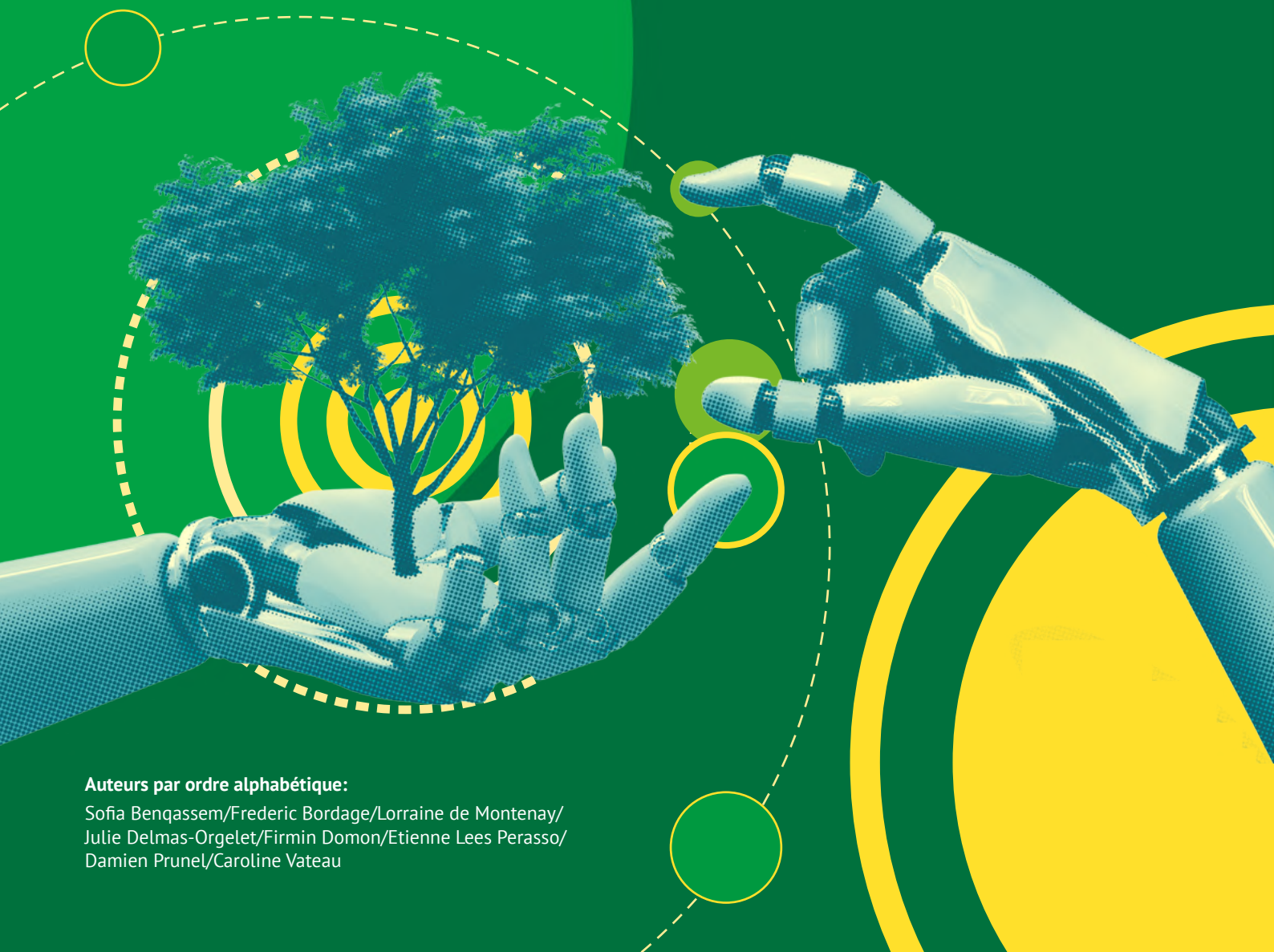


AU-DELÀ DES CHIFFRES :

Comprendre les impacts environnementaux du numérique et agir

Version : 7 décembre 2021



Auteurs par ordre alphabétique:

Sofia Benqassem/Frederic Bordage/Lorraine de Montenay/
Julie Delmas-Orgelet/Firmin Domon/Etienne Lees Perasso/
Damien Prunel/Caroline Vateau

Sommaire

Les auteurs.....	page 2
Méthodologie des études de cas.....	page 3
Résumé des études de cas.....	page 5
Études de cas sur les technologies	page 6
L'IoT et les objets connectés	page 7
L'intelligence artificielle	page 20
Le cloud	page 31
La 5G.....	page 43
Les véhicules autonomes	page 55
Études de cas sur les effets environnementaux.....	page 64
Les effets rebonds	page 65
Les matières premières du numérique	page 77
Les déchets électroniques et l'économie circulaire.....	page 90
Recommandations.....	page 102
Bibliographie	page 117

Les auteurs

Cette étude a été préparée sous la direction de Frédéric Bordage, fondateur de GreenIT.fr.

La gestion de projet de l'étude a été dirigée par Lorraine de Montenay, consultante indépendante et membre du collectif GreenIT.fr.

Les études de cas ont été préparées et écrites par Lorraine de Montenay, avec les contributions de Julie Orgelet, Frédéric Bordage, Etienne Lees-Perasso, Damien Prunel, Caroline Vateau, Romain Mahasenga et Sofia Benqassem, et l'expertise de Michel Bénard, Jacques Combaz, Claire Downey, Laura Draetta, Fabrice Flipo, Guillaume Pitron et Gauthier Roussilhe, que nous remercions pour la qualité de leurs contributions et leur participation.

Comment citer ce rapport :

Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. et Lees Perasso, E. GreenIT.fr. 2021. *Behind the figures: understanding the environmental impacts of ICT and taking action (Au-delà des chiffres : Comprendre les impacts environnementaux du numérique et agir)*

Méthodologie des études de cas

Pour certaines des innovations les plus récentes du numérique, comme pour l'intelligence artificielle par exemple, les données permettant de mesurer les impacts environnementaux de ces technologies ne sont pas suffisamment disponibles pour estimer de manière quantifiée ces impacts à l'échelle de l'Europe dans une analyse de cycle de vie (ACV) multicritère. **Cependant, l'absence de données ne veut pour autant pas dire absence d'impacts environnementaux.** Même s'ils ne peuvent être intégrés dans l'ACV, nous tenions à aborder ces sujets pour limiter les angles morts.

L'objectif de cette étude étant de rendre accessible à un large public la compréhension des impacts environnementaux du numérique, nous avons souhaité donner l'opportunité au grand public de se familiariser avec la méthode scientifique de l'analyse du cycle de vie et de comprendre, au-delà des chiffres de l'analyse de cycle de vie, quels sont les principaux enjeux environnementaux liés au numérique.

Afin d'assurer une compréhension globale des impacts environnementaux du numérique et apporter des réponses à ces problématiques, nous avons rédigé 8 études de cas.

Ces études de cas ont été sélectionnées pour représenter les sujets clés permettant de comprendre **comment fonctionne l'écosystème numérique, ainsi que les enjeux environnementaux qu'il soulève pour aujourd'hui et demain.**

Nous avons divisé les études de cas en deux catégories: les études de cas axées sur les technologies, et celles axées sur les impacts environnementaux.

Les études de cas « technologies » couvrent les sujets suivants :

1. L'IoT et les objets connectés

2. L'intelligence artificielle

3. Le cloud

4. La 5G

5. Les véhicules autonomes

Les études de cas « effets environnementaux » couvrent les sujets suivants :

6. Les effets rebonds

7. Les matières premières du numérique

8. Les déchets électroniques et l'économie circulaire

Comment sont composées les études de cas ?

Chaque étude de cas débute par un en-tête « Les clés pour comprendre », qui permet de parcourir rapidement les enjeux principaux dans une perspective large, à l'échelle mondiale ou européenne.

Pour chaque étude de cas, le résumé permet de comprendre les points clés développés dans l'étude de cas.

Chaque étude de cas est également dotée d'une section définitions : cette section aidera les personnes qui ne sont pas des experts techniques à comprendre les définitions technologiques clés, ou, dans le cas des études de cas environnementales, les notions environnementales clés. Ensuite, le cœur de l'étude vise à expliquer en quoi la technologie abordée est un levier ou un frein pour le climat et l'environnement, ainsi que de mettre en évidence quelques constats clés ou lorsque cela est possible, quelques exemples de solutions. Dans le cas des études de cas environnementales (effets rebonds, matières premières, déchets électroniques et économie circulaire), les impacts et les principaux enjeux pour l'Europe sont abordés.

Au cours des 4 mois de recherche et de rédaction de ces 8 études de cas, nous avons également interrogé des experts extérieurs à notre équipe, apportant un regard complémentaire aux différents sujets explorés. Pour chaque étude de cas dans laquelle nous avons pu les impliquer, leur contribution est mise à disposition du lecteur dans l'encadré « le point de vue de l'expert ». Nous les remercions tout particulièrement pour leur temps et leurs contributions diverses et toujours qualitatives, qui donnent du relief à nos études de cas : Michel Bénard, Jacques Combaz, Claire Downey, Laura Draetta, Fabrice Flipo, Guillaume Pitron, Gauthier Roussilhe.

