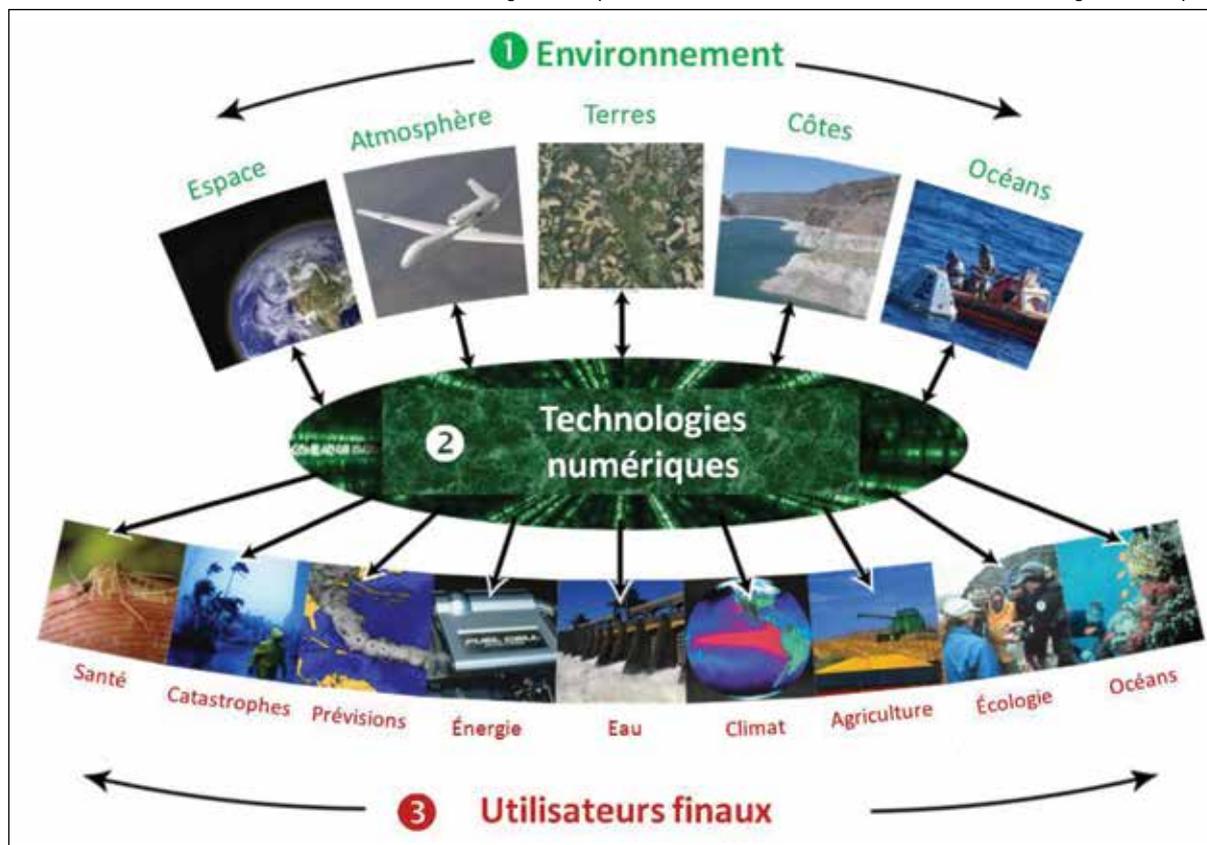


Version non définitive, ne pas citer.
Page internet du numéro : <http://www.see.asso.fr/node/14165>

Figure 1 : Représentation des liens entre environnement et technologies numériques.



Technologies numériques et environnement

PAR CÉDRIC GOSSART¹, RENÉ GARELLO²

MAÎTRE DE CONFÉRENCES, DOCTEUR EN SCIENCES DE GESTION, TÉLÉCOM ÉCOLE DE MANAGEMENT¹

PROFESSEUR, DOCTEUR EN SCIENCES DU SIGNAL, TÉLÉCOM BRETAGNE²

ABSTRACT

This paper discusses the relationship between digital technologies and environment. The aim is to better understand to which extent these technologies can help us to reduce our negative ecological impacts, what are their own ecological impacts and how they can be overcome. To do so, we suggest a taxonomy of the relationship between digital technologies and environment, give examples about how these technologies can help to preserve this environment, and discuss the limits of green digital technologies to save the planet.

