

Le numérique dans l'Anthropocène

Jacques Combaz

Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, VERIMAG

Bâtiment IMAG

700 Avenue Centrale

Domaine Universitaire

F-38401 Saint-Martin d'Hères

FRANCE

David Bol

ICTEAM Institute

Université catholique de Louvain

Maxwell Building

Place du Levant, 3

B-1348 Louvain-la-Neuve

BELGIQUE

Résumé

On parle d'Anthropocène pour décrire l'époque géologique actuelle. Cette dernière est caractérisée par une déstabilisation rapide des équilibres du système terrestre, et en particulier du climat. Dans ce contexte, l'accord de Paris fixe comme objectif de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C par rapport à l'ère pré-industrielle. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) semblent participer à la « grande accélération » de l'Anthropocène, notamment en évoluant d'une empreinte carbone quasi nulle dans les années 50 à environ 2 à 4 % des émissions mondiales aujourd'hui. Les NTIC ont-elles une trajectoire compatible avec l'objectif de 1,5 °C de l'accord de Paris ?

Répondre à cette question nécessite d'étudier d'une part l'évolution de l'empreinte carbone propre aux NTIC, et d'autre part les effets des NTIC sur les émissions des autres secteurs (transport, bâtiment, agriculture, énergie, industrie, etc.). L'empreinte carbone est analysée en particulier en nous basant sur les travaux de Bol et al. qui portent sur la période récente. Nous montrons en quoi l'amélioration technologique, et plus spécifiquement de l'efficacité énergétique, ne permet pas, seule, de réduire cette empreinte. En réalité, il semblerait qu'elle ne fait qu'alimenter la très forte augmentation de la demande en NTIC, par « effet rebond ». Par ailleurs, l'effet (passé, présent, et à venir) des NTIC sur les émissions des autres secteurs reste très incertain. On peut donc légitimement se demander si le numérique ne serait pas « un accélérateur de la grande accélération » plutôt qu'un « un accélérateur de la transition écologique ».

Mots-clefs

soutenabilité environnementale, empreinte carbone, transition, effet rebond, loi de Moore

1 Introduction

L'ampleur géologique des conséquences des activités humaines est aujourd'hui actée [1]. Elle donne lieu à la définition d'une nouvelle époque géologique appelée l'Anthropocène [2], caractérisée par une déstabilisation rapide des équilibres du système terrestre [3], en particulier du climat [4], menaçant gravement nos sociétés [4],[5]. Face à la crise climatique et écologique en

cours, une des priorités est de limiter drastiquement et rapidement nos impacts pour réduire l'ampleur de la catastrophe, et en particulier de décarboner l'ensemble des secteurs d'activité. Pour atteindre l'objectif de l'accord de Paris de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C par rapport à l'ère pré-industrielle, il faudrait réduire de 7,6 % par an nos émissions de gaz à effet de serre (GES) et atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 [6].

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) sont emblématiques de la *grande accélération* de l'Anthropocène [7], en évoluant d'une empreinte carbone quasi nulle dans les années 50 à une part dans les émissions mondiales s'élevant à environ 2 à 4 % aujourd'hui [11],[12]. Cette empreinte est comparable, voire supérieure, à celle d'activités réputées très émissives comme les déplacements pendulaires¹ ou l'aviation civile [13]. Depuis 2015, l'empreinte des NTIC se serait au mieux stabilisée [8] ou, de façon plus probable, aurait augmenté [9],[10],[11],[12]. Les évaluations de cette empreinte comportent de larges incertitudes, et à notre connaissance il n'existe à ce jour qu'une seule étude revue par les pairs dont les sources soient publiquement accessibles et dont les auteurs ne présentent pas de risque de conflit d'intérêt [11]. Remarquons aussi qu'il s'agit probablement de sous-estimations de la réalité dans la mesure où certains appareils numériques ne sont pas inclus dans les périmètres d'étude, notamment l'électronique embarquée.