Des études de cas rigoureuses mais accessibles

Non avons voulu nous assurer que nos études de cas seraient à la fois rigoureuses et accessibles à toute personne, novice ou non dans la compréhension des impacts environnementaux du numérique.

Afin de garantir la rigueur de nos études de cas, et pour étayer nos propos, nous nous sommes appuyés autant que possible sur des analyses du cycle de vie ayant fait l'objet d'une revue critique, ainsi que sur l'état de l'art des connaissances sur ces différents sujets. Nous avons également été aussi transparents que possible sur les sources des données, en fournissant nos sources dans les notes de bas de page – avec un lien hypertexte vers la ressource lorsque cela était possible. Nous nous sommes appuyés autant que possible sur des données accessibles au public. Les études de cas ont été relues a minima par trois personnes différentes de notre équipe ainsi que l'expert interrogé pour chaque étude de cas avec un entretien (6 études de cas sur 8).

Pour rendre nos études de cas accessibles à tous, nous avons fait un compromis entre synthèse et explications suffisamment détaillées pour permettre de comprendre les chaînes logiques. Nos études de cas comptent entre 9 et 13 pages chacune pour permettre au lecteur de choisir son niveau de détail : choisir une lecture rapide, en se concentrant sur l'en-tête « Les clés pour comprendre »

au début de chaque étude de cas, le chiffres, et des citations, ou choisir une lecture plus approfondie du début à la fin de l'étude de cas. Le lecteur qui aimerait avoir une compréhension plus approfondie d'un sujet spécifique abordé dans une étude de cas peut facilement développer des connaissances en suivant les liens vers les sources que nous avons utilisées.

De l'inter-connexion entre les sujets des études de cas à un constat : celui d'une interdépendance des technologies entre elles

Chaque sujet abordé dans les études de cas ouvre de nombreuses portes sur d'autres sujets. Nous avons donc dû restreindre l'étendue de notre travail pour éviter que notre projet devienne un Wikipédia de l'empreinte environnementale du numérique (ce qui serait formidable mais n'était pas le but de ce travail, et représente un travail considérable incompatible avec le périmètre de notre projet). Cependant, nous avons trouvé de nombreuses interconnexions entre les différents thèmes abordés ici, que nous avons mis en évidence pour faciliter la navigation d'une étude de cas à l'autre. Au terme de ce travail, le constat que nous faisons est qu'il existe, au-delà de simples interconnexions entre ces sujets, de réels liens de dépendance d'une technologie à l'autre, que l'on retrouve dans ces études de cas.

Résumé des études de cas

ÉTUDES DE CAS SUR LES TECHNOLOGIES		
L'IoT et les objets connectés	p. 7	L'internet des objets (IoT) se développe rapidement mais n'en est qu'au tout début. L'essor de l' IoT contribue déjà et contribuera à mettre en danger à la fois le climat et le stock de ressources critiques utilisées pour fabriquer à la fois les technologies du numérique et du développement durable (batteries de véhicules électriques, panneaux photovoltaïques).
L'intelligence artificielle	p. 20	Le traitement et l'apprentissage de l'intelligence artificielle sont très énergivores. Éliminer l'acquisition et le traitement des données inutiles, et prendre en compte le coût réel des « applications gratuites » ou des « données gratuites » sont deux clés pour réduire et réguler la gourmandise de l'IA.
Le cloud	p. 31	À court terme , la priorité est de limiter les serveurs zombies – ce qui peut avoir d'importants bénéfices sur l'économie. À long terme , intégrer le cloud propre souverain dans un Plan numérique, s'assurer que l'edge computing ne tue pas les bénéfices de mutualisation du cloud pour quelques millisecondes économisées, stimuler les bonnes pratiques des utilisateurs.
La 5G	p. 43	Si la 5G précipite la production de plus de terminaux et d'objets connectés, ses effets vont indéniablement exacerber l'extraction minière et contribuer à la non-durabilité du secteur numérique.
Les véhicules autonomes	p. 55	On constate avant tout que les véhicules autonomes augmentent la distance moyenne parcourue par les véhicules et contribuent à réduire la part des transports publics et des modes de transport lents. Cela pourrait exacerber les émissions de GES. Pour éviter cet effet rebond prévisible, les comportements des utilisateurs doivent être pris en compte dans les décisions politiques dans une vision plus large de l'évolution des infrastructures de transport.

ÉTUDES DE CAS SUR LES EFFETS ENVIRONNEMENTAUX		
Les effets rebonds	p. 65	Sans l'application immédiate de mesures de sobriété, l'efficacité de la technologie est systématiquement associée à des effets rebonds systémiques à grande échelle. Les comportements des utilisateurs et les stratégies des acteurs économiques doivent être pris en compte dans les politiques pour prévenir les effets rebonds.
Les matières premières du numérique	p. 77	Les matières premières utilisées pour le numérique ne sont pas renouvelables. Le stock de minéraux et de métaux est limité, avec une accessibilité inégale sur la planète. L'autonomie de l'UE ne peut être garantie par l'exploitation minière au sein de l'UE. L'extraction et le raffinage des matières premières ont des impacts environnementaux énormes et variés, ce qui signifie que même dans les cas les plus écologiques, l'extraction et le raffinage provoquent des catastrophes environnementales multiples et fréquentes. L'extraction et le raffinage des métaux sont la deuxième activité humaine la plus polluante sur terre juste après le recyclage des batteries au plomb.
Les déchets électroniques et l'économie circulaire	p. 90	Il est nécessaire d' augmenter la collecte des équipements (encore fonctionnels ou non) pour stimuler l'économie circulaire et l'intérêt des industriels pour le recyclage. La convention de Bale n'est toujours pas respectée par l'UE bien que l'UE ait des intérêts de souveraineté à court terme pour conserver et recycler les DEEE à l'intérieur de l'UE.

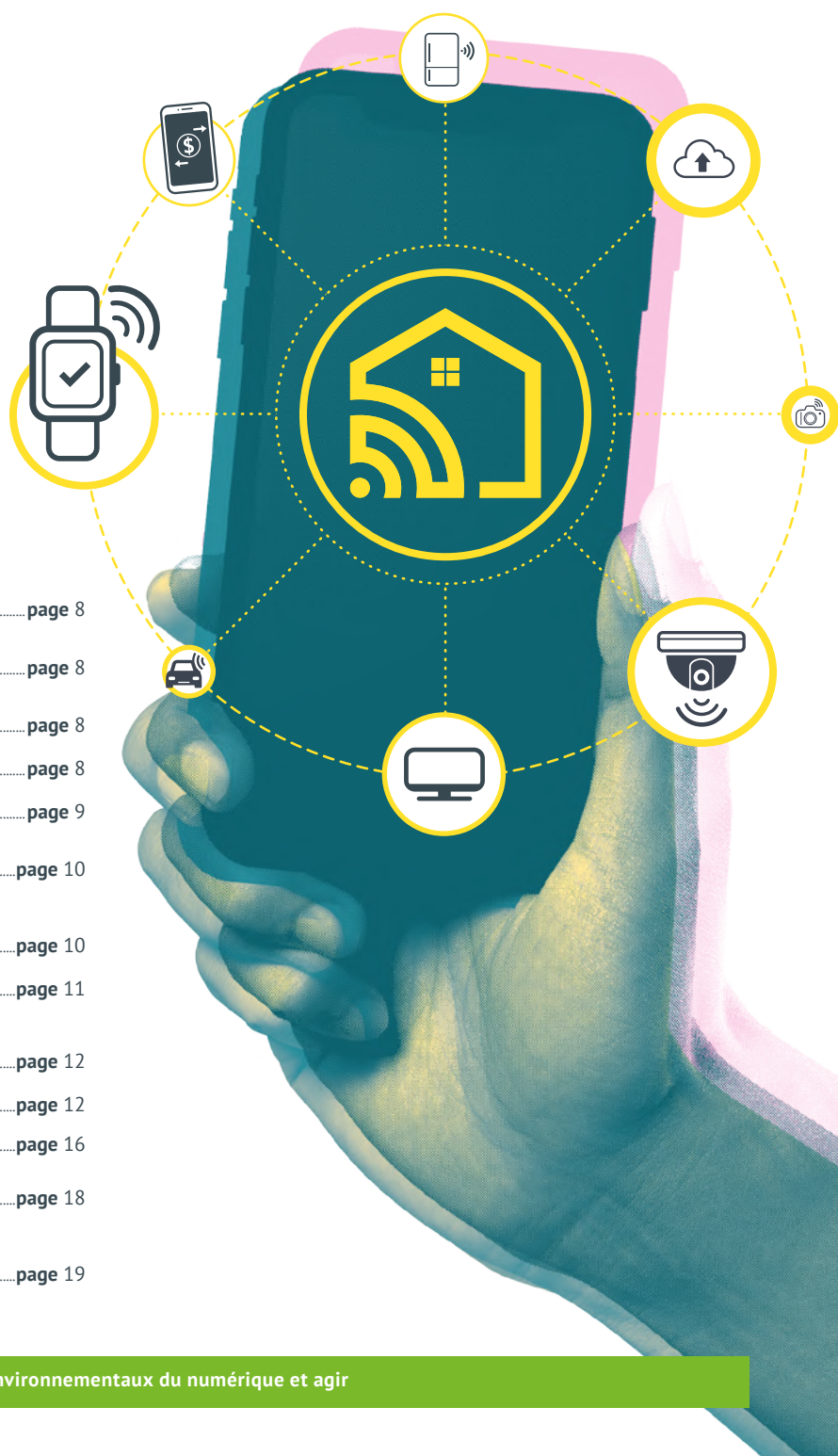
ÉTUDES DE CAS SUR LES TECHNOLOGIES :

