pourrait aller jusqu'à 20%, voire plus si les bureaux réduisent leur demande d'énergie. Hook et al indiquent toutefois que « les études les plus rigoureuses et avec un périmètre d'analyse plus large présentent des résultats plus ambigus »⁶⁴. Quand les études intègrent les impacts additionnels, comme les trajets hors travail ou la consommation d'énergie domestique, les gains d'énergie paraissent plus limités. Le télétravail pourrait accroître la distance entre domicile et lieu de travail et le télétravail à mi-temps pourrait accroître la consommation d'énergie nette. Au final, des gains nets d'énergie peuvent être déterminés si le périmètre d'analyse

reste limité. **L'ADEME estimait en 2020 que le télétravail représentait une économie de 271 kgCO₂e en France et que les effets rebond réduisaient cette économie de 84 kgCO₂e⁶⁵.** Il est alors nécessaire d'être prudent avant de conclure sur la portée et les effets d'échelle du télétravail sur la consommation d'énergie et les émissions de GES.

Sur la question des conférences en ligne, Ong et al estiment dans une étude de 2014 que les facteurs de comparaison sont : la distance parcourue, la durée de la conférence et les technologies utilisées. Ils suggèrent que les conférences vidéo représentent jusqu'à 7% des coûts énergie / carbone d'une conférence en présentiel⁶⁶. Les gains seraient moins importants pour les réunions qui nécessitent de parcourir peu de distance. Les auteurs tracent des tendances futures où les conférences vidéo représenteraient une part bien plus importante du trafic et estiment que les gains énergie / carbone seraient toujours plus importants que le présentiel. Ong et al concluent en rappelant que l'efficacité de la vidéo comme moyen de communication par rapport au présentiel doit être étudiée soigneusement pour mieux comprendre les gains possibles.

Pistes de réflexion et de réorientation

Le sondage réalisé à l'occasion du rapport de la GSMA reste la source de données principale d'où sont extrapolées les émissions évitées potentielles. Les questions du sondage semblent trop restreintes pour comprendre réellement l'impact des activités étudiées. **Les hypothèses résultantes partent du principe qu'il y a toujours substitution et jamais empilement des usages : un appel vidéo ne remplace pas toujours une visite chez sa famille et vice versa.**

À défaut de pouvoir avoir une perspective globale, **les études de cas présentées montrent que les technologies mobiles réduisent de très peu l'empreinte carbone des institutions étudiées.** Il semble encore trop tôt pour conclure que le télétravail permet, toutes choses égales par ailleurs, des réductions ou des

⁶³ Yuliya Voytenko Palgan et al., « Sustainability framings of accommodation sharing », *Environmental Innovation and Societal Transitions* 23, 2017, pp. 70-83.

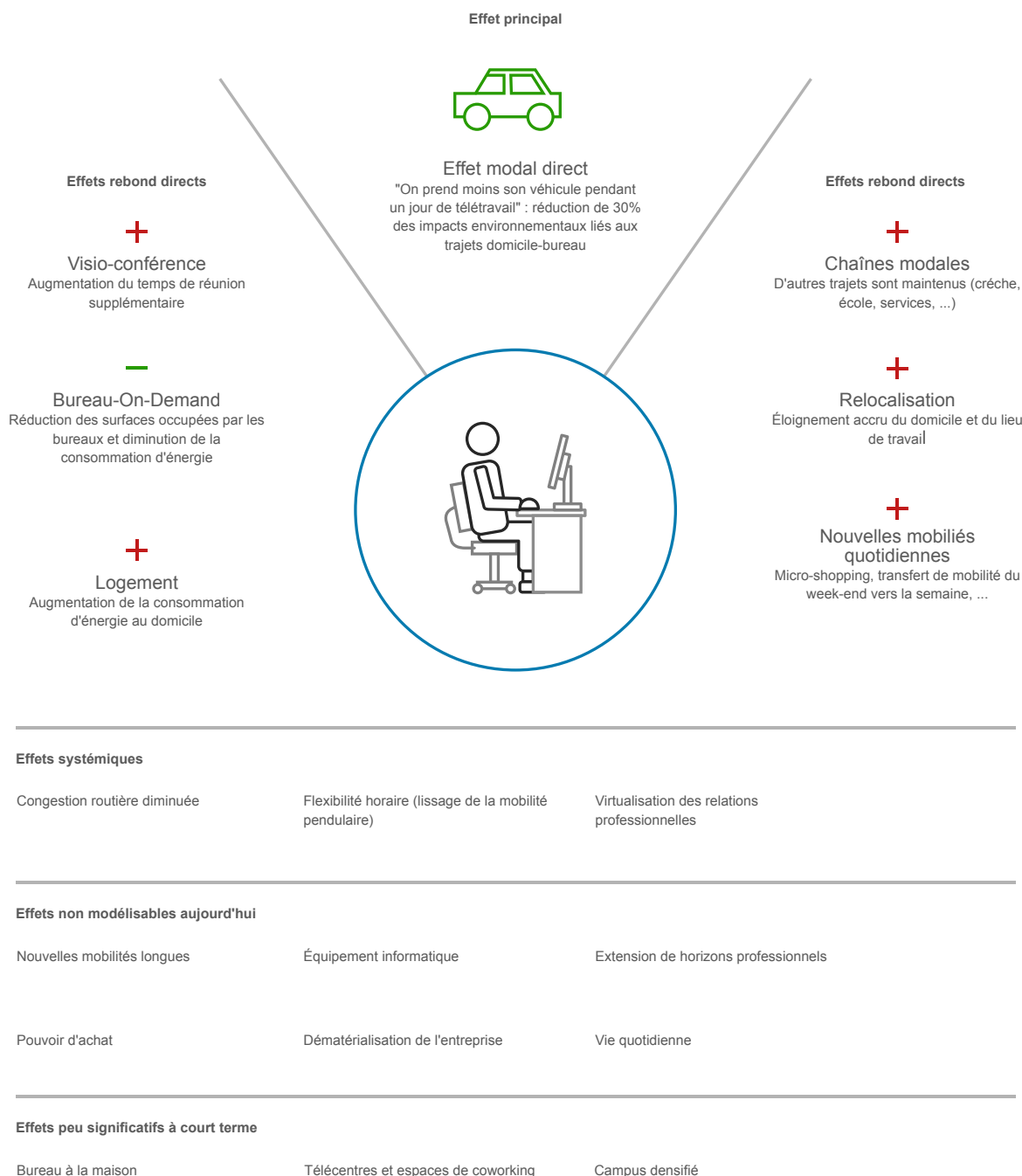
⁶⁴ Traduction personnelle, Andrew Hook et al., « A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking », *Environ. Res. Lett.* n° 15, 2020, consulté le 8 février 2021, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8a84>.

⁶⁵ Greenworking et ADEME, « Étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail », ADEME, 2020, p. 5.

⁶⁶ Dennis Ong et al., « Comparison of the energy, carbon and time costs of videoconferencing and in-person meetings », *Comput. Commun.*, 2014, consulté le 8 février 2021, <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2014.02.009>.

augmentations de consommation d'énergie. Les conférences en ligne représenteraient a priori un mécanisme important de réduction de la consommation d'énergie et des émissions liées. Il faut toutefois être vigilant à ne pas provoquer une inflation des heures de conférence en ligne qui surpasseraient à terme les heures de conférence en présentiel, autant pour des raisons de

consommation d'énergie que pour la qualité de la communication. En conclusion, **l'écosystème numérique ne fait pas que remplacer des usages déjà existants, il en modifie et en rajoute aussi de nombreux autres. Il s'agit alors de les identifier et de les analyser autant du point de vue environnemental que social.**



Source : ADEME, Étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail, septembre 2020

Fig 16 – Différents effets rebond lié au télétravail

Smart Transport and Cities

Généralement le secteur *Smart Transport* intègre les émissions de GES liées au transport maritime et fluvial, le trafic aérien national, le transport ferroviaire et le transport routier (véhicules particuliers, utilitaires, poids lourds, deux roues). Le transport international, aérien comme maritime, est calculé à part car il est difficilement attribuable à un pays précis. Le terme *Smart Cities* ne correspond pas à une catégorie de calcul des émissions de GES et ne peut pas être comparé. Son empreinte peut être répartie entre la plupart des secteurs d'activité (construction, services, modes de vie, etc.).

Le rapport de la GSMA suggère que les réseaux de télécommunication améliorent l'optimisation des itinéraires et les économies de carburant, et peuvent aussi accélérer l'usage de points de chargement pour les véhicules électriques. Le chiffrage de ce secteur estime que le plus gros facteur d'évitement est l'amélioration du comportement des conducteurs permise grâce aux technologies de suivi et supervision du véhicule⁶⁷. **Les *Smart Transport and Cities* représenteraient 30% des émissions évitées potentielles selon la GSMA**

Concernant les villes, les auteurs du rapport considèrent que les technologies de communication peuvent améliorer la congestion du trafic urbain et réduire les émissions des véhicules grâce à un meilleur accès aux transports publics permis par les applications de smartphones. Par exemple, grâce à des capteurs et un système de contrôle, les feux de signalisation peuvent être pilotés pour réduire le temps d'attente des conducteurs.

Différentes études de cas sont présentées, comme un service d'assistance et de capteurs embarqués sur poids-lourds pouvant réduire jusqu'à 15% la consommation de carburant grâce à des conseils sur l'optimisation du carburant, les stations-service et le positionnement GPS. Un système de gestion des places d'un parking et de paiement de la place est aussi présenté comme donnée de chiffrage, un service de réservation de taxi-scooters en Suède ou encore un service de

location de vélo via application en Chine (Mobike)⁶⁸.

Hypothèses

Une première hypothèse est formulée concernant l'autopartage. Les membres d'un service d'autopartage réduiraient leur nombre de kilomètres parcourus comparés à celui des possesseurs de véhicule individuel. L'hypothèse d'évitement de kilomètres parcourus et d'émissions n'est pas exprimée clairement. La seconde hypothèse concerne l'amélioration du

Hypothèses de la GSMA pour le secteur <i>Smart Transport and Cities</i>	
<i>Smart Transport</i>	
Réduction des émissions de GES grâce à l'autopartage (en MtCO ₂ e)	-1,2
Réduction de la consommation de carburant grâce à l'amélioration du comportement de conduite grâce aux technologies mobiles	-10%
Réduction de la consommation de carburant grâce aux applications de navigation	-1,9%
Réduction des émissions de GES du commerce maritime grâce aux communication M2M	-2%
Réduction des émissions de GES du transport routier grâce aux communication M2M	-5%
<i>Smart Cities</i>	
Réduction des émissions de GES grâce aux systèmes intelligents de gestion du trafic	-8,5~10%
Réduction des émissions de GES grâce à la meilleure accessibilité des transports publics via app (en MtCO ₂ e)	-148*
Réduction des émissions de GES grâce à l'accès à des services mobiles de location de vélos	-30,6*
* Hypothèses issues d'un questionnaire en ligne de la GSMA complété un échantillon de 6100 personnes	

⁶⁷ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, p. 24.

⁶⁸ ibid., pp. 23-25.

comportement des conducteurs grâce aux technologies mobiles. Ces dernières réduiraient la consommation de carburant pour les voitures, les semis et les poids lourds de 10%. Le rapport fait l'hypothèse que les applications de navigation (Google Maps, Waze, etc.) réduisent la consommation de carburant de 1,9%. Les applications de service de transport (Uber, Lyft, etc.) et de covoiturage sont aussi intégrées sans fournir de chiffres précis. Il est estimé aussi que les communications M2M permettraient de réduire les émissions de GES du commerce maritime de 2%. Le suivi des flottes de poids lourds permettrait des réductions de consommation de carburant à hauteur de 5%. Une optimisation du chargement des camions grâce à des systèmes de suivi et de contrôle permettrait de réduire de 2% la consommation de carburant. L'évitement attendu des systèmes de contrôle du trafic n'est pas clairement formulé, hormis quelques données des services de la ville de Londres. Il est fait l'hypothèse que les systèmes intelligents de gestion du trafic (feux, signalisation) réduiraient de 10% les émissions de GES en Europe et 8,5% aux USA. L'évitement des émissions permis par l'accessibilité des transports publics via application est calculée par

les réponses à un sondage de 6 115 personnes commandé par la GSMA, en estimant qu'un voyage en transport public remplace un voyage en voiture (et ne se cumule pas). De même, l'évitement permis par les services de location de vélos est calculé depuis le sondage de la GSMA.

Observations macroscopiques

Le secteur des transports n'a jamais cessé de croître depuis les années 50, à l'exception de l'année 2020. Toutes les stratégies de réduction et d'atténuation des émissions ont été largement contrecarrées jusqu'à présent. Il est aujourd'hui le deuxième secteur le plus important en termes d'émissions de GES. D'après le GIEC, le secteur des transports aurait été responsable de 7 GtCO₂e en 2010, soit 23% des émissions de CO₂ mondiales. Le groupe de travail du GIEC insiste sur le fait que sans mesures fortes les émissions du secteur pourraient atteindre 12 GtCO₂e d'ici 2050. **Les données plus récentes de l'Union Européenne montrent que les émissions de CO₂ fossile du secteur ont augmenté de 21% entre 2005 et 2017 à l'échelle mondiale, le transport international de +18%, le trafic aérien international de +29%**⁶⁹.

⁶⁹ Marilena Muntean et al., « Fossil CO₂ emissions of all world countries - 2018 Report », Publications Office of the European Union, 2018, pp. 23-25.