Malgré cette empreinte *directe*, les NTIC seraient un « puissant allié de l'écologie »² du fait de leurs effets *indirects*³, c'est-à-dire liés aux applications que l'on s'attend à développer dans presque tous les domaines. Elles permettraient notamment de réduire fortement les émissions de GES en optimisant et en dématérialisant les autres secteurs comme le transport, le bâtiment, l'agriculture, la production d'énergie, l'industrie, etc. [14],[15],[16],[17],[18],[19],[20]. Mais il convient d'être prudent par rapport à ces affirmations d'un numérique globalement positif pour le climat. D'une part, elles sont rarement issues de travaux académiques. Elles présentent, de ce fait, à la fois des problèmes de conflit d'intérêts mais aussi de larges faiblesses méthodologiques (données incertaines et parcellaires, hypothèses très optimistes, bénéfices attribués à tort, non prise en compte des effets « négatifs⁴ », etc.) [11],[21]. D'autre part, il est possible qu'on assiste en réalité à l'exact inverse. En effet, certains travaux montrent que les NTIC induiraient plutôt une augmentation et non une diminution de consommation d'énergie et des émissions de GES dans les autres secteurs [22],[23]. Bien entendu, évaluer l'ensemble des effets indirects (passés, présents, ou à venir) des NTIC sur les émissions de GES est un exercice très délicat [25].

Cet article vise essentiellement à donner des éléments de bibliographie sur (i) l'évolution récente de l'empreinte carbone directe des NTIC (section 2), (ii) le phénomène de l'*effet rebond* qui explique en partie cette évolution (section 3), (iii) les perspectives de réduction de l'empreinte carbone des NTIC (section 4), et (iv) les effets (indirects) des NTIC sur le reste de l'économie (section 5).

2 Une analyse de l'empreinte carbone des NTIC

Une façon classique de décomposer les émissions de GES d'une technologie est d'utiliser l'identité :

$$I=PAT,$$

où le terme *I* désigne les *impacts* c'est-à-dire les émissions totales de GES, *P* est la *population* c'est-à-dire le nombre total d'utilisateurs, *A* mesure le niveau de consommation moyen des

1 Il s'agit des trajets quotidiens pour le travail ou pour les études.

2 <https://www.gouvernement.fr/le-numerique-accelerateur-d-opportunités>

3 Se référer à [24] et [25] pour une taxonomie complète des effets directs et indirects des NTIC.

4 Une classification des différents types d'effets est proposée par Rivera *et al.* [24].

utilisateurs appelé *affluence* (par exemple le volume moyen de données consommées sur les réseaux par abonné, le nombre moyen de transistors produits par utilisateur, etc.), et T (*technology*) caractérise l'efficacité de la technologie vis-à-vis des émissions et mesure donc les émissions d'une unité consommée, c'est-à-dire l'intensité carbone de la consommation. L'identité de Kaya est une variante de $I=PAT$ dans laquelle le terme T est re-décomposé en $T=EC$, où E est l'intensité énergétique et C l'intensité carbone de l'énergie.

Les facteurs apparaissant dans ce type de décomposition permettent potentiellement d'expliquer l'évolution des émissions dues à une technologie. Elles identifient aussi des leviers d'action pour réduire ces émissions : par exemple la sobriété agit sur le facteur A , l'efficacité énergétique sur E , et la décarbonation de l'énergie sur C . Il faut toutefois faire attention dans l'interprétation de ces différents facteurs. D'une part, les valeurs moyennes cachent possiblement de très grandes disparités : par exemple la consommation de données peut varier considérablement d'un utilisateur à un autre, de même qu'il existe une grande variabilité dans l'efficacité des technologies. D'autre part, il existe des interdépendances complexes qui font qu'on ne peut pas agir sur un des facteurs sans affecter les autres [26],[28], notamment à cause des effets rebond (voir la section 3).

Une décomposition de Kaya pour les NTIC

Dans une publication à DATE 2021 [12], Bol *et al.* ont réalisé des décompositions de Kaya pour analyser l'évolution des émissions de GES directes de trois sous-domaines des NTIC : la fabrication des semi-conducteurs entre 2004 et 2019, l'Internet mobile entre 2010 et 2015, et les centres de données entre 2010 et 2018. La figure 1, empruntée à cette publication, représente les taux de croissance annuels composés (CAGR⁵ en anglais) des différents facteurs pour chaque décomposition et pour les périodes ciblées par l'étude.