Introduction

Afin de mieux comprendre sous quelles conditions les technologies numériques pourraient contribuer à améliorer la qualité de vie des habitants de notre planète, cet article examine les liens (positifs et négatifs) entre ces technologies et l'environnement. Il fournit des exemples concrets d'applications des technologies numériques contri-

buant à réduire les impacts écologiques négatifs des sociétés humaines, mais aborde aussi la question des limites à ces contributions.

Quels liens entre technologies numériques et environnement ?

Les technologies numériques comprennent à la fois des matériels (*hard-*

ware) et des logiciels et bases de données (*software*)¹. Nous explorons dans cet article les liens entre ces technologies et l'environnement, c'est-à-

¹ Voir la définition des TIC (technologies de l'information et de la communication) proposée par l'OCDE sur <http://www.oecd.org/sti/ieconomy/2771153.pdf>. Dans cet article, à la place de « TIC » nous avons préféré le terme de « technologies numériques ».

dire les écosystèmes naturels au sein desquels évolue l'espèce humaine. Deux questions principales nous préoccupent : les technologies numériques peuvent-elles contribuer à réduire nos impacts écologiques négatifs ? Quels sont les impacts propres à ces technologies et comment peut-on les limiter ?

Les interventions des sociétés humaines sur leur environnement se produisent à travers cinq milieux ou environnements différents : l'environnement spatial, l'environnement terrestre, l'environnement atmosphérique, l'environnement côtier et l'environnement marin. Sur la base de ces définitions, nous proposons ci-dessous une taxonomie des relations entre technologies numériques et environnement qui permet de mieux répondre aux deux questions posées.

Les relations entre technologies numériques et environnement sont surtout connues par les données que les premières permettent de collecter sur le second, par les résultats des exercices de modélisation informatique et par les multiples canaux de diffusion d'informations sur notre environnement offerts par le numérique. Toutefois, comme nous le verrons plus loin, ces technologies ont aussi une face cachée qui nuit aux écosystèmes naturels.

La taxonomie que nous proposons ici s'inspire de celle proposée par le Système mondial des systèmes d'observation de la Terre (*GEOSS : Global Earth Observation System of Systems*)². Elle propose une représentation des liens entre environnement et technologies numériques, synthétisée dans la figure 1.

Le **premier niveau** de la figure 1 décline les différents milieux écologiques de notre planète, avec lesquels les humains sont susceptibles d'interagir, notamment par l'intermédiaire des technologies numériques. Au **deuxième**

niveau, on trouve les technologies numériques, qui permettent d'observer cet environnement mais qui ne sont pas inertes à son égard. Le **troisième niveau**, est celui des parties prenantes susceptibles d'être impliquées par les retombées positives ou négatives des technologies numériques.

Dans la figure 1, la composante n° 3 montre les secteurs dans lesquels opèrent les parties prenantes utilisant les technologies numériques pour l'environnement. Ces acteurs, aussi appelés « utilisateurs finaux » ou « end users » en anglais, peuvent par exemple utiliser les données produites à l'aide de ces technologies pour diminuer les risques d'inondation ou pour réduire les consommations énergétiques des utilisateurs.

En fin de compte, les technologies numériques peuvent être mises « au service de l'environnement » de plusieurs manières³. Elles peuvent tout d'abord être utilisées pour mieux connaître cet environnement (*monitoring*), notamment à travers les activités suivantes :

- acquisition de données : capteurs, plates-formes...
- transport des informations (par avion, par réseaux...);
- traitement et détection de processus géophysiques et écologiques décrits par des modèles ;
- analyse des informations : détermination de paramètres pertinents, construction de modèles, simulations...

