

Document de travail n° 81

L'essor du numérique est favorable
à la croissance et à la réduction
de l'empreinte carbone de la France

Ce document de travail a été réalisé
par Gilles KOLEDA et Raphaël TROTIGNON

Rexecode

COMITÉ DE DIRECTION

Michel DIDIER, président
Denis FERRAND, directeur général
Emmanuel JESSUA, directeur des études
Charles-Henri COLOMBIER, directeur de la conjoncture
Raphaël TROTIGNON, responsable du pôle énergie-climat

CONSEIL D'ADMINISTRATION

Pierre GADONNEIX, Président ; Président d'Honneur : Jacques-Henri DAVID
Vice-président : Michel CICUREL, Philippe DARMAYAN ; Trésorier : Antoine GENDRY
Administrateurs : Christophe BEAUX, Olivier COSTA de BEAUREGARD, Pierre-André de CHALENDAR, Michel de ROSEN,
Christian DARGNAT, Michel DIDIER, Christine FABRESSE, Xavier FONTANET, Christel HEYDEMANN, François JACKOW,
Olivier KLEIN, Philippe LAMOUREUX, Patrick MARTIN, Hubert MONGON, Henri MOREL, Natacha VALLA, Christian NIBOUREL,
Olivier SALLERON, Amaury de WARENGHIEN

Centre de Recherche pour l'Expansion de l'Economie et le Développement des Entreprises

Rexecode : association régie par la loi du 1^{er} juillet 1901 - Siret : 784 361 164 00030 - APE 9412Z
Siège social : 29 avenue Hoche - 75008 PARIS - Tél. (33) 01 53 89 20 89 - www.rexecode.fr - [www.twitter.com/Rexecode](https://twitter.com/Rexecode)

L'essor du numérique est favorable à la croissance et à la réduction de l'empreinte carbone de la France

Résumé et principales conclusions	5
Introduction	7
1. L'empreinte carbone du numérique	11
2. Le numérique est un moteur de la croissance économique	19
3. Le numérique est favorable à la croissance et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre	31
Conclusion	39
<i>Annexe 1</i> <i>Détermination du contenu en CO₂</i> <i>d'un investissement de 4 milliards d'euros dans le numérique</i>	<i>41</i>
<i>Annexe 2</i> <i>L'empreinte carbone du numérique</i>	<i>45</i>
Bibliographie	49

L'essor du numérique est favorable à la croissance et à la réduction de l'empreinte carbone de la France

L'essor du numérique est favorable à la croissance et à la réduction de l'empreinte carbone de la France

Résumé et principales conclusions

L'essor des technologies numériques représente, comme pour les révolutions technologiques précédentes, un atout économique et sociétal majeur, source d'efficacité et de croissance. Il entraîne des évolutions économiques et sociales importantes (procédés de productions, emplois, modes de consommations, alternatives à la mobilité physique etc.), mais aussi des nuisances environnementales liées notamment, comme pour toute activité, à sa consommation directe et indirecte d'énergie et de ressources naturelles.

Afin de mesurer les enjeux en termes de croissance économique et d'empreinte carbone, **Rexecode a procédé à une analyse de type coût bénéfice, en comparant les avantages économiques et les coûts du développement du numérique.** L'étude est centrée sur la problématique économique globale du développement du numérique en tenant compte de ses conséquences sur les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi sur le revenu national et la croissance économique. Elle n'aborde pas en revanche les aspects sociétaux et de gouvernance, les aspects concernant la cyber-sécurité, les aspects environnementaux autres que les émissions de gaz à effet de serre.

Une première partie présente « l'empreinte carbone » du numérique, c'est-à-dire les émissions de gaz à effet de serre qui peuvent être associées à la production et à l'usage des technologies numériques. Les évaluations actuelles conduisent à une empreinte carbone du numérique au niveau mondial de l'ordre de 2 à 4 % du total des émissions mondiales de gaz à effet de serre. **Pour la France, l'empreinte carbone du numérique serait de 11 MtCO₂e, soit 1,8 % de l'empreinte carbone totale de la France.** L'empreinte carbone du numérique utilisé en France est composée pour deux tiers environ (soit 8 MtCO₂e) des émissions dégagées lors de la production et du transport du matériel numérique importé en France (écrans, smartphones, ordinateurs, etc), généralement en provenance de pays dont l'intensité des émissions est très supérieure à la nôtre. Le tiers restant (soit 3 MtCO₂e) est dû aux émissions associées à l'électricité consommée par les matériels numériques lors de leur utilisation en France. **En France, le poids du numérique dans l'empreinte carbone totale est, environ deux fois plus faible qu'au niveau mondial, mais l'usage du numérique se développe rapidement.**

La deuxième partie propose une évaluation du lien entre développement du numérique et croissance économique. Elle montre le rôle moteur du développement du numérique dans l'économie. Un large usage du numérique est un facteur favorable à la croissance économique et à l'augmentation du pouvoir d'achat du revenu national. **Les pays qui sur les dernières décennies présentent les secteurs numériques les plus développés sont également ceux qui ont connu les plus fort taux de croissance.** Une méthodologie d'identification et de mesure des sources de la croissance et de décomposition de la valeur ajoutée permet de calculer l'impact de l'économie numérique sur la croissance. **Pour la France, la**

relative faiblesse du secteur numérique apparaît comme un handicap pour la croissance (de l'ordre de 0,2 point de croissance).

Une troisième partie explore la contribution du développement des outils numériques aux efforts de découplage entre croissance et émissions de gaz à effet de serre. En rapprochant les coûts et les avantages économiques de l'investissement dans le numérique, on montre que le développement du numérique apparaît clairement positif pour l'économie. Le coût en termes d'émissions de carbone est réel mais, dans la panoplie des actions possibles pour limiter les émissions carbonées, réduire l'investissement numérique constituerait une voie très coûteuse par rapport aux autres options mobilisables. Ceci reviendrait à réduire les émissions au coût de 4 400 € par tonne de CO₂ évitée, alors que soutenir le développement du numérique générerait un supplément de revenu national qui permettrait de mobiliser des réductions d'émission bien moins coûteuses, de l'ordre de 50 à 500 €/tCO₂.

Deux facteurs complémentaires, non pris en compte dans l'analyse coût bénéfice décrite précédemment, renforcent encore le sentiment que limiter le développement du numérique serait clairement défavorable à la réduction de l'effet de serre. Le premier est que les émissions du numérique sont dues pour l'essentiel à des consommations d'énergie. Or **les politiques de la transition énergétique et climatique visent précisément à décarboner la production d'énergie. L'empreinte carbone du numérique diminuera donc à mesure que ces politiques porteront leurs effets.** Le second facteur est que le numérique est aussi un outil de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le reste de l'économie par trois mécanismes : par substitution entre des usages numériques et des usages « physiques » plus émetteurs ; par une amélioration de l'efficacité énergétique de l'économie ; et dans certains cas, par la facilitation des mécanismes utilisés pour la décarbonation de l'énergie. **Certains usages numériques permettent de stimuler le découplage entre activité économique et émissions de gaz à effet de serre**, comme le montre l'étude de cas portant sur les solutions numériques d'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment.

Ces observations conduisent à **encourager le développement du numérique, particulièrement en France, où l'intensité carbone de l'électricité est faible, tout en étant très attentif à l'efficacité et la sobriété énergétique des usages, à une bonne gestion de la durée de vie des appareils et de leur réemploi/réparation ainsi qu'à la gestion des déchets et au recyclage.**

Introduction

Les usages numériques se développent rapidement. Ils permettent notamment une amélioration des échanges, un meilleur partage de l'information, une communication instantanée, le travail collaboratif. Le secteur « producteur de numérique » regroupe les activités de production de matériels et de leurs composants (puces électroniques, serveurs, *smartphones* etc.), et des logiciels et des services numériques. Les outils numériques sont ensuite utilisés par l'ensemble des acteurs de l'économie. La quasi-totalité des secteurs économiques font un usage plus ou moins intense de numérique. Les activités de la banque et de la finance se basent aujourd'hui très majoritairement sur des outils numériques. Dans l'industrie beaucoup de procédés de production font appel à des programmes informatiques avancés (automatisation, optimisation...). Les transports et la logistique, et même l'agriculture, sont eux aussi fortement informatisés (guidage, pilotage...). Les enquêtes sur la diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française le confirment. Dans les entreprises, le baromètre France Num réalisé par le CREDOC pour la Direction générale des entreprises (DGE)¹ indique que 95 % des Très Petites Entreprises (TPE) et Petites et Moyennes Entreprises (PME) interrogées utilisent au moins une solution numérique de gestion (bureautique, comptabilité, facturation, cyber-sécurité etc.) et que 80 % ont une solution numérique pour l'organisation du travail. Ces chiffres sont encore plus importants dans les grandes entreprises. Concernant les ménages, le *baromètre de l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse* (ARCEP) indique que 95 % des français sont équipés de téléphone mobile, près de 85 % ont un smartphone, 85 % ont un ordinateur, et près de 90 % ont accès à internet. Les usages numériques ont ainsi pénétré l'ensemble du tissu économique et de nouveaux progrès dans la qualité et dans l'usage des outils numériques ne manqueront pas de se réaliser.

Les révolutions industrielles que nous avons connues dans le passé sont nées d'innovations radicales, puis de grappes d'innovations associées qui ont ouvert de nouvelles perspectives de croissance à l'économie. On peut citer par exemple la machine à vapeur et les progrès de la métallurgie au début du XIX^{ème} siècle qui ont permis, entre autres, des progrès considérables dans les transports, l'agriculture et le textile. Quelques décennies plus tard, la découverte de l'électricité et du moteur à explosion ont entraîné un nouveau bond économique majeur. L'électricité a permis l'essor de l'éclairage des télécommunications puis plus tard, avec les travaux du début du XX^{ème} siècle sur les semi-conducteurs, l'essor de l'électronique et le développement des premiers ordinateurs. Plus récemment, la convergence des télécommunications et de l'informatique a conduit à une révolution de la transmission de la voix et des données. L'économie accède alors progressivement à une puissance d'analyse numérique et des moyens de télécommunication importants, qui dégagent un potentiel de gains d'efficacité et de productivité dans de nombreux domaines.

¹ <https://www.francenum.gouv.fr/comprendre-le-numerique/barometre-france-num-2021-le-numerique-dans-les-tpe-pme-0-249-salaries>

L'essor extrêmement rapide des technologies numériques depuis les années 2000 soulève, comme pour les révolutions technologiques précédentes, beaucoup de questions. Il entraîne des reconfigurations économiques et sociales majeures, comme l'invention du moteur avait entraîné un recul massif de l'utilisation du cheval et des usages et métiers associés, ou encore comme l'invention de l'électricité avait conduit à repenser complètement l'éclairage et fait émerger une concentration de la production centralisée d'électricité et un réseau dédié de transport et de distribution. Chacune de ces innovations, en permettant d'accélérer le développement économique, a aussi entraîné des bouleversements dans la gestion des ressources associées, et aussi des nuisances environnementales nouvelles. Le développement du moteur thermique a provoqué l'exploitation des gisements de pétrole, et entraîné les nuisances associées à sa combustion. L'essor du numérique, que nous connaissons aujourd'hui, entraîne aussi des évolutions économiques et sociales importantes (procédés de productions, emplois, modes de consommations, alternatives à la mobilité physique etc.), mais aussi des nuisances environnementales liées, comme pour toute activité, à sa consommation directe et indirecte d'énergie et de ressources naturelles.

L'usage du numérique est une source d'émissions de gaz à effet de serre par les consommations d'énergie qu'il implique lors de la fabrication, de l'usage, et de la fin de vie des équipements². La fabrication des équipements numériques exige l'extraction, le transport et la transformation de matières premières qui mobilisent également de l'énergie. Si la France a vu la part de son industrie manufacturière dans le domaine numérique devenir très faible, les importations de matériels et équipements numériques font en contrepartie augmenter l'empreinte carbone de la France. Quant à l'usage des matériels et le fonctionnement des réseaux, ils constituent des sources d'émissions par l'énergie qu'ils consomment. Enfin, la fin de vie des matériels électroniques peut aboutir à des pollutions mal contrôlées.

Plusieurs études ont tenté de mesurer les émissions de gaz à effet de serre imputables au numérique au niveau mondial. L'ADEME (2019) notait ainsi que « [Le numérique] est responsable aujourd'hui de 4 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et la forte augmentation des usages laisse présager un doublement de cette empreinte carbone d'ici 2025 ». Selon une étude de septembre 2021 dans la revue *Patterns*³, les téléphones, ordinateurs, télévisions et autres centres de données généreraient entre 2,1 % et 3,9 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Selon le Cabinet GreenIT, dans son étude *Empreinte environnementale du numérique mondial*, le numérique mondial serait responsable de 5,5 % de la consommation d'électricité mondiale et de 3,8 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. **Malgré**

² D'après l'ADEME (2019), les émissions de gaz à effet de serre sont à 28 % dues aux infrastructures de réseaux, à 25 % dues aux *data centers* et à 47 % dues aux équipements des consommateurs (ordinateurs, smartphones, tablettes, objets connectés, GPS...). ADEME (2019), *La face cachée du numérique – Réduire les impacts du numérique sur l'environnement*, Edition novembre 2019.