D'après Bol *et al.*, la miniaturisation des semi-conducteurs, autrement dit la « loi Moore », a permis de réduire la taille des transistors à un rythme d'environ 29 % par an entre 2004 et 2019 (voir *area intensity* sur la figure 1(b)). Puisque l'énergie nécessaire à la fabrication d'un *wafer* de silicium progresse moins vite que la miniaturisation (l'*electricity intensity* n'a augmenté que de 7 à 15,2 % par an), la loi de Moore a *in fine* permis de réduire l'énergie moyenne de fabrication d'un transistor. Pourtant, la quantité totale d'énergie nécessaire à la fabrication de l'ensemble des semi-conducteurs (ainsi que l'empreinte carbone associée) a augmenté de 12 à 20 % par an entre 2004 et 2019. Cela est dû essentiellement à la très forte augmentation du nombre moyen de transistors produits par utilisateur (c'est-à-dire l'*affluence*), qui s'explique par la multiplication et la complexification des appareils électroniques⁶.

Des tendances similaires sont observées dans les deux autres domaines étudiés : selon Bol *et al.*, la consommation d'énergie de l'Internet mobile a progressé d'environ 10 % par an entre 2010 et 2015 (figure 1(c)), et celle des centres de données de 0,7 à 6,5 % par an entre 2010 et 2018 (figure 1(d)). Les progrès d'efficacité énergétique sont dans ces deux cas plus que compensés par une progression supérieure de l'*affluence*. On constate notamment une explosion du volume de données consommées sur les réseaux mobiles (environ +73 % par an sur la période considérée). Remarquons que les émissions de GES attribuées aux centres de données dépendent très fortement de l'intensité carbone considérée pour l'électricité « verte » achetée sur les marchés bas carbone. Elles augmentent légèrement si on considère la même intensité carbone (moyenne) pour tout type d'électricité (partant du principe que l'électricité « verte » est physiquement mélangée sur les réseaux et qu'elle n'a pas forcément été produite au moment où elle a été consommée⁷). Elles

5 Pour *Compound Annual Growth Rate*.

6 Certains auteurs parlent de « *miniaturization paradox* » [27].

7 Le mécanisme européen des garanties d'origine autorise jusqu'à un an entre la production et la consommation d'électricité « verte ».

diminuent fortement si on considère l'intensité spécifique de l'électricité « verte ». D'une manière générale, le calcul de l'intensité carbone de l'électricité comporte une part de subjectivité et est en partie affaire de convention [29]. L'effet exact des marchés d'électricité bas carbone sur les émissions globales (et plus généralement celui de la production d'énergie renouvelable [30]) fait également débat [31].