- L'IoT et les objets connectés
- L'Intelligence artificielle
- Le cloud
- La 5G
- Les véhicules autonomes

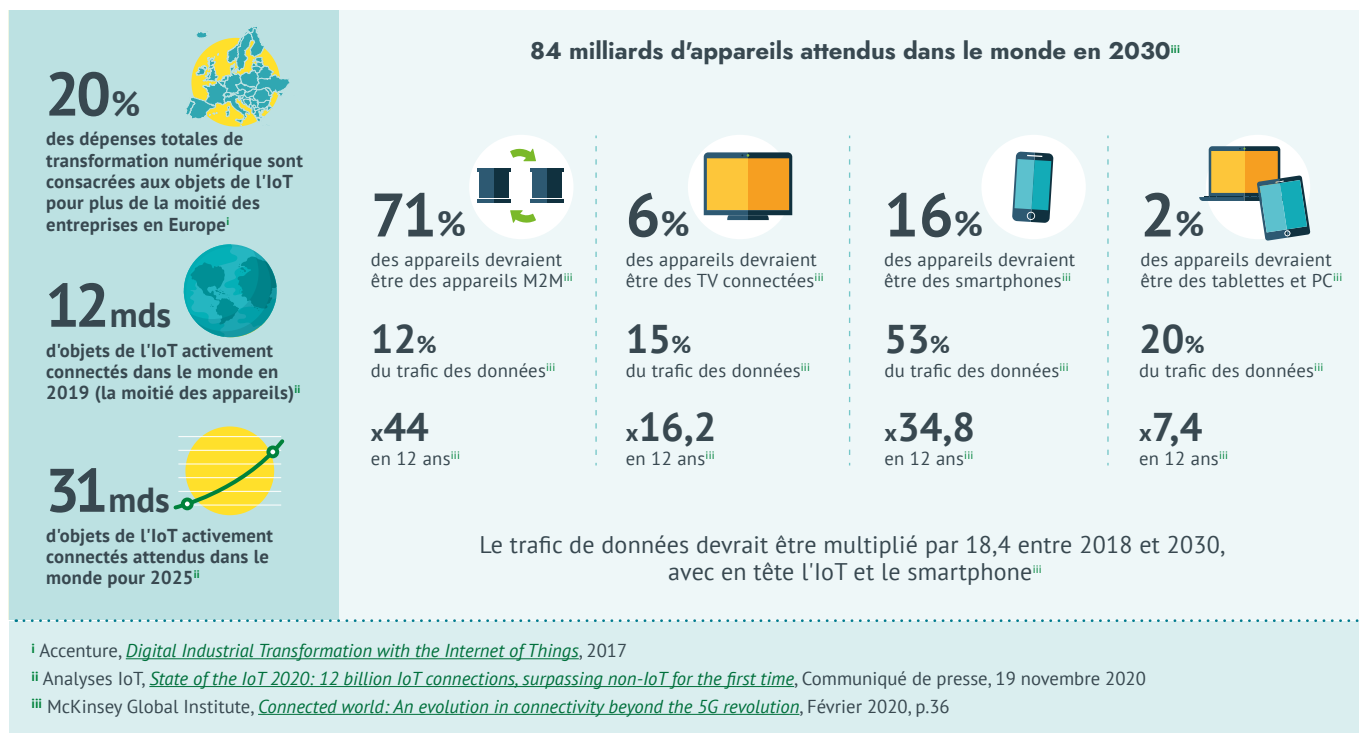
L'IoT et les objets connectés

Sommaire

Les clés pour comprendre	page 8
Résumé de l'étude de cas	page 8
Définitions	page 8
Qu'est-ce que l' IoT?	page 8
Notions principales	page 9
Enjeux environnementaux liés au recours à l'IoT	page 10
L'IoT: un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux ?	page 10
<i>Focus sur une ACV comparative de trois cas de hottes de cuisine</i>	page 11
L'IoT: un obstacle à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux?	page 12
<i>Focus sur l'exemple de l'ACV de la Samsung Galaxy Watch</i>	page 12
<i>Avis d'expert</i>	page 16
Conclusion	page 18
<i>Recommandations pour une évolution du numérique compatible avec le Green Deal</i>	page 19



Les clés pour comprendre



Résumé de l'étude de cas

L'IoT est un domaine technologique jeune et complexe, regroupant un ensemble d'objets électroniques connectés. Ces objets sont à la fois difficiles à définir et à dénombrer, et leur impact environnemental est de plus en plus difficile à évaluer, car ils se diversifient de plus en plus vite et connaissent une croissance exponentielle.

Dans la première section de cette étude de cas, nous explorerons ce qu'est l'IoT et quels types d'objets connectés le composent. Dans la deuxième section, nous donnerons un aperçu des enjeux environnementaux liés à l'IoT et à son essor exponentiel. Avec deux exemples concrets à l'appui, nous verrons que l'un des principaux problèmes liés à l'IoT est l'entropie des ressources utilisées pour fabriquer des composés électroniques alors que de plus en plus d'objets connectés sont fabriqués, car même lorsque les appareils intelligents peuvent être utilisés pour limiter les émissions de gaz à effet de serre,

la question du transfert d'impact doit être envisagée au niveau des ressources en matières premières.

La plupart des appareils IoT étant destinés au marché de consommation ou à l'industrie, et la proportion d'objets connectés qui serviront à limiter et à réduire les impacts environnementaux des activités humaines étant encore difficile à prévoir, l'IoT peut-il être conçu pour façonner activement un avenir durable ? Notre section de recommandation offre quelques pistes.

Définitions

Qu'est-ce que l'IoT?

L'Internet des Objets (IoT, pour *Internet of Things* en anglais) est défini par l'UIT comme « une infrastructure mondiale pour la société de l'information, permettant des services avancés en interconnectant des choses (physiques et virtuelles) basées sur des technologies d'information et de communication interopérables existantes et en évolution ».¹

¹ <https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx> (dernière consultation : 02/04/2021)

L'objectif de l'IoT est de connecter à Internet et entre eux des appareils appelés objets connectés. Les objets connectés sont une large catégorie qui peut être divisée en :

- **Équipements personnels** : Enceintes connectées, montres connectées, enceintes Bluetooth, lunettes RV/RA, etc.
- **Équipements domotiques** : Pour la gestion de l'énergie, les systèmes d'alarme de maison connectée, les équipements électro-ménagers connectés tels que les réfrigérateurs, les robots aspirateurs, etc.
- **IoT public et dispositifs pour la ville intelligente (smart city)** : caméras de sécurité, dispositifs de surveillance du trafic, distribution d'énergie et optimisation du réseau, capteurs pour collecter, analyser et partager des données pour améliorer l'urbanisme, etc.
- **Dispositifs de santé et de soins médicaux** : Pour surveiller la tension artérielle, le taux de sucre, le poids corporel, etc.
- **Dispositifs industriels et de fabrication** : Systèmes de contrôle qualité automatisés, suivi de production, pour améliorer les performances opérationnelles et augmenter la productivité.

L'expansion du web : de l'Internet des objets à l'Internet de la pensée



Source: ©TrendONE 2008 de Nils Müller; www.TrendONE.de
Tous droits réservés

- **Dispositifs de transport et de mobilité** : Véhicules connectés, télématiques et gestion de flotte pour le diagnostic ou la surveillance des véhicules (surveillance de la batterie, de la pression des pneus, surveillance du conducteur, etc.)

« Les ordinateurs personnels, tablettes et smartphones connectés ne sont PAS considérés comme faisant partie de l'IoT, bien que ceux-ci puissent faire partie de la configuration de la solution. »

Source: [IoT Analytics](http://IoTAnalytics)

Notions principales

- **Objets connectés ou intelligents** : Objets connectés à Internet avec un ensemble de paramétrages permettant à l'objet d'auto-améliorer ses fonctionnalités grâce à des mises à jour de données et de logiciels fournies via Internet. Un objet connecté possède trois types de composants matériels : les composants de l'objet initial, les composants intelligents et les composants de connectivité.
- **Les composants de l'objet initial** comprennent les pièces mécaniques et électriques du produit, présentes même lorsque ce même type d'appareil n'est pas un objet connecté (réfrigérateur, appareil photo, haut-parleur, etc.)
- **Les composants intelligents** comprennent les capteurs, les microprocesseurs et le stockage des données. En plus de cette base de composants matériels, l'objet connecté peut inclure un logiciel (qui n'est pas un composant) qui apporte sa part d'« intelligence » via son système d'exploitation et son interface utilisateur améliorée, permettant le contrôle de l'appareil.
- **Les composants de connectivité** incluent les ports et les antennes permettant des connexions filaires ou sans fil avec le produit.

L'intelligence (logiciels et composants de détection) et la connectivité confèrent à un objet ou à un produit quatre nouvelles capacités : surveillance, contrôle, optimisation et autonomie, chacune s'appuyant sur la précédente.²

² <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition> (dernière consultation : 05/04/2021)

Un objet connecté n'est pas isolé : pour être « intelligent », l'appareil s'appuie également sur un réseau pour communiquer et fonctionner avec d'autres appareils ou pour s'alimenter en données, mais aussi sur des unités de calcul locales (*edge computing*) ou distantes (centres de données).