Les résultats de ces analyses pourront ensuite contribuer à sensibiliser les parties prenantes aux enjeux écologiques, qu'elles soient ministres, patrons d'entreprises ou simples citoyens. Elles vont permettre de mieux protéger les écosystèmes naturels, de prévenir différents types de risques ou de concevoir de nouveaux produits et services. La production de données environnemen-

tales est telle que l'on parle désormais de « données environnementales massives ». Mais les technologies numériques peuvent également fournir des moyens de diffusion de ces informations afin de toucher le plus grand public possible pour *in fine* influencer les modes de production et de consommation. Elles peuvent également permettre de réduire les impacts écologiques d'autres secteurs que le leur (secteur énergétique, transport...).

Mais les technologies numériques n'étant pas neutres pour l'environnement, elles doivent également réduire leurs propres impacts écologiques (consommation de ressources épuisables, émissions de gaz à effet de serre, consommation d'énergie, utilisation de produits toxiques...). Cela passe par une stratégie d'écoinnovation, visant par exemple à réduire les consommations énergétiques des équipements matériels et logiciels, ainsi que la quantité de déchets électroniques. Cette stratégie commence par une analyse des impacts, à savoir dans le meilleur des cas par une analyse du cycle de vie (ACV). Cette méthode très coûteuse permet d'évaluer une large palette d'impacts négatifs pour chacune des phases du cycle de vie d'un produit ou service (conception, production, distribution, utilisation, fin de vie).

Les impacts écologiques des technologies numériques

On parle peu de cette face cachée de « l'immatériel », mais les technologies numériques génèrent quantité d'impacts écologiques négatifs à chaque phase de leur cycle de vie. Ceci est valable pour les produits numériques comme les composants et les cartes électroniques, les ordinateurs, téléphones et réseaux associés, les produits électroniques grand public, écrans, ou li-seuses, et pour les services numériques comme la programmation informatique ou le traitement de données [1].

² Voir <http://www.earthobservations.org/geoss.php>.

³ https://www.earthobservations.org/documents/ministerial/geneva/MS3_GEO%20Report_on_Progress_2011_2013.pdf.

Concernant la phase de fabrication, les éléments les plus impactants sont les composants électroniques, les écrans et les batteries. Les principaux impacts sont l'épuisement des métaux, l'éco-toxicité terrestre, la toxicité humaine, l'eutrophisation et le réchauffement climatique. Les impacts de la phase de transport restent négligeables par rapport à ceux des autres phases, y compris dans les cas où ils sont effectués par avion. Quant à la phase d'utilisation, les impacts sont directement fonction de la quantité d'énergie consommée par les terminaux, les réseaux, ou les serveurs. Les impacts les plus importants sont alors le réchauffement climatique et l'eutrophisation.

Enfin, concernant la phase de fin de vie, ses impacts étant assez mal modélisés, il est difficile de tirer des conclusions générales comme pour les phases précédentes. Précisons simplement que les effets négatifs des autres phases peuvent être compensés par des effets positifs générés par la gestion responsable de la fin de vie des technologies numériques. Le recyclage d'une technologie numérique réalisé selon les règles de l'art permet par exemple de récupérer des métaux qui pourront être réutilisés, comme l'or (métal très polluant à l'extraction), et d'éviter les pollutions liées à la fin de vie (furanes, déchets toxiques...). Enfin, la mauvaise gestion de la fin de vie des technologies numériques soulève également des enjeux géopolitiques et de justice sociale majeurs [2].

Le monitoring de l'environnement – Technologies numériques et bien-être social

Le bien-être social lié au secteur énergétique

Des capteurs intelligents (*smart meters*) aux réseaux intelligents (*smart grids*), nombreux sont les bénéfices que peuvent apporter les technologies numériques aux

acteurs s'intéressant aux enjeux énergétiques. Par exemple, dans la perspective de la mise en place des smart grids, des chercheurs de Télécom SudParis travaillent avec Renault et EDF sur l'utilisation des technologies numériques afin de favoriser le stockage d'électricité dans les batteries des véhicules électriques la nuit quand celles-ci sont au repos. De même, la réduction du coût énergétique fait l'objet d'études sur les transports en commun intelligents avec optimisation du taux d'occupation des transports ferroviaires. Enfin, les activités de recherche sur les technologies numériques sans fil se préoccupent de la réduction des consommations d'énergie et des émissions d'ondes électromagnétiques.