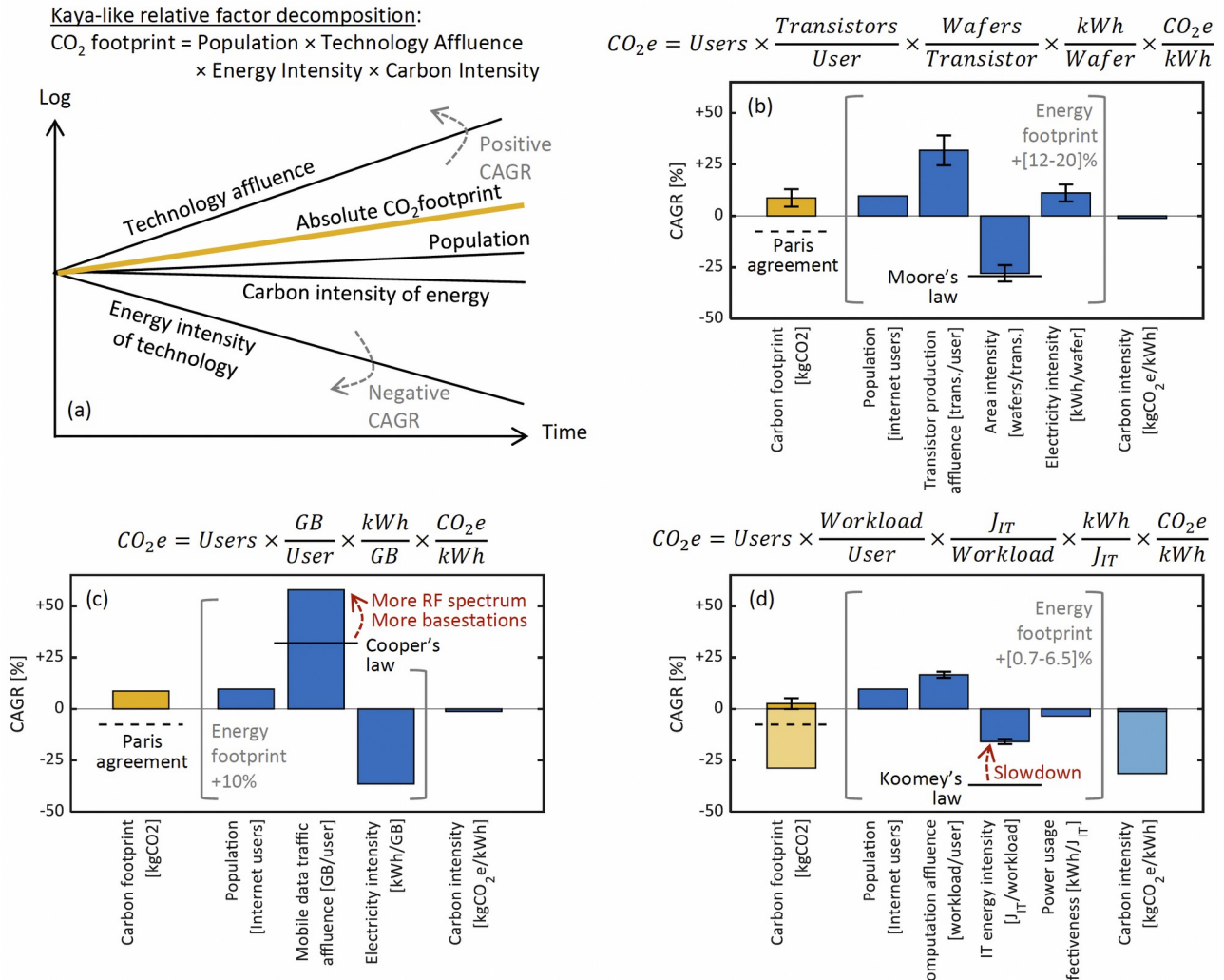


Figure 1: Analyse de l'évolution annuelle des émissions de GES directes des NTIC proposée par Bol et al. dans [12] pour trois sous-domaines : (b) la fabrication des semi-conducteurs (2004-2019), (c) l'Internet mobile (2010-2015), et (d) les centres de données (2010-2018).

Même si elles ne s'intéressent qu'à un sous-ensemble des NTIC, les analyses de Bol *et al.* [12] suggèrent plutôt une augmentation de l'empreinte carbone des NTIC, confirmant les résultats de la plupart des travaux sur la question [9],[10],[11]. C'est pourquoi nous privilégions cette hypothèse par rapport à celle d'une stagnation des émissions soutenue par Malmodin *et al.* [8].

3 L'effet rebond

Doit-on s'étonner de la croissance de la consommation énergétique des NTIC alors que leur efficacité énergétique progresse continûment et rapidement ? En 1865, William Stanley Jevons expliquait déjà dans [32] en quoi les progrès d'efficacité énergétique de la machine à vapeur

n'avaient pas permis de réduire la consommation de charbon (bien au contraire), notamment parce qu'ils ont conduit à diminuer son coût d'utilisation. Cette situation est appelée *effet rebond* : les ressources (énergie, matière, temps, etc.) potentiellement économisées par l'introduction d'une technologie plus efficace⁸ que les précédentes sont partiellement voire totalement réutilisées pour intensifier les usages existants ou pour en développer de nouveaux. Dans les cas les plus extrêmes (qu'on désigne par *backfire* ou « paradoxe de Jevons »), les bénéfices potentiels sont plus que compensés par l'effet rebond, si bien qu'une efficacité croissante induit alors une consommation croissante de ressources.

Mais l'effet rebond n'est pas systématique : les usages peuvent être contraints par une ou plusieurs *limites*, et ce malgré des gains d'efficacité. Ces limites peuvent être de nature économique, physique, technique, psychologique, sociologique, réglementaire, etc. [28]. Par exemple, un automobiliste ayant atteint ce qu'il considère comme la limite acceptable de ses temps de transport ne se déplacera pas nécessairement plus dans une automobile plus économe en carburant. De même, par manque de place, il se peut qu'on ne profite pas de gains d'efficacité énergétique pour augmenter la taille de son réfrigérateur. Il est aussi possible d'atteindre le niveau de « saturation des besoins » des consommateurs : par exemple, on n'imagine pas augmenter la température de son chauffage à l'infini⁹. Évidemment, ces limites ne sont pas figées dans le temps. L'amélioration des infrastructures routières a par exemple permis d'augmenter les vitesses de déplacement et donc de repousser les limites temporelles [33]. De même, les besoins en déplacement évoluent avec l'urbanisme (offre d'emploi, de logement, etc.).