Enjeux environnementaux liés au recours à l'IoT

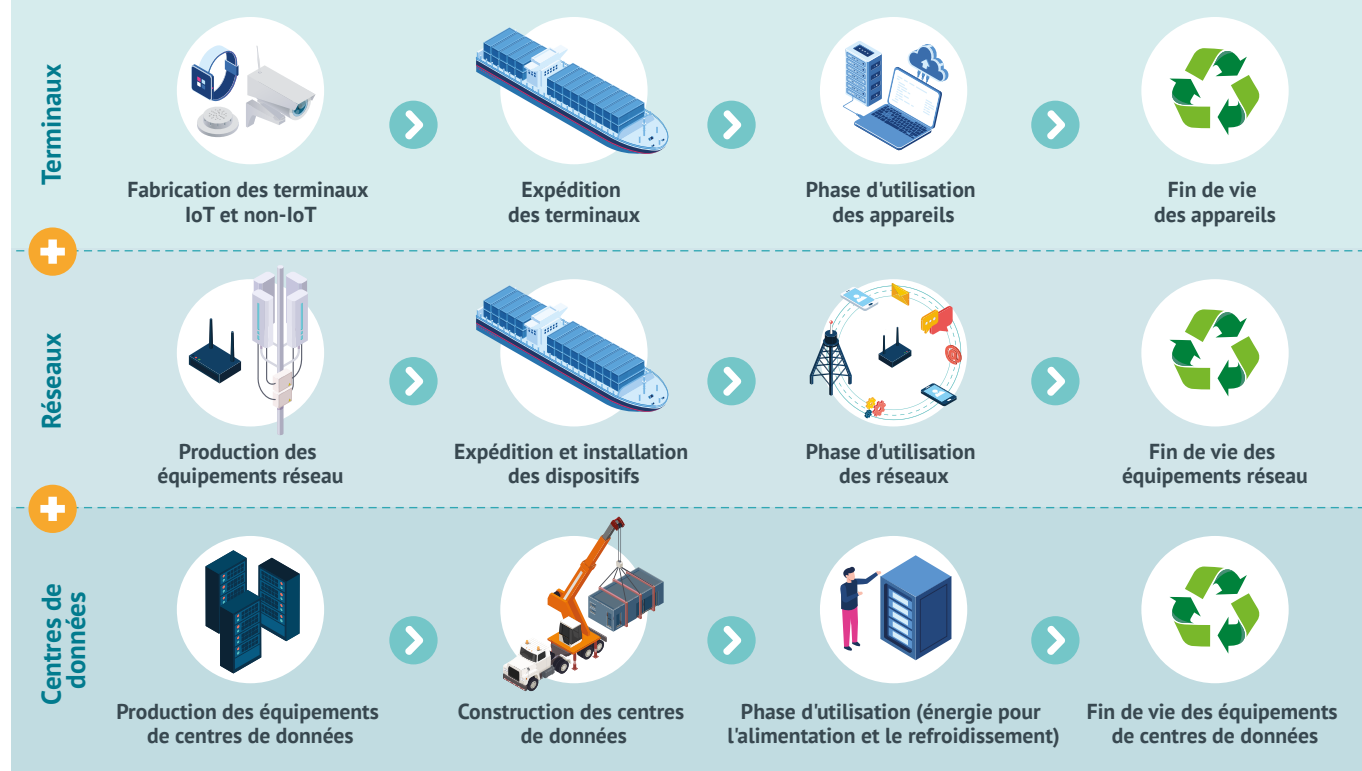
Si l'on considère la diversité des types d'appareils dans l'IoT, le manque d'analyses du cycle de vie des objets connectés et le fait que l'IoT est une industrie en évolution très rapide, il est presque impossible de fournir un aperçu complet des impacts environnementaux qui en découlent. Dans cette section, nous verrons que les informations fournies par les analyses de cycle de vie existantes sur certains des objets connectés nous

invitent à considérer la balance bénéfices/coûts environnementaux globaux dans une approche multicritère et à limiter les transferts d'impact lorsque l'on envisage de concevoir un objet connecté respectueux de l'environnement. Alors que de plus en plus d'objets connectés sont fabriqués, chaque objet contribue à la production et à la diffusion de déchets électroniques contenant des matériaux rares et précieux. Enfin, nous nous demandons quelles sont les conséquences prévisibles de l'essor futur de l'IoT ?

L'IoT: un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux ?

Dans certains cas, l'utilisation de l'IoT est destinée à aider à réduire l'empreinte environnementale des activités humaines, par exemple lors de l'utilisation à la fois de l'IoT et de l'IA de surveillance du trafic afin de réduire la pollution de l'air, ou pour optimiser la fabrication industrielle ou encore pour réaliser de la maintenance prédictive. Néanmoins, dans la plupart des cas décrits dans la littérature, les impacts

Vision simplifiée du cycle de vie de l'IoT



Focus sur une ACV comparative de trois cas de hottes de cuisine*

En 2018, une équipe italienne a réalisé une analyse comparative du cycle de vie de trois cas de hottes de cuisine :

- Système A: hotte de cuisine conventionnelle à extraction
- Système B: hotte de cuisine aspirante intelligente
- Système C: hotte de cuisine filtrante intelligente avec un système d'aspiration intelligent supplémentaire

Cette ACV montre clairement qu'une réduction significative des impacts sur le changement climatique est possible, moyennant certains compromis. Dans la discussion, les chercheurs expliquent que « *d'un point de vue général, l'introduction de stratégies de réduction de l'énergie consommée tout au long du cycle de vie du produit détermine une contraction significative des impacts associés. Toutefois, si l'on observe des catégories d'impact spécifiques (par exemple, dans le cas présent, "toxicité humaine" et "épuisement des métaux"), l'utilisation de composants électriques et électroniques pèse négativement sur le comportement environnemental. De plus, pour les cas analysés, la diminution de la consommation d'énergie se fait au détriment des bonnes conditions d'air, qui sont pénalisées par un débit d'aspiration plus faible et une réduction du renouvellement d'air.* »

Cela signifie que, bien que la consommation d'énergie de la hotte de cuisine soit limitée tout au long du cycle de vie de la hotte, de la production à la fin de vie, cette diminution de la consommation est compensée par une limitation de son usage principal, et qu'il y a un transfert d'impact à prendre en compte concernant l'épuisement des métaux et la toxicité humaine.

L'étude indique clairement que ce n'est pas un paramètre, mais une pluralité de paramètres environnementaux qui doivent être pris en compte lors de la conception de dispositifs intelligents pour éviter le transfert d'impact : « *Selon les configurations de produits actuellement analysées, d'un point de vue environnemental, l'utilisation de certains matériaux, comme les métaux rares et précieux, devrait être réduite. Parallèlement, des stratégies visant à prendre en compte également des paramètres "environnementaux" supplémentaires doivent être soigneusement adoptées dans le développement d'équipements intelligents, évitant ainsi un transfert "d'impact", qui ne peut être négligé dans une acception large de la notion de durabilité environnementale.* »

* V. Castorani et al., *Life cycle assessment of home smart objects: kitchen hood cases*, 2018

environnementaux de la solution elle-même ne sont pas évalués, ce qui ne nous permet pas de juger si l'impact global affecte positivement ou non notre empreinte environnementale ([voir notre étude de cas sur l'IA](#)).

Dans d'autres cas, encore rares, comme celui de l'exemple ci-contre, l'analyse du cycle de vie permet de voir de quelle manière les objets connectés (ici, les hottes connectées) pourraient contribuer à réduire, ou du moins limiter, notre empreinte environnementale.

Il n'est pas possible de juger toutes les utilisations des appareils connectés sur la base d'un seul cas ; cependant, d'autres analyses du cycle de vie sur des objets connectés – ou plus largement, des unités fonctionnelles de l'IoT – tendent souvent à tirer des conclusions similaires, montrant que la réduction de l'impact d'un objet connecté par rapport à une unité fonctionnelle sans IoT n'est pas toujours claire ou peut être très limitée et peut entraîner des transferts d'impact, plus particulièrement l'épuisement des matières premières et la production de déchets dangereux.³

Au regard de la vitesse de développement de l'IoT et de la variété des dispositifs connectés, le nombre d'études permettant de comprendre la durabilité des solutions de mesure intelligentes – et plus généralement l'impact environnemental de l'IoT – est encore faible. Mesurer plus systématiquement les impacts environnementaux des nouveaux objets connectés permettrait de mieux évaluer et quantifier les conditions par lesquelles les objets connectés et l'IoT pourraient être un levier de réduction des impacts environnementaux, ou du moins contribuer à la réduction de ces impacts, en limitant le transfert d'impact.

3 Lelah A, Mathieux F, Brissaud D, *Contributions to eco-design of machine-to-machine product service systems: the example of waste glass collection*, 2011 ; Bonvoisin J, Lelah A, Mathieux F, Brissaud D, *An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services*, 2014 ; Ingemarsdotter, E., Diener, D., Andersson, S. et al., *Quantifying the Net Environmental Impact of Using IoT to Support Circular Strategies – The Case of Heavy-Duty Truck Tires in Sweden*, 2021)

L'IoT: un obstacle à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux ?