À ce sujet, le groupe TELICE (Télécom Lille) mène des travaux sur les communications passant par les lignes d'énergie (courant porteur en ligne ou CPL). Cette équipe a étudié la possibilité d'utiliser le réseau d'énergie des véhicules comme réseau de communications. Récemment, l'industrie aéronautique s'est intéressée à la solution CPL dans le cadre du développement de l'avion « plus électrique ». Des études théoriques de caractérisation, modélisation et calcul de performances de liaisons pour ces diverses applications aéronautiques sont en cours, en parallèle à des expérimentations rendues possibles grâce à l'utilisation d'un modem versatile haut débit développé par IEMN/TELICE. Un autre projet intitulé "Smart City" s'intéresse à la coexistence des CPL associés au *smart grid* avec les CPL "in-home".

Le bien-être social lié aux milieux naturels

Ainsi que nous l'avons présenté en introduction, cinq milieux naturels forment notre environnement : l'espace, l'atmosphère, les surfaces continentales, l'océan et les zones côtières. Nous nous concentrons dans ce paragraphe

sur les deux milieux les plus observés à l'Institut Mines-Télécom par les capteurs à bord de satellites : le maritime et le terrestre.

La surveillance maritime

Ce domaine inclut les communications sous-marines entre capteurs et entre engins sous-marins ou aériens vers des mobiles off-shore. Quant à l'utilisation des technologies numériques pour produire et gérer l'énergie (éoliennes marines, etc.), ce sont des domaines de recherche en pleine expansion. Les technologies numériques permettent aussi de suivre les pollutions pétrolières en mer, car elles favorisent l'identification des coupables de dégazage qui sont à l'origine de la grande majorité des pollutions maritimes d'hydrocarbures, loin devant les accidents de tankers.

Le système océan

Les technologies numériques ont un rôle important à jouer dans l'étude et la modélisation des dynamiques des systèmes océaniques. De manière générale, il s'agit de développer des outils et méthodes de télédétection spatiale de la surface de l'océan ou de télédétection acoustique sous-marine. Les techniques d'acoustique passive et les modèles numériques opérationnels sont par exemple capables d'extraire, de caractériser et de modéliser les dynamiques des composantes caractéristiques abiotiques comme les paramètres géophysiques tels que courants ou vagues. Les technologies numériques permettent aussi de suivre des traceurs géophysiques tels que la salinité ou la température, mais aussi des traceurs biotiques d'intérêt halieutique comme le plancton et les poissons.

Ces développements doivent notamment permettre d'appréhender l'impact des changements climatiques, notamment en termes d'événements extrêmes (prévision des hauteurs de vagues sur les

côtes françaises en cas de tempête au milieu de l'Atlantique, prévision des risques de dépassement de digues, cf. Xynthia ou Fukushima). Les écosystèmes marins côtiers sont identifiés parmi les problématiques thématiques centrales dans les années à venir du fait des enjeux socio-économiques associés (par exemple le suivi et l'impact de l'aménagement dans les zones littorales et portuaires).

L'agriculture

Les technologies numériques peuvent favoriser une gestion intégrée des pesticides (*Integrated Pest Management*), permettre de détecter des plantes invasives pour anticiper l'eutrophisation, permettre de modéliser les bassins versants pour suivre l'écoulement des eaux et mettre ainsi en évidence l'impact des nitrates sur l'apparition des algues vertes, de suivre l'évolution des « corridors écologiques », etc. Par exemple, l'École des Mines d'Alès a travaillé à des mesures de vents pour aider les agriculteurs à savoir à quel moment ils pouvaient procéder à l'épandage.

Les ressources en eau et les forêts

Les acteurs s'intéressant à la ressource en eau pourront par exemple s'appuyer sur les technologies numériques pour le monitoring des zones de sécheresse et ceux concernés par les forêts pourront suivre l'évolution de la couverture forestière ou prévenir les incendies, tout en suivant l'état de la biodiversité (voir par exemple le projet EuroGEOSS, www.eurogeoss.eu). Un accent très fort est aujourd'hui mis sur l'interopérabilité et les avantages sociétaux et économiques de telles approches.