L'effet rebond dans les NTIC

À en croire l'évolution de l'*affluence* présentée en section 2, les NTIC ne semblent contraintes par aucune limite. Nous voyons plusieurs explications à cela. Tout d'abord les progrès technologiques dans les NTIC tendent à repousser simultanément l'ensemble des facteurs qui pourraient en limiter l'usage. Par exemple, la loi de Moore réduit simultanément le prix des transistors, leur consommation énergétique (pour la fabrication et le fonctionnement), leur consommation de ressources, et leur taille [34]. De même, par rapport à la 4G, la 5G augmente non seulement l'efficacité énergétique mais aussi les débits, et elle réduit les latences. L'effet rebond est aussi à chercher ailleurs que du côté du consommateur. En effet, les gains en performance alimentent la complexification des logiciels et l'inflation de la taille des fichiers (suivant la « loi de Wirth »). Pour maintenir les mêmes performances utilisateur, il faut donc un matériel et des infrastructures toujours plus performants [35],[36]. Remarquons aussi que l'effet rebond fait souvent partie intégrante du modèle économique des entreprises. Il permet en effet de financer des dépenses d'investissement croissant à mesure que la technologie progresse [12].

Peut-on s'attendre à une saturation de l'usage des NTIC ?

À ce jour une large partie des données est déjà générée automatiquement¹⁰, c'est-à-dire sans intervention humaine. Cette production de données n'est donc limitée que par la capacité des machines. Le développement de l'IoT (Internet des objets) et de l'IA (intelligence artificielle) ne fera que renforcer cette tendance [11]. De même, le véhicule autonome promet des gains d'efficacité mais permettra aussi aux objets de se déplacer seuls dans une automobile [37],[38]. Tout indique qu'il ne faut pas s'attendre, au moins à court terme, à une saturation de l'usage des NTIC.

8 Le terme « efficacité » est emprunté au domaine de l'énergie, mais les économistes lui préfère en général celui « d'efficience ».

9 Une température constante n'empêche pas nécessairement l'effet rebond, par exemple par augmentation de la taille du logement.

10 <https://www.imperva.com/blog/bot-traffic-report-2016>

4 Réduire l’empreinte carbone des NTIC...

... par l’amélioration de l’efficacité énergétique des NTIC ?

Selon [11], la croissance des émissions dues aux NTIC serait plus de deux fois plus rapide que celle des autres secteurs. L’histoire de l’informatique, y compris récente, est pourtant marquée par l’amélioration très rapide de l’efficacité énergétique [39]. L’échec de cette dernière à réduire la consommation énergétique globale des NTIC (et les émissions de GES associées) devrait nous faire relativiser le rôle que l’efficacité énergétique pourrait jouer à l’avenir dans la réduction de leur empreinte carbone. L’effet rebond, qui n’est pas propre au numérique, permet en grande partie d’expliquer cet échec. En effet, ces progrès d’efficacité ne visent pas la préservation de l’environnement mais le développement économique avec l’intensification et la diversification des usages. Une autre raison de penser que les progrès d’efficacité énergétique ne peuvent, seuls, permettre de réduire l’empreinte carbone des NTIC est qu’ils sont de toute façon amenés à ralentir dans le futur à cause de limites physiques [11].

... par la « transition énergétique » ?

Si rien n’est fait pour maîtriser la croissance des usages, il ne faut donc pas s’attendre à une baisse de la consommation énergétique des NTIC. La réduction de leur empreinte carbone passerait-elle, alors, par la décarbonation de l’énergie qui les alimente ? Rappelons que la « transition énergétique » est un immense défi pour l’ensemble des activités humaines, et qu’elle va conditionner en partie les émissions de GES futures [4]. Mais sa faisabilité, voire le concept même de « transition énergétique » [40], posent question. En effet son rythme actuel est bien insuffisant pour nous placer sur une trajectoire à 1,5 °C d’élévation de la température [41], et on peut même sérieusement douter qu’il soit possible d’y arriver sans une réduction importante de la demande en énergie [42]. La transition vers les énergies renouvelables n’est pas non plus sans poser des problèmes environnementaux, notamment à cause de ses besoins très élevés en ressources [43].