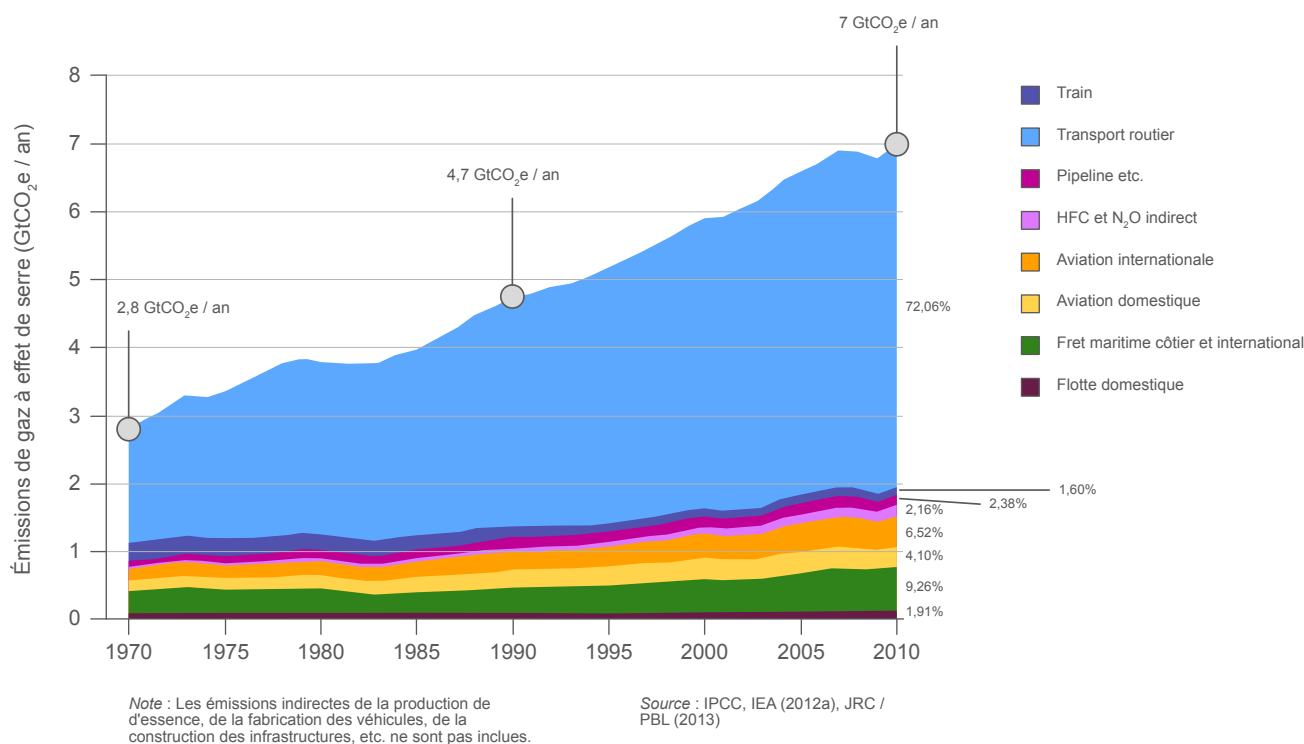


Fig 17 – Évolution des émissions de GES par type de transport entre 1970 et 2010

Observations à l'échelle nationale

Les émissions de CO₂ fossile de l'échantillon présenté par la GSMA montrent une tendance quasi-générale d'augmentation des émissions à l'exception des baisses observables en Espagne et au Royaume-Uni. **Il ne semble pas y avoir de corrélation entre taux de numérisation des pays et évolution des émissions liées au transport.** Par exemple, les émissions sud-coréennes ont augmenté de 17% en 12 ans. Sur une période plus large, de 1990 à 2017, les émissions du secteur ont même été multipliées par 2,8. D'après le gouvernement sud-coréen, cela serait dû au nombre de véhicules en circulation (x6,6 entre 1990 et 2017), à l'expansion du transport de marchandises (x6 sur la même période) et l'expansion du réseau routier⁷⁰.

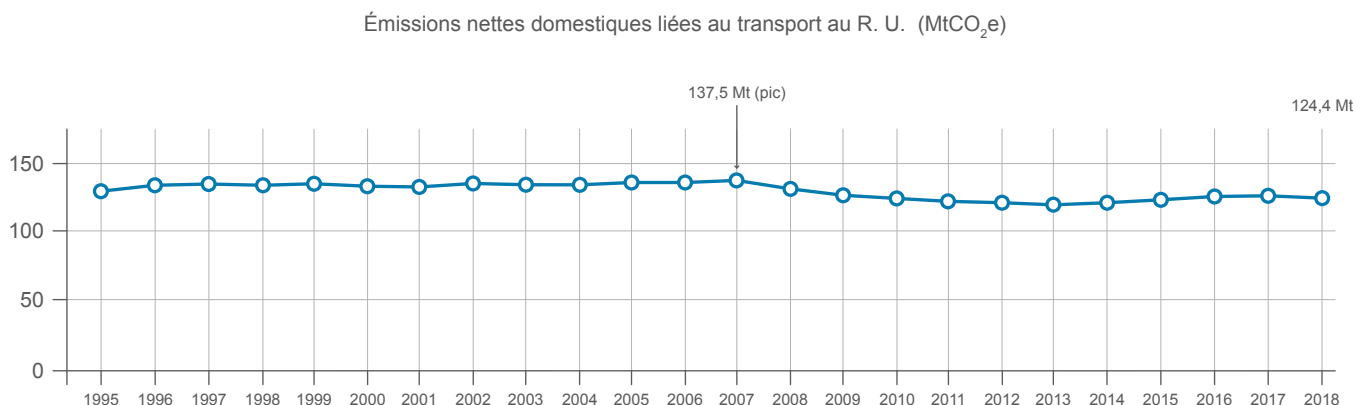
La baisse des émissions du Royaume-Uni est à relativiser, les émissions liées au transport domestique sont quasiment inchangées depuis 2010 (124,5 MtCO₂e en 2010 ; 124,4 MtCO₂e en 2018⁷¹). En fait, entre 1990 et 2018, ces mêmes émissions n'ont baissé que de 3%. Le même phénomène est observable en Espagne. Il semblerait que de nombreux pays aient connu leur pic d'émissions du secteur vers 2007, ce qui

laisse apparaître une forte baisse si on regarde uniquement les émissions de 2005 à 2018. En fait, les émissions des transports sont aujourd'hui

Émissions de CO ₂ fossile entre 2005 et 2017 liées au transport	
France	-3%
Royaume-Uni	-16%
Espagne	-18%
Allemagne	+2%
Kenya	+212%
Égypte	+89%
Afrique du sud	+23%
Corée du sud	+17%
Chine	+104%
Inde	+141%
Brésil	+34%
Mexique	+19%
États-Unis	-6%
Australie	+19%

⁷⁰ « 2050 Carbon Neutral Strategy of Republic of Korea », The Government of the Republic of Korea, 2020, p. 74, consulté le 8 février 2021, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf.

⁷¹ « Energy and environment: data tables – ENV0201: Greenhouse gas emissions by transport mode: United Kingdom », Department for Transport, Gov.UK, 2020, consulté le 8 février 2021, <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/energy-and-environment-data-tables-env>.



Source : Ricardo-AEA/BEIS (NAEI), Office for National Statistics (Environmental Accounts)

Fig 18 – Évolution des émissions de GES liées au transport au Royaume-Uni entre 1995 et 2018

sur un plateau depuis 2010 dans de nombreux pays d'Europe.

Si le numérique peut éviter des émissions de GES liées au transport alors ce n'est largement pas suffisant pour contrebalancer la hausse du trafic, et encore moins pour faire réduire les émissions à long terme. De même, un point d'intention doit être soulevé, si les systèmes numériques permettent l'optimisation et l'efficacité du transport de marchandises il est alors nécessaire de quantifier l'augmentation totale de tonnes transportées que cela engendre. L'exemple sud-coréen nous montre un pays fortement numérisé mais qui a augmenté les tonnes de marchandises transportées par 6 entre 1990 et 2017. **Si le numérique fluidifie le secteur alors il permet son accélération, cela doit être alors quantifié pour que la démarche comptable présentée par la GSMA soit cohérente.**

Vérification à l'échelle européenne

En 2005 les émissions de GES des transports en UE28 étaient de l'ordre de 979 MtCO_{2e}. En 2018, elles étaient de l'ordre de 946 MtCO_{2e}, soit une réduction de 33 MtCO_{2e} en 12 ans. Le rapport de la GSMA estime que les technologies numériques dans le secteur « Transport et Villes intelligentes » auraient évité 127,7 MtCO_{2e} dans l'Union Européenne en 2018. Encore une fois, **l'évitement annoncé semble trop élevé par rapport à la faible réduction des émissions constatée dans la zone.** En parallèle, la croissance annuelle moyenne des véhicules en circulation en Europe entre 2000 et 2017 a été de l'ordre de 1,4%⁷². La quantité d'émissions évitées de la GSMA impliquerait que la croissance du parc de véhicules ait été beaucoup plus forte pour éviter autant d'émissions.

Pistes de réflexion et de réorientation

Il semblerait donc que les estimations de la GSMA soient trop optimistes et ne soient pas vérifiées avec les données officielles disponibles. **Cette erreur semble largement due à l'extrapolation d'un sondage d'opinion de 6100 répondants pour estimer l'effet de mécanismes subjectifs : changements de comportement globaux et influence des applications. De plus, la méthodologie utilisée**

estime que des trajets via un mode de transport public remplacent des trajets en véhicule individuel alors que ces trajets peuvent se cumuler en conditions réelles.

Selon l'estimation de la GSMA, certains usages comme la réservation de voitures avec chauffeur (*ride-hailing* type Uber ou Lyft) provoquent une hausse de la consommation de carburant. Toutefois, certains usages semblent plus prometteurs, comme le co-voiturage, l'optimisation de la circulation routière et l'accès facilité aux réseaux de transport public. Le secteur des transports est complexe et est amené à changer rapidement pour rentrer dans les accords de Paris : le nombre de véhicules personnels en circulation doit diminuer, le poids des voitures doit diminuer ainsi que la proportion de véhicules très émetteurs comme les SUV, et les transports publics doivent se développer. L'urbanisme et l'implémentation des commerces de proximité doivent aussi être repensés pour réduire l'usage de la voiture. Le numérique peut avoir une influence positive sur nombre de ces facteurs mais il reste difficile à déterminer comment le numérique peut éviter l'augmentation de ces usages.

⁷² « Size of the vehicle fleet in Europe », European Environment Agency, 2019, consulté le 8 février 2021, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/size-of-the-vehicle-fleet/size-of-the-vehicle-fleet-10>.

Smart Agriculture

L'agriculture représente une grande part des émissions mondiales de GES. Le secteur fait face à de nombreux défis liés à l'utilisation des terres, à l'usage de fertilisants, à l'efficacité des systèmes d'irrigation ou encore au gaspillage alimentaire. Les auteurs du rapport GSMA estiment que les technologies mobiles pourraient permettre aux agriculteurs de mieux gérer et surveiller à distance l'irrigation et la qualité des sols. Ce type d'usages faciliterait à terme une gestion des sols plus efficaces, la réduction d'intrants chimiques et la réduction des pertes agricoles.

L'agriculture connectée représenterait 3% des émissions évitées potentielles selon la GSMA.

Le rapport introduit un projet d'Ericsson où des objets connectés (capteurs d'humidité, caméras, etc.) ont été déployés dans une mangrove pour permettre aux villageois de suivre l'évolution de celle-ci. Depuis, la mangrove en question aurait vu sa vie sauvage prospérer. Un projet d'AT&T en Californie aurait permis de réduire les émissions de GES des plantations d'asperge de 5%, et de 6% pour la consommation d'eau. Ces réductions seraient dues à des capteurs enterrés dans les champs qui avertiraient les agriculteurs des parcelles nécessitant d'être arrosées via une application smartphone. Une expérience similaire dans des fermes verticales de fraises est présentée sans préciser des réductions d'émissions de GES⁷³.

Hypothèses

Il est estimé que les technologies mobiles peuvent permettre un meilleur usage des

Hypothèses de la GSMA pour le secteur <i>Smart Agriculture</i>	
Réduction de l'usage des fertilisants chimiques par hectare	-40%
Réduction de la consommation d'eau (USA, Afrique du sud)	-20~40%

⁷³ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, pp. 30-32.

ressources (travail, carburant, eau), une augmentation de la productivité et une réduction des pertes agricoles. De même, elles permettraient de réduire l'usage des fertilisants chimiques à hauteur de 40% par hectare. L'agriculture de précision (via données remontées par des capteurs et l'usage de drones) réduirait l'usage d'eau de 20 à 40% aux États-Unis et en Afrique du sud.

Observations macroscopiques

La contribution du secteur agricole aux émissions de GES a baissé au fur et à mesure des années. Entre 1990 et 1999, le secteur représentait 29% des émissions mondiales en moyenne ; en 2017, ce secteur représentait 11,1 GtCO₂e, soit 20% des émissions. Au fur et à mesure que les émissions mondiales ont augmenté l'agriculture a représenté une part relativement moins importante. D'après la *Food and Agriculture Organization* (FAO), cela serait principalement dû à la baisse des émissions liées à l'usage des terres agricoles⁷⁴.

Évolution du secteur agricole au niveau mondial		
	2005	2016
Surface agricole mondiale (en km ²)	48 000 000	48 600 000
Rendement céréalier par hectare (en kg)	3 312	4 074
Consommation de fertilisants par hectare (en kg)	115,8	140,5

D'après la Banque Mondiale, la surface agricole mondiale était de 48 millions de km² en 2005 et de 48,6 millions km² en 2016⁷⁵. En 2005, les rendements céréaliers étaient de 3 312 kg par hectare et, en 2017, de 4 074 kg par hectare⁷⁶. En 2005, la consommation de fertilisants était de 115,8 kg par hectare et, en 2016 de 140,5 kg par

⁷⁴ « The Contribution of Agriculture to Greenhouse Gas Emissions », FAO, consulté le 9 février 2021, <http://www.fao.org/economic/ess/environment/data/emission-shares/en/>.

⁷⁵ « Agricultural land (sq. km) », The World Bank, consulté le 9 février 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2?view=chart>

⁷⁶ « Cereal yield (kg per hectare) », The World Bank, consulté le 9 février 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/AG.YLD.CREL.KG?view=chart>

⁷⁷ « Fertilizer consumption (kilograms per hectare of arable land) », The World Bank, consulté le 9 février 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS?view=chart>

hectare⁷⁷. Les données concernant la consommation d'eau du secteur agricole sont plus parcellaires et liées aux territoires étudiés. Il est difficile d'assembler pour une vue globale, nous traiterons donc la question au niveau national.

La surface des terres agricoles a peu augmenté entre 2005 et 2016. La hausse des rendements céréaliers à l'hectare suit la hausse de la consommation de fertilisants à l'hectare. **Contrairement à ce qui est annoncé par la GSMA, l'usage des fertilisants est en forte croissance.** Il est difficile d'isoler l'effet particulier du numérique sur la question. On peut néanmoins estimer qu'il n'est pas suffisamment important pour contribuer à un changement de tendance.