Actuellement, un tsunami d'objets connectés déferle sur notre quotidien et cet essor n'est pas sans conséquences sur l'environnement. L'envolée fulgurante de l'IoT soulève trois grandes questions environnementales :

1. Les impacts environnementaux de la fabrication, de l'utilisation et de la fin de vie de chaque appareil
2. Les impacts environnementaux du traitement des données (via les centres de données ou l'*edge computing*)
3. Les éventuels effets rebonds (paradoxe de Jevons) dûs à l'IoT

Focus sur l'exemple de l'ACV de la Samsung Galaxy Watch*

Une analyse du cycle de vie publiée en 2020 montre que plus de 22 substances sont utilisées pour fabriquer la Samsung Galaxy Smartwatch (46 mm). Les minéraux et métaux – magnésium, fer, cuivre, chrome, nickel, manganèse et zinc – représentent plus de 90,56 % de la concentration, tandis que les éléments non métalliques – comme le silicium et le soufre – représentent environ 8% des composés, et les substances dangereuses – comme le plomb, l'arsenic, le brome et le mercure – pour 900 ppm tout au plus.

Cette étude évalue également trois scénarios différents pour la phase d'utilisation (sur la base d'une durée de vie de 3 ans) : un scénario de consommation élevée (utilisateur avancé), un scénario d'utilisation moyenne (utilisateur régulier) et un scénario d'un utilisateur « vert », qui démontre que le scénario de consommation le plus élevé peut aller jusqu'à presque doubler l'empreinte carbone de la montre intelligente en comparaison au cas d'usage le plus sobre.

* H. Vo, J. Kattleus, S. Karki, S. Shopneel, *Life Cycle Assessment Summary Samsung Galaxy Watch*, 2020

Un aperçu des impacts environnementaux de la fabrication et de la fin de vie de chaque appareil

Lorsqu'on évalue les impacts environnementaux d'un objet connecté dans une analyse du cycle de vie, les composants relatifs à la dimension intelligente et à la connectivité sont pris en compte. Les composants qui auraient fait partie de l'objet même s'il n'avait pas été « intelligent » sont également inclus, sauf si l'objectif de l'ACV est d'évaluer les impacts environnementaux du numérique (si ces composants ne sont pas des composants électroniques).

Les composants des capteurs et de connectivité contiennent une grande variété de matières premières telles que le magnésium, le fer, le cuivre, le silicium, le chrome, le nickel, etc. ([voir notre étude de cas sur les matières premières](#)). Par exemple, une ACV de la Samsung Galaxy Watch (46 mm), montre que plus de 22 substances préoccupantes sont utilisées pour fabriquer la montre (voir exemple ci-contre)⁴.

Bien que les résultats de cette étude ne concernent qu'un seul type de montre connectée et un seul type d'appareil parmi la multitude des objets connectés, ils rappellent quels sont les principaux facteurs d'impact des objets connectés (principalement pendant la phase de fabrication), ce qui est le cas pour la plupart des terminaux utilisateurs tels que les smartphones, les ordinateurs portables, les tablettes, etc.

« L'IoT, c'est non seulement une multitude d'objets connectés, mais aussi toute l'infrastructure Internet qui permet à ces appareils de se connecter entre eux et avec le reste du monde. Cela signifie qu'il faut ajouter à l'équation des millions de serveurs, des kilomètres de câbles en cuivre et de fibres optiques, des boîtiers Internet, etc. »

L'extraction et l'utilisation de ces matières premières dans la fabrication contribue largement aux émissions de gaz à effet de serre (GES), mais aussi à la raréfaction de l'eau et des matières premières.

4 Xiuyan Li, K. Lu, *Improving sustainability with simpler alloys*, Science, 2019

De plus, les objets connectés ont pour caractéristique de disséminer dans le monde entier de minuscules quantités de nombreuses matières premières critiques qui ont été utilisées pour produire une variété de petits objets connectés. Une fois que ces matières sont extraites, traitées et utilisées pour fabriquer de petits composants, parfois sous forme d'alliages, leur taux de recyclabilité diminue considérablement (**voir notre étude de cas sur les matières premières**). Actuellement, la plupart des concepteurs d'objets connectés ne prennent pas en compte les impacts environnementaux lors de la conception de ces objets, ce qui est une occasion perdue pour les législateurs d'assurer une traçabilité et un recyclage efficaces de ces déchets électroniques diffus.

Un aperçu des impacts environnementaux du traitement des données

Une vision systémique est nécessaire

Lorsque l'on effectue une analyse du cycle de vie en

tenant compte d'une unité fonctionnelle complète, par exemple « Déclencher automatiquement l'arrosage d'une pelouse en tenant compte de l'humidité du sol et des prévisions météorologiques », il faut également inclure le temps de calcul des serveurs de prévisions météorologiques, serveurs auxquels l'objet est connecté et qui constituent son cerveau, de toute l'infrastructure de réseau, etc. au prorata temporis - c'est-à-dire le pourcentage de temps pendant lequel l'équipement est utilisé à cette fin spécifique - ou une autre méthode d'allocation telle que la performance du processeur.

L'IoT et la consommation d'énergie

L'IoT est constitué d'une multitude d'objets connectés. En additionnant tous ces appareils, il représente déjà une importante consommation d'énergie finale du numérique. Selon notre étude ACV, les objets connectés au sein de l'UE-28 en 2019 représentent environ 28 TWh de consommation électrique sur l'année.⁵ L'IoT n'est

5 Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. et Lees Perasso, E. GreenIT.fr. 2021. *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie*

Aperçu des technologies les mieux adaptées aux usages de l'IoT étudiés

Zone d'application	Application	Périphérique	ANT+	Bluetooth	Bluetooth Smart	DECT ULE	Z-Wave	ZigBee	Basé sur la norme 802.15.4-2011	EnOcean	WiFi	Ethernet WiFi	WiFi à faible puissance	GPRS	3G (UMTS)	3G+ (HSPA)	4G (LTE)	LoRa	Sigfox
Maison intelligente	Éclairage intelligent	Ampoule LED intelligente	O	N	M	O	O	O	O	O	N	O	X	X	X	X	X	X	X
		Passerelle	X	X	X	X	X	X	X	X	O	M	O	O	N	N	N	X	X
	Domotique	Capteurs	O	N	O	O	O	O	M	M	N	O	N	X	X	X	X	X	X
		Activateurs	O	N	O	O	O	O	M	M	N	O	N	X	X	X	X	X	X
		Appareil photo	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	M	X	O	O	O	X	X
		Passerelle	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	M	X	O	O	O	X	X
	Appareils intelligents	Appareil intelligent	O	N	M	O	O	O	M	M	N	O	N	X	X	X	X	X	X
		Passerelle	X	X	X	X	X	X	X	X	O	M	O	O	N	N	N	X	X
Mobilité intelligente	Routes intelligentes	Unité de bord de route	X	X	X	X	X	X	X	X	M	X	X	X	X	X	X	X	X
	Rue intelligentes	Lampadaires	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	N	N	N	M	M

■ Meilleure technologie disponible ■ Technologie possible ■ Technologie non recommandée X Technologie non appropriée

Source: Commission européenne, *ICT Impact study, Final report*, préparé par VHK et Viegand Maagoe pour la Commission européenne, juillet 2020, p.156

pas seulement une multitude d'objets connectés, mais aussi toute l'infrastructure Internet qui permet à ces appareils de se connecter les uns aux autres et au reste du monde, y compris un mélange de réseaux utilisés pour l'IoT tels que ZigBee, Bluetooth Smart, EnOcean, LoRa, Sigfox, etc. (voir tableau p. 13), qui présentent tous des caractéristiques différentes.

Cela signifie que des millions de serveurs, des kilomètres de câbles en cuivre et de fibres optiques, des boîtiers internet, des routeurs, des répéteurs, des antennes, etc. doivent être ajoutés à l'équation - et tous ces équipements doivent être fabriqués, alimentés en électricité, dans certains cas refroidis, etc.

L'évolution de la consommation d'énergie du numérique au cours des dernières années dépend fortement des nombreuses innovations en matière d'efficacité des infrastructures de réseaux et de centres de données, mais aussi du comportement des utilisateurs qui achètent davantage d'équipements numériques et les utilisent souvent. En ce sens, l'essor des objets connectés est impressionnant, car les objets connectés contribuent déjà à hauteur d'environ 10% de la consommation d'énergie finale du numérique au sein de l'UE-28.⁶

Trafic et traitement des données

Le trafic et le traitement de données sont deux aspects différents de la connectivité et leurs impacts environnementaux sont donc très différents.

La gestion des données est un aspect crucial d'un

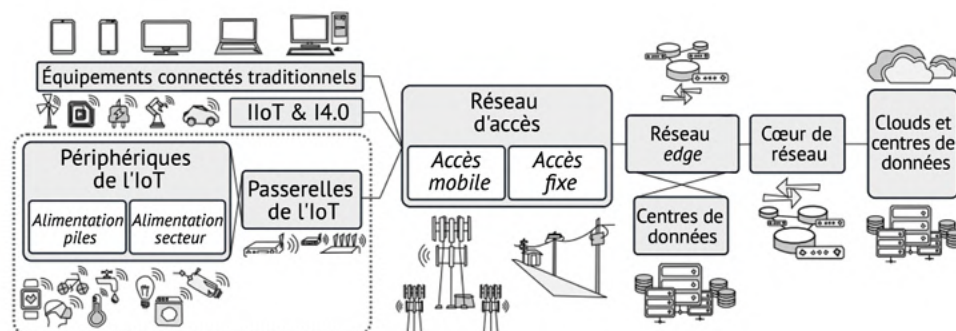
développement contrôlé et soutenable de l'IoT. L'*edge computing* permet aux différents capteurs et objets connectés de communiquer des données au point le plus proche, sans avoir recours à un centre de données. Le développement de l'*edge computing* va de paire avec le développement de l'IoT.