³ *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations*, C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks, B. Knowles, G. Blair, A. Friday, *Patterns*, Septembre 2021.

les incertitudes inhérentes à ces estimations, la littérature suggère donc au niveau mondial une empreinte carbone du numérique de l'ordre de 2 à 4 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Dans ces conditions, il peut paraître surprenant que l'Union européenne, comme au demeurant la France, engage des crédits importants pour soutenir et renforcer le développement du numérique, tout en affirmant un fort engagement pour la réduction des émissions de CO₂. La raison est que le numérique n'est pas simplement une source d'émissions de gaz à effet de serre, c'est également un levier important de la croissance et du pouvoir d'achat. On observe notamment que les économies les plus avancées en termes d'équipements et d'usages du numérique dans les entreprises et les administrations sont également les pays qui connaissent les taux de croissance les plus élevés. C'est en outre un levier de réduction des émissions dans les autres secteurs de l'économie.

Pour éclairer cette question, Rexecode a procédé à une analyse de type coût bénéfique, en comparant les avantages économiques et les coûts du développement du numérique. L'étude présentée ici n'aborde pas en revanche les aspects sociétaux et de gouvernance, les aspects concernant la cyber-sécurité, les aspects environnementaux autres que les émissions de gaz à effet de serre. Elle est centrée sur la problématique économique globale du développement du numérique en tenant compte de ses conséquences sur les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi sur le revenu national et la croissance économique.

Ce document de travail présente dans une première partie « l'empreinte carbone » du numérique, c'est-à-dire les émissions de gaz à effet de serre qui peuvent être associées à la production et à l'usage des technologies numériques. La deuxième partie évoque les liens entre développement du numérique et croissance économique et tente de quantifier le rôle moteur du développement du numérique dans l'économie. La troisième partie explore la contribution du développement des outils numériques aux efforts de découplage entre croissance et émissions de gaz à effet de serre, à travers une analyse de type coût-bénéfice comparant les avantages économiques et les coûts du développement du numérique, et en évoquant les facteurs complémentaires qui renforcent le sentiment que soutenir le développement du numérique est favorable à la réduction de l'effet de serre : la mise en œuvre de politiques de décarbonation de l'énergie, et la contribution du numérique par ses fonctionnalités, au découplage entre activité économique et émissions de gaz à effet de serre.

1. L'empreinte carbone du numérique

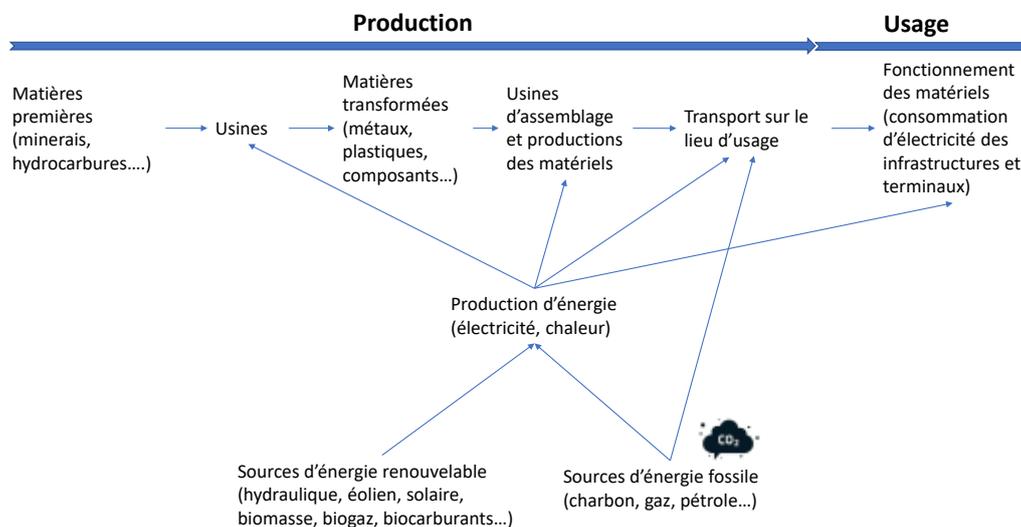
Nous nous concentrons dans cette partie sur la contribution du numérique utilisé en France, qu'elle que soit l'origine à « l'empreinte carbone » de la France. En effet, on distingue deux approches pour comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre imputables à un pays : l'inventaire territorial et l'empreinte carbone. Alors que l'approche inventaire prend en compte les émissions ayant lieu sur le territoire national, que le produit fabriqué en France soit consommé ou non en France, l'empreinte carbone, elle, intègre les émissions indirectes telles que celles induites par la consommation par les unités économiques résidant en France de biens et services fabriqués en France ou à l'étranger. Ces émissions « indirectes », incluses dans les produits et services consommés en France, sont les émissions qui ont eu lieu en France et à l'étranger pour produire ces biens et services⁴.

Les outils numériques (ordinateurs, *smartphones*, serveurs etc.) ne sont pas des émetteurs directs de gaz à effet de serre, comme peuvent l'être par exemple des centrales qui produisent de l'électricité à partir d'énergie fossile, qui ont des cheminées d'où sortent des gaz à effet de serre. On peut néanmoins attribuer au numérique une contribution aux émissions mondiales de gaz à effet de serre. En effet, il a fallu extraire des matériaux de base, produire les matériels numériques par la transformation de ces ressources (plastiques, métaux etc.), puis assembler ces composants produits. Ces étapes utilisent de l'énergie qui, si elle est basée sur des sources fossiles, est émettrice de gaz à effet de serre. Ensuite il faut alimenter ces matériels numériques en électricité pour leur fonctionnement, électricité qu'il a donc fallu produire, et qui peut aussi être émettrice de gaz à effet de serre si elle repose sur des sources fossiles. L'empreinte carbone du numérique est donc fonction des sources d'énergie utilisées lors de la production et de l'usage des matériels.

Le schéma ci-après présente la composition de l'empreinte carbone du numérique, avec la partie associée à la production des matériels, et la partie liée aux consommations électriques à l'usage. Plus l'énergie utilisée à ces étapes sera décarbonée, plus l'empreinte carbone du numérique serait faible. En d'autres termes il n'y a pas de spécificité du numérique dans les émissions de gaz à effet de serre. Mais la réalité actuelle est que l'électricité n'est pas décarbonée, et par conséquent, tant qu'elle ne le sera pas, le développement rapide du numérique restera un facteur d'augmentation des gaz à effet de serre dégagés par la production d'énergie.

⁴ Une partie de l'empreinte carbone de la France correspond donc à des émissions qui ont eu lieu sur le territoire national, auxquelles on ajoute les émissions qui ont eu lieu à l'étranger pour produire les biens et services consommés en France, et desquelles on retranche enfin les émissions qui ont eu lieu sur le territoire national pour produire des biens et services consommés à l'étranger.

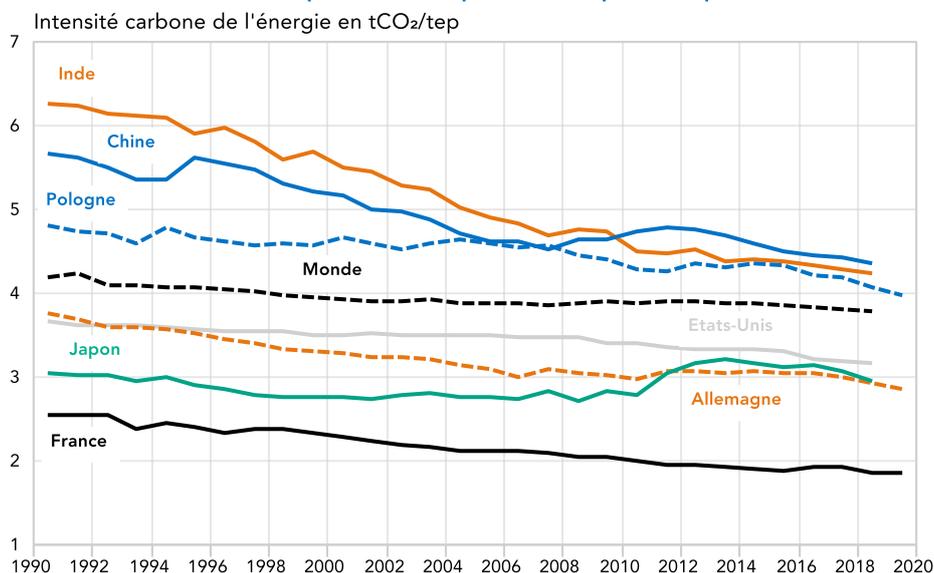
L'empreinte carbone du numérique provient de l'utilisation d'énergie produite à partir d'énergie fossile, à la production comme à l'usage



L'empreinte carbone de la production de matériels numériques est très dépendante de l'intensité carbone de l'énergie des pays producteurs

Le graphique ci-après montre l'évolution de l'intensité carbone moyenne de l'énergie consommée dans différents pays du monde. On observe que cet indicateur, qui représente la quantité de gaz à effet de serre émise du fait de l'utilisation d'une unité d'énergie primaire (une tonne équivalent pétrole ou tep), dans différents pays du monde, est de façon générale en diminution dans à peu près tous les pays. En moyenne, au niveau mondial, l'utilisation d'une tep d'énergie entraîne des émissions d'environ 3,7 tCO₂e. Cependant, l'intensité carbone de l'énergie consommée est très différente entre les pays. Elle est particulièrement basse en France, où l'intensité carbone de l'énergie consommée est deux fois plus faible que la moyenne mondiale. En revanche en Pologne, en Chine ou en Inde, l'intensité carbone de l'énergie est très élevée, entre 4 et 4,5 tCO₂e par tep. Le matériel numérique (ordinateur, téléphones, serveurs etc.) produit dans ces pays a donc en moyenne, pour le même produit, une empreinte carbone à la production plus de deux fois supérieure à ce que serait cette empreinte si ce matériel était produit en France.

L'intensité carbone de l'énergie consommée dans le monde en tonne d'équivalent CO₂ par tonne équivalent pétrole



Source : Rexecode d'après BP Statistical Review et PIK

© Rexecode

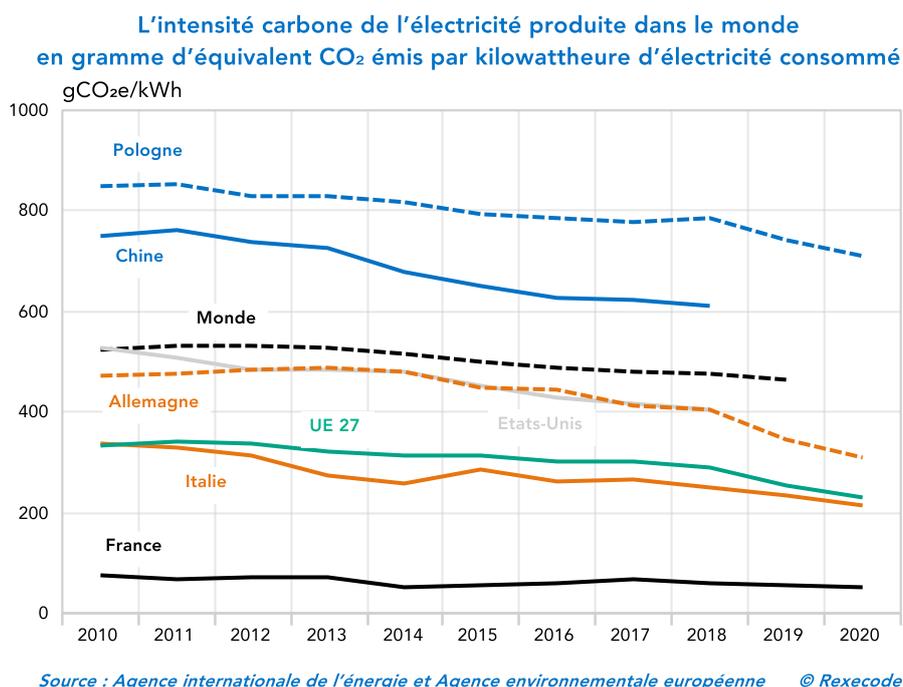
L'évaluation de l'empreinte carbone du numérique doit tenir compte de la grande diversité des matériels produits et, pour chacun de ses produits, de la nature des chaînes de valeur et des filières de production qui font intervenir de nombreuses étapes, qui peuvent avoir lieu dans des pays différents. Par exemple un ordinateur portable comprend un écran, un ou plusieurs processeurs, une batterie, des composants de mémoire, un disque dur etc. Chacun de ses éléments est lui-même composé de sous-composants produits à partir de ressources initiales qui ont été transformées, assemblées et transportées à de nombreuses reprises dans le processus de production. L'association Green IT a estimé qu'un smartphone classique était composé, en pourcentage de son poids, de 50 % de plastiques divers (coque, touches, etc.), 15 % de cuivre (connecteurs, batterie et circuit imprimé), 15 % de verre (l'écran et les connecteurs), 4 % de cobalt ou de lithium (batterie), 4 % de carbone pur et de divers métaux pour le reste⁵. Il faut donc estimer les émissions de gaz à effet de serre à ces différentes étapes.