L'évolution climatique

Ce terme générique est transversal aux autres aspects qui sont développés ici. Les différentes composantes de l'environnement (agriculture, forêts, res-

sources en eau, océans...) et les interactions avec les technologies numériques sont bien évidemment concernées. Par exemple, le projet MEGATOR (Télécom ParisTech) visant à suivre l'évolution des glaciers de la vallée de Chamonix, montre l'usage que l'on peut faire des technologies numériques pour réaliser une observation objective de changements ayant un impact potentiel sur le climat.

Le bien-être social lié à la prévision et gestion des risques de pollution

Des capteurs à la diffusion des données au grand public en passant par les modèles d'analyse des pollutions, les réseaux de mesure de la qualité de l'air en Europe offrent un bon exemple du rôle joué par les technologies numériques pour faire face au défi de la pollution atmosphérique. Par exemple, l'École des Mines d'Alès travaille sur les risques industriels environnementaux en vue de cartographier la vulnérabilité de l'homme et l'environnement. Des chercheurs de Télécom Lille s'intéressent à la problématique de la localisation de sources polluantes par un réseau de capteurs, l'estimation de leurs caractéristiques (masse, instant de rejet, type de rejet), ainsi qu'à la prédiction de l'évolution de la toxicité. Sur cette problématique, enjeu majeur pour la sauvegarde des écosystèmes pollués, Telecom Lille 1 développe un partenariat avec la division DAM du CEA.

L'accroissement récent du volume et de la diversité des données relatives aux problématiques sociales et environnementales permet une appréciation quantitative de la dynamique liée à la fois aux activités humaines et à leurs impacts. Ces mêmes données ont aussi permis le développement de modèles, ainsi que d'un nouveau domaine de recherche consacré à la mise en place d'une analyse des risques systémiques liées aux activités humaines (transport, énergie).

Ce courant analyse également l'impact d'événements climatiques sur les activités humaines, ainsi que les interdépendances complexes qui existent entre ces deux réalités. Mais si les technologies numériques peuvent contribuer à « sauver la Planète », elles souffrent aussi de leur lot de toxicités.

Les limites des éco-TIC

Malgré leur capacité à produire de l'information sur notre environnement et de permettre d'écoconcevoir de nouveaux produits et services, les éco-TIC⁴ sont loin d'être des baguettes magiques à verdir la planète. En effet, elles comportent de sérieuses limites, dont la principale semble être l'existence d'« effets rebond » qui annulent tout ou partie de leurs bénéfices écologiques. Entre 1982 et 2012, tandis que l'intensité énergétique finale⁵ en France avait diminué d'un tiers, la consommation finale d'énergie avait augmenté de 15 %, en passant de 134 à 154 Mtep [3].

Dans le cas des technologies numériques comme les serveurs, les gains en termes d'amélioration de l'efficacité énergétique pourraient également être absorbés par une augmentation de la demande de stockage numérique d'informations, ce qui annulerait les bénéfices environnementaux de cette amélioration.

L'invention de l'effet rebond

Dans l'Angleterre du 19^e siècle, le charbon était essentiel au succès de la révolution industrielle, et l'on craignait

⁴ Traduction française du terme anglais "*green information technology*", les éco-TIC sont des « Techniques de l'information et de la communication dont la conception ou l'emploi permettent de réduire les effets négatifs des activités humaines sur l'environnement ». Source : *Journal Officiel* du 12/07/2009, http://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?cidTexte=JORFT EXT000020835844.