Si d'un côté, l'*edge computing* limite l'utilisation du réseau, de l'autre, les centres de données ont fait des progrès significatifs ces dernières années au niveau de leur impact sur la consommation grâce, par exemple, à l'essor des data centers de type *hyperscalers* et de la colocation, et à une augmentation du taux de charge qui représente un gain d'efficacité ([voir notre étude de cas sur le cloud](#)). Le taux de charge d'un centre de données étant beaucoup plus élevé que celui d'une unité de calcul périphérique, il n'est pas certain que des unités de calcul périphérique plus petites, décentralisées et éventuellement très nombreuses, soient finalement aussi efficaces que les centres de données pour limiter l'impact environnemental lié au traitement des données.

Le traitement des données, et plus encore concernant l'*edge computing*, est en constante maturation, ce qui rend difficile de prédire l'ampleur exacte de l'expansion de l'IoT et, par conséquent, son empreinte globale en termes de consommation matérielle et énergétique. Toutefois, l'engouement pour l'IoT sera probablement stimulé par la 5G au cours de la prochaine décennie ([voir notre étude de cas sur la 5G](#)). La 5G étant capable de supporter des taux de transmission de données bien

⁶ Voir les résultats de notre étude ACV : Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. et Lees Perasso, E. GreenIT.fr. 2021. *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie*

Représentation schématique du réseau de l'IoT, adaptée de Pirson et Bol, 2021.



plus élevés que les réseaux à faible puissance (LoRa, Sigfox), et la variété et la complexité des applications IoT devant augmenter, la consommation de données par l'IoT risque fort d'exploser dans les années à venir.⁷

Cependant, pour comprendre la part importante que représentent les données dans l'empreinte environnementale d'une unité fonctionnelle au sein de l'IoT, il serait nécessaire de réaliser des analyses de cycle de vie systématiques, ou du moins régulières, sur des unités fonctionnelles spécifiques dans le domaine de l'IoT.

Les potentiels effets rebonds énormes de l'IoT

L'IoT est actuellement en train de se structurer pour permettre aux objets connectés de faire partie d'un écosystème complet, composé de :

- **Terminaux** : de machine à machine (M2M), capteurs, dispositifs utilisateurs, etc.
- **Réseaux** : filaires tels que la fibre, ou sans fil tels que LoRa, NB-IoT, 5G, LTE, Bluetooth, etc.
- **Services** : Big Data, plateforme en tant que service (PaaS), recours à l'IA, etc.

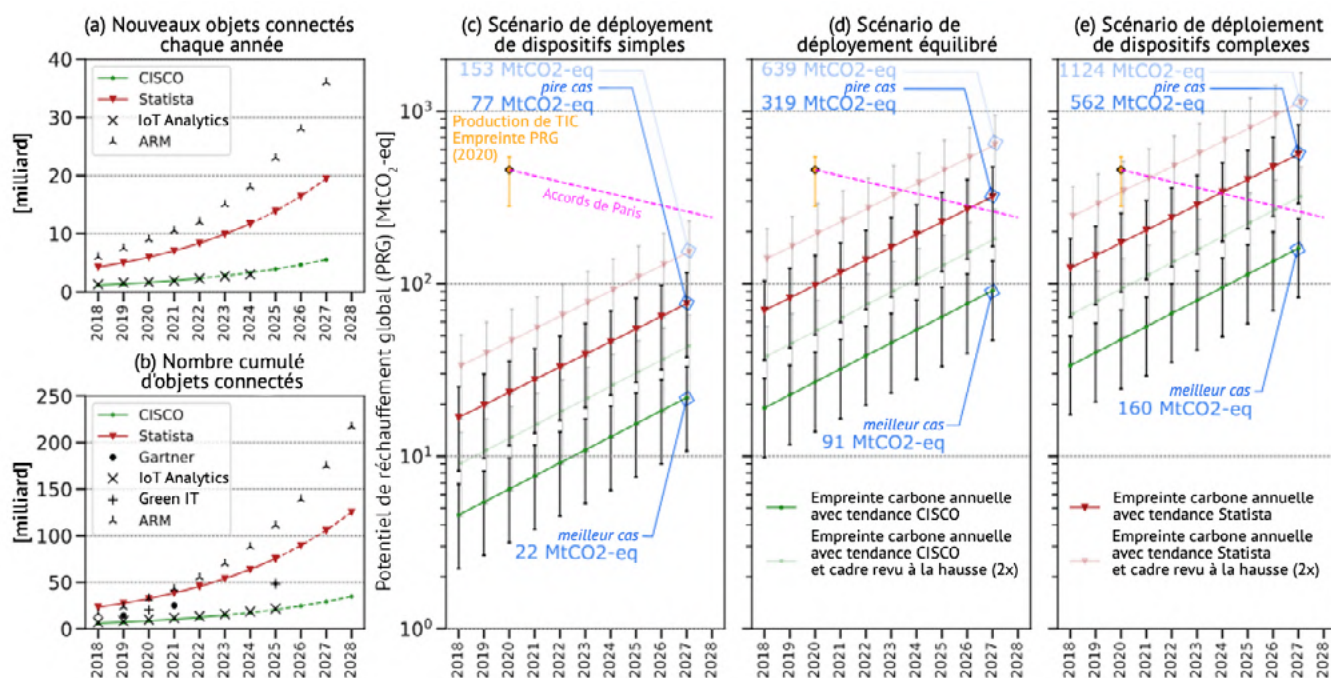
Une étude très récente soumise à examen en 2021⁸ évaluant l'empreinte carbone intrinsèque des dispositifs IoT, constate que leur hétérogénéité rend très difficile l'estimation de l'empreinte carbone absolue de la production de dispositifs IoT, avec des résultats mondiaux allant de 22 à 1124 MtCO₂-eq/an en 2027 selon les scénarios de déploiement (voir figure ci-dessous) - à titre de comparaison, l'empreinte carbone mondiale de la production de TIC en 2020 se situe entre 281 et 543 MtCO₂-eq.⁹

7 McKinsey Global Institute, *Connected world: An evolution in connectivity beyond the 5G revolution*, Février 2020, p.36

8 Pirson T., Bol D., *Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach*, 2021

9 Freitag C., Berners-Lee M., Widdicks K., Knowles B., Blair G., and Friday A., *The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations*, 2021

Déploiement annuel de nouveaux objets connectés, schéma issu de Pirson et Bol, 2021



Source: *Yearly deployment of new IoT devices*, diagram from Pirson & Bol, 2021. « (a) Déploiement annuel de nouveaux objets connectés calculé sur la base des tendances de (b) qui représente le nombre cumulé d'objets connectés, selon les études de marché et les prédictions les plus connues. Les lignes en pointillés correspondent à une extrapolation personnelle [des auteurs]. (c-e) Analyse macroscopique de l'empreinte carbone annuelle générée par la production d'objets connectés pour différents scénarios de déploiement massif de l'IoT, sur la base de (a). Les courbes ombrées montrent les résultats si [le système des auteurs] est révisé à la hausse par un facteur 2x pour tenir compte de l'erreur de troncature. (c) Le scénario 1 de déploiement de dispositifs simples considère une majorité de dispositifs simples dans le déploiement, c'est-à-dire $\alpha=90\%$ d'équipement léger. (d) le scénario 2 de déploiement équilibré considère un mélange équilibré de dispositifs simples et complexes, c'est-à-dire $\alpha=50\%$, (e) le scénario 3 de déploiement de dispositifs complexes considère une majorité de dispositifs complexes, c'est-à-dire $\alpha=10\%$. »

Avis d'expert



Laura Draetta est une sociologue de l'environnement. Elle a d'abord obtenu un doctorat à l'École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS). Elle a été professeur associé à Télécom Paris pendant 15 ans et mène simultanément ses recherches à l'Institut interdisciplinaire de

l'Innovation (unité mixte de recherche du CNRS). Elle est co-titulaire de la Chaire RD-ID créée à Telecom Paris en partenariat avec Thales pour investiguer le thème de l'identité numérique responsable. Ses recherches et son enseignement portent sur les interconnexions entre la technologie, l'environnement et la société. Elle s'intéresse particulièrement à l'innovation responsable et aux controverses publiques liées aux innovations numériques (RFID, compteurs connectés, reconnaissance faciale, 5G). Depuis 2019, elle est chargée de recherche à l'Université de Californie Berkeley, au Centre Science, Technologie, Médecine et Société. Elle est également experte en éthique auprès de la Commission européenne et a été désignée par l'ANSESⁱ pour participer à l'expertise collective sur les compteurs intelligents et la 5G.

Dans le cadre du projet Trace de TIC : Technologies de l'information et gestion des déchetsⁱⁱ, vous avez travaillé sur un des premiers exemples d'objets connectés, les étiquettes RFID. En quoi consistait ce projet ?