... par la sobriété ?

Pour toutes ces raisons, les réflexions sur la réduction de l’empreinte carbone des NTIC ne peuvent se cantonner à l’hypothèse d’une transition énergétique « salvatrice ». En l’état actuel des connaissances, il n’existe pas de raison d’écarter la question des usages du numérique : comment les rendre compatibles avec les objectifs de réduction des émissions fixés par l’accord de Paris ?

5 Les NTIC, un allié de la transition écologique ?

Dans les années 90, l’Europe accuse un « retard » de croissance économique par rapport aux États-Unis, que certains économistes attribuent à l’époque à l’augmentation du niveau de productivité américain permis par les NTIC (allant ainsi à l’encontre du « paradoxe de Solow »). Mais la réalité d’un effet positif des NTIC sur la productivité est loin de faire l’unanimité au sein des économistes [44]. Malgré cela, en mars 2000, les États membres mettent en place la stratégie de Lisbonne visant à accélérer la « transition numérique » dans l’espoir de dynamiser les économies européennes. Le numérique serait donc d’abord un allié de la croissance économique. Mais la stratégie de Lisbonne intègre une autre idée en vogue à l’époque : les NTIC permettraient un développement économique « durable », autrement dit une « croissance verte » assurée par le *découplage* entre la croissance économique et sa matérialité (et ses impacts) [45].

Dans le cas du changement climatique, le découplage par rapport aux émissions de GES doit être *absolu*¹¹, global, suffisamment rapide, et permanent [46]. Indépendamment du rôle que peuvent jouer les NTIC dans un tel découplage, rappelons que celui-ci n'a toujours pas eu lieu, même en Europe qui fait pourtant figure de bon élève dans ce domaine. L'empreinte carbone européenne (qui tient compte des émissions importées) est globalement en baisse depuis 2007, mais de façon très insuffisante vis-à-vis de l'objectif de limitation du réchauffement climatique à 1,5 °C [47]. Par ailleurs cette baisse semble surtout liée au ralentissement de l'activité économique consécutif à la crise de 2008 (et plus récemment à la crise sanitaire due à la Covid-19). En effet, l'intensité carbone du PIB¹² européen baisse à une vitesse relativement stable d'environ 2 % par an [47], si bien que les émissions sont reparties à la hausse entre 2014 et 2017 [48] avec le retour d'une croissance économique supérieure à 2 % par an. Faut-il s'attendre (comme les tenants de la courbe environnementale de Kuznets) à une accélération du découplage, en particulier dans les économies « développées » ? Il est possible d'en douter si les logiques économiques actuelles se maintiennent [49],[50], notamment à cause des effets rebond *macroéconomiques* qui font que l'activité économique tend à s'accroître lorsque son intensité énergétique ou matérielle baisse [46],[51],[52],[53].

6 Conclusion

Si les tendances historiques se poursuivent, l'empreinte carbone des NTIC risque de continuer à augmenter, ce qui semble incompatible avec l'objectif de l'accord de Paris de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C par rapport à l'ère pré-industrielle. Les progrès en matière d'efficacité énergétique dans les NTIC permettent au mieux de compenser l'augmentation des besoins par utilisateur (*l'affluence*), et contribuent probablement à cette augmentation par effet rebond. Les NTIC ne semblent pas non plus permettre de réduire l'empreinte carbone des autres secteurs de l'économie. On peut même légitimement se demander si les NTIC n'agissent pas comme « un accélérateur de la grande accélération » [54], en renforçant les tendances délétères actuelles, plutôt que comme « un accélérateur de la transition écologique » [19]. De ces constats émerge la question suivante : *comment repenser les technologies numériques, ainsi que les usages et les modèles économiques qui les accompagnent, pour les rendre compatibles avec un monde à 1,5 °C ?* Cette question dépasse largement le cadre des NTIC [52] et interroge le rôle de la technique et de l'innovation dans la transformation de nos sociétés. Plus généralement, il nous semble que le progrès technique ne peut pas être l'unique réponse aux défis posés par l'Anthropocène, et il apparaît nécessaire de poser la question de la sobriété à l'échelle globale.