L'empreinte carbone de l'usage du numérique dépend fortement du mode de production de l'électricité, très variable selon les pays

Le matériel numérique requiert pour fonctionner exclusivement de l'électricité (mis à part dans quelques cas minoritaires, par exemple pour les *data centers*, ou l'utilisation d'une source de refroidissement peut être nécessaire, mais celle-ci est elle-même majoritairement produite à partir d'électricité). Cette électricité consommée lors de l'usage des matériels numériques a une empreinte

⁵ <https://www.greenit.fr/2014/12/12/quelle-est-la-composition-de-mon-telephone/>

carbone très variable selon les pays. Elle dépend de la façon dont l'électricité a été produite. Ceci peut être mesuré par l'intensité carbone moyenne de l'électricité, c'est-à-dire le ratio entre les émissions associées à la production d'électricité dans le pays considéré, et la quantité d'électricité produite dans ce même pays. Elle est exprimée en gramme de CO₂ par kilowattheure d'électricité consommé. Le graphique ci-dessous présente l'évolution de l'intensité carbone moyenne de l'électricité consommée dans différents pays du monde.



L'intensité carbone de l'électricité a elle aussi une tendance à baisser dans les principaux pays ou ensemble de pays considérés ici. En moyenne dans l'Union européenne, la consommation d'un kilowattheure d'électricité a entraîné en 2020 l'émission de 216 gCO₂e. Cette valeur est de 352 gCO₂/kWh aux Etats-Unis, plus importante en Corée du Sud (472 gCO₂/kWh), et presque le double de la moyenne européenne en Chine (580 gCO₂/kWh).

L'intensité carbone de l'électricité est extrêmement faible en France du fait de la part très importante des moyens de production décarbonés, notamment du nucléaire et de l'hydraulique dans son bouquet de production. L'ADEME estime que le facteur d'émission moyen de l'électricité française est de 57 gCO₂/kWh en 2018⁶ (tenant compte du contenu carbone de l'électricité importée et exportée). Le même appareil numérique (serveur, ordinateur, téléviseur etc...) branché en France a une empreinte carbone à l'usage dix fois inférieure à celle qu'il aurait s'il était branché en Chine, et quatre fois moins que dans le reste de l'Europe en moyenne. La France ayant un bouquet énergétique et électrique particulièrement avantageux comparativement à ses voisins, elle est un lieu favorable à l'implantation de matériels

⁶ <http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil>

numériques comme les serveurs et *datacenters* (et éventuellement à l'implantation de sites de production de matériels).

L'empreinte carbone du numérique utilisé en France

Le Conseil Général de l'Économie (CGE) a mené une étude complète sur l'empreinte énergétique et l'empreinte carbone du numérique en France, étude publiée en décembre 2019. Cette étude évalue, pour tous les matériels numériques recensés en France (*smartphones*, téléphones, téléviseurs, panneaux publicitaires, matériel hi-fi vidéo, ordinateurs, imprimantes, tablettes, *box* internet, réseaux et *switchs*, serveurs et *datacenters*) leur consommation électrique annuelle, les émissions associées, et les émissions estimées qui peuvent être associées à leur production. Selon cette étude, **l'empreinte carbone totale du numérique (production et usage) serait pour la France de 11 MtCO₂e (en 2018)⁷. L'empreinte carbone du numérique représenterait 1,8 % de l'empreinte carbone annuelle totale de la France**, telle qu'estimée par le Service de la donnée et des études statistiques (SDES) du Ministère de la transition écologique⁸ pour la même année, soit 614 MtCO₂e. La part du numérique dans l'empreinte carbone de la France est donc bien moins importante qu'au niveau mondial (presque deux fois moins), où elle représenterait environ 3 % de l'empreinte totale.

La plus grande part de l'empreinte carbone du numérique est associée à la production des matériels, 8 MtCO₂e sur les 11 MtCO₂e soit 72 % de l'empreinte carbone du numérique en France. Ces émissions ont très majoritairement lieu hors de France car la plupart des matériels ne sont pas produits sur notre territoire. La partie de l'empreinte liée à l'usage des matériels est de moins de 3 MtCO₂e, soit environ un quart de l'empreinte du numérique en France. Ces émissions dues à l'usage des matériels représentent moins de 0,7 % des émissions domestiques de gaz à effet de serre, et moins de 0,5 % de l'empreinte carbone totale de la France.

La même étude montre en outre que **l'empreinte carbone total du numérique utilisé ou produit en France s'est nettement réduite en une décennie**. L'empreinte totale du numérique était estimée en 2008 à 19 MtCO₂e. Elle a depuis été quasiment divisée par deux, alors que dans le même temps la quantité de matériels et les usages se sont très largement développés.

⁷ D'autres études, portant sur un champ plus large, présentent des empreintes carbone du numérique plus élevées (15 MtCO₂eq pour le rapport du Sénat de juin 2020, 16,9 MtCO₂eq pour l'étude Ademe/Arcep de janvier 2022 avec un intervalle de confiance allant de 10,6 à 26,3 MtCO₂eq).

⁸ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/estimation-de-lempreinte-carbone-de-1995-2020>

L'empreinte carbone du numérique de la France en MtCO₂e (données de 2018)

Matériels	Emissions associées à la production des matériels (principalement hors de France)	Emissions associées à l'électricité consommée (utilisation en France)	Empreinte carbone totale (somme des deux colonnes précédentes)
Téléphones et smartphones	1,5	0,02	9,7
Télévision et audiovisuel	2,2	0,8	3,0
Ordinateurs et postes de travail	2,3	0,6	2,9
Réseaux, datacenters, box	2,1	1,5	3,6
Total	8,1	2,9	11,0

Source : CGE (2019)

Les leviers de réduction de l'empreinte carbone du numérique

L'empreinte carbone du numérique est entièrement dépendante de la quantité et de l'intensité carbone de l'énergie utilisée pour la production et l'usage des matériels et des applications numériques. Il en découle deux leviers possibles de réductions de l'empreinte. Le premier levier est l'amélioration de l'efficacité énergétique, c'est-à-dire l'ensemble des mesures qui consistent à produire les mêmes matériels en utilisant moins d'énergie et à avoir des matériels moins consommateurs d'électricité à l'usage pour un même service fourni. Le deuxième levier est la réduction, partielle voire à terme complète, de l'intensité carbone de l'énergie, consommée dans les usines et pour le transport (à l'étape de la production et du transport des matériels), ou consommée lors de l'utilisation de ces matériels (électricité).

Les leviers de réduction de l'empreinte carbone du numérique

	Efficacité énergétique	Intensité carbone de l'énergie
Production	Amélioration des procédés dans les usines de production Allongement de la durée de vie des matériels	Décarboner l'énergie consommée sur le lieu de production (principalement de l'électricité)
Usage	Matériels plus économes en énergie pour le même service fourni Sobriété numérique (écoconception des services numériques, optimisation des usages type vidéos, etc.)	Décarboner l'électricité dans le pays d'utilisation

Les deux leviers sont pertinents. Le premier, l'efficacité énergétique, ne permet pas d'éliminer totalement l'empreinte carbone du numérique, car on ne pourra jamais atteindre une efficacité énergétique infinie en éliminant les consommations. Il permet néanmoins de réduire l'empreinte énergétique, et

donc l’empreinte carbone du numérique, indépendamment des actions sur le contenu carbone de l’énergie. Il sera d’autant plus efficace du point de vue du climat qu’il sera mis en œuvre dans les pays où l’énergie est la plus carbonée. Le deuxième levier, la réduction de l’intensité carbone de l’énergie, a le potentiel de réduire à zéro l’empreinte carbone du numérique, indépendamment de la quantité d’énergie qu’il consomme. Les processus et technologies de production d’électricité et de chaleur moins carbonés existent et sont mis en œuvre aujourd’hui.

L’objectif de réduction des émissions de carbone implique de combiner les deux leviers de l’intensité énergétique de l’activité et de l’intensité carbone de l’énergie, afin d’accélérer la maîtrise des émissions. Ces leviers ne concernent pas spécifiquement le secteur du numérique, mais de façon plus générale l’ensemble de l’économie.

Principaux enseignements

- Etant donné les matériels utilisés en France, l’empreinte carbone du numérique représenterait 1,8 % de l’empreinte carbone annuelle totale de la France. La plus grande part de cette empreinte carbone est associée à la phase de production des matériels. Ces émissions ont très majoritairement lieu hors de France car la plupart des matériels ne sont pas produits sur notre territoire.
- La partie de l’empreinte du numérique en France liée à l’usage des matériels est d’environ un quart de l’empreinte totale. Ces émissions représentent moins de 0,5 % de l’empreinte carbone totale de la France.
- L’empreinte carbone du numérique est fonction des sources d’énergie utilisées d’une part pour la production et le transport des matériels, et d’autre part pour la production de l’électricité nécessaire à leur fonctionnement.
- L’empreinte carbone de la production de matériels numériques est très dépendante de l’intensité carbone de l’énergie des pays producteurs. Celle-ci diminue tendanciellement au niveau mondial, mais elle varie fortement (selon les pays du simple au triple).
- Lors de l’usage du numérique, l’empreinte carbone dépend fortement du bouquet de production d’électricité dans les pays d’utilisation. Il varie d’un facteur un à plus de dix selon les pays.
- La France disposant d’un bouquet énergétique et électrique particulièrement favorable comparativement à ses voisins, produire, installer, voire utiliser les matériels numériques en France constitue une source de réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

- Deux leviers de réductions de l'empreinte carbone du numérique peuvent être actionnés. Le premier levier consiste en des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique, c'est-à-dire les mesures qui consistent à pouvoir produire les mêmes matériels en utilisant moins d'énergie, et à avoir des matériels moins consommateurs d'électricité à l'usage pour un même service fourni. Le deuxième levier est celui de la réduction de l'intensité carbone de l'énergie consommée pour produire et utiliser ces matériels.
- Il est nécessaire de combiner ces deux leviers afin d'accélérer autant que possible les actions de maîtrise des émissions du numérique.

2. Le numérique est un moteur de la croissance économique

La question de l'impact des secteurs de l'économie numérique sur la croissance et la productivité avait donné lieu à de nombreux débats et publications au début des années 2000. On évoquait alors l'émergence d'une « nouvelle économie » dont la dynamique de croissance non-inflationniste et durable reposait sur une diffusion des technologies de l'information et de la communication dans le système productif⁹. On notait dans le rapport *Nouvelle économie* du Conseil d'analyse économique de 2000 un retard français sur les Etats-Unis, entrés « 6 ou 7 ans plus tôt » dans cette nouvelle révolution industrielle.

Les progrès réalisés dans la mémorisation, le traitement et la transmission des données numérisées ont permis aux secteurs de l'informatique, des télécommunications et de l'audiovisuel de converger. Les fournisseurs d'équipements et de services pour les technologies de l'information et de la communication forment un « secteur de l'économie numérique ». Mais, comme le rappelle une note du Conseil d'Analyse économique d'octobre 2015, « C'est désormais toute l'économie qui devient numérique »¹⁰.

La quantification de l'apport du numérique à l'économie et du poids du numérique dans l'économie peut en effet revêtir deux approches différentes : l'utilisation de biens et services numériques et la production de biens et services numériques. Le numérique peut être considéré comme l'ensemble des technologies de l'information et de la communication qui peuvent être utilisées et adoptées par les entreprises dans l'ensemble des secteurs de l'économie. On mesure alors l'adoption des technologies numériques par les entreprises ou les administrations producteurs de biens et services de toutes les sortes et les conséquences potentielle sur leur productivité. Le numérique peut alternativement être apprécié, dans une vision plus ciblée et restrictive, comme l'ensemble des produits et services relevant du domaine des technologies de l'information et de la communication, c'est-à-dire comme la production des secteurs producteurs de biens et services numériques¹¹.

⁹ Le Conseil d'analyse économique avait ainsi publié deux rapports sur le sujet au début des années 2000 : *Nouvelle Economie* (2000), Daniel Cohen et Michèle Debonneuil, et *La société de l'information* (2004), Nicolas Curien et Pierre-Alain Muet.

¹⁰ *Perspectives 2001-2002 des marchés de biens d'équipement dans le monde - Comparaison du poids des NTIC : Etats-Unis, Royaume-Uni, Allemagne et France*, Rexecode mars 2001.

¹¹ Voir par exemple Gaglio et Guillou (2018), *Le tissu productif numérique en France*, OFCE Policy brief n° 36, juillet 2018.

Le poids de la valeur ajoutée du secteur numérique

La définition adoptée pour le périmètre du secteur « numérique » par les comptes nationaux réunit le secteur des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)¹² avec ces deux composantes ; les secteurs des TIC de l'industrie manufacturière fabriquant des produits électroniques, informatiques ou des équipements de télécommunication, les secteurs des services TIC (édition de logiciel, secteur des télécommunications, sous-secteur de la programmation et du conseil et autres activités informatiques, traitement de données, hébergement, portail internet...). Ce dernier secteur s'est particulièrement développé au cours des dernières années dans les pays qui sont les plus avancés en matière de numérique tandis que la production de matériels TIC étaient plutôt délocalisées dans quelques pays asiatiques.