Nous nous sommes intéressés au paradoxe qui caractérise les étiquettes RFID et leur utilisation spécifique dans la gestion des déchets : le risque de générer de nouveaux déchets alors que l'objectif est de mieux gérer les déchets existants. L'étiquette RFID, presque invisible, est souvent indissociable de l'objet dans lequel elle est incorporée. Lorsque ce dernier arrive en fin de vie, il risque d'être éliminé avec l'étiquette RFID qui l'identifie. Dans ce cas, l'étiquette devient à

son tour un déchet. Les étiquettes RFID posent le problème de leur recyclabilité en raison de leur petite taille (difficile à voir) et de la difficulté de séparer les étiquettes des objets qui les intègrent. Dans les bouteilles en verre par exemple, l'étiquette RFID est fondue dans la masse, ce qui la rend impossible à récupérer.

Ce paradoxe à l'origine du projet est devenu un enjeu croissant par rapport à l'Internet des Objets, qui envisage une société où tout objet peut être identifié à distance.

La question se posait tant du point de vue de l'approvisionnement en matières premières que de leur valorisation.

Le projet a également révélé un manque d'intérêt assez important pour la question chez les fabricants. La tendance des industriels était de mettre en avant les forces de la RFID plutôt que ses faiblesses et de transférer le problème de son impact environnemental à leurs clients. Les scientifiques étaient plus sensibles à la question et s'intéressaient, par exemple, à la dématérialisation des étiquettes RFID (étiquettes sans antenne ni puce). Ce projet a abouti à la publication d'un livre en 2012ⁱⁱⁱ et à la coordination d'un groupe de travail international sur la traçabilité numérique avec toutes les parties prenantes.^{iv}

Vous travaillez également sur les controverses liées aux technologies intelligentes. Pourquoi - comment - une controverse surgit-elle ? Comment y remédier ?

La controverse entourant une nouvelle technologie est en fait un mode d'évaluation technologique publique et informelle qui est complémentaire de l'évaluation techno-scientifique formelle fournie par l'expertise institutionnelle. Elle soulève de nouveaux doutes et préoccupations qui élargissent ●●●

ⁱ <https://www.anses.fr/en/content/presentation-anses> (dernière consultation : 28/06/2021).

ⁱⁱ En français, Trace de TIC <https://journals.openedition.org/terminal/18012?lang=fr> (dernière consultation : 28/06/2021). Ce projet de recherche interdisciplinaire était basé sur une collaboration entre des sociologues de Télécom Paris (Campus Sophia Antipolis) et des chercheurs en génie industriel de Mines Saint-Etienne (Campus G. Charpak Provence), et il était soutenu par l'ADEME. Le projet s'est intéressé au potentiel de la technologie RFID dans la gestion des déchets et à sa viabilité écologique.

ⁱⁱⁱ DRAETTA Laura, DELANOË Alexandre, *RFID, une technologie controversée : ethnographie de la construction sociale du risque*, Collection Mondialisation, Hommes et Sociétés, éd. Lavoisier, 2012

^{iv} Ce groupe de travail, qui était un thinktank au sein de l'Observatoire de l'innovation responsable, comprenait des fabricants, des régulateurs et des universitaires du secteur des TIC. Les membres de ce groupe de réflexion ont travaillé sur la manière dont cette technologie RFID prometteuse peut être déployée de manière responsable pour répondre aux problèmes de confidentialité, de santé et d'environnement. Le groupe de travail a tenu un *colloque à Paris* et a produit un *document de synthèse*.

... le champ des représentations de la technologie proposée.

Nous entendons souvent l'appel à « éduquer plus ». Mais cette image de « manque de connaissances » est inappropriée. Il a été démontré, données à l'appui^v, que les personnes concernées par une nouvelle technologie sont souvent parfaitement informées et exposées à la communication techno-scientifique. L'éducation n'est pas nécessairement le remède pour arrêter ou prévenir les controverses, car elle risque de répondre à des questions qui n'ont pas été posées et de ne pas répondre aux bonnes questions.

Sans être une solution miracle, réunir toutes les parties prenantes autour d'une même table est déjà un progrès. La difficulté réside dans l'identification des parties prenantes pertinentes, et c'est souvent là que les choses se gâtent, car elle se fait du point de vue des promoteurs, qu'ils soient industriels ou institutionnels. Souvent, les citoyens ne sont pas vus comme tels, mais uniquement comme des consommateurs, et sont laissés de côté.

Ignorer une controverse a de graves conséquences. Elle crée une méfiance à l'égard des promoteurs des nouvelles technologies. De plus, les questions qui émergent au cours d'une controverse reviendront si elles restent sans réponse et alimenteront une nouvelle controverse. La controverse est une question sans réponse.

^v Bucchi M. & Neresini F., 2002, *Biotech remains unloved by the more informed*. Nature, 416: 261.
Raimi K. & Carrico A., 2016, *Understanding and beliefs about smart energy technology*. Energy Research & Social Science, 12: 68-74.

L'étude souligne que ces tendances sont en contradiction avec l'accord de Paris, même dans le cas du déploiement du scénario des dispositifs simples (« *susceptible de générer des préoccupations après 2030*¹⁰ »). Cette même étude souligne que l'IoT réunit plusieurs conditions qui favorisent le développement d'effets rebonds, créant ainsi « *un terrain fertile pour les effets rebonds* »¹¹.

.....

10 Pirson T., Bol D., *Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach*, 2021, p.12

11 Ibid., p.13

« Ce paradoxe [de plus d'impacts environnementaux créés par une technologie utilisée pour limiter les impacts environnementaux] est devenu un problème croissant par rapport à l'Internet des Objets, qui envisage une société où tout objet peut être identifié à distance. »

Laura Draetta

L'avenir qui se dessine pour l'IoT est donc celui d'une accélération impressionnante de la production et de l'utilisation des objets connectés, avec pour conséquence une augmentation des impacts environnementaux qui y sont associés. Comme nous l'avons vu, cette multiplication des impacts provient, d'une part, des impacts liés à la fabrication des objets connectés et, d'autre part, des impacts liés à l'utilisation de ces objets connectés, mais aussi du traitement des données et l'utilisation de l'infrastructure réseau et des appareils qui doivent être ajoutés à l'équation

Conclusion

L'IoT devrait connaître un essor considérable dans les années à venir, mais les avantages qu'il promet ne seront pas exempts de lourdes conséquences pour l'environnement, qui sont encore négligées. En attendant le peu d'analyses du cycle de vie des objets connectés soulignent le risque d'aggravation de la situation environnementale actuelle; elles se concluent souvent en affirmant la nécessité impérieuse de réaliser plus d'analyses du cycle de vie afin de garantir que les processus décisionnels se concentrent sur les avantages de l'IoT sans transférer les impacts et ainsi d'éviter que les réductions d'impacts potentiels soient contrebalancées par les impacts négatifs. Il est donc urgent de prendre en compte l'ensemble des avantages et des coûts environnementaux dans une approche multicritère et de limiter les transferts d'impact lors de la conception d'un objet connecté respectueux de l'environnement.

Alors que de plus en plus d'objets connectés sont fabriqués, chaque appareil contribue à la dispersion de certains des matériaux utilisés pour fabriquer ces appareils, qui ne sont souvent pas recyclables¹² (**[pour en savoir plus, voir nos études de cas sur les matières premières, les déchets électroniques et l'économie circulaire](#)**). De plus, l'augmentation considérable attendue du nombre d'objets connectés et du trafic de données souligne la nécessité de fixer des priorités et des limites pour s'assurer que l'IoT ne sera pas un obstacle à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux, comme le réchauffement climatique ; que l'IoT permettra de rester en conformité avec l'accord de Paris et non en conflit avec ; mais aussi de limiter l'épuisement des ressources, qui sont critiques et limitées ; et enfin, de répondre aux enjeux de santé et de souveraineté géopolitique.

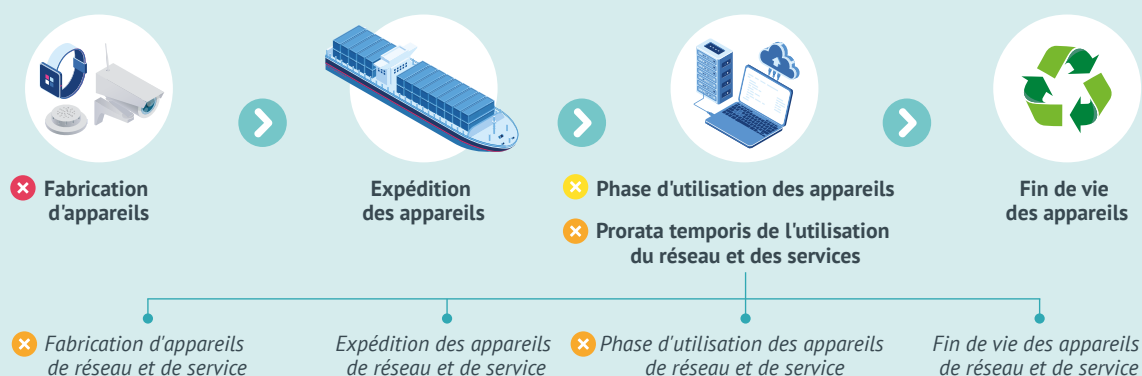
Actuellement, la plupart des concepteurs d'objets connectés ne prennent pas en compte l'impact environnemental lors de la conception des objets - ou du moins pas de manière systématique - même lorsque ces objets sont destinés à réduire l'empreinte environnementale de l'humanité. L'écoconception peut être un premier prérequis pour limiter les impacts environnementaux de l'IoT ; toutefois, au regard de la montée exponentielle de l'IoT, même si l'écoconception des objets connectés est une nécessité, sera-t-elle suffisante pour limiter le

changement climatique et l'épuisement des matières premières critiques ?