Observations à l'échelle nationale

Il semble plus intéressant pour cette section de se concentrer sur la consommation d'eau du secteur agricole plutôt que sur les émissions de GES car l'effet d'évitement estimé par la GSMA est de 3%, soit l'évitement le plus faible (16,6 MtCO₂e évitées

Prélèvements d'eau du secteur agricole en milliard de m ³ par an (FAO, Aquastat)			
	2007	2012	2017
France	3,93	2,91	3,11
Royaume-Uni	1,33	1,05	1,18
Espagne	23,18	25,47	20,36
Allemagne	0,13	0,46	0,29
Kenya	1,84	1,9	3,2
Égypte	64,6	61,5	61,35
Afrique du sud	8,83	9,54	11,39
Corée du sud	15,96	15,96	15,96
Chine	360	388	385,2
Inde	649,1	688	688
Brésil	35	40,09	39,83
Mexique	60,57	63,35	66,8
États-Unis	185,2	175,5	176,2
Australie	9,77	9,58	10,5

en 2018 dans le monde). Cependant les hypothèses avancées se focalisent plutôt sur la consommation d'eau ou la consommation de fertilisants, il est donc intéressant de regarder si un effet est visible.

Il s'avère complexe de relever une quelconque corrélation entre numérisation d'un pays et réduction de la consommation en eau. **La GSMA fait tout de même l'hypothèse que la Smart Agriculture aurait réduit en 2018 la consommation d'eau de 20% aux États-Unis et de 40% en Afrique du Sud, or, ces deux pays ont lentement augmenté la consommation d'eau de leur secteur agricole entre 2007 et 2017.** L'hypothèse n'est donc pas vérifiable de façon préliminaire au niveau national, il est très incertain de l'extrapoler au niveau mondial.

Pistes de réflexion et de réorientation

En regardant de plus près l'étude de cas sur le suivi des mangroves, le dispositif de suivi connecté n'a pas d'effet positif direct sur l'évolution des mangroves. Les bénéfices constatés sont dus à la mobilisation d'employés volontaires d'Ericsson pour planter 3 400 arbres dans la zone concernée⁷⁸. **Il existe de nombreuses barrières à l'entrée pour les objets connectés dans l'agriculture, autant au niveau de la sécurité que de la robustesse des systèmes et leurs coûts. Il s'agit d'un des secteurs les plus incertains quant aux effets de la numérisation.** Certains outils de l'agriculture de précision, comme les drones semblent être un cas d'usage intéressant dans certains pays comme en Chine pour l'irrigation et l'épandage de fertilisants ou de pesticides. La question du modèle agricole reste toutefois en suspens.

⁷⁸ « Latest from the Connected Mangroves reforestation project », Ericsson Blog, 2019, consulté le 8 février 2021, <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/10/latest-connected-mangroves-reforestation-project>.

Smart Industry

Le secteur industriel regroupe les activités d'extraction, de transformation de matières, de fabrication de matériel et de construction, ainsi que les activités de traitement de déchets. La GSMA estime que les principales contributions de la numérisation dans l'industrie seront l'augmentation de l'efficacité énergétique et la réduction de la consommation d'énergie. **Les émissions évitées potentielles dans l'industrie représenteraient 11% des émissions totales estimées par la GSMA⁷⁹.**

Des palettes connectées en matériaux composites sont présentées comme une solution vis-à-vis de la perte de palettes en bois par les entreprises utilisant des services de location de palettes. Une meilleure gestion de l'inventaire des palettes via les technologies mobiles, et l'adoption de palettes composites, permettraient d'augmenter considérablement la durée de celles-ci, de 18 à 162 usages. De même, un système de capteurs et de contrôle de la température aurait réduit la consommation d'énergie de ces entrepôts de nourriture congelée de 8%⁸⁰.

Hypothèses

La gestion des inventaires via les technologies mobiles permettrait de réduire les stocks nécessaires et la taille des entrepôts, réduisant la consommation d'énergie et les émissions liées. Il est estimé que cela réduirait de 15% la consommation d'électricité des entrepôts.

Hypothèses de la GSMA pour le secteur <i>Smart Industry</i>	
Réduction de la surface et de la consommation d'électricité des entrepôts grâce aux technologies mobiles	-15%

⁷⁹ Carbon Trust, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019, pp. 34.

⁸⁰ Ibid., pp. 34-35.

Observations

L'hypothèse formulée ne concerne que les entrepôts. Il est très complexe d'identifier, de mesurer et de piloter les émissions liées aux activités de gestion et de stationnement des stocks comme le rappellent Rüdiger et al⁸¹. Un rapport de 2009 du World Economic Forum estimait les émissions des bâtiments logistiques à environ 300 MtCO₂e par an⁸² alors que la GSMA l'estime plutôt à 240 MTCO₂e en 2018. À défaut de pouvoir suivre ses émissions au niveau mondial, nous pouvons essayer de suivre l'évolution des surfaces d'entrepôts. **En 2018, la surface des entrepôts réfrigérés était estimée à 616 millions m³, soit une augmentation de**

Surfaces des entrepôts réfrigérés en million m ³ de 2014 à 2018			
	2014	2016	2018
France	15,5	6,29	-
Royaume-Uni	24,65	32,37	24,18
Espagne	-	10	7,5
Allemagne	23,92	16	-
Kenya	-	0,02	-
Égypte	3,25	-	3,5
Afrique du sud	0,32	0,47	-
Corée du sud	-	12	-
Chine	76,08	107	105
Inde	130,72	141,13	150,23
Brésil	16,05	16,83	19,05
Mexique	4,87	6,5	15
États-Unis	114,85	118,07	130,96
Australie	5,08	6,04	1,86

⁸¹ David Rüdiger et al., « Managing greenhouse gas emissions from warehousing and transshipment with environmental performance indicators », *Transportation Research Procedia* 14, 2016, p. 895.

⁸² « Supply Chain Decarbonization – The role of logistics and transport in reducing supply chain carbon emissions », World Economic Forum, 2009, consulté le 10 février 2021, http://www3.weforum.org/docs/WEF_LT_SupplyChainDecarbonization_Report_2009.pdf.

2,67% depuis 2016 selon la Global Cold Chain Alliance (GCCA)⁸³. Ce rapport nous permet de suivre l'évolution des surfaces d'entrepôts au niveau national pour observer si ces surfaces ont baissé comme le suggère l'hypothèse de la GSMA.

Les données sont trop parcellaires pour pouvoir observer un quelconque phénomène positif ou négatif lié à la numérisation. L'Inde, les États-Unis et la Chine possèdent les plus grandes surfaces d'entrepôts réfrigérés mais cela est principalement dû à leur place dans les chaînes logistiques, la densité de la population et les conditions climatiques qui affectent la conservation des denrées. Les données de consommation d'électricité de ces surfaces n'étant pas disponibles il n'est pas possible de définir une augmentation ou une baisse de l'efficacité énergétique de ces bâtiments. **Il n'est donc pas possible de tenir une conclusion qui validerait ou invaliderait l'hypothèse de la GSMA.**

Pistes de réflexion et de réorientation

Les auteurs utilisent des données provenant du rapport de GeSI « SMARTer 2020 » qui utilisent des jeux de données anciens. De même, les auteurs opèrent une réduction arbitraire dans l'estimation de base (de 24% à 15%) car GeSI fournit une estimation sur tout le secteur des ICT alors que la GSMA se focalise sur les technologies mobiles. Ce mécanisme de découpage n'apparaît pas autre part dans le rapport a priori et n'est donc pas cohérent avec la démarche globale. Le calcul de la réduction n'est pas expliqué. **Les données disponibles ne permettent ni de valider ni d'invalider cette hypothèse, toutefois la surface des entrepôts réfrigérés, qui sont les entrepôts les plus consommateurs d'électricité, a augmenté de presque 3% entre 2016 et 2018 (GCCA) donc l'effet de réduction des surfaces n'est pas visible à ce niveau.**

L'étude de cas sur les palettes connectées est à pondérer avec des analyses de cycle de vie. Les palettes en bois semblent avoir un potentiel de

réchauffement global moindre car les arbres servant à faire les palettes séquestrent du carbone et les palettes usagées sont broyées pour être réutilisées et éviter les rejets de CO₂ dans l'atmosphère⁸⁴. Les palettes plastiques ont plus généralement un plus gros potentiel de réchauffement global selon l'utilisation de plastique vierge ou recyclé. L'ajout d'un traçage des palettes n'implique pas automatiquement un rallongement de la durée de vie car de nombreuses autres variables entrent dans l'équation.

De nombreuses données existent sur l'évolution des émissions de GES du secteur industriel mais **l'hypothèse de la GSMA concerne un segment où précisément peu de données sont disponibles.** La gestion des stocks de denrées alimentaires et la chaîne du froid sont un enjeu majeur pour réduire les pertes de denrées et leur distribution dans un monde globalisé, ou même au niveau national— comme en Chine qui a connu de nombreux scandales sanitaires internes dans ses approvisionnements. L'hypothèse d'une réduction des surfaces d'entrepôts grâce à une meilleure efficacité repose sur le maintien d'une logistique en flux tendu (logique du juste à temps) qui ne peut pas être appliquée universellement pour différentes raisons : stocks d'état, stocks spéculatifs, surplus nécessaire pour la résilience d'une nation, ... Une enquête plus poussée serait nécessaire pour comprendre les effets de la numérisation sur d'autres secteurs industriels.

⁸³ Victoria Salin, "2018 GCCA Global Cold Storage Capacity Report », International Association of Refrigerated Warehouses and Global Cold Chain Alliance, 2018, p.3, consulté le 10 février 2021, <https://www.gcca.org/sites/default/files/2018%20GCCA%20Cold%20Storage%20Capacity%20Report%20final.pdf>.

⁸⁴ Ivan Deviatkin et al., « Wooden and Plastic Pallets: A Review of Life Cycle Assessment (LCA) Studies », Sustainability 11, n° 5750, 2019, p. 15.

Conclusion sur

« The Enablement Effect »

Dans un premier temps, il est important de situer le rapport de la GSMA et de Carbon Trust dans son contexte de publication. Il est indiqué dans les premières pages que l'objectif de ce rapport est, entre autres, d'attirer les investissements après que le secteur des ICT a été fléché comme un secteur d'investissement « soutenable » par l'Union Européenne en juin 2019. En cela, ce rapport permet à la GSMA de montrer un bilan positif afin d'aller dans le sens des experts de l'Union Européenne⁸⁵. Essayer d'attirer de l'investissement dans le secteur n'est pas problématique en soi car c'est le rôle d'organisations de représentation professionnelle comme la GSMA. Par contre, il est nécessaire d'identifier les biais liés à la position de cet acteur et à un contexte de publication spécifique.

Dans un deuxième temps, la méthode de calcul des évitements utilisée présente deux défauts cruciaux. En fait, **l'exercice de calcul consiste à prouver que l'on a évité des émissions, mais cela ne consiste pas à prouver que ces émissions auraient existé en premier lieu. En l'occurrence, la comparaison systématique des évitements d'émissions de la GSMA avec les taux de croissance des émissions de GES au niveau mondial, européen et national montre que les réductions liées au numérique ne sont pas visibles quand on passe à l'échelle ou ne sont pas suffisamment fortes pour compenser la croissance tendancielle. Ensuite, cette méthode de calcul consiste uniquement à estimer les émissions que les technologies numériques enlèvent dans tous les secteurs d'activité. Mais si le numérique permet de fluidifier et d'optimiser la production, la distribution et la consommation, il est alors nécessaire de quantifier les émissions potentiellement « ajoutées » par le numérique dans les mêmes secteurs afin d'avoir une balance nette.** Enfin, une hypothèse cruciale à ce rapport consiste à dire que le numérique ne peut que substituer des usages mais ne s'empile pas avec les usages déjà existants.

⁸⁵ EU Technical Expert Group on Sustainable Finance, « Taxonomy Technical Report », European Union, 2019, p. 27, consulté le 8 février 2021, https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/190618-sustainable-finance-teg-report-taxonomy_en.pdf.

Exemple d'émissions potentielles ajoutées

McKinsey rapporte qu'un grand producteur gazier et pétrolier aurait augmenté son volume de production de 2% sur ses installations pétrolières *offshore* grâce à l'analyse numérique en temps de réel de ses appareils de production. D'après McKinsey cette augmentation de la production aurait été possible sans augmentation des émissions supplémentaires à l'extraction. Néanmoins, 2% de pétrole brut en plus ont été extraits et seront transformés par la suite sous forme de carburant par exemple. Quelles sont alors les émissions potentielles rajoutées par l'extraction supplémentaire de 2% de pétrole brut ?

D'après l'International Energy Agency, 26 400 000 barils d'équivalent pétrole étaient extraits des puits *offshore* chaque jour en 2016, soit 9,64 milliards de barils en un an. D'après Jing et al, un baril de pétrole brut aurait en moyenne une empreinte carbone de 40,7 kgCO₂e (estimation basse pour l'*offshore*). Si le numérique peut effectivement augmenter de 2% la production de pétrole offshore alors cela rajoute 192 800 000 de barils par an. **En utilisant la même logique que le rapport de la GSMA on peut alors estimer que la production supplémentaire de pétrole *offshore* permise par le numérique rajouterait alors des émissions équivalentes à 7,84 MtCO₂e.** La méthodologie utilisée par la GSMA et Carbon Trust peut avoir deux dimensions, mais seule celle qui est favorable, l'évitement, est présentée dans leur rapport.

Sources :

- Ferry Grijpink et al., « How tapping connectivity in oil and gas can fuel higher performance », McKinsey & Company, publié le 6 novembre 2020, consulté le 3 mars 2021, <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/how-tapping-connectivity-in-oil-and-gas-can-fuel-higher-performance>.
- « Offshore Energy Outlook 2018 », IEA, Mai 2018, consulté le 3 mars 2021, <https://www.iea.org/reports/offshore-energy-outlook-2018>.
- Liang Jing et al., « Carbon intensity of global crude oil refining and mitigation potential », Nature Climate Change, 2020.

incertain elle ne peut pas être utilisée en l'état pour les décisions politiques concernant les technologies numériques pour le climat.

Ce rapport se base en bonne partie sur des études de cas et des sondages d'opinion pour estimer des tendances globales de réduction des émissions. Ce type de pratiques pour calculer les effets d'évitement du numérique a déjà été largement critiqué, notamment par Malmodin et Coroama⁸⁶. Ceux-ci énoncent différents facteurs qui rendent ces extrapolations incorrectes :

- les facteurs d'influence non-numériques sont souvent ignorés, alors qu'ils sont généralement plus importants que les facteurs numériques ;
- le poids du dispositif numérique est généralement ignoré – ce qui n'est pas le cas ici ;
- la représentativité de l'échantillon est rarement analysée, les personnes interrogées sont-elles sensibles aux dispositifs numériques (*early adopters*) ou pas du tout ?