⁵ L'intensité énergétique finale désigne la quantité d'énergie finale utilisée pour produire une unité de produit intérieur brut.

l'épuisement de cette ressource stratégique. Pour éviter ce drame économique, des ingénieurs sont parvenus à exploiter le charbon de manière plus efficace dans l'espoir d'en repousser l'épuisement. Mais c'est l'inverse qui se produit, car en exploitant cette ressource fossile de manière plus efficace, son prix est devenu plus accessible et sa consommation a augmenté, comme l'avait prédit en 1865 l'économiste William Stanley Jevons dans son livre "The Coal Question". Ce n'est que bien plus tard que sera proposé le terme d'effet rebond pour qualifier ce « paradoxe de Jevons » [4]. On distingue trois catégories d'effets rebond, directs, indirects, et structurels [5] :

- les effets rebond directs apparaissent lorsqu'une baisse du coût de l'énergie induit des réductions de prix qui déclenchent une augmentation de la demande pour le bien coûtant le moins cher : par exemple, si une machine à laver consomme moins d'énergie, les consommateurs peuvent se permettre de laver leur linge plus souvent ;
- la deuxième catégorie d'effets rebond est celle des effets de rebond indirects : quand une ressource est utilisée plus efficacement et que son prix descend, les ressources financières dégagées induisent la consommation d'autres produits. Par exemple, si une famille économise de l'argent en isolant son appartement, elle peut dépenser cet argent en achetant une plus grosse voiture. Les bénéfices écologiques générés par l'isolation du logement seraient donc absorbés par les impacts négatifs d'un nouveau produit éventuellement plus polluant ;
- une troisième catégorie d'effets rebond concerne ceux qui touchent l'ensemble de l'économie. Ceux-là apparaissent lorsque la baisse des prix de l'énergie induit une réduction des prix des biens intermédiaires et finaux dans toute l'économie et provoque des changements structurels dans les

modes de production et les habitudes de consommation. Par exemple, un carburant moins cher permet d'habiter plus loin de son lieu de travail.

Si de nombreuses études sectorielles ont été faites dans le cas du secteur automobile ou du bâtiment, il existe en revanche encore peu de mesures d'effets rebond dans le secteur du numérique. Nous expliquons ci-dessous comment les trois types d'effets rebond peuvent se traduire dans le numérique, et discutons dans la conclusion de cet article des conséquences des effets rebond du numérique.

Les effets rebond du numérique

Les effets rebond directs du numérique concernent par exemple les microprocesseurs. Comme ils sont de plus en plus petits, chacun d'entre eux nécessite en valeur absolue moins de matériaux pour être fabriqué. Par conséquent, leur prix baisse et leur demande explose, de nouveaux modèles venant rapidement remplacer les plus lents, ce qui contribue en outre à accélérer l'obsolescence des ordinateurs. La miniaturisation des technologies numériques peut également avoir un effet démultiplicateur sur leur demande : les économies de matières générées par la miniaturisation vont alors être absorbées par la multiplication du nombre de petits appareils électroniques.

Ce « paradoxe de la miniaturisation » est illustré dans le cas de la Suisse, où entre 1990 et 2005 la masse physique moyenne d'un téléphone mobile a été réduite d'un facteur de 4,4, alors que la masse totale de tous les téléphones utilisés en Suisse avait augmenté d'un facteur 8, le nombre d'utilisateurs ayant explosé. Un autre exemple concerne les gains d'efficacité obtenus grâce à la virtualisation des centres de données. Pour un volume de données stockées constant, cette technique permet de diminuer le nombre de serveurs et de ré-

LES AUTEURS

CÉDRIC GOSSART travaille sur les stratégies et politiques d'innovation dans les secteurs des éco-TIC (*green IT*) et de l'énergie (LED). Il s'intéresse aux liens entre TIC et environnement (impacts écologiques & écoconception des TIC), ainsi qu'aux stratégies de transition vers un développement durable. Il anime avec René Garello le réseau thématique « TIC & Environnement » de l'Institut Mines-Télécom, est membre du GDS ÉcoInfo du CNRS, administrateur de l'Office français de la Fondation pour l'éducation à l'environnement en Europe et président de l'ONG Enda Europe.