11 Les émissions doivent diminuer en valeur absolue et pas uniquement relativement à l'activité économique.

12 Produit Intérieur Brut.

Bibliographie

- [1] Christophe Bonneuil et Jean-baptiste Fressoz. *l'évènement Anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*. Seuil, 2013.
- [2] Paul J. Crutzen et Eugene F. Stoermer. The “Anthropocene”. *IGBP Global Change Newsletter*, n°41, p. 17-18, mai 2000.
- [3] Will Steffen *et al.* Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), janvier 2015.
- [4] IPCC. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) on global warming of 1.5°C, 2018.
- [5] Camilo Mora *et al.* Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7, juin 2017.
- [6] UNEP. Emissions Gap Report. Rapport disponible en ligne (<https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2019>), novembre 2019.
- [7] Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney, Owen et Cornelia Ludwig. The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(3), avril 2015.
- [8] Jens Malmödin et Dag Lundén. The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10(9), août 2018.
- [9] Lotfi Belkhir and Ahmed Elmelig. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, mars 2018.
- [10] Anders S. G. Andrae et Tomas Edler. On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), avril 2015.
- [11] Charlotte Freitag *et al.* The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9), septembre 2021.
- [12] David Bol, Thibault Pirson and Rémi Dekimpe. Moore’s Law and ICT Innovation in the Anthropocene. Dans *Proceedings de IEEE Design, Automation and Test in Europe Conference (DATE)*, 2021.
- [13] Bojana Bajželj, Julian M. Allwood, et Jonathan M. Cullen. Designing Climate Change Mitigation Plans That Add Up. *Environmental Science & Technology*, 47(14), juillet 2013.
- [14] The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative (GeSI). *Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*. Rapport disponible en ligne (<https://gesi.org/public/research/smart-2020-enabling-the-low-carbon-economy-in-the-information-age>), 2008.
- [15] WWF Sweden. The potential global CO₂ reductions from ICT use: Identifying and assessing the opportunities to reduce the first billion tonnes of CO₂. Rapport, 2008.
- [16] The Climate Group on behalf of the Global eSustainability Initiative (GeSI), *Smarter 2020: The role of ICT*. Rapport disponible en ligne (<https://gesi.org/research/gesi-smarter2020-the-role-of-ict-in-driving-a-sustainable-future>), 2012.
- [17] International Energy Agency (IEA). *Digitalization & energy*. Rapport disponible en ligne (<https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>), 2017.

- [18] Cédric Villani, Donner un sens à l'intelligence artificielle. Rapport disponible en ligne (<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/rapport-de-cedric-villani-donner-un-sens-l-intelligence-artificielle-ia-49194>), 2018.
- [19] Iddri, FING, WWF France, GreenIT.fr, et CNNUm. Livre Blanc numérique et environnement — Faire de la transition numérique un accélérateur de la transition écologique. Rapport disponible en ligne (<https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/rapport/livre-blanc-numerique-et-environnement>), 2018.
- [20] GSMA et Carbon Trust. The Enablement Effect. Rapport disponible en ligne (<https://www.gsma.com/betterfuture/enablement-effect>), 2019.
- [21] Gauthier Roussilhe. Que peut le numérique pour la transition écologique ? Rapport disponible en ligne (<https://gauthierroussilhe.com/pdf/NTE-Mars2021.pdf>), mars 2021.
- [22] Steffen Lange, Johanna Pohl, et Tilman Santarius. Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? *Ecological Economics*, 176, octobre 2020.
- [23] Joseph M. Simpson *et al.* The Treadmill of Information—Development of the Information Society and Carbon Dioxide Emissions. *Sociology of Development*, 5(4), décembre 2019.
- [24] Miriam Börjesson Rivera *et al.* Including second order effects in environmental assessments of ICT. *Environmental Modelling & Software*, 56, juin 2014.
- [25] Nathaniel C Horner, Arman Shehabi, et Inês L Azevedo. Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*, 11(10), octobre 2016.
- [26] Blake Alcott. Impact caps: why population, affluence and technology strategies should be abandoned. *Journal of Cleaner Production*, 18(6), avril 2010.
- [27] Cédric Gossart. Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. *ICT innovations for sustainability, Advance in Intelligent Systems and Computing* 310, 2015.
- [28] François Schneider. Sur l'importance de la décroissance des capacités de production et de consommation dans le Nord Global pour éviter l'Effet Rebond. *La décroissance économique. Pour la soutenabilité écologique et l'équité sociale*, 2009.
- [29] ADEME. Positionnement de l'ADEME sur le calcul du contenu CO₂ de l'électricité, cas du chauffage électrique. Rapport disponible en ligne (<https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/84-positionnement-de-l-ademe-sur-le-calcul-du-contenu-co2-de-l-electricite-cas-du-chauffage-electrique.html>), juillet 2020.
- [30] Richard York. Do alternative energy sources displace fossil fuels? *Nature Climate Change*, 2, juin 2012.
- [31] Machiel Mulder et Sigourney P. E. Zomer. Contribution of green labels in electricity retail markets to fostering renewable energy. *Energy Policy*, 99, décembre 2016.
- [32] William Stanley Jevons. *The Coal Question*. Macmillan & Co. London, 1865.
- [33] Aurélien Bigo. Les transports face au défi de la transition énergétique — Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement. Thèse de doctorat disponible en ligne (<http://www.theses.fr/2020IPPAX068>), 2020.
- [34] Ray Galvin. The ICT/electronics question: Structural change and the rebound effect. *Ecological Economics*, 120, décembre 2015.
- [35] Lorenz M. Hilty *et al.* Rebound effects of progress in information technology. *Poiesis Prax*, 4(1), mars 2006.