Dans le cas présent, l'échantillon reste insuffisant. De plus, **le sondage d'opinion de plus de 6000 participants ne constitue pas un protocole d'enquête rigoureux pour extrapoler des données au niveau mondial. Ainsi, les émissions évitées issues des données du sondage produisent généralement les estimations d'évitement les plus élevées**, comme dans le cas des conférences en ligne audio, des appels vidéo avec les amis et la famille et le partage d'habitations.

Après l'analyse approfondie des hypothèses et des estimations dans chaque secteur, celles-ci semblent trop optimistes, en partie à cause de la méthode de calcul choisie et de l'extrapolation de cas particuliers au niveau global. La somme de 2 135 MtCO₂e ne semble pas tenable et est difficilement vérifiable au niveau mondial, européen et national (dans les 14 pays de l'échantillon). De même, le rapport présente un biais méthodologique en analysant seulement les technologies mobiles pour ensuite réclamer les gains potentiels permis pour toute l'infrastructure numérique. Les technologies mobiles ne peuvent pas fonctionner par elles-mêmes (*stand-alone*), elles ont nécessairement besoin de serveurs, d'ordinateurs et d'autres équipements, c'est-à-dire l'ensemble de l'infrastructure numérique, qu'il faut alors comptabiliser. **Au vu de la méthodologie de l'étude et de son périmètre**

⁸⁶ Jens Malmodin and Vlad Coroama, « Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation – the example of smart metering », 2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG), 2016, p. 1.

Analyse : « le numérique permet de réduire jusqu'à 20% les émissions de GES dans les autres secteurs »

Cette deuxième affirmation provient du rapport « #SMARTer2030 : ICT Solutions for the 21st Century Challenges », publié en juin 2015 par *Global e-Sustainability Initiative* (GeSI) et Accenture Strategy⁸⁷. GeSI est une association d'entreprises et d'organisations du secteur de l'ICT, formé en 2001, qui fait la promotion de solutions technologiques pour accompagner la « soutenabilité économique, environnementale et sociale »⁸⁸. Accenture est une des plus grandes entreprises de conseil, notamment dans le domaine des technologies et du management. « SMARTer2030 » s'inscrit à la suite des rapports précédents commandés par GeSI: « SMART2020 » publié en 2008, et « SMARTer2020 » publié en 2012.

Ce rapport fait l'hypothèse que le secteur de l'ICT peut réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20% d'ici 2030, maintenant ainsi les émissions à leur niveau de 2015. Cela permettrait « d'éviter l'arbitrage entre prospérité économique et protection environnementale »⁸⁹. Il est estimé que le déploiement de technologies numériques permettrait de réduire les émissions mondiales de 12 GtCO₂e d'ici 2030. De même, les auteurs du rapport suggèrent que les émissions du secteur ICT vont baisser d'ici 2030, à hauteur de 1,97% des émissions mondiales⁹⁰. En plus de réduire les émissions de GES, il est souligné que l'ICT peut apporter de larges bénéfices environnementaux comme dans le secteur agricole où les technologies numériques pourraient augmenter les rendements agricoles de 30%. Finalement, des gains économiques substantiels sont suggérés à hauteur de 11 trillions de dollars par an d'ici 2030. Il s'agit des hypothèses les plus optimistes de tous les rapports « SMART » de GeSI.

Les auteurs du rapport estiment que l'empreinte carbone du numérique serait de 1,25 GtCO₂e en 2020. À la différence du rapport

de la GSMA, « SMARTer2030 » compare l'empreinte sectorielle totale de l'ICT à l'ensemble des réductions potentielles. Comparé à la réduction des émissions annoncée de 12,08 GtCO₂e, le numérique aurait alors un effet de réduction 9,7 fois plus important que le poids du secteur, d'ici 2030. Pour rappel, le rapport « SMART2020 » estimait que le numérique pourrait réduire les émissions de 7,8 GtCO₂e d'ici 2020, amenant à un total d'à peu près 45 GtCO₂e. Le rapport « SMARTer2020 » estimait l'abattement à 9,1 GtCO₂e, indiquant un total d'émissions en 2020 de 45,9 GtCO₂e. Les émissions de gaz à effet de serre en 2019 étaient de 52,4 GtCO₂e.

Synthèse des rapports SMART			
	SMART 2020	SMARTer 2020	SMARTer 2030
Estimation de l'effet d'abattement du numérique (en GtCO ₂ e)	7,8	9,1	12
Émissions globales projetées grâce à cet abattement (en GtCO ₂ e)	45	45,9	51,5
Émissions globales de référence (en GtCO ₂ e)	51,9	55	63,5
Émissions globales mesurées (en GtCO ₂ e)	52,4	52,4	-

Un des objectifs de « SMARTer2030 » est de montrer que le numérique permet de découpler la croissance économique de la croissance des émissions. Le rapport tend alors à démontrer les

⁸⁷ GeSI et Accenture Strategy, « SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges », GeSI, 2015.

⁸⁸ Ibid., p. 3.

⁸⁹ Ibid., p. 8.

⁹⁰ Ibid.,

bénéfices économiques, sociaux et environnementaux du numérique tout au long de son déroulé. La question du découplage, déjà abordée en introduction, sera abordée dans une prochaine publication.

Méthodologie du rapport

Les auteurs partent des projections d'émissions du GIEC pour 2030 pour ensuite intégrer les solutions technologiques et mesurer leur effet potentiel. Le scénario du GIEC utilisé est celui du *Business-As-Usual* (BAU), impliquant qu'aucune mesure n'est prise pour réduire les émissions au-delà de celles déjà existantes. Celui-ci projette les émissions mondiales en 2030 à 63,5 GtCO₂e. En enlevant la part d'abattement liée aux énergies renouvelables déjà comptée dans le scénario du GIEC, l'abattement total du numérique serait de 10,3 GtCO₂e. **Le scénario du GIEC choisi est le scénario le plus pessimiste, ce choix permet alors de calculer un potentiel d'abattement plus important. Toutefois, la section du présent document dédiée aux indicateurs macroscopiques montre que ce n'est pas le scénario suivi grâce aux contributions déterminées nationales (CDN) conditionnels et inconditionnels des pays.**

Plusieurs secteurs et usages sont identifiés pour calculer l'abattement des émissions : l'industrie (*Smart Manufacturing*), l'agriculture (*Smart Agriculture*), le bâti résidentiel et tertiaire (*Smart Buildings*), l'énergie (*Smart Energy*), la logistique (*Smart Logistics*), le contrôle et l'optimisation du trafic, les transports privés connectés, le télétravail, le commerce en ligne, la télémédecine, l'enseignement en ligne et les banques en ligne.

Les estimations d'abattement sont projetées depuis trois variables : les données de référence, le taux d'adoption des technologies numériques, et les impacts pour la soutenabilité (efficacité énergétique et autres). Par exemple, pour calculer les réductions d'émissions liées à la télémédecine les données de référence sont la distance moyenne jusqu'à un hôpital et le nombre d'entrées, en y ajoutant un taux d'adoption de 75%, le développement des services de télémédecine correspond à une réduction du nombre d'entrées de 26,32% (donnée d'une étude de cas). L'abattement des réductions est calculé à partir du nombre de kilomètres évités et les émissions moyennes par litre de carburant.

Les auteurs du rapport rappellent que chacune de ces variables est soumise à de nombreuses incertitudes et encouragent à la prudence lors de l'usage de leurs estimations.

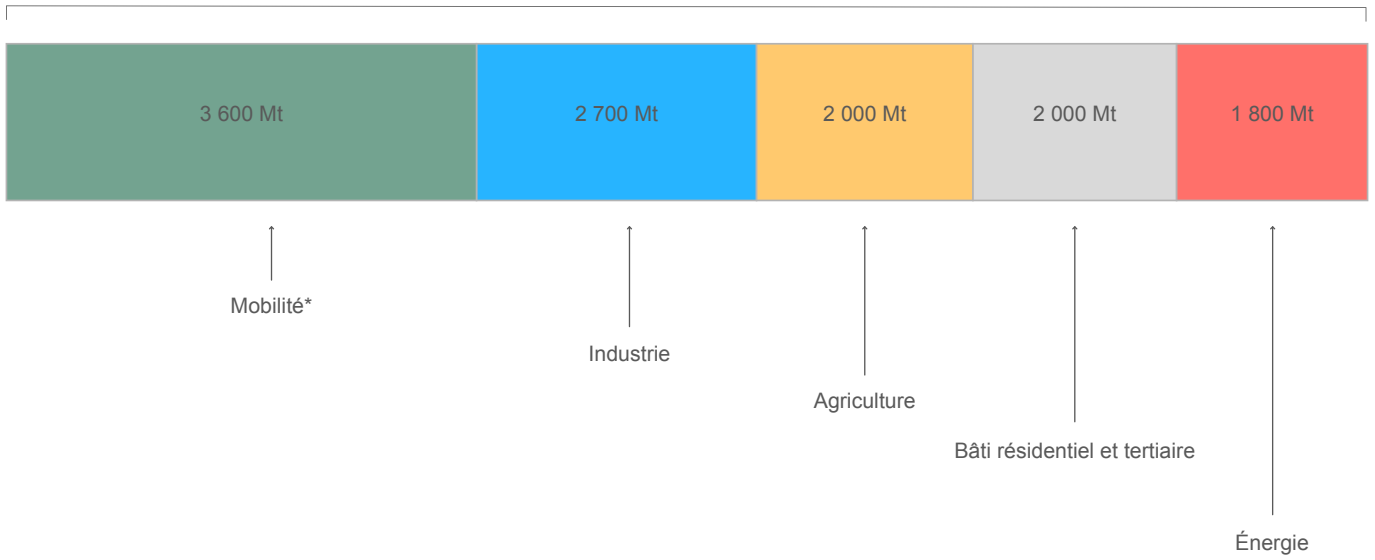
Dans ses annexes le rapport fournit un calcul des effets rebond potentiels dans chaque secteur. Ceux-ci seraient de 27,4% dans le télétravail, 20% dans la logistique ; 7% dans la télémédecine, commerces, enseignement et banques en ligne et dans les transports privés connectés ; 10% dans l'agriculture, l'industrie, le bâti et la gestion du trafic. **L'ensemble de ces effets rebond potentiels représenterait 1,37 GtCO₂e, ramenant le total à 10,71 GtCO₂e au lieu de 12 Gt⁹¹. Ce calcul des effets rebond n'est toutefois pas utilisé dans la suite du rapport.**

Les impacts du numérique sont modélisés depuis 12 études de cas fournies par des grandes entreprises du secteur numérique : Deutsche Telekom, AT&T, Microsoft, Fujitsu, Huawei, etc. Ces études de cas ont été ensuite utilisées pour modéliser des résultats dans 9 pays : États-Unis, Royaume-Uni, Chine, Inde, Allemagne, Brésil, Australie et Kenya. Les résultats obtenus dans ces neuf pays ont été extrapolés pour obtenir des projections mondiales.

« SMARTer2030 » propose aussi des projections économiques et sociales qui ne seront pas discutées ici. Ce rapport est bien moins détaillé que celui de la GSMA donc l'analyse qui suit sera plus brève et s'appuiera sur les éléments déjà observés dans le rapport « The Enablement Effect ».

⁹¹ GeSI et Accenture Strategy, « SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges », GeSI, 2015, p. 112.

12 100 Mt



Mobilité inclut la logistique, la gestion et l'optimisation du trafic, les transports privés connectés, le télétravail, le commerce et la banque en ligne, la télémédecine et l'enseignement à distance.

Fig 19 – Décomposition par secteurs des émissions évitées potentielles en 2020 selon « SMARTer 2030 » par GeSI / Accenture

Télémédecine

Les réductions d'émissions liées à la télémédecine seraient permises par quatre technologies numériques : les diagnostics à distance, les conférences vidéo, le stockage de données par voie électronique et la réalité augmentée.

Deux leviers sont identifiés : les voyages jusqu'aux lieux de soins sont réduits, et comme de moins en moins de personnes vont y aller, alors la surface nécessaire va être réduite. La réduction des trajets ainsi que la réduction de la surface amèneraient à la réduction des émissions de CO₂e.

Évitements permis par la télémédecine selon SMARTer 2030	
Litres de carburant économisés (en milliard)	1,7
Surface libérée dans les zones urbaines (en m ²)	271 400 000
Réduction des émissions de CO ₂ e (en Mt)	7
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	75%
Taux d'adoption projeté en 2030 (Hors-OCDE)	65%

Dans un premier temps, il est nécessaire de rappeler que le système de soins ne doit pas forcément être amené à réduire ses lits disponibles mais doit être pensé pour absorber les pics contagieux et les crises sanitaires. La crise de la COVID-19 est un rappel douloureux qu'un service de soins ne peut pas être compris comme une chaîne de production à optimiser. Ainsi, la réduction de la surface hospitalière ne semble pas être une hypothèse tenable notamment depuis 2020. Dans un second temps, **la réduction des voyages sur les lieux de soin dépend très largement de chaque région et pays, et des crises sanitaires qui traversent ceux-ci. Une extrapolation globale est alors très périlleuse et trop incertaine pour être effectuée.** Des données régionales et nationales seraient plus pertinentes. Finalement, **le taux d'adoption de 65-75% d'ici 2030 semble très**

optimiste et ne semble pas basé sur des études de terrain mais sur un cadre théorique de l'entreprise de conseil Gartner (Gartner Hype Cycle).

La télémédecine peut soulager les entrées hospitalières mais sa pertinence et son efficacité dépendent très largement de la région et du pays étudié, ainsi que de facteurs internes et externes : les symptômes présentés, différents risques épidémiques. Par exemple, dans l'État de New-York la télémédecine aurait permis de faire baisser la durée de séjours des admissions aux urgences entre 2010 et 2014⁹². Cependant, l'épidémie de COVID-19 dans l'état de New-York en 2020 ne permet pas de poursuivre cette tendance. Finalement, il est crucial de comprendre la qualité de la relation patient-médecin permise par la télémédecine et la qualité de soin qui en résulte.

⁹² Shujing Sun et al., « Does Telemedicine Reduce Emergency Room Congestion? Evidence from New York State », Information Systems Research 31, n° 3, 2020, 972-986.

Enseignement à distance

D'après GeSI et Accenture, l'enseignement à distance se caractérise par l'accès à des plateformes et des contenus d'éducation comme les MOOCs (*Massive Open Online Courses*), des jeux sérieux (*serious games*) ou de la réalité virtuelle via un smartphone et une connexion de bonne qualité.