Sous-secteurs composant le secteur des technologies de l'information et de la communication

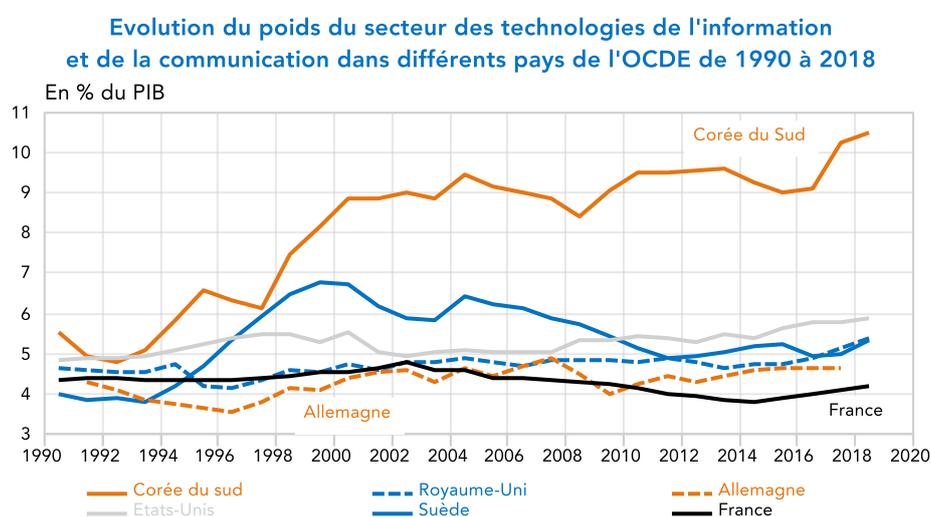
		Valeur ajoutée en 2019(en milliards d'euros)
TIC – Industrie manufacturière		
26.1	Fabrication de composants et cartes électroniques	3,2
26.2	Fabrication d'ordinateurs et d'équipements périphériques	0,2
26.3	Fabrication d'équipements de communication	6,7
26.4	Fabrication de produits électroniques grand public	0,1
26.8	Fabrication de supports magnétiques et optiques	0,0
	Total	10,2
TIC – Services		
46.5	Commerce de gros d'équipements de l'information et de la communication	5,7
58.2	Edition de logiciels	7,4
61	Télécommunications	28,5
62	Programmation, conseil et autres activités informatiques	39,0
63.1	Traitement de données, hébergement et activités connexes - portails Internet	3,9
95.1	Réparation d'ordinateurs et d'équipements de communication	1,4
	Total	85,9
	Total général	96,1

* Note : Le code de la première colonne est celui de la NACE Rev.2 à trois niveaux

¹² A noter que dans sa publication « L'économie et la société à l'ère du numérique » édition 2019, l'Insee quantifie l'économie des technologies, contenus et supports de l'information (TCSI) avec peu ou prou le même périmètre que celui des TIC mais en ajoutant quelques secteurs d'activité « Contenus et supports » (notamment les secteurs « Edition » (58), « Production de films cinématographiques, de vidéos et de programmes de télévision » (59), « Programmation et diffusion » (60) qui ne figurent pas dans la liste des secteurs d'activité des technologies de l'information et de la communication définis par l'OCDE.

Certains pays ont un poids important du secteur TIC car ils sont principalement producteurs d'équipements informatique et de télécommunications (exemple de la Corée dont le poids de l'industrie est de 7,4 % du PIB pour un secteur TIC représentant 10,5 % de son PIB en 2018), d'autres parce qu'ils sont plutôt en avance dans les services d'information et de télécommunications (le poids des services TIC aux Etats-Unis est de 5,2 % du PIB pour un secteur TIC dans son ensemble représentant 5,9 % du PIB en 2018).

La France a un poids de son secteur producteur de TIC très faible (0,3 % du PIB), et le poids des services TIC (3,8 %) se maintient de sorte que le poids total du secteur des technologies de l'information et de la communication est en 2018 parmi les plus faibles des grands pays de l'OCDE.



Source : Base de données STAN de l'OCDE et comptes nationaux

© Rexecode

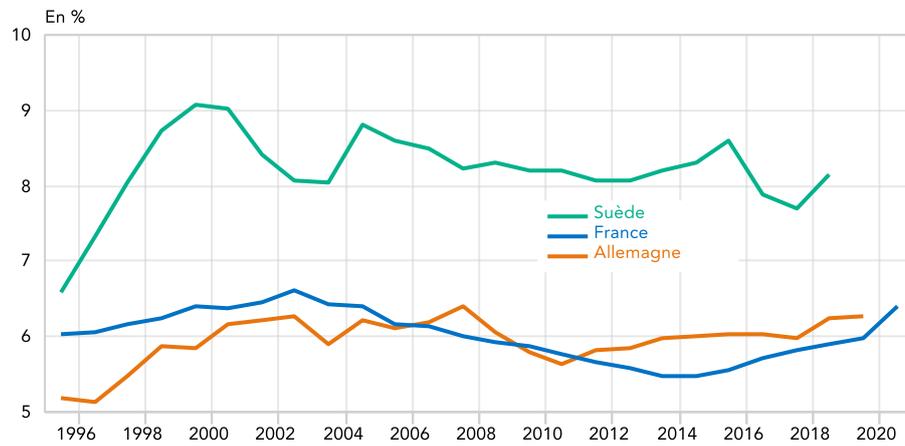
Cette apparente stagnation du poids des secteurs producteurs de biens et services numériques au cours des dernières décennies doit être relativisée. En considérant le périmètre défini par l'INSEE des Technologies, contenus et support de l'information, très légèrement différent de celui retenu par l'OCDE, on constate sur quatre pays européens une évolution très différente de la part des secteurs producteurs de biens et services numériques selon que l'on réalise le calcul en euros courants (stagnation du poids du secteur) ou en euros constants (on révèle alors une progression assez nette depuis deux décennies). La raison est bien entendu que le prix de la valeur ajoutée des branches produisant des biens et services numériques a fortement baissé au cours des dernières décennies (une baisse comprise entre 2 et 3 % par an selon les pays) tandis que le prix de la valeur ajoutée de l'ensemble des autres biens et services progressait (entre 1 et 1,5 % par an selon les pays).

Poids du secteur des TIC dans différents pays de l'OCDE

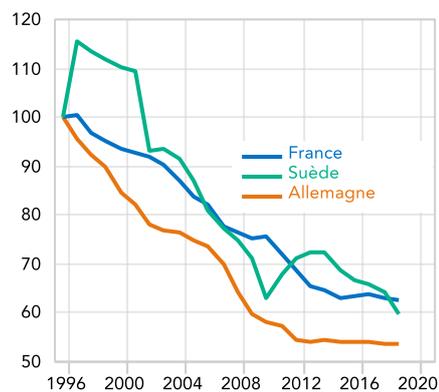
	Corée du sud	Etats-Unis	Suède	Royaume-Uni	Allemagne	France
1990	5,5	4,9	4,0	4,6	4,3*	4,3
2000	8,9	5,5	6,7	4,7	4,4	4,5
2010	9,5	5,4	5,1	4,8	4,2	4,1
2018	10,5	5,9	5,4	5,4	4,6	4,2

* 1991 pour l'Allemagne

Part de la valeur ajoutée du secteur numérique dans la valeur ajoutée de l'ensemble des branches

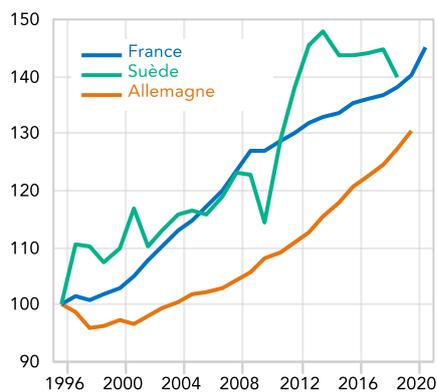


Indice de prix de la valeur ajoutée du secteur numérique (1995=100)



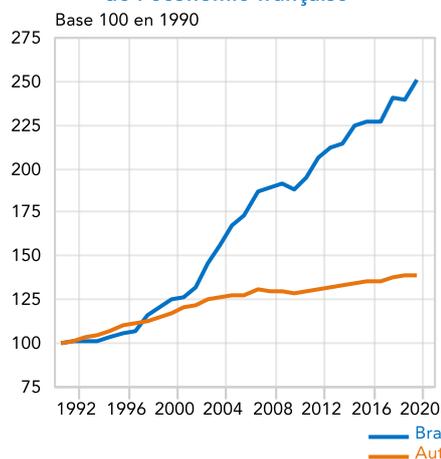
Source : Eurostat comptes nationaux

Indice de prix de la valeur ajoutée de l'ensemble des branches hors numérique (1995=100)

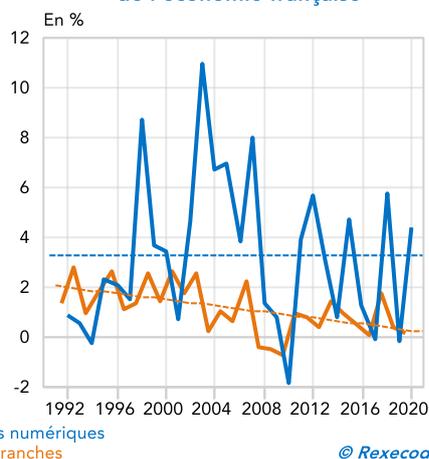


© Rexecode

Evolution de la productivité horaire
dans les branches numériques
et les autres branches
de l'économie française



Taux de croissance de la productivité
horaire dans les branches numériques
et les autres branches
de l'économie française



Une raison à la baisse de l'indice du prix de la valeur ajoutée dans les branches numériques est la forte augmentation de la productivité du travail dans les branches produisant des biens et des services numériques, comparativement au reste des branches de l'économie. Le taux d'accroissement de la productivité horaire du travail a été de plus de 3 % en moyenne dans les branches numériques de l'économie française entre 1990 et 2019 tandis qu'il n'était que de 2 % au début des années 1990 pour les autres branches de l'économie avant de lentement décroître au fil des années. Ainsi, sur la période 2010-2019, le taux de croissance moyen de la productivité horaire du travail a été de 2,9 % dans les branches numériques et seulement 0,7 % dans les autres branches de l'économie française.

Les pays qui ont un poids moyen du secteur numérique plus important ont aussi un taux de croissance annuel supérieur

Les pays dont les poids du secteur de l'information et des télécommunications sont les plus élevés sont les pays qui ont connu au cours des dernières décennies les taux de croissance économique les plus élevés. La relative faiblesse du secteur des TIC en France peut ainsi apparaître comme un handicap pour la croissance française.

	Poids moyen du secteur TIC sur la période 1990-2018 (en % du PIB)	Taux de croissance annuel moyen du PIB sur la période 1990-2018 (en %)
Corée du Sud	8,2	5,1
Etats-Unis	5,3	2,5
Suède	5,3	2,2
Royaume-Uni	4,7	2,0
Allemagne	4,3	1,5
France	4,3	1,6

La contribution du capital numérique à la croissance économique

Pour déterminer la contribution du numérique à la croissance, les économistes partent d'une représentation de la fonction de production macroéconomique. Celle-ci explique le volume du produit intérieur brut (PIB) par la quantité de travail (mesurée en heures), le stock de capital productif (l'ensemble des machines, bâtiments, ordinateurs, matériels utilisés par les entreprises et les administrations) ainsi que la productivité globale des facteurs (PGF).

La productivité globale des facteurs est la composante de la croissance non expliquée par les volumes des facteurs travail et capital. Elle reflète l'ensemble des autres paramètres qui influencent l'augmentation de la production à volume des facteurs inchangés (progrès technique, innovation,...).

Certains exercices récents ont isolé la contribution du capital TIC ou numérique à la croissance. Le stock de capital numérique (matériels et équipements numériques) est ainsi distingué du capital traditionnel ou classique (machines, bâtiments,...). Cette distinction permet de mesurer la contribution du capital numérique à la croissance, c'est-à-dire à l'effet direct de l'économie numérique sur la croissance.

En 2018, le stock de capital numérique atteignait 401 milliards d'euros. Il était constitué de 72 milliards d'euros d'équipements des technologies de l'information et de la communication et de 329 milliards d'euros de logiciels et de base de données. Les investissements en numérique s'établissaient la même année à 90 milliards d'euros. Le taux de dépréciation du stock de

capital numérique est relativement élevé (18 % environ). Le stock de capital numérique représentait en 2018 environ 3,7 % du stock de capital brut total.

Un examen des exercices de comptabilité de la croissance à partir de la base de données EU-KLEMS permet d'apprécier la contribution des différents facteurs de production à la croissance de la valeur ajoutée de l'ensemble de l'économie, bien que la base de données ne soit pas totalement homogène en termes de période (1990-2015 pour la France et les Etats-Unis, 1996-2015 pour l'Allemagne)¹³.

La contribution du capital TIC (matériel informatique et de communication) à la croissance annuelle du PIB est de 0,40 point par an aux Etats-Unis sur la période 1990-2015, de 0,41 point pour l'Allemagne sur la période 1996-2015, et de seulement 0,17 point pour la France sur la période 1990-2015. La comparaison de la contribution du capital en technologie numérique donne donc une différence de contribution 0,1 à 0,2 point par an de croissance française en moins par rapport aux autres pays.