- [36] Liqiu Deng et Eric D. Williams. Functionality Versus “Typical Product” Measures of Technological Progress—A Case Study of Semiconductor Manufacturing. *Industrial Ecology*, 15(1), février 2011.
- [37] Vlad C. Coroamă et Daniel Pargman. Skill rebound: On an unintended effect of digitalization. *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S2020)*, Bristol, Royaume-Uni, juin 2020.
- [38] <https://www.synopsys.com/automotive/what-is-autonomous-car.html>
- [39] Jonathan G. Koomey *et al.* Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing. *IEEE Annals of the History of Computing*, 33(3), mars 2011.
- [40] Jean-Baptiste Fressoz. Pour une histoire des symbioses énergétiques et matérielles. *Annales des mines — Série responsabilité et environnement*, janvier 2021.
- [41] International Energy Agency. *World Energy Outlook*. Rapport disponible en ligne (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>), octobre 2021.
- [42] Gert Jan Kramer et Martin Haigh. No quick switch to low-carbon energy. *Nature*, 462, décembre 2009.
- [43] Olivier Vidal, Hugo le Boulzec and Cyril François. Modelling the material and energy costs of the transition to low-carbon energy. *EPJ Web of Conf.*, 198, octobre 2018.
- [44] Nathalie Greenan et Yannick l’Horty. Le paradoxe de la productivité. *Travail et Emploi* n°91, juillet 2002.
- [45] Fabrice Flipo, François Deltour, et Michelle Dobré. Les technologies de l’information à l’épreuve du développement durable. *Natures Sciences Sociétés*, 24(1), mai 2016.
- [46] Timothée Parrique *et al.* Decoupling Debunked—Evidence and arguments agains green growth as sole strategy for sustainability. Rapport disponible en ligne (<https://eeb.org/library/decoupling-debunked/>), juillet 2019.
- [47] Richard Wood *et al.* The structure, drivers and policy implications of the European carbon footprint. *Climate Policy*, 20(S1), 2020.
- [48] Jonas Karstensen, Glen P. Peters, et Robbie M. Andrew. Trends of the EU’s territorial and consumption-based emissions from 1990 to 2016. *Climatic Change*, 151, octobre 2018.
- [49] Jason Hickel et Giorgos Kallis. Is Green Growth Possible? *New Political Economy*, 25(4), avril 2019.
- [50] Blair Fix. Dematerialization Through Services: Evaluating the Evidence. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 4(6), mars 2019.
- [51] Grégoire Wallenborn. Rebounds Are Structural Effects of Infrastructures and Markets. *Frontiers in Energy Research*, 6, octobre 2018.
- [52] Vlad C. Coroamă et Friedemann Mattern. Digital Rebound — Why Digitalization Will Not Redeem Us Our Environmental Sins. *Proceedings de ICT4S*, 2019.
- [53] Jesse Jenkins, Ted Nordhaus, et Michael Shellenberger. Energy Emergence—Rebound & Backfire as Emergent Phenomena. The Breakthrough Institute, rapport disponible en ligne (<https://thebreakthrough.org/articles/new-report-how-efficiency-can>), février 2011.
- [54] Pierre-Yves Longaretti et Françoise Berthoud. Le numérique, espoir pour la transition écologique ? *l’Économie Politique* n°90, mai 2021.