Trois leviers sont mis en avant : la réduction des transports pour l'enseignement secondaire, l'enseignement supérieur et pour les formations internes. Ces réductions des trajets expliqueraient une réduction des émissions liées. L'hypothèse générale est que l'enseignement à distance permet de réduire globalement les voyages vers les lieux d'éducation de 30%

étudié spécifiquement l'impact de l'enseignement supérieur à distance aux Pays-Bas et concluent qu'une réduction est possible mais dans une moindre mesure car les étudiants aux Pays-Bas ont accès aux transports publics gratuitement⁹³. L'impact ne serait pas le même aux États-Unis ou en Australie où les trajets sont plus souvent faits en voiture. Il est aussi important d'analyser la qualité de l'enseignement possible à distance. La crise sanitaire permettra de tirer de nombreuses leçons de ce que peut et ne peut pas l'enseignement à distance.

Hypothèses de SMARTer 2030 sur l'enseignement à distance	
Réduction des trajets vers les lieux d'éducation	-30%
Évitements permis par l'enseignement à distance selon SMARTer 2030	
Litres de carburant économisés (en milliard)	5
Tonnes de papier économisées (en millions)	91
Réduction des émissions de CO ₂ e (en Mt)	100
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	65%
Taux d'adoption projeté en 2030 (Hors-OCDE)	35%

Comme pour la télémédecine, le taux d'adoption est tiré d'une théorie de Gartner et n'est pas basé sur des données empiriques. L'hypothèse générale d'une réduction des voyages de 30% est basé sur une analyse interne à Accenture qui n'est pas publiée et n'est pas auditable.

La pertinence et les effets de l'enseignement à distance sont aussi très dépendants du contexte et **peu de publications ont étudié l'effet de l'enseignement à distance sur les émissions de gaz à effet de serre**. Versteijlen et al ont

⁹³ Marieke Versteijlen et al., « Pros and cons of online education as a measure to reduce carbon emissions in higher education in the Netherlands », *Current Opinion in Environmental Sustainability* 28, 2017, pp. 80-89.

Smart Buildings

Les *Smart Buildings* sont définis comme les systèmes d'automatisation, les capteurs, l'intégration de smart grids et des compteurs intelligents (smart meters), l'analyse de la consommation d'énergie et toutes les technologies de suivi et de contrôle du bâti. Ce secteur nécessite le déploiement d'un grand nombre d'objets connectés et de capteurs et d'appareils mobiles afin d'opérer sa numérisation.

Les deux leviers considérés sont la réduction de la consommation des ménages, et celle des bâtiments commerciaux. Cette réduction est estimée à 40% pour le résidentiel et à 45% pour le commercial. Une partie des émissions évitées dans la partie *Smart Energy* est allouée au bâti, notamment par l'usage de compteurs intelligents (+1,18GtCO₂e).

Ce secteur a largement été traité dans l'analyse précédente et sera donc peu commenté ici. **On peut néanmoins surligner les hypothèses très optimistes d'Accenture sur la réduction de la consommation d'énergie (-40%, -45%) qui ne correspondent pas à la littérature existante sur l'effet des compteurs intelligents.**

Smart Agriculture

L'agriculture connectée inclut l'usage de cartographies numériques, de capteurs, de communication machine-à-machine (M2M), d'analyses de données et de plateformes de gestion de l'information. Ce secteur requiert une bonne connexion internet et de nombreux appareils et objets connectés pour se numériser. Les cas d'usage projetés vont de l'agriculture de précision (capteurs, vue satellites, analyse de données), des plateformes d'information, des systèmes de gestion agricole, à la traçabilité et au suivi de la logistique alimentaire.

Les leviers évoqués sont : la réduction de la consommation d'énergie grâce à des capteurs permettant de mieux utiliser les machines agricoles, une plus grande efficacité à l'usage des fertilisants, un meilleur usage des ressources pour l'alimentation du bétail et pour la gestion du

Hypothèses de SMARTer 2030 sur les <i>Smart Buildings</i>	
Réduction de la consommation d'énergie des ménages grâce à des compteurs intelligents	-40%
Réduction de la consommation d'énergie des bâtiments commerciaux grâce à des compteurs intelligents	-45%
Évitements permis par les <i>Smart Buildings</i> à distance selon SMARTer 2030	
MWh économisés (en milliard)	5
Litres d'eau économisés (en milliard)	300
Réduction des émissions de CO ₂ e (en Mt)	2 000
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	30%
Taux d'adoption projeté en 2030 (Hors-OCDE)	20%

fumier, et une plus grande efficacité des ressources pour la culture du riz.

Les hypothèses citées ci-dessous proviennent de nouveau d'analyses internes. Les chiffres annoncés sont phénoménaux : estimer que la numérisation permet de réduire de 65% la demande d'énergie du secteur agricole et que cela sera adopté à hauteur de 75% dans l'OCDE semble extrêmement improbable. Dans une analyse systématique des publications sur les technologies « intelligentes » d'agriculture (SFT), **Balafoutis et al** montrent que la grande majorité des articles scientifiques ne se prononcent pas sur les réductions d'émissions de GES liées à ces technologies⁹⁴. Les réductions envisagées viennent plutôt de publications commerciales ou d'articles de recherche (sans publication dans une revue scientifique).

⁹⁴ Athanasios T. Balafoutis et al., « Smart Farming Technology Trends: Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness », *Agronomy* 10, no. 5, 2020, p. 743.

Hypothèses de SMARTer 2030 sur la Smart Agriculture	
Réduction de la consommation d'énergie de l'agriculture	-65%
Réduction de l'usage des fertilisants	-65%
Réduction des émissions de GES liées à la digestion du bétail	-65%
Réduction des émissions de GES liées à la gestion du fumier	-50%
Réduction des émissions de GES liées à la riziculture	-40%
Réduction du gaspillage alimentaire lors du transport et du stockage des denrées	-20%
Évitements permis par la Smart Agriculture selon SMARTer 2030	
MWh économisés (en milliard)	1
Litres d'eau économisés (en milliard)	251 000
Réduction des émissions de CO ₂ e (en Mt)	2 000
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	75%
Taux d'adoption projeté en 2030 (Hors-OCDE)	45%

D'après Shoaib Farooq et al, de nombreux obstacles bloquent l'adoption des technologies numériques pour l'agriculture : la sécurité des données et des capteurs, le coût d'installation et d'abonnement, le manque de connaissances sur ces technologies, la fiabilité, la difficulté de mise à l'échelle, la localisation et l'interopérabilité⁹⁵. Chaque technologie doit être analysée au cas par cas afin de déterminer ses bénéfices.

Smart Mobility

La *Smart Mobility* est comprise comme l'ensemble des systèmes connectés permettant le contrôle et l'optimisation du trafic, les services de transport privé (covoiturage, VTC, etc.) et la logistique « intelligente ». Ces systèmes requièrent le déploiement et l'activation d'un ensemble d'appareils et d'objets connectés ainsi qu'un large accès au réseau internet.

Pour les transports privés connectés, les leviers sont une baisse du transport grâce au covoiturage et à l'autopartage, et une baisse de la production de voitures. Il est fait l'hypothèse que le co-voiturage réduit les kilomètres parcourus de 30%, que l'autopartage va réduire le nombre de

voitures en circulation de 15%, tout en augmentant le nombre de kilomètres parcourus par 20%, et finalement que le nombre de voitures produites va réduire de 15%.

Concernant la gestion et l'optimisation du trafic, les leviers sont une réduction des distances parcourues à hauteur de 25% et du carburant consommé de 30% et la réduction des kilomètres parcourus en voiture privée à hauteur de 25%, due à l'attractivité des transports publics via le numérique.

La logistique « intelligente » s'appuierait sur quatre leviers : une baisse du fret routier (30%),

⁹⁴ Athanasios T. Balafoutis et al., « Smart Farming Technology Trends: Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness », *Agronomy* 10, no. 5, 2020, p. 743.

⁹⁵ Muhammad S. Farooq et al., « Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review », *Electronics* 9, no. 2, 2020, p. 319.

Hypothèses de SMARTer 2030 sur la Smart Mobility	
Transports privés connectés	
Réduction du nombre de kilomètres parcourus grâce au co-voiturage	-30%
Réduction du nombre de véhicules en circulation grâce à l'autopartage	-15%
Augmentation du nombre de kilomètres parcourus à cause de l'autopartage	+20%
Réduction de la production de voitures	-15%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	50%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	40%
Gestion intelligente et optimisation du trafic	
Réduction des distances parcourues	-25%
Réduction du carburant consommé	-30%
Réduction du nombre de kilomètres parcourus en voiture privée	-25%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	45%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	10%
Logistique intelligente	
Réduction du fret routier grâce à la logistique intelligente	-30%
Réduction du fret maritime grâce à la logistique intelligente	-20%
Réduction du fret ferroviaire grâce à la logistique intelligente	-25%
Réduction du fret aérien grâce à la logistique intelligente	-20%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	85%
Taux d'adoption projeté en 2030 (Hors-OCDE)	75%

Évitements permis par la Smart Mobility selon SMARTer 2030	
Litres de carburant économisés (en milliard)	723
Réduction des émissions de CO ₂ e (en Mt)	2 600

maritime (20%), ferroviaire (25%) et aérien (20%) grâce à l'optimisation des routes et à la maximisation des capacités de transport.

D'une manière ironique, les hypothèses utilisées pour la mobilité relèvent subtilement d'un scénario de décroissance du secteur : baisse de production des voitures de 15%, baisse de fret tous transports confondus, augmentation de l'usage des transports publics. Ceci avec un taux d'adoption très élevé dans l'OCDE comme en dehors. Malheureusement, **comme expliqué dans l'analyse précédente, les véhicules en circulation et le fret continuent à augmenter dans le monde**. Les effets rebond de certains usages (covoiturage, autopartage, etc.) sont encore mal connus. Il a été estimé à Paris que les effets rebond du covoiturage annulent 68 à 77% des réductions d'émissions⁹⁶. Dans une étude en analyse de cycle de vie sur l'autopartage, il a été estimé que cet usage réduit entre 3 et 18% les émissions de GES en fonction des zones étudiées⁹⁷ (Calgary, Pays-Bas, San Francisco). Ainsi, **les hypothèses présentées semblent une nouvelle fois trop optimistes**.

⁹⁶ Nicolas Coulombel et al., « Substantial rebound effects in urban ridesharing: Simulating travel decisions in Paris, France », Transportation Research Part D: Transport and Environment 71, 2019, pp. 110-126.

⁹⁷ Levon Amatuni et al., « Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective », Journal of Cleaner Production 266, 2020.

Smart Energy

Le rapport définit la Smart Energy comme l'inclusion de compteurs intelligents, d'outils de collecte de données, de systèmes d'analyse de données afin d'optimiser la gestion de la demande et la fourniture d'énergie. Cela implique la gestion de réseaux d'énergies intermittentes, des réponses en temps réel aux demandes d'énergie et le suivi de la maintenance de l'infrastructure.

Les trois leviers présentés sont : la réduction de la demande d'énergie liée à des systèmes plus efficaces, la production d'énergies renouvelables et la réduction de la perte liée au transport et à la distribution de l'énergie. Les deux hypothèses sont que la numérisation peut réduire la production d'énergie de 20% et les pertes de transport et de distribution de 5%

Hypothèses de SMARTer 2030 sur la <i>Smart Energy</i>	
Réduction de la production d'énergie	-20%
Réduction des pertes liées au transport et à la distribution d'énergie	-5%
Évitements permis par la <i>Smart Energy</i> selon SMARTer 2030	
MWh économisés (en milliard)	6,3
Réduction des émissions de CO ₂ e (en Mt)	1 610
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	30%
Taux d'adoption projeté en 2030 (Hors-OCDE)	15%

Les hypothèses de -20% et -5% proviennent encore une fois d'une analyse interne d'Accenture qui n'est pas accessible et donc invérifiable. Toutefois, **estimer que la numérisation permettrait de réduire de 20% la production d'énergie mondiale va à l'encontre de presque toutes les prévisions disponibles sur l'évolution de la production et de la demande d'énergie mondiale**⁹⁸. Les scénarios de découplage entre la croissance économique et les émissions de GES, plébiscités par les auteurs

du rapport, impliquent pour la plupart des scénarios une croissance de la production énergétique—dont les émissions seraient réduites par l'inclusion d'énergie renouvelable. Cette hypothèse n'est pas cohérente avec la littérature et les projections existantes de l'Agence Internationale de l'Énergie (IAE) par exemple⁹⁹. Une hypothèse supplémentaire suggère que l'ICT permettra le déploiement d'énergies renouvelables réduisant encore les émissions de 1,8 GtCO₂e. Pourtant, **il est incorrect que le secteur numérique s'attribue un rôle majeur dans le déploiement d'EnR. Les investissements des États, la baisse du prix des EnR au kWh sont des facteurs primordiaux pour ce déploiement. Le numérique a un rôle à jouer mais il ne peut pas se permettre de s'afficher comme un facteur primordial.**

Les effets de l'ICT sur le secteur énergétique ont déjà été discutés dans l'analyse précédente mais il est important de rappeler que ces effets sont toujours contextuels à un pays, un type d'infrastructure énergétique, de mix énergétique, à un climat et à des taux d'équipements.

⁹⁸ Voir Point d'Étape Planétaire.

⁹⁹ « World Energy Outlook 2020 », IEA, 2020, consulté le 9 février 2021, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.

Travail et affaires

Cette catégorie hétérogène regroupe le commerce en ligne, la banque en ligne et le télétravail. Ces services requièrent le déploiement massif d'appareils connectés et un large accès au réseau.

Le commerce en ligne ferait appel à un levier : une réduction des trajets vers les zones et centres commerciaux de 50%, et un effet rebond qui serait l'augmentation du transport logistique (Amazon, etc.).

Les services bancaires en ligne s'appuieraient sur deux leviers : une baisse des transports vers les banques (50%) et une baisse des émissions de GES par employé de banque (50-60%).

Le télétravail disposerait de trois leviers : la baisse des trajets domicile-travail (53%), la baisse des voyages d'affaires en voiture (80%) et celle des voyages d'affaires en avion (80%).