RENÉ GARELLO travaille sur le monitoring des océans par les technologies numériques (télédétection, traitement du signal, analyse statistique et spectrale appliquée à la détection et caractérisation de la surface de l'océan). Au cours des deux dernières décennies, il a travaillé au développement d'outils de traitement du signal et de l'image permettant d'interpréter les signaux radar et extraire les caractéristiques de surface de la mer, qu'elles soient naturelles (vent, vagues, courants) ou artificielles (navires, pollution). Il préside l'*Oceanic Engineering Society* de l'IEEE.

duire le coût de l'octet stocké, d'où une explosion de la demande d'espace de stockage de données. De 1986 à 2007 la capacité mondiale de traitement de données aurait augmenté cinq fois plus vite que la croissance économique [6].

Les effets rebond indirects apparaissent lorsqu'une production plus efficace d'une ressource entraîne une diminution des prix des biens et services qui l'utilisent, ce qui induit une augmentation de leurs ventes et donc la consommation d'autres ressources. Par exemple, dans le domaine du *e-learning*, l'analyse des impacts environnementaux de trois systèmes d'enseignement conclut que le *e-learning* ne se traduit pas par une réduction des émissions de CO₂ ou de la consommation énergétique en raison d'effets rebond [7].

Les effets rebond indirects ont également été observés pour les services numériques visant à réduire les déplacements. Par exemple, dans les cas du téléachat, du télétravail et des téléconférences, une partie importante des économies de déplacement sont annulées par l'augmentation des trajets non professionnels pour faire des courses ou accompagner des membres de sa famille dans des déplacements de loisir. Une étude montre par exemple que c'est au Danemark que l'on trouve le plus fort effet rebond lié au télétravail (73 %). En effet, pour ce pays le télétravail a permis de réduire les déplacements domicile-travail motorisés de

105 km par semaine. Mais il a dans le même temps occasionné des déplacements personnels de 77 km, qui annulent en partie les kilomètres économisés grâce au télétravail, d'où un effet rebond de 73 % (77 km/105 km) [8]. On voit bien dans cet exemple que le comportement des acteurs est la clé du changement environnemental, quelle que soit la performance environnementale de la technologie « verte » qu'ils utilisent.

Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une taxonomie des relations entre technologies numériques et environnement. Après avoir défini les termes en question, nous avons tenté de mettre en avant plusieurs exemples de travaux visant à mobiliser ces technologies au service de l'environnement. Par exemple, de par la puissance de leur capacité à collecter, traiter et diffuser des données sur cet environnement, elles peuvent nous aider à mieux le protéger. Grâce à elles, on peut aujourd'hui rêver d'un futur où les êtres humains sauront évoluer au sein de leurs environnements dans les limites d'un "Safe operating space for humanity" [9]. Pour ce faire, il nous faudra dépasser les limites des éco-TIC, et bien avoir à l'esprit que seules les technologies les plus « vertes » ne peuvent pas grand-chose si les acteurs et institutions ne les accompagnent pas sur le chemin de la transition écologique.

Références

- [1] ÉcolInfo, Impacts écologiques des TIC : Les faces cachées de l'immatérialité, Les Ulis : EDP Sciences, 2012.
- [2] C. Gossart, « De l'exportation des maux écologiques à l'heure du numérique » *Mouvements*, vol. 60, pp. 23-28, 2009.
- [3] ADEME, « Chiffres clés (Climat, Air et énergie) » 2013-2014.
- [4] J. Khazzoom, "Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances", *The Energy Journal*, vol. 1, pp. 21-40, 1980.
- [5] J. Sorrell, "Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency", *Energy Policy*, vol. 37, pp. 1456-1469, 2009.
- [6] H. Hilbert et P. Lopez, "The World's technological capacity to store, communicate, and compute information", *Science*, vol. 332, pp. 60-65, 1 April 2011.
- [7] H. Herring et R. Roy, "Technological innovation, energy efficient design and the rebound effect" *Technovation*, vol. 27, pp. 194-203, 2007.
- [8] M. Falch, Environmental Impact of ICT on Transport Sector, vol. 7216, A. Hadjiantonis et B. Stiller, Éd., Berlin Heidelberg: Springer, 2012, pp. 126-137.
- [9] J. Rockstrom et al., "A safe operating space for humanity", *Nature*, vol. 461, pp. 472-475, 24 September 2009.