Croissance du PIB et contributions des facteurs pour la France
(en % et en point)

	1990-2015	1990-1999	2000-2009	2010-2015
Taux de croissance du PIB	1,58	2,02	1,42	1,13
Contribution du travail	0,53	0,57	0,43	0,64
<i>Heures travaillées</i>	0,21	0,15	0,30	0,17
<i>Changement de la composition du travail</i>	0,33	0,42	0,14	0,47
Contribution du capital (non TIC)	0,62	0,72	0,70	0,32
Contribution du capital TIC	0,17	0,16	0,19	0,13
Contribution de la productivité globale des facteurs	0,26	0,56	0,09	0,04

Source : EU-KLEMS.

Lecture : Sur la période 1990-2015, le taux de croissance moyen a été de 1,58 % en France. La contribution du travail a été de 0,53 point, celle du capital (non TIC) de 0,62 point, celle du capital TIC de 0,17 point. La part inexpliquée de la croissance est attribuée à la productivité globale des facteurs (1,58 - 0,53 - 0,62 - 0,17 = 0,26 point).

¹³ Voir par exemple *Recent trends in Europe's output and productivity, growth performance in the sector level, 2002-2015*, Bart van Ark, Kirsten Jäger, international productivity vol. n° 33, 2017.

Croissance du PIB et contributions des facteurs pour les Etats-Unis (en % et en point)

	1990-2015	1990-1999	2000-2009	2010-2015
Taux de croissance du PIB	2,25	3,37	1,51	1,61
Contribution du travail	0,61	1,16	0,00	0,69
<i>Heures travaillées</i>	0,39	0,90	-0,21	0,53
<i>Changement de la composition du travail</i>	0,22	0,26	0,21	0,16
Contribution du capital (non TIC)	0,54	0,47	0,64	0,48
Contribution du capital TIC	0,40	0,65	0,30	0,14
Contribution de la productivité globale des facteurs	0,71	1,10	0,56	0,30

Source : EU-KLEMS.

Croissance du PIB et contributions des facteurs pour l'Allemagne (en % et en point)

	1996-2015	1996-1999	2000-2009	2010-2015
Taux de croissance du PIB	1,37	1,73	0,90	1,94
Contribution du travail	0,11	-0,03	-0,16	0,65
<i>Heures travaillées</i>	0,00	-0,17	-0,25	0,53
<i>Changement de la composition du travail</i>	0,11	0,13	0,09	0,12
Contribution du capital (non TIC)	0,43	0,62	0,46	0,26
Contribution du capital TIC	0,41	0,93	0,37	0,12
Contribution de la productivité globale des facteurs	0,43	0,21	0,23	0,91

Source : EU-KLEMS.

Entre 1990 et 2015, la part de la croissance expliquée directement par l'accumulation du capital TIC était de 11 % en France contre 18 % aux Etats-Unis et 30 % en Allemagne (1996-2015).

Part de la croissance expliquée par la contribution du capital TIC

	France 1990-2015	Etats-Unis 1990-2015	Allemagne 1996-2015
Taux de croissance moyen du PIB annuel sur la période	1,58	2,25	1,37
Contribution du capital TIC à cette croissance	0,17	0,40	0,41
Part de la croissance expliquée par le Capital TIC	11 %	18 %	30 %

Source : EU-KLEMS, calculs Rexecode.

Les résultats issus de ces travaux récents à partir de la base de données EU-KLEMS rejoignent donc les conclusions d'un exercice du même type que Rexecode avait mené en 2011 dont les conclusions étaient les suivantes : « Sur longue période, la part de la croissance expliquée par l'effet direct de l'accumulation du capital numérique est la plus faible en France et la plus forte aux Etats-Unis ».

Appréciation de l'effet direct de l'accroissement du capital numérique sur la croissance

	France 1980-2008	Etats-Unis 1980-2008	Allemagne 1991-2007	Royaume-Uni 1980-2007	Japon 1980-2006
Taux de croissance du PIB annuel moyen sur la période	2,01	2,91	1,55	2,62	2,53
Effet direct de l'accroissement du capital TIC (en point)	0,21	0,52	0,21	0,37	0,39
Part de la croissance expliquée par le Capital TIC	10 %	18 %	14 %	14 %	15 %

Source : Rexecode (2011), *L'économie numérique et la croissance, Poids, impact et enjeux d'un secteur stratégique*, Document de travail n°24, mai 2011

Cependant, cette mesure de l'effet de l'accumulation du capital numérique sur la croissance ne rend pas compte de l'ensemble des effets du numérique sur la croissance. En effet une partie de la croissance de la productivité globale des facteurs provient de la diffusion des technologies numériques dans les secteurs utilisateurs et des effets réseaux. Des études tentent d'estimer la part de la contribution de la productivité globale des facteurs à la croissance imputable à la diffusion des technologies numériques dans l'économie, c'est-à-dire l'effet indirect du capital numérique sur la croissance. Les travaux menés par Rexecode en 2011 avaient abouti à un effet indirect de l'accroissement du capital numérique plus important que l'effet direct.

Appréciation de l'effet indirect de l'accroissement du capital numérique sur la croissance

	France 1980-2008	Etats-Unis 1980-2008	Allemagne 1991-2007	Royaume-Uni 1980-2007	Japon 1980-2006
Taux de croissance du PIB annuel moyen sur la période	2,01	2,91	1,55	2,62	2,53
Effet indirect de l'accroissement du capital TIC (en point)	0,31	0,56	0,29	0,34	0,42
Part de la croissance expliquée par le Capital TIC	16 %	19 %	18 %	13 %	17 %

Source : Rexecode (2011), *L'économie numérique et la croissance, Poids, impact et enjeux d'un secteur stratégique*, Document de travail n°24, mai 2011

Les travaux les plus récents ont cherché à intégrer la contribution de facteurs complémentaires appelés « intangibles » (les logiciels, les bases de données, le capital en recherche et développement) en isolant ces facteurs du capital TIC. Des statistiques ont été introduites pour ces actifs longtemps ignorés dans les exercices de comptabilité de la croissance. Les résultats d'exercice de comptabilité de la croissance intégrant les intangibles aboutissent à abaisser légèrement la contribution du capital TIC à la croissance pour faire apparaître une contribution du même ordre par ces actifs « intangibles » ignorés des précédents exercices de comptabilité de la croissance.

La prise en compte de ces facteurs intangibles ne change cependant pas la conclusion d'une faible contribution du capital TIC renforcé de celle des facteurs intangibles à la croissance en France (0,11 point, soit 7 % de la croissance) en particulier aux Etats-Unis (0,34 point, soit 16 % de la croissance).

Exercice de comptabilité de la croissance intégrant la contribution des intangibles

Croissance du PIB et contributions des facteurs pour la France (en % et en point) en tenant compte des intangibles

	1998-2017	1998-2007	2008-2017
Taux de croissance du PIB	1,61	2,40	0,81
Contribution du travail	0,69	0,73	0,64
Contribution du capital (non TIC)	0,19	0,23	0,14
Contribution du capital TIC	0,02	0,03	0,02
Contribution des intangibles (logiciels, base de données, R&D,...)	0,09	0,08	0,09
Contribution de la productivité globale des facteurs	0,63	1,34	-0,09

Croissance du PIB et contributions des facteurs pour les Etats-Unis (en % et en point) en tenant compte des intangibles

	1998-2017	1998-2007	2008-2017
Taux de croissance du PIB	2,13	2,95	1,32
Contribution du travail	0,49	0,61	0,38
Contribution du capital (non TIC)	0,57	0,74	0,39
Contribution du capital TIC	0,15	0,23	0,07
Contribution des intangibles (logiciels, base de données, R&D,...)	0,19	0,23	0,15
Contribution de la productivité globale des facteurs	0,73	1,13	0,33

Source : Base de données EU-KLEMS (2019), Stehrer, R., A. Bykova, K. Jäger, O. Reiter and M. Schwarzhappel (2019): *Industry level growth and productivity data with special focus on intangible assets*, *wiiw Statistical Report No. 8*.

Pour résumer, **au cours des trente dernières années, la France a connu une croissance du stock de capital numérique de 4,8 % par an en moyenne pour un taux de croissance du PIB de l'ordre de 1,6 % par an. L'élasticité du taux de croissance du PIB au taux de croissance du stock de capital numérique apparaît ainsi de l'ordre de 0,3.**

Un supplément d'investissement en capital numérique de 1 % du stock de capital numérique (environ 4 milliards d'euros la première année), qui serait poursuivi de manière continue pendant de très nombreuses années, permettrait d'accroître le stock de capital numérique d'un peu moins de 6 % à l'horizon d'une vingtaine d'années. Cela renforcerait le taux de croissance du stock de capital numérique et donc le taux de croissance du PIB pendant quelques années. En considérant l'élasticité du taux de croissance du PIB au taux de croissance du stock de capital numérique de 0,3 (source de l'effet direct de l'accroissement du stock de capital numérique dans l'économie et des conséquences de l'amélioration de la productivité globale des facteurs permise par la diffusion du capital numérique dans l'économie),

cela déboucherait sur un renforcement initial de la croissance du PIB de 0,3 point la première année, effet qui s'estomperait progressivement au cours du temps. A l'horizon de vingt ans, le supplément de PIB atteindrait 50 milliards d'euros.

Principaux messages du chapitre

En 2018, le poids du secteur des technologies de l'information et de la communication est plus faible en France (4,2 % du PIB) qu'en Allemagne (4,6 % du PIB), en Suède (5,4 % du PIB) ou aux Etats-Unis (5,9 % du PIB). Or, les pays qui sur les dernières décennies présentent les secteurs numériques les plus développés sont également ceux qui ont connu les plus fort taux de croissance. La relative faiblesse du secteur numérique en France apparaît donc comme un handicap pour la croissance française.

Une méthodologie d'identification et de mesure des sources de la croissance et de décomposition de la valeur ajoutée permet de calculer l'impact de l'économie numérique sur la croissance. L'effet direct du numérique (accumulation de capital numérique dans l'économie) est de 0,17 point de croissance en France (sur la période 1990-2015), 0,40 aux Etats-Unis (1990-2015) et 0,41 en Allemagne (1996-2015). C'est donc environ 0,2 point de croissance supplémentaire que l'économie française pourrait obtenir en accélérant l'accumulation de capital numérique.

En 2018, le stock de capital numérique en France atteignait 400 milliards d'euros. Il était constitué pour 72 milliards d'euros d'équipements des technologies de l'information et de la communication et pour 321 milliards d'euros de logiciels et de bases de données. Le stock de capital numérique représentait environ 3,7 % du stock de capital brut total.

Un supplément d'investissement en capital numérique de 1 % du stock de capital numérique (environ 4 milliards d'euros la première année) qui serait poursuivi pendant de très nombreuses années permettrait d'accroître le stock de capital numérique d'un peu moins de 6 % à l'horizon d'une vingtaine d'années. En considérant l'élasticité du taux de croissance du PIB au taux de croissance du stock de capital numérique de 0,3, cela déboucherait sur un renforcement de la croissance du PIB de 0,3 point la première année, effet qui s'estomperait progressivement sur une vingtaine d'années. A cet horizon le supplément de PIB atteindrait 50 milliards d'euros.

3. Le numérique est favorable à la croissance et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre

Il est utile de rapprocher les effets (négatifs) des émissions carbonées entraînées par l'utilisation du numérique en France et les effets (positifs) sur le revenu national français du développement du numérique. L'approche retenue consiste à évaluer et comparer les effets d'une variation de l'investissement en capital numérique d'une part sur les émissions de CO₂, d'autre part sur le revenu national. Nous raisonnerons ici « en moyenne » sans chercher à distinguer l'intérêt de telle ou telle application numérique, afin de calculer des ordres de grandeur moyens.

Un essai d'analyse « coût-bénéfice » comparant les avantages économiques et l'empreinte carbone associée au numérique

Le stock de capital numérique, constitué par des équipements, des logiciels et des bases de données, représentait en 2018 de l'ordre de 400 milliards d'euros en France. L'investissement annuel des entreprises en numérique atteignait la même année 90 milliards d'euros (sur un investissement total de l'ensemble des agents économiques de 540 milliards d'euros). Le revenu national (PIB) était de 2 353 milliards d'euros. On examine ici les conséquences de l'hypothèse théorique d'un moindre investissement annuel en capital numérique par les entreprises de 1 % du stock total de leur capital numérique, soit de 4 milliards d'euros.

On calcule en premier lieu la baisse de PIB qui en découlerait en s'appuyant sur l'élasticité de la croissance du PIB à la croissance du stock de capital numérique (élasticité estimée à 0,3, cf. partie 2). Il ressort que **ce moindre investissement en numérique** de 4 milliards d'euros, soit 1 % du capital numérique, **générerait une réduction de PIB de 7 milliards d'euros** (soit $0,3 \times 1 \% \times 2\,353$ milliards). Ceci résulte à la fois du moindre apport direct du capital numérique dans les processus des branches productrices, et de la moindre croissance de la productivité globale des facteurs qui peut être associée au ralentissement de la diffusion du capital numérique dans l'économie.