Les effets du télétravail ont été abordés dans la première analyse et ne seront pas répétés ici. Néanmoins, d'après la littérature évoquée précédemment, **une réduction des trajets domicile-travail de 53% semble une hypothèse très élevée et est sujette à de nombreux effets rebond**. Une baisse des voyages d'affaires en avion de 80% semble très élevée, sachant que les voyageurs d'affaires représentent 12% du trafic mondial mais une part conséquente du revenu des compagnies aériennes. À titre d'exemple, les voyages d'affaires en avion ont baissé jusqu'à 90% sur l'année 2020 aux États-Unis durant la crise sanitaire¹⁰⁰. Cette baisse de trafic a provoqué une crise phénoménale sur cette industrie, et celle-ci espère attirer de nouveau les voyageurs d'affaires dès que possible. **Les hypothèses avancées par les auteurs du rapport sont en contradiction fondamentale avec les scénarios de croissance économique annoncés.**

Concernant le commerce en ligne, une publication de 2020 de Shahmohammadi et al compare les émissions de GES entre l'achat de produits de grande consommation en ligne via livraison au domicile (*Pure Players*), en ligne puis

Hypothèses de SMARTer 2030 sur Travail et affaires	
Commerce en ligne	
Réduction des trajets vers les zones et centres commerciaux	-50%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	90%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	50%
Services bancaires en ligne	
Réduction des trajets vers les banques	-50%
Réduction des émissions de GES par employé de banque	-50~60%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	77%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	60%
Télétravail	
Réduction des trajets domicile-travail	-53%
Réduction des voyages d'affaires en voiture	-80%
Réduction des voyages d'affaires en avion	-80%
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	80%
Taux d'adoption projeté en 2030 (Hors-OCDE)	32%
Évitements permis par Travail et affaires selon SMARTer 2030	
Litres de carburant économisés (en milliard)	331,3
Réduction des émissions de CO ₂ e (en Mt)	600

en retrait en magasin (*Bricks & Clicks*), et l'achat en magasin (*Bricks & Mortar*) au Royaume-Uni. Les émissions par produit sont généralement plus importantes chez les vendeurs en ligne avec livraison à domicile, notamment à cause du transport sur le dernier kilomètre. **La solution**

¹⁰⁰ « Corporate and business travel will undergo a fundamental transformation », CAPA Center for Aviation, 2020, consulté le 9 février 2021, <https://centreforaviation.com/analysis/airline-leader/corporate-and-business-travel-will-undergo-a-fundamental-transformation-536596>.

médiane de commande en ligne et de retrait en magasin présente la meilleure empreinte carbone¹⁰¹. Toutefois, il peut y avoir une grande variabilité de l'empreinte en fonction du pays, les émissions par produit fabriqué en Chine sont bien plus basses en Chine qu'aux États-Unis ou au Royaume-Uni par exemple. Le contexte fait donc largement varier les résultats.

¹⁰¹ Sadegh Shahmohammadi et al., « Comparative Greenhouse Gas Footprinting of Online versus Traditional Shopping for Fast-Moving Consumer Goods: A Stochastic Approach », *Environmental Science & Technology* 54, n° 6, 2020, pp. 3499-3509.

Smart Manufacturing

Le *Smart Manufacturing* désigne des développements technologiques liés au concept de « Quatrième révolution industrielle », comme l'Internet Industriel des Objets (IIoT), la robotique, les drones, des appareils de réalité augmentée, l'impression 3D, des systèmes de production embarqués et des systèmes cyber-physiques. Cela demande le déploiement massif de nouvelles infrastructures de télécommunication et la modification des appareils de production.

Hypothèses de SMARTer 2030 sur le <i>Smart Manufacturing</i>	
Réduction des émissions de GES grâce à l'automatisation des processus industriels	-50%
Réduction des émissions de GES grâce à l'optimisation des machines	-40%
Évitements permis par le <i>Smart Manufacturing</i> selon SMARTer 2030	
Litres d'eau économisés (en milliard)	81 182
MWh économisés (en milliard)	4,2
Réduction des émissions de CO ₂ e (en Mt)	2 700
Taux d'adoption projeté en 2030 (OCDE)	75%
Taux d'adoption projeté en 2030 (Hors-OCDE)	65%

Les leviers évoqués sont l'automatisation des processus industriels et l'optimisation des machines. L'automatisation des processus industriels de fabrication et de refroidissement pourrait réduire leurs émissions jusqu'à 50%, l'optimisation des machines pourrait réduire leurs émissions jusqu'à 40%.

Les hypothèses de réduction présentées ici proviennent de discussions entre l'équipe d'Accenture et les experts du secteur, toutefois leurs entreprises respectives et les conversations ne sont pas publiées. Il faut noter que les auteurs du rapport utilisent l'hypothèse la plus haute, « jusqu'à 50% », pour faire leurs estimations. On peut alors affirmer que celles-ci sont trop élevées car elles ne représentent pas un scénario médian.

Au vu de la littérature existante il est complexe de se prononcer sur les effets réels de l'automatisation industrielle possible avec l'IIoT. Certains secteurs industriels sont déjà largement automatisés et la plus-value semble plus maigre. Toutefois, d'après Stock et al, **les technologies regroupées sous le concept de « Industrie 4.0 » semblent prometteuses pour la gestion des déchets, la réutilisation de matière et sur l'efficacité énergétique. Cette publication souligne aussi les limites de l'automatisation concernant la consommation de matières par produit et sur la consommation d'énergie de l'équipement industriel**¹⁰².

¹⁰² Tim Stock et al., « Industry 4.0 as Enabler for a Sustainable Development: A Qualitative Assessment of its Ecological and Social Potential », *Process Safety and Environmental Protection* 118, 2018, pp. 254-267.

Conclusion sur « SMARTer2030 »

Le rapport propose une méthodologie bien moins robuste que celle présentée quelques années plus tard par la GSMA et Carbon Trust. S'appuyer sur 12 études de cas présentées par des professionnels de l'industrie implique des chiffres de départ généralement optimistes et spécifiques à des contextes précis. Ces études de cas sont passées à travers les variables de 9 pays pour ensuite être extrapolées au niveau mondial. Ce type d'extrapolation de cas spécifique vers des tendances mondiales présente de sévères lacunes déjà identifiées par Malmmodin et al en 2014¹⁰³ : une déconnexion entre le potentiel de l'ICT et les impacts réellement adressables, et la nécessité d'intégration des analyses de cycle de vie plutôt que des données provenant d'une seule étape du cycle de vie, comme une étude de cas.

Les réductions d'émissions de GES sont calculées à partir des leviers et des effets multiplicateurs qui sont aujourd'hui largement mis à défaut par la littérature scientifique existante. Les taux d'adoption viennent d'un cadre théorique de l'entreprise de conseil Gartner, ceux-ci ne sont donc pas renseignés par des données de terrain et restent hautement spéculatifs. **Il est donc plus prudent d'affirmer que les résultats annoncés sont trop incertains, datés et pas exploitables en l'état.**

Il est finalement intéressant de constater que les scénarios proposés par GeSI et Accenture projettent une prospérité économique pour le secteur de l'ICT mais impliquent une décroissance ciblée d'autres secteurs : la numérisation ferait baisser la production de voitures de 15% en 2030, les voyages d'affaires en avion et en voiture de 80%, production d'énergie de 20%, pour citer quelques-unes des hypothèses utilisées dans le rapport. Celles-ci impliquent donc des modèles économiques tout-à-fait différents des scénarios habituels de croissance économique et pointent plutôt vers des scénarios de croissance et de décroissance ciblées.

Au vu de la méthode utilisée, des données de base et des hypothèses ultra-optimistes, les estimations proposées par GeSI et Accenture

ne devraient pas être utilisées pour l'évaluation des impacts environnementaux, positifs comme négatifs, du numérique. Cela ne veut pas dire que les études de cas ou certaines des hypothèses présentées sont incorrectes par défaut, en revanche leur utilisation et leur extrapolation sont faussées et ne permettent pas de définir concrètement les effets potentiels du numérique dans chaque secteur.

¹⁰³ Jens Malmmodin et al., « Considerations for macro-level studies of ICT as enablement potential », ICT for Sustainability 2014 (ICT4S-14) 179, n° 188, 2014.

Prospecter le numérique

Prospecter le numérique : trouver les effets positifs dans les bons contextes

L'analyse des rapports de la GSMA et de GeSI, bien que questionnable sur leur méthodologie, fournit des pistes pour identifier les sujets qu'il semble intéressant d'approfondir. L'approche sectorielle permet de relever des services potentiellement intéressants. Le défi est toutefois titanesque : **il s'agit de diviser par 4 à 5 les émissions de GES d'ici 2050**. Toutes les technologies abordées sont ainsi approchées avec ce défi en tête.

Dans le secteur du bâti résidentiel et tertiaire, d'après l'évolution des émissions de GES, les solutions numériques qui évitent l'étalement urbain seraient particulièrement utiles, bien que ce type de services ne semble pas exister pour l'instant. En plus, tout service numérique pour repérer et réduire les îlots de chaleur urbaine, à l'usage des urbanistes, permettrait de réduire le développement de la climatisation dans les zones urbaines. La numérisation peut permettre de piloter et optimiser les systèmes de chauffage et de climatisation dans le tertiaire et le bâti commercial mais doit être étudiée au cas par cas pour éviter les effets rebond. **De façon générale, améliorer la performance thermique des bâtiments est un chantier fondamental qui doit être financé en priorité. Dans ce cadre, la numérisation des systèmes de contrôle est alors complémentaire mais non centrale.**

Dans le secteur de l'énergie, si des investissements massifs vont dans les EnR alors la numérisation pourra aider le pilotage de réseaux distribués d'énergies intermittentes. Cela semble le principal cas d'usage. Le transport et la distribution de l'électricité sont déjà largement optimisés dans les pays de l'OCDE, toutefois des améliorations marginales restent possibles. Les compteurs intelligents pourraient permettre de réduire un peu la consommation d'énergie des ménages si les effets rebond sont maîtrisés. Dans ce secteur, le but est de réduire la consommation d'énergie, puis de décarboner le mix restant. Malheureusement, le secteur numérique augmente drastiquement sa consommation d'énergie et il en va de même pour les autres secteurs d'activité. Même s'il intensifie l'usage des énergies renouvelables sur certaines parties de son infrastructure, comme les centres

de données, le secteur numérique ne pourra décarboner l'ensemble de la consommation d'énergie liée à la fabrication (extraction minière, transport, etc.). **La numérisation ne permet pas en l'état de répondre au principal défi de la transition énergétique.**

Services numériques alignés avec les enjeux de transition
Secteur du bâti résidentiel et commercial
<i>Objectifs de transition : stopper l'étalement urbain, réduire l'usage de la climatisation, réduire les îlots de chaleur urbains, améliorer la performance énergétique du bâti, ...</i>
Services numériques existants potentiellement positifs
Service d'amélioration de la performance énergétique
Service pour repérer et réduire les îlots de chaleur urbains
Nouveaux numériques services potentiels
Service permettant l'évitement de l'étalement urbain
Service pour réduire le développement de la climatisation
Secteur de l'énergie
<i>Objectifs de transition : réduire la consommation d'énergie (en valeur absolue), décarboner le mix restant, ...</i>
Services numériques existants potentiellement positifs
Service d'interconnexion du réseau électrique distribué et intermittent
Nouveaux numériques services potentiels
Service pour réduire la consommation d'énergie du numérique en valeur absolue
Secteur des transports
<i>Objectif de transition : réduire le nombre de véhicules en circulation, favoriser les véhicules moins émetteurs, augmenter l'usage des transports communs, ...</i>
Services numériques existants potentiellement positifs
Service favorisant l'usage des vélos
Service favorisant l'usage des transports publics
Nouveaux numériques services potentiels
Service pour réduire l'achat et l'usage de véhicules émetteurs (SUV, etc.)

Concernant les activités quotidiennes (télétravail, télé médecine, commerces, banques), le télétravail reste généralement bénéfique si un certain nombre de conditions sont réunies. Les gains sont toujours contextuels et peuvent déjà être évalués en conséquence. Cela dit, il y a un risque que le télétravail favorise l'étalement urbain évoqué plus haut, ce mécanisme doit donc être surveillé de près. Les conférences en ligne, si elles remplacent effectivement une conférence en présentiel dans un lieu éloigné (séminaire, symposium, etc.), sont aussi généralement très positives en termes d'émissions évitées. Le commerce en ligne opérant via un Click & Collect semble le meilleur scénario pour réduire les émissions liées à l'achat en ligne. La télé médecine semble plus complexe à évaluer de façon globale, sa pertinence dépendra de nombreux facteurs contextuels. Par exemple, il n'est pas forcément évident pour un médecin généraliste d'émettre un diagnostic à distance et les consultations en ligne peuvent amener à un trajet vers un lieu de soin dans tous les cas. Il en va de même pour l'enseignement à distance, la réduction d'émissions de GES dépend fortement du contexte. Dans tous les cas, l'enseignement à distance remplit une fonction de support qui a notamment été utile durant les confinements successifs. Son usage doit tout de même être pondéré pour permettre la sociabilité entre étudiants et enseignants et pour maintenir la qualité de l'enseignement. Un cours en ligne et un cours en présentiel n'ont pas le même usage et leur contenu doit être différencié. **Ainsi, la numérisation n'est pas pertinente dans tous les contextes mais peut être, au cas par cas, un bon support pour tendre vers une meilleure qualité de soins, d'enseignements et de conditions de travail.**

Pour être pertinente la numérisation de la mobilité et de la logistique doit viser à réduire le nombre de véhicules en circulation, de favoriser les véhicules les moins émetteurs, de réduire les émissions des véhicules restants et de favoriser le développement des mobilités douces. Face à tous ces défis, la numérisation ne sera pas un facteur déterminant, comparé aux choix d'urbanisme et de taxation des véhicules, mais peut soutenir un effort global. Des usages sont déjà identifiés comme inefficaces concernant la réduction des émissions : les effets rebond des services de VTC surpassent les émissions évitées par exemple. Favoriser les transports publics et l'usage de vélos, par rapport aux

Services numériques alignés avec les enjeux de transition
Secteur Travail, Affaires, Santé
<i>Objectifs de transition : réduire les trajets quotidiens et les voyages professionnels, améliorer la qualité de soin et d'enseignement, ...</i>
Services numériques existants potentiellement positifs
Services de conférence en ligne
Service de Click & Collect
Service de réduction de la consommation
Nouveaux numériques services potentiels
Pas de nouveau service potentiel identifié
Secteur de l'industrie
<i>Objectifs de transition : réduire la consommation de matières, réduire la production de déchets et les pollutions, réduire la consommation d'énergie en valeur absolue, ...</i>
Services numériques existants potentiellement positifs
Service de réduction des déchets de production
Service de réemploi de la matière
Service de maintenance industrielle
Nouveaux numériques services potentiels
Pas de nouveau service potentiel identifié
Secteur de l'agriculture
<i>Objectif de transition : réduire l'usage d'intrants chimiques, réduire la consommation d'eau en valeur absolue, réduire la consommation d'énergie en valeur absolue, réduire la production de viande, développer l'agro-écologie, ...</i>
Services numériques existants potentiellement positifs
Pas de recommandation
Nouveaux numériques services potentiels
Pas de nouveau service potentiel identifié

voitures, est pertinent. L'optimisation du trafic aura des limites physiques liées à l'aménagement des villes, de même que l'optimisation du transport logistique pourra amener à une intensification, contre-productive, des flux de marchandises. Les contextes d'application seront primordiaux là aussi.

La numérisation de l'agriculture semble confrontée à de nombreux obstacles pour être considérée comme un phénomène global. De nombreux types d'exploitations ne nécessitent pas d'applications numériques et n'ont pas les

moyens de les déployer. La Chine est sûrement un pays au sein duquel les nouvelles technologies sont largement expérimentées dans le secteur agricole (épandage par drone, blockchain, etc.). Cependant, du recul sera nécessaire pour évaluer l'impact et la pertinence de ces déploiements.

Le secteur industriel a déjà été fortement numérisé sous différents aspects, de nombreuses chaînes de production sont automatisées, comme dans l'industrie automobile par exemple. À terme ce secteur doit viser à réduire l'intensité matérielle et énergétique par produit, et, comme tous les autres secteurs diviser ses émissions par 5. L'appareil industriel va donc devoir stabiliser sa capacité de production pour que les possibles optimisations aient un effet réducteur. Au-delà d'une automatisation sous contrôle, des usages peuvent être potentiellement intéressants pour le réemploi de la matière et la réduction des déchets lors de la phase de production.

Ainsi, seule une bonne compréhension des contextes d'application permettra de structurer l'usage, ou non, d'une technologie numérique afin qu'elle soit efficace pour réduire les émissions. Cela implique que les usages proposés soient évalués avant leur déploiement, plutôt qu'après, sur l'ensemble des critères de transition écologique. Il est aussi primordial de regarder tous les autres indicateurs afin d'anticiper des transferts de pollution : la consommation d'eau, de ressources et la production de déchets doivent être réduites en même temps que les émissions. **La pertinence de la numérisation dépend ainsi du contexte d'application : le passage à l'échelle d'une technologie n'est pas systématiquement pertinent pour la réduction de l'impact environnemental des activités humaines. Cela sera d'ailleurs un point de tension majeur entre les modèles économiques qui sous-tendent l'écosystème numérique actuel et les stratégies de transition écologique.**

Conclusion générale

L'étude des affirmations d'impacts positifs du numérique sur le climat permet de conclure que celles-ci ne peuvent pas être utilisées pour informer les décisions politiques ou la recherche. Elles reposent sur des données extrêmement parcellaires et des hypothèses trop optimistes pour extrapoler des estimations globales. De plus, **les deux rapports étudiés ne voient pas les évitements dans les mêmes secteurs, voire se contredisent**. Cependant, ces rapports ne sont pas des publications scientifiques et ont plutôt pour vocation de produire des chiffres clés communicables dans un but de promotion. Ils sont là en partie pour attirer des investissements dans un secteur d'activité. Il pourrait être opposé que les chiffres annoncés n'ont pas été atteints car les investissements nécessaires n'ont pas été réalisés mais cela ne répond pas à tous les défauts soulevés par la présente analyse. Cette logique serait tout de même incertaine car cela représenterait une tautologie : il faudrait toujours

plus numériser dans l'espoir que le numérique atteigne son plein potentiel. Or, **la présente analyse suggère que, aujourd'hui, le secteur numérique n'offre pas de garantie sur la question environnementale**.

La littérature étudiée tend à utiliser des hypothèses généralement très optimistes plutôt que des hypothèses médianes. Cela doit être questionné car utiliser des hypothèses optimistes sur l'évitement d'émissions présente un risque certain. Sur la question climatique, il est préférable que toute la littérature à venir s'appuie sur des scénarios médians et que les scénarios pessimistes soient envisagés et étudiés sérieusement. Émettre bien moins que prévu ne présente pas du tout le même niveau de risque qu'émettre plus que prévu. De même, **la littérature étudiée estime que le numérique ne permet que la substitution d'équipements et remplace des usages. L'empilement des**

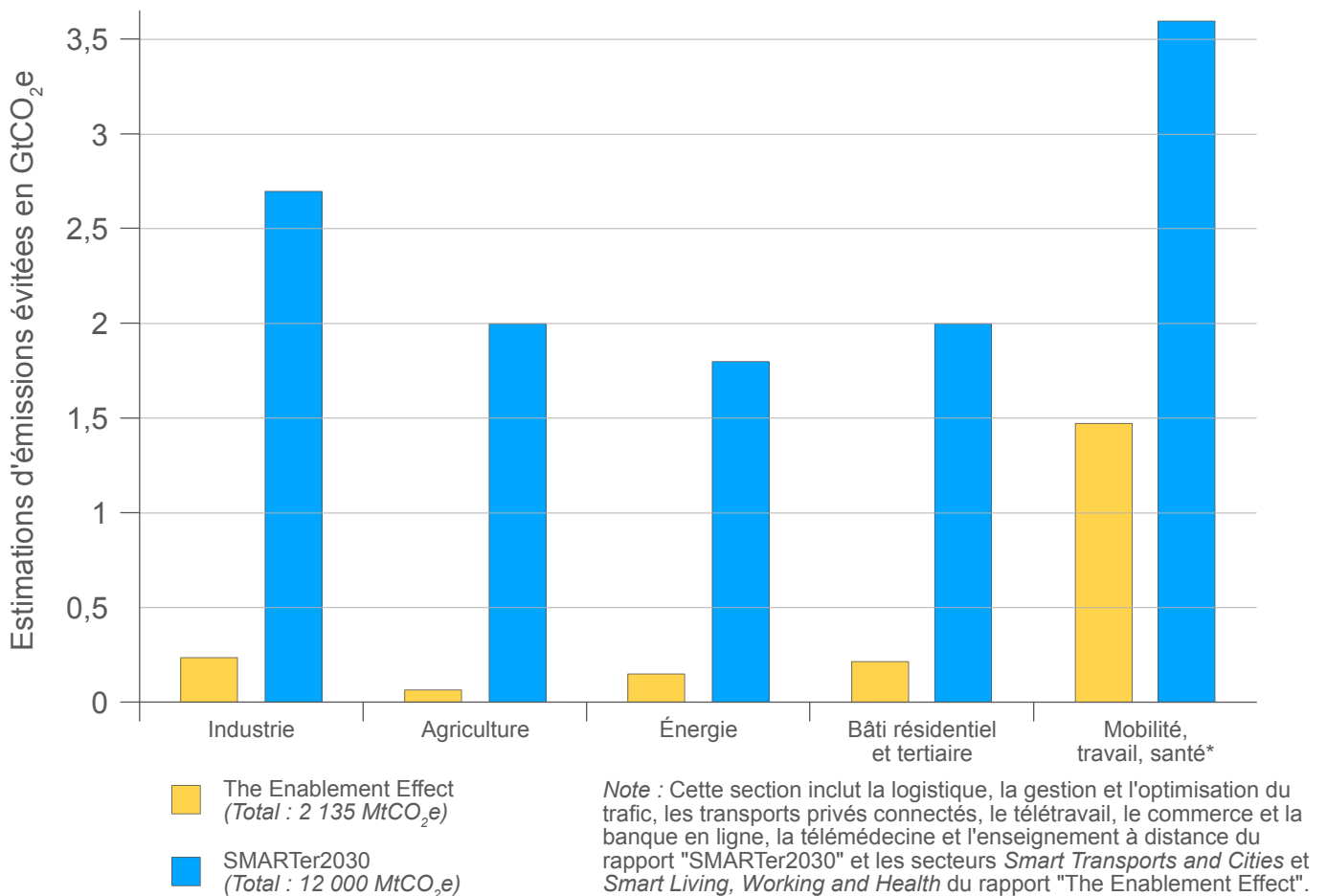


Fig 20 – Synthèse des estimations d'émissions évitées par secteur et par publication

usages et des équipements n'est généralement pas considéré. Finalement, si le numérique peut éviter des émissions dans tous les secteurs cela veut dire qu'il peut aussi en permettre, comme les hausses de production liées à l'efficacité et l'optimisation par exemple, donc au-delà des effets rebond. Ce double calcul permettrait d'avoir une balance nette car aujourd'hui ces rapports présentent une balance hypothétique brute.

Les rapports de la GSMA et GeSI sont néanmoins une source d'information pour essayer d'identifier ou de confirmer les secteurs et les usages où le numérique pourrait atteindre son plein potentiel de réduction des émissions. En effet, les conférences en ligne présentent un grand potentiel pour éviter les trajets terrestres ou aériens et les émissions liées, de même pour l'amélioration de l'usage des transports publics et leur qualité. **Aujourd'hui, il semble que les gains d'efficacité et d'optimisation permettront généralement d'augmenter la productivité et le flux de matière et d'énergie associé, pas de le stabiliser ou de le réduire. L'écosystème numérique (industriels, opérateurs, états, fabricants, consommateurs, ...) doit être extrêmement vigilant à stabiliser et réduire sa consommation d'énergie en valeur absolue plutôt que de décarboner la croissance de celle-ci grâce à la monopolisation des capacités de production d'énergies renouvelables.** Cela permettra à d'autres secteurs d'effectuer leur transition plus rapidement. Enfin, nos modèles de développement ne nous permettent pas de voir certaines autres opportunités de développement du numérique pour la transition : à quoi ressemblerait un service numérique pour éviter l'étalement urbain ? À quoi ressemblerait un service pour éviter l'usage de la climatisation ? En retournant la façon dont nous envisageons le numérique nous pourrions faire advenir de nouveaux secteurs d'activités et des services dont les effets positifs seraient beaucoup plus certains.

Quatre leçons sont à tirer de la présente analyse pour mieux qualifier les impacts positifs du numérique sur le climat. Premièrement, il est important à terme de comprendre ce que la numérisation peut et ne peut pas à l'égard de la transition écologique. Une posture agnostique est recommandée : il ne s'agit pas de partir du principe que plus de numérique permet forcément des gains environnementaux mais plutôt de

comprendre précisément, à travers des exemples dans des territoires précis, les conditions qui permettent ces gains et à quel point elles sont reproductibles. Deuxièmement, **les technologies numériques ne remplacent pas des politiques concrètes d'aménagement du territoire, de programmation énergétique, d'investissement industriel, etc. La numérisation ne doit pas être une politique incantatoire ou une défusse des politiques nationales.** Troisièmement, la numérisation n'est qu'un facteur parmi d'autres et il n'est généralement pas le plus important. Il semble contreproductif de survendre l'effet de la numérisation quitte à minorer les autres facteurs bien plus efficaces. Finalement, il ne semble pas pertinent de faire des extrapolations au niveau mondial au vu du manque de données, c'est peut-être pour cela qu'il n'y a pas de publications scientifiques sur le sujet a priori. Il serait préférable que les prochaines estimations soient restreintes au niveau national tout en maintenant une analyse sectorielle.

Le poids environnemental de la numérisation comme ses bénéfices sont complexes à estimer. La crise environnementale demande une grande vigilance et une exigence sur les systèmes que nous utilisons et développons. **Dans le cas du secteur numérique nous ne sommes qu'au tout début d'une longue enquête pour comprendre où est-ce que celui-ci présente un bénéfice environnemental net et dans quelles conditions, et où est-ce qu'il représente un fardeau écologique.** Aujourd'hui, nous vivons dans un modèle de développement du numérique très particulier, formulé originellement hors de toute considération environnementale, qu'il sera nécessaire de réorienter, reste à savoir où et comment.

Crédits

Auteur

Gauthier Roussilhe

Relecteurs

Thomas Lemaire, Alain Tord, Maël Levet

Date de publication

8 mars 2021

Image de couverture

Winslow Homer, Eight Bells (domaine public)

Site web

conseil.gauthierroussilhe.com

Remerciements

Merci à Thomas Lemaire, Alain Tord, Maël Levet, Adrien Jahier et Florimond Manca pour leur relecture et leurs corrections qui ont contribué à rendre ce rapport meilleur.

Glossaire

ACV : Analyse de Cycle de Vie, méthode d'évaluation normalisée (ISO 14040 et 14044) permettant de réaliser un bilan environnemental multicritère et multi-étape d'un système (produit, service, entreprise ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie.

BAU : Business As Usual, comme d'habitude, sans changement de méthode.

Bottom-up : partir du détail, du « bas », c'est-à-dire l'échelon le plus fin, pour consolider progressivement et opérer une synthèse.

CO₂e : l'équivalent CO₂ est, pour un gaz à effet de serre, la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) qui provoquerait le même forçage radiatif que ce gaz, c'est-à-dire qui aurait la même capacité à retenir le rayonnement solaire

CPE : Customer Premises Equipment ou «Équipement dans les Locaux du Client, désigne tout équipement installé dans le site d'un client (particulier, entreprise...) et qui est raccordé à l'infrastructure d'un opérateur/fournisseur de service.

Découplage : objectif de séparer la prospérité économique (génération de revenu, croissance économique) de la consommation de ressources et d'énergie (impact environnemental négatif, émissions de gaz à effet de serre, etc.)

Effet rebond : les économies d'énergie ou de ressources initialement prévues par l'utilisation d'une nouvelle technologie sont partiellement ou complètement compensées à la suite d'une adaptation du comportement de la société

E&M : Entertainment and Media ou Média et Divertissement, inclut le cinéma, la presse écrite, la radio et la télévision. Ces segments comprennent les films, les émissions de télévision, les émissions de radio, les nouvelles, la musique, les journaux, les magazines et les livres.

GES : Gaz à Effet de Serre, gaz naturels présents dans l'atmosphère terrestre et qui emprisonnent les rayons du soleil, stabilisant la température à la surface de la planète à un niveau raisonnable.

GeSI : Global e-Sustainability Initiative, organisation internationale dont les activités sont centrées sur la mise en œuvre de la soutenabilité numérique.

GSMA : Global System for Mobile Communications, association internationale représentant les intérêts de plus de 750 opérateurs et constructeurs de téléphonie mobile de 220 pays du monde.

HVAC : Heating, Ventilation and Air-Conditioning, ou chauffage, ventilation et climatisation, ensemble de domaines techniques regroupant les corps d'état traitant du confort aérial. Ce qualificatif s'applique à tous types de bâtiments (habitat, tertiaire, industriel).

ICT : Information and Communication Technologies ou Technologies de l'Information et de la Communication, ensemble des techniques et des équipements informatiques permettant de communiquer à distance par voie électronique.

Intensité énergétique : une mesure de l'efficacité énergétique d'une économie. Elle est calculée comme le quotient de la consommation d'énergie au produit intérieur brut.