On évalue en outre les émissions de carbone en moins qui résulteraient de notre hypothèse théorique d'un ralentissement de la croissance du capital numérique. L'empreinte carbone totale du numérique utilisé en France est de 11 millions de tonnes¹⁴ de CO₂e et l'investissement annuel en numérique de 90 milliards d'euros (année 2018). Les émissions qui seraient économisées en conséquence de la baisse des investissements dans le numérique de 4 milliards

¹⁴ Selon l'étude du Conseil général de l'économie de 2019. L'annexe 2 présente un teste de sensibilité de nos calculs à la valeur de l'empreinte carbone retenue.

d'euros seraient de 0,27 million de tonne de CO₂e¹⁵. En outre, les émissions associées à la baisse du PIB provoquée par le ralentissement de l'investissement en numérique seraient de 1,32 million de tonne de CO₂e, étant donné le contenu en gaz à effet de serre de la valeur ajoutée française (445 millions de tonnes de CO₂e émises en France pour un PIB de 2 353 milliards d'euros en 2018, soit 189 kgCO₂e pour 1 000 euros de valeur ajoutée). **Au total, les économies d'émissions de CO₂e qui résulteraient de l'hypothèse théorique de baisse de l'investissement numérique seraient donc de 1,59 millions de tonnes de CO₂e par an** (voir annexe).

On peut dès lors calculer le ratio entre les émissions brutes de carbone non émises et la baisse de création de valeur qu'entraînerait le ralentissement de l'investissement en capital numérique. La baisse de revenu national (PIB) générée par un moindre capital numérique, rapportée aux émissions économisées qu'elle entraîne, représente le coût économique de chaque tonne de CO₂e évitée. Il s'agit de la baisse des émissions émanant du territoire français mais aussi des territoires de production des matériels importés par la France. **On trouve une valeur de 4 400 €/tCO₂¹⁶ (7 milliards d'euros / 1,59 millions de tonnes de CO₂e). Chaque tonne de CO₂e évitée par une réduction de 1 % du stock de capital numérique de l'investissement numérique des entreprises aurait pour contrepartie une baisse du PIB de 4 400 euros.** Ce ratio est le coût économique associé à la moindre accumulation de capital numérique. Réduire l'essor numérique pour réduire l'empreinte carbone du numérique reviendrait à réaliser des économies de **gaz à effet de serre au coût à la tonne évitée de 4 400 €/tCO₂¹⁷. Cette valeur est très significativement supérieure au coût à la tonne évitée de nombreux autres modes de réductions des émissions de gaz à effet de serre.** Rappelons notamment que le rapport Quinet proposait une valeur tutélaire du carbone en France (c'est à dire le coût des mesures de réduction qu'il est économiquement souhaitable d'engager) de l'ordre de 250 €/tCO₂ en 2030 et 780 €/tCO₂ en 2050. Plusieurs options de réduction des émissions, comme la décarbonation de la production d'électricité, la décarbonation de certains procédés industriels, ou la réduction des consommations de chauffages des logements, se situent dans des ordres de grandeurs de coût de 50 à 500 €/tCO₂e, soit bien moins que le coût de réduction des émissions induites par le ralentissement du numérique que nous avons calculé. **La réduction des émissions de CO₂ par le biais d'un moindre développement du numérique apparaît comme une mauvaise solution puisque ce moindre développement entraînerait une perte de revenu qui pourrait être affecté à réduire bien plus nettement les émissions carbonées.**

¹⁵ Le calcul est détaillé en annexe page 41, en fonction des contenus en empreinte carbone des matériels et immatériels résultant de cet investissement.

¹⁶ En retenant une hypothèse plus élevée pour l'empreinte carbone (16,9 millions de tonnes de CO₂, c'est-à-dire les estimations du rapport Ademe/Arcep), nous parvenons à un coût de la tonne économisée de 4 220 euros/tCO₂.

¹⁷ Nous sommes conscients des approximations qui peuvent être contenues dans les données de base retenues pour ces calculs. Notre objectif est avant tout de donner un ordre de grandeur acceptable pour la valeur de la tonne de CO₂ économisée, si celle-ci devait l'être par un moindre essor du numérique.

On rappelle que nous prenons ici le numérique dans sa globalité, en moyenne, sans essayer de distinguer tel ou tel usage en particulier, plus ou moins utile ou plus ou moins consommateur d'énergie.

Deux facteurs importants renforcent encore l'observation que freiner le développement du numérique serait une option très coûteuse et défavorable à l'objectif de réduction de l'effet de serre

Le premier est que les émissions du numérique sont dues pour l'essentiel à la consommation d'énergie nécessaire à sa production et à l'électricité nécessaire à son usage. Pour réduire l'empreinte carbone du numérique, le premier levier est l'amélioration de l'efficacité énergétique, c'est-à-dire les mesures qui consistent à pouvoir produire les mêmes matériels en utilisant moins d'énergie, et à avoir des matériels moins consommateurs d'électricité à l'usage pour un même service fourni. Le deuxième levier est celui de la réduction, partielle voire totale à terme, de l'intensité carbone de l'énergie consommée pour produire et utiliser ces matériels. **Les politiques de la transition énergétique et climatique visent précisément à actionner ces deux leviers. L'empreinte carbone du numérique diminuera donc à mesure que ces politiques de réduction de l'intensité carbone de l'énergie et de l'électricité porteront leurs effets.**

Par ailleurs, il est important de souligner que le numérique est aussi, par les fonctionnalités qu'il offre, un outil de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le reste de l'économie. **Le numérique est ainsi un facteur de découplage entre croissance économique et émissions de gaz à effet de serre** par trois mécanismes : par substitution entre des usages numériques et des usages « physiques » plus émetteurs ; par une amélioration de l'efficacité énergétique de l'économie ; et dans certains cas, par la facilitation des mécanismes utilisés pour la décarbonation de l'énergie. Le numérique permet en effet le suivi en temps réel, la communication et l'optimisation de systèmes et variables clés de la transition énergie-climat (demande d'énergie, production électrique etc...).

Des usages numériques peuvent se substituer à des usages « physiques » plus émetteurs

La période récente a montré que les outils numériques peuvent permettre d'éviter des usages physiques émetteurs de gaz à effet de serre. C'est particulièrement le cas du transport individuel et du transport longue distance, très majoritairement réalisé en voiture thermique pour les distances courtes, et en avion pour les longues distances, transports physiques qui peuvent être évités par des dispositifs de visio-conférence. C'est aussi le cas de la numérisation de beaucoup de démarches administratives, du commerce en ligne (dans certaines configurations), de la correspondance dématérialisée plutôt

que par courrier physique, avec toutefois des limites tenant à la capacité d'utilisation par certaines catégories de la population.

Une étude de l'Ademe publiée en 2015 « *Evaluation de l'impact du télétravail & des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et sur l'organisation des entreprises* » indiquait par exemple que la mise en place de mesure de travail à distance de 2,9 jours par semaine d'un salarié français moyen entraînait une baisse des émissions directes de 26 % (liée à la moindre utilisation de véhicules thermiques pour le trajet domicile-travail) et une augmentation des émissions domestiques de 13 % (liée à la consommation accrue de chauffage et d'électricité à domicile et d'une légère augmentation des trajets personnels en voiture), soit une baisse nette des émissions de 13 %. La mise à jour et l'extension de cette étude à de nouveaux facteurs qui peuvent être associés au travail à distance, publiée en 2020, tire une conclusion similaire : le bilan environnemental du télétravail reste favorable dans la plupart des jeux d'hypothèses¹⁸.

Le numérique permet d'augmenter l'efficacité énergétique et la décarbonation de l'énergie

Le numérique permet le suivi en temps réel, la communication et l'optimisation de systèmes et variables clés de la transition énergie-climat. Ainsi par exemple dans le transport, le véhicule électrique et le pilotage de la recharge, le véhicule autonome et la réduction des congestions ; dans la production d'énergie, l'intégration d'un important niveau de renouvelables dans le mix de production d'électricité, les *smart grids* (gestion de l'intermittence, stockage intelligent, effacement) ; dans le secteur du bâtiments, l'optimisation des consommations énergétiques des bâtiments (éclairage, chauffage/climatisation, bâtiments à énergie positive...) ; dans l'ensemble de l'industrie, l'automatisation, l'optimisation des process de production et des chaînes logistiques ; dans l'agriculture, le suivi des besoins du sol et donc optimisation des épandages d'engrais émetteurs en GES...

Une étude de la *Global Enabling Sustainability Initiative (GeSI)*¹⁹, organisation qui représente des acteurs importants du secteur du numérique, a montré, pour le cas des Etats Unis, qu'en fournissant aux acteurs les informations nécessaires pour prendre des décisions intelligentes sur la consommation énergétique optimale, certaines solutions numériques peuvent contribuer à la réduction de l'empreinte carbone de l'économie. D'après cette étude, les solutions numériques pourraient réduire les émissions annuelles de CO₂ aux États-Unis de 13 à 22 % en 2050 par rapport aux projections basées sur une hypothèse de statu quo à partir de 2020. Cela se traduirait par des écono-

¹⁸ Le résultat est plus incertain à moyen-long terme notamment si l'on tient compte des effets possibles sur la localisation des travailleurs. Ceux-ci ne pourront être appréhendés que dans la durée mais l'étude indique qu'aucune évolution majeure n'a été relevée à ce stade.

¹⁹ <https://gesi.org/research/smart-2020-enabling-the-low-carbon-economy-in-the-information-age-united-states-report-addendum>

Exemple de mesures d'économie d'énergie basée sur des solutions numériques : l'efficacité énergétique « active » dans le secteur du bâtiment

L'efficacité énergétique dans les bâtiments peut être liée à la mise en place de matériaux isolants (efficacité dite « passive »), et de système de production d'énergie plus efficace. Elle peut aussi reposer sur des mesures dites « actives », c'est à dire basées sur l'intégration dans le bâtiment d'outils intelligents de mesure, de régulation et d'automatisation des systèmes. Ces outils intelligents sont numériques. Ils permettent de réduire la consommation énergétique globale d'un logement ou d'un bâtiment tertiaire par une optimisation des usages d'énergie (quantité et disponibilité dans le temps calculés pour ne consommer que l'énergie nécessaire en fonction des usages). Concrètement, il s'agit de mesurer en temps réel les paramètres pertinents (température, aération, luminosité) et de piloter au mieux les systèmes comme le chauffage (atteinte d'une consigne, abaissement en inoccupation ou de nuit...), la vitesse de ventilation, l'éclairage, l'ouverture et la fermeture des ouvrants, éventuellement la gestion de la production d'énergie renouvelable si le bâtiment est par exemple équipé de panneaux solaires.

Des simulations thermiques ont été réalisées pour étudier l'impact de tels outils numériques sur les consommations d'énergie des bâtiments, notamment par le Cerema¹. Ces simulations montrent des gains potentiels importants notamment lorsqu'il y a une intermittence d'occupation prévisible (bureaux, commerces). L'étude montre un potentiel d'économie de 17 % à 53 % en fonction des typologies de bâtiments et d'usages. Lorsqu'il y a une intermittence faible ou imprévisible (pour les logements par exemple), les gains potentiels sont plus faibles mais restent intéressants, de 9 % à 20 %, soit deux fois moindres.

Ces résultats sont confirmés par des expérimentations pratiques, comme celle lancée en 2014 par l'Institut français pour la performance environnementale des bâtiments (Ifpeb) qui concernait 74 bâtiments tertiaires. Les expérimentations réelles ont confirmé qu'un pilotage optimisé des équipements énergétiques permettaient de réduire de 10 à 20 % la facture énergétique des sites concernés. L'étude de l'Ademe en 2015² portant sur 15 bâtiments du secteur tertiaire (bureaux, lycées, centre commercial, hôtel etc) confirme également ces résultats et indique des économies pouvant atteindre 25 à 30 %.

¹ <https://www.banquedesterritoires.fr/sites/default/files/2018-11/Cerema%20fiche%206.pdf>

² *Evaluation de systèmes de GTB dans le tertiaire*, Décembre 2015

Les systèmes numériques d'optimisation peuvent également être utilisés dans l'industrie et couplés aux systèmes de pilotage de la production, eux aussi de plus en plus numériques. Dans une expérimentation publiée en 2015, l'ADEME et l'AFNOR ont accompagné la mise en œuvre d'un système de management de l'énergie dans 13 entreprises industrielles de toutes tailles et de tous secteurs d'activité, basées en Haute et Basse Normandie. Cette étude fait état non seulement de baisse de consommation énergétique du même ordre de grandeur que les précédents, mais y ajoute une dimension économique. Des progrès d'efficacité énergétique dans l'industrie sont accompagnés d'autres bénéfices :

- amélioration de la productivité (en utilisant mieux l'énergie, en identifiant les gaspillages, et les fuites, en optimisant les procédés du production consommateurs d'énergie) ;
- amélioration de la rentabilité (dans un contexte concurrentiel, la réduction de la dépense énergétique participe à la baisse du coût de production et donc du prix de revient, et donc partant d'une part de l'énergie de l'ordre de 10 % dans le prix de revient, une amélioration de l'efficacité énergétique de 10 à 20 % génère une marge accrue de 1 à 2 points) ;
- amélioration de la compétitivité (hormis le point précédemment cité, la maîtrise de la consommation énergétique apporte aussi à l'entreprise une plus grande capacité de résistance face à des évolutions non prévisibles du prix ou de l'approvisionnement en énergie par rapport à des concurrents qui n'ont pas forcément de telles capacités).

mies brutes d'énergie et de carburant d'une valeur de 140 à 240 milliards de dollars (réduction de la consommation totale de pétrole de 11 à 21 % et une réduction du pétrole importé de 20 à 36 %). Le rapport mentionne quatre principales opportunités liées aux outils numériques pour réduire les émissions : les réseaux électriques intelligents ; l'optimisation du transport routier qui pourrait réduire le temps de trajet et les congestions ; les bâtiments intelligents ; la substitution des déplacements par des réunions virtuelles et des modalités de travail flexibles.

L'exemple de l'encadré ci-dessus de l'utilisation d'outils numériques pour la décarbonation du secteur du bâtiment est particulièrement frappant. Prenons pour illustration le cas moyen d'un logement type de 90 m², de classe énergétique D, consommant au total de l'ordre de 20 MWh d'énergie par an, supposons du gaz naturel. Etant donnée l'intensité en carbone du gaz naturel, ces consommations entraîneront des émissions annuelles de CO₂ de l'ordre de 4 tonnes par an. Si un système numérique d'optimisation est installé dans ce logement, il devrait permettre comme nous l'avons vu ci-dessus d'obtenir un gain sur les consommations énergétiques de l'ordre de 10 %. Ce gain se traduirait donc en une baisse des consommations de gaz et donc des émissions de CO₂ associées, d'un montant de 400 kgCO₂.

Ce montant économisé peut être rapproché de l'augmentation des émissions induite par l'ajout du dispositif numérique, donc l'empreinte carbone de ce dispositif. Supposons que l'empreinte carbone d'un dispositif d'optimisation des consommations énergétiques soit équivalente à celle d'une box internet (les deux dispositifs sont techniquement similaires même si notre hypothèse conduit probablement à une surestimation de l'empreinte carbone). L'empreinte carbone d'une box internet est estimée à environ 80 kgCO₂, 70 kgCO₂ d'émissions induites par sa production, et environ 10 kgCO₂ d'émissions induites par sa consommation annuelle d'électricité (comptées au contenu carbone de l'électricité française). Ainsi on voit que la première année, **l'installation du dispositif numérique a entraîné une augmentation de l'empreinte carbone de 80 kgCO₂, mais a permis dans le même temps une réduction de 400 kgCO₂ des émissions du logement, et donc une réduction nette totale de 320 kgCO₂.** Les années suivantes, on ne compte plus que les émissions associées à la consommation d'électricité du dispositif, et l'économie d'émission nette atteint alors à 390 kgCO₂ par an.

Le bilan complet en émissions de gaz à effet de serre d'un tel dispositif numérique est donc très favorable. Il l'est plus encore si l'on considère un logement chauffé au fioul (qui est plus carboné que le gaz à contenu énergétique équivalent), et encore davantage si l'on considère que les économies obtenues dépassent 10 % des consommations d'énergie, ce qui est le cas pour plusieurs expérimentations conduites notamment sur des bâtiments tertiaires. **Ainsi, pour certains usages bien identifiés, la mise en œuvre de solutions numériques peut entraîner des réductions d'émissions plus importantes que l'empreinte carbone des outils numériques qu'elle mobilise.**

Il est difficile au stade actuel d'évaluer la totalité des impacts positifs possibles de l'usage des outils numériques sur la réduction des émissions carbonées des secteurs utilisateurs notamment, par l'amélioration de l'efficacité énergétique. Nous n'avons donc pas tenu compte de cet effet supplémentaire, mais celui-ci ne ferait que renforcer encore l'impact positif du numérique sur le découplage entre croissance et effet de serre.

Principaux enseignements

- Une analyse du type coût-bénéfice, rapprochant les effets d'une variation de l'investissement en capital numérique d'une part sur les émissions de gaz et d'autre part sur le revenu national, montre que la réduction des émissions par le biais d'un moindre développement du numérique apparaît comme une mauvaise solution, puisque ce moindre développement entraînerait une perte de revenu qui pourrait être affectée à réduire bien plus nettement les émissions carbonées.
- Les politiques de la transition énergétique et climatique visent à la réduction, partielle voire totale à terme, de l'intensité carbone de l'énergie consommée pour produire et utiliser ces matériels. L'empreinte carbone du numérique diminuera donc à mesure que ces politiques porteront leurs effets.

- Le numérique est un facteur de découplage entre croissance économique et émissions de gaz à effet de serre par trois mécanismes : par substitution entre des usages numériques et des usages « physiques » plus émetteurs ; par une amélioration de l'efficacité énergétique de l'économie ; et dans certains cas, par la facilitation des mécanismes utilisés pour la décarbonation de l'énergie.
- Pour certains usages bien identifiés, la mise en œuvre de solutions numériques peut entraîner des réductions d'émissions plus importantes que l'empreinte carbone des outils numériques qu'elle mobilise, comme en atteste l'étude de cas portant sur les solutions numériques d'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment.

Conclusion

La première partie de cette étude porte sur l’empreinte carbone du numérique de la France, c’est-à-dire les émissions de gaz à effet de serre qui sont associées à l’utilisation de matériels numériques sur le territoire français, quelle que soit l’origine de ces matériels. Pour la France, l’empreinte carbone du numérique est de 11 MtCO₂e, soit 1,8 % de l’empreinte carbone totale de la France²⁰. L’empreinte carbone du numérique utilisé en France est due pour deux tiers (soit 8 MtCO₂e) à des émissions dégagées lors de la production et du transport du matériel numérique importé en France (écrans, smartphones, ordinateurs, etc), généralement en provenance de pays dont l’intensité des émissions est très supérieure à la nôtre. Le tiers restant (soit 3 MtCO₂e) est dû aux émissions associées à l’électricité consommée par les matériels numériques lors de leur utilisation en France. **Le poids du numérique dans l’empreinte carbone de la France est relativement faible mais l’usage du numérique se développe rapidement. Il est donc légitime de se préoccuper de son impact sur les émissions mondiales de gaz à effet de serre.**

La deuxième partie de l’étude propose une évaluation de l’impact du numérique sur la croissance potentielle de la France. Elle s’appuie sur une méthodologie d’identification et de mesure des sources de la croissance et de décomposition de la valeur ajoutée permettant de calculer l’impact de l’économie numérique sur la croissance. **Elle montre qu’un large usage du numérique est un facteur favorable à la croissance économique et à l’augmentation du pouvoir d’achat du revenu national.**

La troisième partie explore la contribution du développement des outils numériques aux efforts de découplage entre croissance et émissions de gaz à effet de serre. En rapprochant les coûts et les avantages économiques de l’investissement dans le numérique, **le développement du numérique apparaît clairement positif pour l’économie. Le coût en termes d’émissions de carbone est réel mais, dans la panoplie des actions possibles pour limiter les émissions carbonées, réduire l’investissement numérique constituerait une voie très coûteuse par rapport aux autres options mobilisables.** Ceci reviendrait à réduire les émissions au coût de 4 400 € par tonne de CO₂ évitée²¹, alors que soutenir le développement du numérique générerait un supplément de revenu national qui permettrait de mobiliser des réductions d’émission bien moins coûteuses, de l’ordre de 50 à 500 €/tCO₂. En outre, deux facteurs complémentaires, non pris en compte dans l’analyse coût bénéfice décrite précédemment, renforcent encore le sentiment que limiter le développement du numérique serait clairement défavorable à la réduction de l’effet de serre. Le premier est que les émissions du numérique sont dues pour

²⁰ D’après l’étude du Conseil général de l’économie de 2019. D’autres études (Ademe/Arcep par exemple) donne une empreinte carbone du numérique en France supérieure (16,9 millions de tonnes). Voir en annexe la présentation des différences.

²¹ Quelle que soit la valeur retenue pour l’empreinte carbone du numérique, nous parvenons à un coût de la tonne évitée largement supérieur à 4 000 euros/tCO₂ (cf. annexe 2 pour un test de sensibilité sur la base du chiffre Ademe/Arcep pour l’empreinte carbone.

l'essentiel à des consommations d'énergie. Or **les politiques de la transition énergétique et climatique visent précisément à décarboner la production d'énergie. L'empreinte carbone du numérique diminuera donc à mesure que ces politiques porteront leurs effets.** Le second facteur est que le numérique est aussi un outil de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le reste de l'économie. **Certains usages numériques permettent de stimuler le découplage entre activité économique et émissions de gaz à effet de serre.** Ainsi, l'essor du numérique dans sa globalité, sans distinguer tel ou tel usage en particulier, plus ou moins utile ou plus ou moins consommateur d'énergie, apparaît comme favorable à la croissance et à la réduction des émissions de carbone.

Ces observations conduisent à encourager le développement du numérique, particulièrement en France, où l'intensité carbone de l'électricité est faible. Il va de soi que le développement du numérique doit être effectué de façon compatible avec l'objectif de réduction globale des émissions de gaz à effet de serre : éviter tout gaspillage, maximiser son effet du moins sur la réduction de l'intensité énergétique et l'intensité carbone du reste de l'économie (usages numériques dans le logement, l'industrie, le transport), miser sur l'avantage comparatif du site France (réindustrialisation numérique, taxe carbone aux frontières...), et gérer au mieux son cycle de vie complet (efficacité et sobriété énergétique, durée de vie, réemploi/réparation, gestion des déchets et recyclage). Mais la meilleure politique, du point de vue du pouvoir d'achat comme du point de vue de l'effet de serre, est d'assurer, voire de renforcer l'essor du numérique en France en développant particulièrement les applications les plus efficaces en termes de découplage.

Annexe 1

Détermination du contenu en CO₂ d'un investissement de 4 milliards d'euros dans le numérique

Pour déterminer le contenu en carbone des investissements numériques, nous nous fondons sur les données en matière d'investissement, de consommations intermédiaires de la part des entreprises en matériels et services numériques ainsi que sur la consommation finale des ménages en produits et services numériques (principalement dans les services de télécommunications).

Les données pour l'année 2018 sont les suivantes.

Investissements et consommations intermédiaires de biens et services numériques par les entreprises (en milliards d'euros)

	Investissements	Consommations intermédiaires	Ensemble des achats
Matériels numériques	10	34	44
Services numériques (logiciels, base de données, télécoms)	80	73	153
Ensemble	90	107	197

Source : Insee, Compte nationaux

Consommation finale des ménages de biens et services numériques (en milliards d'euros)

	Consommation finale
Matériels numériques	18
Services numériques (télécoms)	25
Ensemble	43

Source : Insee, Compte nationaux

L'empreinte carbone associée au numérique est de 11 millions de tonnes de CO₂ par an (8 millions de tonnes contenus dans les matériels et 3 millions de tonnes par les usages numériques).

Calcul des émissions associées à 4 milliards d'investissement dans le numérique

Cet investissement de 4 milliards d'euros par les entreprises sera composé pour 10/90^{ème} par des achats de matériels numériques (principalement importés) et pour 80/90^{ème} par des achats de services numériques (logiciels, base de données).

Les achats annuels de matériels numériques sont de 62 milliards d'euros : 44 milliards d'euros par des entreprises (10 milliards d'euros de biens d'équipements et 34 milliards d'euros de biens intermédiaires) et 18 milliards d'euros par les ménages. Un investissement de 4 milliards d'euros représente donc 4/62^{ème} des achats de matériels numériques par an.

Les émissions associées aux achats de matériels numériques en France sont de 8 millions de tonnes de CO₂ par an.

On peut donc associer à un investissement de 4 milliards d'euros 0,06 million de tonnes de CO₂ ($8 \times 4/62 \times 10/90$) pour le contenu en carbone des matériels numériques de cet investissement.

Pour les émissions associées aux investissements en services numériques (logiciels, base données), nous appliquons le coefficient des émissions du secteur tertiaire (hors transports) rapportée à la valeur ajoutée correspondante soit 30 millions de tonnes de CO₂ pour 1 094 milliards d'euros de valeur ajoutée.

On peut donc associer à un investissement de 4 milliards d'euros 0,10 million de tonnes de CO₂ ($4 \times 80/90 \times 30/1094$) pour les émissions associées aux investissements en services numériques.

Les émissions associées à l'usage supplémentaire que va provoquer ces investissements en biens et services numériques sont de 0,11 million de tonnes de CO₂ (3 millions de tonnes de CO₂ x 4 milliards d'euros d'investissements x 4/108). L'ampleur des usages annuels du numérique est appréciée par les achats de services numériques par les entreprises (73 milliards d'euros) et les ménages (25 milliards d'euros).

Un investissement régulier de 4 milliards d'euros dans le numérique va donc provoquer 0,27 million de tonne de CO₂ annuellement du fait des émissions contenues dans les achats de matériels numériques (0,06 million de tonnes), des émissions associées aux achats de services numériques (0,10 million de tonnes) et des émissions associées aux usages de cet investissement (0,11 million de tonnes).

Cet investissement de 4 milliards d'euros accroît le stock de capital numérique. Nous retenons une élasticité de 0,3 entre la croissance du produit intérieur brut et celle du stock de capital numérique. L'investissement en capital numérique permet donc un surcroît de PIB de 7 milliards d'euros.