Intensité carbone : Indicateur qui rapporte la quantité de gaz à effet de serre émis, mesurée par son équivalent en dioxyde de carbone, au produit intérieur brut.

IoT : Internet of Objects, interconnexion entre l'Internet et des objets, des lieux et des environnements physiques. L'appellation désigne un nombre croissant d'objets connectés à l'Internet permettant ainsi une communication entre nos biens dits physiques et leurs existences numériques.

IIoT : Industrial Internet of Objects, application des technologies de l'internet et de l'internet des objets au domaine industriel pour interconnecter au sein d'architectures géodistribuées les capteurs, les équipements industriels intelligents et les systèmes informatiques.

IEA : International Energy Agency, organisation intergouvernementale qui facilite la coordination des politiques énergétiques des pays membres. Cette organisation est rattachée à l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économique).

M2M : Machine-to-Machine, utilisation des télécommunications et l'informatique pour permettre des communications entre machines, et ceci sans intervention humaine.

MOOC : Massive Open Online Courses, type ouvert de formation à distance capable d'accueillir un grand nombre de participants.

NDC : National Determined Contributions, Contributions déterminées au niveau national, représentent les efforts déployés par chaque pays pour réduire ses émissions nationales et s'adapter aux effets du changement climatique. L'Accord de Paris (article 4, paragraphe 2) exige que chaque Partie établisse, communique et actualise les contributions déterminées au niveau national successives qu'elle prévoit de réaliser. Les Parties doivent également prendre des mesures internes pour l'atténuation en vue de réaliser les objectifs de ces contributions.

NHS : National Health System, système de la santé publique du Royaume-Uni.

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques, organisation internationale d'études économiques, dont les pays membres — des pays développés pour la plupart — ont en commun un système de gouvernement démocratique et une économie de marché.

ONU : Organisation des Nations Unies, institution mondiale qui comprend 193 pays. Créée en 1945, l'ONU a remplacé la Société des Nations. Elle a pour principal but de préserver la paix et la sécurité dans le monde par la diplomatie.

Ppm : Partie par million, fraction valant 10⁻⁶, c'est-à-dire un millionième. On utilise surtout le ppm pour exprimer une fraction massique. Pour exprimer une fraction volumique on précise « partie par million en volume ».

RAN : Radio Access Network, partie radio d'un système de télécommunication mobile. Il met en œuvre une technologie d'accès radio.

SFT : Smart Farming Technologies, convergence de l'agriculture et des technologies de l'information (capteurs, réseaux intelligents, outils de la science de la données, application, voire automatisme et robotique) pour, tout au long de la chaîne de valeurs, améliorer la productivité et répondre aux attentes environnementales et sociétales.

Top-down : partir de l'ensemble, on décompose en éléments toujours plus détaillés, pour déboucher sur une « mise à plat », une « dissection totale », un état des lieux de l'objet étudié.

UTCATF : Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie, catégorie utilisée dans les inventaires sectoriels d'émissions de gaz à effet de serre qui regroupe les émissions et les absorptions de ces gaz découlant directement des activités humaines liées à l'utilisation des terres, leurs changements d'affectation et à la forêt.

Bibliographie

- Alternatives Économiques**, Hors-série pratique n° 61, 1er mars 2013, consulté le 7 février 2021, <https://www.alternatives-economiques.fr/leffet-rebond-lefficacite-energetique-accroit-demande/00066786>.
- Amatuni**, Levon et al., « Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective », *Journal of Cleaner Production* 266, 2020.
- Andrae**, Anders S. G. et Tomas Edler, « On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 », *Challenges* n° 6, 2020, pp. 117-157.
- Andrae**, Anders S. G., « New perspectives on internet electricity use in 2030 », *Eng. Appl. Sci. Lett.* n° 3, 2020, pp. 19-31.
- Apple**, « iPhone 5s Environmental Report », Apple, consulté le 7 février 2021, https://www.apple.com/environment/pdf/products/archive/2013/iPhone5s_PER_sept2013.pdf.
- Balafoutis**, Athanasios T. et al., « Smart Farming Technology Trends: Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness », *Agronomy* 10, no. 5, 2020, p. 743.
- Belkhir**, Lofti et Ahmed Elmeligi, « Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations », *Journal of Cleaner Production* n° 177, 2018, pp. 448-463.
- CAPA**, « Corporate and business travel will undergo a fundamental transformation », CAPA Center for Aviation, 2020, consulté le 9 février 2021, <https://centreforaviation.com/analysis/airline-leader/corporate-and-business-travel-will-undergo-a-fundamental-transformation-536596>.
- Carbon Trust**, « The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions », GSMA, 2019
- Carbon Trust**, « Mobile Carbon Impact How mobile communications technology is enabling carbon emissions reduction », GeSI, 2016, p. 3, consulté le 8 février 2021, https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2016/11/GeSI-Mobile-Carbon-Impact-study_Presentation-for-GSMA-Latam-webinar_20161129.pdf.
- Climate Scenarios**, « Net-zero Pathways for Industrialized Countries », *Climate Scenarios*, consulté le 7 février 2021, <https://climatescenarios.org/countries-pathways>.
- Collectif GreenIT**, « iNum : Impacts environnementaux du numérique en France », *GreenIT*, 31 janvier 2020, consulté le 28 février 2021, <https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2021/02/2021-01-iNum-etude-impacts-numerique-France-rapport-0.8.pdf>.
- Coulombel**, Nicolas et al., « Substantial rebound effects in urban ridesharing: Simulating travel decisions in Paris, France », *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 71, 2019, pp. 110-126.
- Dell**, « Progress Made Real FY20 Social Impact report – Striving to create a positive and lasting impact on humankind and the planet », Dell Technologies, 2019, pp. 58-59, consulté le 8 février 2021, <https://corporate.delltechnologies.com/en-us/social-impact/reporting/fy20-progress-made-real-report.htm#overlay=content/dam/delltechnologies/assets/corporate/pdf/progress-made-real-reports/delltechnologies-fy20-progress-made-real-report.pdf>.
- Deviatkin**, Ivan et al., « Wooden and Plastic Pallets: A Review of Life Cycle Assessment (LCA) Studies », *Sustainability* 11, n° 5750, 2019, p. 15.
- EEA**, « Greenhouse gas emissions by aggregated sector », European Environment Agency, 2019, consulté le 8 février 2021, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/ghg-emissions-by-aggregated-sector-5#tab-dashboard-02>.
- EEA**, « Size of the vehicle fleet in Europe », European Environment Agency, 2019, consulté le 8 février 2021, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/size-of-the-vehicle-fleet/size-of-the-vehicle-fleet-10>.
- Ericsson**, « Latest from the Connected Mangroves reforestation project », Ericsson Blog, 2019, consulté le 8 février 2021, <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/10/latest-connected-mangroves-reforestation-project>.
- EU Technical Expert Group on Sustainable Finance**, « Taxonomy Technical Report », European Union, 2019, p. 27, consulté le 8 février 2021, https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/190618-sustainable-finance-teg-report-taxonomy_en.pdf.
- FAO**, « The Contribution of Agriculture to Greenhouse Gas Emissions », FAO, consulté le 9 février 2021, <http://www.fao.org/economic/ess/environment/data/emission-shares/en/>.
- FAO**, « Agricultural land (sq. km) », The World Bank, consulté le 9 février 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2?view=chart>
- FAO**, « Cereal yield (kg per hectare) », The World Bank, consulté le 9 février 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/AG.YLD.CREL.KG?view=chart>
- FAO**, « Fertilizer consumption (kilograms per hectare of arable land) », The World Bank, consulté le 9 février 2021, <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS?view=chart>
- Farooq**, Muhammad S. et al., « Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review », *Electronics* 9, no. 2, 2020, p. 319.
- Friedlingstein**, Pierre et al., « Global Carbon Project 2020 », *Earth Syst. Sci. Data* n° 12, 2020, p. 26, consulté le 7 février 2021, https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/20/files/GCP_CarbonBudget_2020.pdf.
- Freitag, Charlotte** et al., « The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations », *Physics and Society*, consulté le 3 mars 2021, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2102/2102.02622.pdf>.
- GeSI et Accenture Strategy**, « SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges », GeSI, 2015.

- Gov.UK**, « Energy and environment: data tables – ENV0201: Greenhouse gas emissions by transport mode: United Kingdom », Departement for Transport, Gov.UK, 2020, consulté le 8 février 2021, <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/energy-and-environment-data-tables-env>.
- Government of the Republic of Korea**, « 2050 Carbon Neutral Strategy of Republic of Korea », The Government of the Republic of Korea, 2020, p. 74, consulté le 8 février 2021, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf.
- Greenworking et ADEME**, « Étude sur la caractérisation des effets rebond induits par le télétravail », ADEME, 2020, p. 5.
- Haberl**, Helmut et al., « A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights », *Environ. Res. Lett.* n°15, 2020, consulté le 7 février 2021, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab842a/meta#erlab842as5>.
- Hook**, Andrew et al., « A systematic review of the energy and climate impacts of teleworking », *Environ. Res. Lett.* n° 15, 2020, consulté le 8 février 2021, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8a84>.
- IEA**, « Energy Efficiency 2019 », International Energy Agency, consulté le 7 février 2021, <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2019>.
- IEA**, « World Energy Outlook 2020 », IEA, 2020, consulté le 9 février 2021, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
- IPCC**, « Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », IPCC, 2020, p. 11, consulté le 7 février 2021, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf.
- ITU**, « Recommendation ITU-T L.1470 – Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement », ITU, 2020.
- Malmodin**, Jens, « Greenhouse gas emissions and operational electricity use in the ICT and entertainment & media sectors », *J. Ind. Ecol.* n° 14, 2020, pp. 770-790.
- Malmodin**, Jens et Dag Lundén, « The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015 », *Sustainability* 10, n° 9, 2018, p. 3027.
- Malmodin**, Jens and Vlad Coroama, « Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation – the example of smart metering », *2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG)*, 2016, p. 1.
- Malmodin**, Jens et al., « Considerations for macro-level studies of ICT as enablement potential », *ICT for Sustainability 2014 (ICT4S-14)* 179, n° 188, 2014.
- Muntean**, Marilena et al., « Fossil CO2 emissions of all world countries - 2018 Report », Publications Office of the European Union, 2018.
- NHS**, « Delivering a 'Net Zero' National Health Service », NHS, 2020, p. 12, consulté le 8 février 2021, <https://www.england.nhs.uk/greenernhs/wp-content/uploads/sites/51/2020/10/delivering-a-net-zero-national-health-service.pdf>.
- OECD**, « Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic drivers and environmental consequences – Highlights », OECD Publishing, 2018, p. 11, consulté le 7 février 2021.
- Ong**, Dennis et al., « Comparison of the energy, carbon and time costs of videoconferencing and in-person meetings », *Comput. Commun.*, 2014, consulté le 8 février 2021, <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2014.02.009>.
- Parrique**, Timothée, « Decoupling debunked: Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability », *European Environmental Bureau*, 2019, p.11-16, consulté le 7 février 2021, <https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>.
- Ritchie**, Hannah et Max Roser, « Annual greenhouse gas emissions by sector », *Our World in Data*, consulté le 8 février 2021, <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#annual-greenhouse-gas-emissions-by-sector>.
- Royal Society**, « Digital technology and the planet: Harnessing computing to achieve net zero », *Royal Society of Technology*, consulté le 3 mars 2021, <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/digital-technology-and-the-planet/digital-technology-and-the-planet-report.pdf>.
- Rüdiger**, David et al., « Managing greenhouse gas emissions from warehousing and transshipment with environmental performance indicators », *Transportation Research Procedia* 14, 2016, p. 895.
- Salin**, Victoria, « 2018 GCCA Global Cold Storage Capacity Report », *International Association of Refrigerated Warehouses and Global Cold Chain Alliance*, 2018, p.3, consulté le 10 février 2021, <https://www.gcca.org/sites/default/files/2018%20GCCA%20Cold%20Storage%20Capacity%20Report%20final.pdf>.
- Samsung**, « Life Cycle Assessment for Mobile Products », Samsung, consulté le 7 février 2021, <https://www.samsung.com/us/smg/content/dam/samsung/us/aboutsamsung/2019/2018-Life-Cycle-Assessment-for-HHP-and-Display.pdf>.
- Shahmohammadi**, Sadegh et al., « Comparative Greenhouse Gas Footprinting of Online versus Traditional Shopping for Fast-Moving Consumer Goods: A Stochastic Approach », *Environmental Science & Technology* 54, n° 6, 2020, pp. 3499-3509.
- Stock**, Tim et al., « Industry 4.0 as Enabler for a Sustainable Development: A Qualitative Assessment of its Ecological and Social Potential », *Process Safety and Environmental Protection* 118, 2018, pp. 254-267.
- Sun**, Shujing et al., « Does Telemedicine Reduce Emergency Room Congestion? Evidence from New York State », *Information Systems Research* 31, n° 3, 2020, 972-986.
- UN**, « Emissions Gap Report 2020 », *United Nations Environment Programme*, 2020, p. XIV, consulté le 7 février 2021, <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>.
- UN**, « Goal 12 : Responsible Consumption and Production, Ensure sustainable consumption and production patterns », *Organisation des Nations Unies*, consulté le 7 février 2021, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-12/>.
- UN**, « Rapport sur les objectifs de développement durable 2020 », *Organisation des Nations Unies*, 2020, p. 39, consulté le 7 février 2021, <https://unstats.un.org/sdgs/report/>

2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_French.pdf.

UN, « Emissions Gap Report 2019 – Executive Summary », United Nations Environment Programme, 2019, p. IV, consulté le 8 février 2021, <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30798/EGR19ESEN.pdf?sequence=13>.

UN, « 2019 Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector », Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, 2019, p. 9.

Versteijlen, Marieke et al., « Pros and cons of online education as a measure to reduce carbon emissions in higher education in the Netherlands », *Current Opinion in Environmental Sustainability* 28, 2017, pp. 80-89.

Voytenko, Palgan Yuliya et al., « Sustainability framings of accommodation sharing », *Environmental Innovation and Societal Transitions* 23, 2017, pp. 70-83.

Wikipedia, « GSM Association », Wikipedia, consulté le 8 février 2021, https://fr.wikipedia.org/wiki/GSM_Association.

World Economic Forum, « Supply Chain Decarbonization – The role of logistics and transport in reducing supply chain carbon emissions », World Economic Forum, 2009, consulté le 10 février 2021, http://www3.weforum.org/docs/WEF_LT_SupplyChainDecarbonization_Report_2009.pdf.