Les émissions de CO₂ associées à ces 7 milliards d'euros de PIB sont de 1,32 million de tonnes (7 x 445/2353), en rapportant les émissions de CO₂ de l'inventaire national en 2018 au PIB de la même année.

Au final, les émissions générées par cet investissement de 4 milliards d'euros sont de 1,59 million de tonnes de CO₂ (1,32 millions de tonnes de CO₂ du fait du supplément de PIB et 0,27 million de tonnes de CO₂ contenues dans les investissements en numérique).

Si on rapporte le supplément de PIB (7 milliards d'euros) aux émissions (1,59 million de tonnes de CO₂), cela donne un coût de 4 400 euros par tonne de CO₂.

Annexe 2

L'empreinte carbone du numérique

Les chiffrages récents de l'empreinte carbone du numérique

Dans notre étude « *L'essor du numérique est favorable à la croissance et à la réduction de l'empreinte carbone de la France* », nous avons retenu les chiffrages de l'empreinte carbone réalisés par le **Conseil général de l'économie** dans son étude de décembre 2019 « *Réduire la consommation énergétique du numérique* » de décembre 2019²², à savoir une empreinte carbone de **11 millions de tonnes de CO₂** (8 millions de tonnes de CO₂ pour l'empreinte liée aux matériels et 3 millions de tonnes de CO₂ pour l'empreinte liée aux usages).

L'étude **ADEME/ARCEP** présentée le 19 janvier 2022 « *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective* »²³ évalue l'empreinte carbone du numérique à **16,9 millions de tonnes de CO₂**, avec une consommation électrique pour les équipements et infrastructures numériques en France de 48,7 TWh. En retenant un chiffre pour les émissions de CO₂ associées à la production d'électricité française de 57 gCO₂/kWh (source : ADEME (2018)), les 48,7 TWh de consommation électrique pour des usages numériques correspondent à des émissions de 2,7 millions de tonnes de CO₂. L'empreinte carbone associée aux seuls matériels et services est donc dans l'étude ADEME/ARCEP de 14,2 millions de tonnes de CO₂ (16,9-2,7). L'étude de l'ADEME donne un intervalle de confiance pour l'empreinte carbone du numérique entre 10,6 et 26,3 millions de tonnes de CO₂.

Les auteurs de l'étude ADEME/ARCEP précise : « *Cette étude permet de quantifier les impacts environnementaux des équipements et infrastructures numériques en France en 2020, conformément aux trois briques présentées ci-dessous :*

- *Les terminaux fixes et mobiles présents en France tels que les téléviseurs, ordinateurs, tablettes, objets connectés, smartphones, etc. ;*
- *Les réseaux déployés ;*
- *Les centres informatiques tels que définis par les normes ISO 30134 et EN 50600 et tout ce qu'ils contiennent (notamment les équipements informatiques tels que les serveurs, les équipements réseaux et baies de stockage).*

²² https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/consommation-energie-numerique.pdf

²³ https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-numerique-environnement-ademe-arcep-volet02_janv2022.pdf

Cette étude couvre l'ensemble des infrastructures et équipements utilisés en France relatifs aux services numériques. Néanmoins, dans une approche cycle de vie, sont aussi pris en considération l'ensemble des impacts environnementaux au-delà des frontières tels que la fabrication des équipements à l'étranger. La partie logicielle (impacts reliés aux ressources humaines tels que le transport, le chauffage ou la nourriture, mais aussi l'influence du code sur la consommation de ressources matérielles et énergétiques) n'est pas couverte par cette étude ».

Le rapport du Sénat N°555 de juin 2020 « *L'empreinte environnementale du numérique* »²⁴ avance un chiffre de **15 millions de tonnes de CO₂** pour l'empreinte carbone du numérique en France et une consommation électrique provenant des usages numériques de 44 TWh (soit 2,5 millions de tonnes de CO₂ pour les usages numériques et 12,5 millions de tonnes de CO₂ pour le contenu en carbone des matériels et services).

Dans l'annexe du rapport du Sénat (2020) qui présente les travaux du cabinet CITIZING, il est indiqué :

Un rapport du Conseil Général à l'Économie (CGE) publié en décembre 2019 a estimé l'empreinte carbone du numérique français à 11 millions de tCO₂eq en 2018. L'écart de 4 millions de tonnes avec l'estimation de la présente étude s'explique principalement par des différences de champ d'étude :

- La présente étude a estimé les émissions en phase amont des réseaux et centres informatiques, ce que n'avait pas fait le CGE
- La présente étude a estimé les émissions des réseaux et centres informatiques installés à l'étranger mais qui servent les consommations françaises de services numériques, ce que n'avait pas fait le CGE
- La présente étude a inclus des terminaux que n'avait pas pris en compte le CGE : consoles de jeu de salon et portables, enceintes connectées, casques de réalité virtuelle et modules de connexion IoT
- La présente étude n'a pas inclus certaines composantes des émissions scope 3 des opérateurs, comme les déplacements entre le domicile et le lieu de travail des salariés des opérateurs télécoms avec leur propre véhicule, pris en compte par le CGE

Le champ d'étude de la mission est donc globalement plus large que celui du CGE, qui a eu une approche plus analytique et, hormis les émissions amont des terminaux, centrée sur le territoire français. La mission s'est cependant appuyée autant que possible sur le travail du CGE et a auditionné ses rapporteurs.

Une autre différence significative entre les deux études concerne l'intensité carbone de l'électricité consommée en France. Le CGE a utilisé une valeur de 81 gCO₂/kWh issue de la base carbone ADEME 2014, alors que l'intensité carbone de l'électricité française utilisée dans le présent rapport est de

²⁴ <https://www.senat.fr/rap/r19-555/r19-5551.pdf>

57,1 gCO₂/kWh, issue de la base carbone ADEME 2018. Cette valeur plus haute augmente l'estimation du CGE par rapport à celle de cette étude. Elle compense en partie l'écart entre les deux estimations.

Les estimations récentes de l'empreinte carbone du numérique en France (en millions de tonnes de CO₂)

	Etude du Conseil général de l'économie (2019)	Rapport du Sénat (2020), travaux du cabinet CITIZING	Etude ADEME/ARCEP (2022)
Empreinte liée à la production des matériels et services numériques	8	12,5	14,2
Empreinte liée à l'usage des matériels et services numériques	3	2,5	2,7
Empreinte du numérique	11	15	16,9

Source : CGE (2019), Sénat (2020) et ADEME/ARCEP (2022), calculs Rexecode pour la partition de l'empreinte carbone entre production et usage sur la base des consommations d'électricité indiquées dans les études.

Les estimations de l'empreinte carbone du numérique sont relativement convergentes en ce qui concerne la partie usage mais diffère sensiblement pour l'empreinte carbone de la production des matériels et services numériques (notamment du fait d'un périmètre d'analyse plus large pour les études les plus récentes).

Test de sensibilité de nos résultats au chiffre retenu pour l'empreinte carbone

Notre analyse coût avantage d'un investissement de 4 milliards d'euros en capital numérique repose sur le chiffre retenu pour l'empreinte carbone du numérique. Nous réalisons donc un test de sensibilité en refaisant nos calculs sur la base du chiffre de l'ADEME/ARCEP pour l'empreinte carbone (puisque c'est le montant le plus élevé des trois études).

Un investissement de 4 milliards d'euros va générer 0,24 million de tonnes de CO₂ pour le contenu en carbone des matériels numériques de cet investissement et pour les émissions de CO₂ associées aux investissements en services numériques (contre 0,16 millions de tonne sur la base de l'empreinte carbone du CGE)

Les émissions associées à l'usage complémentaire que va provoquer cet investissement en biens et services numériques sont de 0,10 million de tonnes de CO₂ (contre 0,11 Mt CO₂ en retenant l'estimation de l'empreinte carbone de l'usage du numérique du CGE).

Un investissement régulier de 4 milliards d'euros dans le numérique va donc provoquer 0,34 million de tonnes de CO₂ annuellement.

Les émissions de CO₂ associées aux 7 milliards d'euros de PIB générés par l'investissement numérique sont de 1,32 million de tonne en rapportant les émissions de CO₂ de l'inventaire national au PIB de la même année (cela reste inchangé). C'est la part la plus importante du supplément d'émissions.

Au final, les émissions de CO₂ générées par cet investissement de 4 milliards d'euros sont de 1,66 million de tonnes de CO₂ (contre 1,59 million de tonnes en retenant l'empreinte carbone du CGE).

Si on rapporte le supplément de PIB (de 7 milliards d'euros) aux émissions (1,66 million de tonnes de CO₂), cela donne un coût de 4 220 euros par tonne de CO₂.

Bibliographie

- ADEME (2015), *Evaluation de l'impact du télétravail et des tiers-lieux sur la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et sur l'organisation des entreprises*, septembre 2015
- ADEME (2015), *Evaluation de systèmes de GTB dans le tertiaire : Enquête et Audit d'opérations*, décembre 2015
- ADEME (2015), *Système de management de l'énergie : Ce sont les entreprises qui en parlent le mieux...*, mars 2015
- ADEME (2019), *La face cachée du numérique, Réduire les impacts du numérique sur l'environnement*, novembre 2019
- ADEME (2020), *Caractérisation des effets rebond induits par le télétravail*, septembre 2020
- Agence européenne de l'environnement (2021), *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe*, novembre 2021
- Agence internationale de l'énergie (2020), *Tracking Power 2020*, juin 2020
- ARCEP (2020), *Pour un numérique soutenable, rapport d'étape, synthèse de la plateforme de travail et propositions de l'Arcep pour un numérique soutenable*, décembre 2020
- ARCEP (2021), *Baromètre du numérique, Edition 2021, Enquête sur la diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française*
- CEREMA (2017), *La Gestion Technique du Bâtiment (GTB) : quel système choisir ?*, février 2017
- Conseil d'analyse économique (2000), *Nouvelle économie*, Daniel Cohen et Michèle Debonneuil, septembre 2000
- Conseil d'analyse économique (2004), *La société de l'information*, Nicolas Curien et Pierre-Alain Muet, mai 2004
- Conseil d'analyse économique (2015), *Economie numérique*, Nicolas Colin, Augustin Landier, Pierre Mohnen, et Anne Perrot, octobre 2015
- Conseil général de l'économie (2019), *Réduire la consommation énergétique du numérique*, décembre 2019
- EU-KLEMS (2019), Stehrer, R., A. Bykova, K. Jäger, O. Reiter, and M. Schwarzhappel, *Industry level growth and productivity data with special focus on intangible assets*
- France Num (2021), *Barometre France Num 2021 : le numerique dans les TPE-PME*

- Freitag et al. (2021), *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations*, Patterns, Volume 2, Issue 9, september 2021, 100340
- GeSI (2020), *SMART 2020, Enabling the low carbon economy in the information age*
- Green IT (2014), *Quelle est la composition de mon téléphone ?*, Frédéric Bordage, décembre 2014
- Green IT (2019), *Empreinte environnementale du numérique mondial*, Frédéric Bordage, Version 2.0, septembre 2019
- INSEE (2019), *L'économie et la société à l'ère du numérique, Édition 2019*, novembre 2019
- Ministère de la transition écologique (2021), *Estimation de l'empreinte carbone de 1995 à 2020*, Service de la donnée et des études statistiques (SDES), octobre 2021
- OFCE (2018), *Le tissu productif numérique en France*, Cyrielle Gaglio et Sarah Guillou, Policy Brief, juillet 2018
- Rexecode (2001), *Perspectives 2001-2002 des marchés de biens d'équipement dans le monde - Comparaison du poids des NTIC : Etats-Unis, Royaume-Uni, Allemagne et France*, mars 2001
- Rexecode (2011), *L'économie numérique et la croissance, Poids, impact et enjeux d'un secteur stratégique*, Document de travail n°24, mai 2011
- The Shift Project (2018), *Lean ICT : Pour une sobriété numérique*, octobre 2018
- The Shift Project (2019), *Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne*, juillet 2019
- The Shift Project (2020), *Déployer la sobriété numérique*, octobre 2020
- The Shift Project (2021), *Impact environnemental du numérique, tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G*, mars 2021
- Van Ark et Jäger (2017), *Recent trends in Europe's output and productivity, growth performance in the sector level, 2002-2015*, International productivity vol. n° 33, 2017

Documents de travail récemment parus :

Perspectives économiques et budgétaires 2022 - N° 80 - octobre 2021

La durée effective du travail en France et en Europe - N° 79 - octobre 2021

La soutenabilité de la dette publique ou le dilemme des émissions - N° 78 - avril 2021

Les indicateurs de compétitivité de la France reculent nettement en 2020 - N° 77 - mars 2021

Les émissions françaises de gaz à effet de serre d'ici 2030 - N° 76 - janvier 2021

La politique budgétaire entre sauvegarde et relance - N° 75 - octobre 2020

Moins de croissance trop de carbone - N° 74 - juillet 2020

Rexecode

Centre de Recherche pour l'Expansion
de l'Économie et le Développement des Entreprises

Siège social : 29 avenue Hoche • 75008 Paris

Téléphone : +33 (0)1 53 89 20 89

Association régie par la loi du 1^{er} juillet 1901 • APE 9412 Z • SIRET 784 361 164 00030 • TVA FR 80 784 361 164

www.rexecode.fr • twitter.com/Rexecode

ISSN : 1956-0486