Notre section de recommandations présente quelques pistes pour une évolution de l'IoT compatible avec l'Accord de Paris et le Green Deal européen. ■

¹² <https://www.environnement-magazine.fr/recyclage/article/2015/12/01/46697/quelle-fin-vie-pour-les-puces-rfid> dernière consultation : 04/06/2021 ; <https://staceyoniot.com/sustainability-is-the-elephant-in-the-iot-room/> dernière consultation : 08/07/2021

Vision simplifiée des impacts environnementaux liées à l'IoT



Recommandations pour une évolution numérique compatible avec le Green Deal

En ce qui concerne l'IoT, il est **obligatoire d'éco-concevoir les objets connectés dans une approche systémique, en tenant compte de la manière dont ils sont fabriqués et dont ils interagissent avec leur environnement**. Les objets connectés sont prioritairement destinés à des usages critiques, comme la médecine, et limités aux cas où leurs avantages globaux sont prouvés, afin de limiter leur empreinte environnementale. Pour garantir ce gain environnemental, une analyse multicritère du cycle de vie est réalisée pour vérifier le bénéfice environnemental global dans une comparaison coûts-avantages ; cette analyse est effectuée systématiquement avant que la solution puisse être présentée comme respectueuse de l'environnement et ces informations sont fournies aux utilisateurs.

Le diagnostic et le suivi de l'efficacité se fait par un modèle économique qui a été conçu pour promouvoir une approche mutualisée des services de diagnostic, dans lequel ces-mêmes capteurs sont utilisés à différents endroits pendant une période donnée et sont déplacés. Cela limite le risque de désintérêt pour l'utilisation des capteurs qui survient après un certain temps et permet de les réutiliser ailleurs une fois les bonnes pratiques mises en place, réduisant ainsi fortement leur impact environnemental. Un exemple de cela est un cas où l'IoT, qui était utilisé pour assurer la sécurité sur un chantier de construction et a permis de réduire l'épuisement des matières premières de 60 %, les émissions de gaz à

effet de serre de 67 % et la consommation d'eau de 75 % grâce à la mutualisation et une approche par un modèle circulaire.ⁱ Un autre aspect positif de ce modèle est qu'il peut être utilisé aussi bien pour le B2C que pour le B2B, et que lorsqu'il est appliqué au B2C, il permet de limiter la fracture numérique et la perception de la surveillance comme une intrusion dans la vie privée.

Les financements européens soutiennent la conception d'innovations s'appuyant à la fois sur des high-tech et des low-tech, respectueuses de l'environnement : celles-ci utilisent le meilleur des deux approches pour éco-concevoir des solutions offrant la plus grande sobriété. L'innovation disruptive comprend non seulement les innovations techniques mais aussi les modèles innovants qui permettent de développer des approches coopératives et résilientes tout en renforçant l'économie circulaire en Europe, avec un impact positif sur la souveraineté de l'Europe ainsi que sur le climat.

Les interfaces de communication (API) des objets connectés sont obligatoirement en opensource pour permettre aux utilisateurs de conserver l'usage de leurs objets connectés même si le service n'est plus supporté par le fabricant d'origine, et pour fournir des mises à jour logicielles opensources.

Afin d'assurer une connaissance claire et actualisée à des fins de prise de décision stratégique et politique, des études ACV multicritères sont régulièrement financées à l'échelle européenne pour couvrir le marché de l'IoT, à la fois au global et en couvrant des catégories spécifiques d'objets connectés, et en premier lieu les plus fabriqués et les plus lourds.

ⁱ Cas d'utilisation de l'innovation ELA par une PME française, issu de l'opération GreenConcept de l'ADEME, entre 2017 et 2019 : http://www.greenconcept-innovation.fr/wp-content/uploads/2020/02/ELA_INNOVATION_fiche_Ademe_GreenConcept2409.pdf

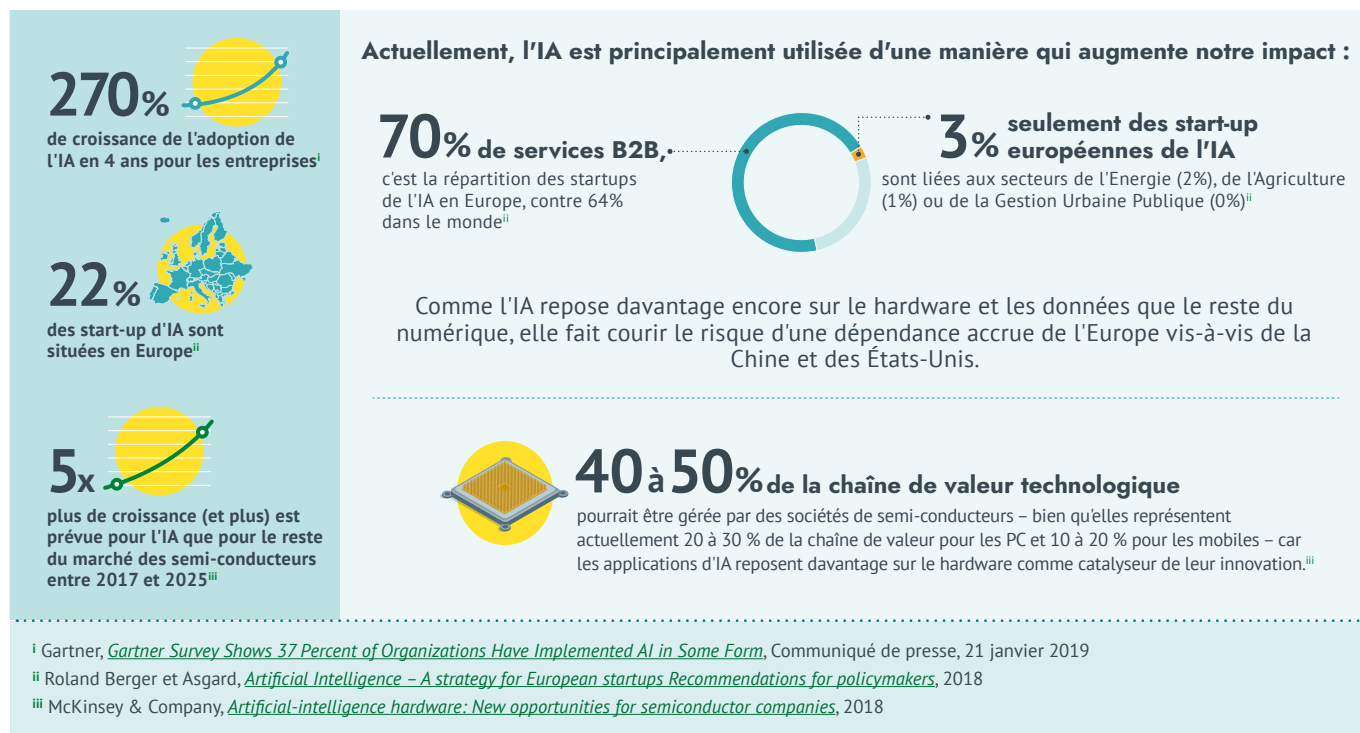
L'intelligence artificielle

Sommaire

Les clés pour comprendre	page 21
Résumé de l'étude de cas	page 21
Définitions	page 22
Qu'est-ce que l'intelligence artificielle	page 22
Notions principales	page 22
Quelques exemples non exhaustifs d'utilisation de l'IA	page 23
KDOG vs LYNA utilisé pour la détection du cancer du sein	page 23
Enjeux environnementaux liés à l'utilisation de l'IA	page 24
L'intelligence artificielle : un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux ?	page 24
L'intelligence artificielle : un obstacle à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux ?	page 25
1. L'acquisition des données	page 26
2. Le traitement des données pour les rendre intelligibles pour l'IA	page 27
3. L'exécution et test de l'algorithme	page 27
Avis d'expert	page 29
4. La présentation des résultats	page 30
Conclusion	page 30
Recommandations pour une évolution du numérique compatible avec le Green Deal	page 30



Les clés pour comprendre



Résumé de l'étude de cas

Cette étude de cas donne un aperçu général de ce qu'est l'intelligence artificielle (IA), des possibilités offertes par les récents progrès de l'IA et de la façon dont elle peut être un levier ou un obstacle pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux, sur la base de la littérature disponible. Tout d'abord, nous fournirons quelques définitions qui donneront une meilleure idée de ce que recouvre l'IA en termes d'usages actuels pour nous aider à comprendre ce qu'est l'IA et quelles sont ses cas d'applications aujourd'hui. Ensuite nous explorerons la question brûlante : « L'intelligence artificielle est-elle un levier ou un frein pour la réduction des impacts environnementaux ? » Nous explorerons parallèlement de quelle manière l'IA contribue actuellement à la réduction des impacts environnementaux, bien que des développements et des recherches supplémentaires soient nécessaires pour qu'elle puisse apporter une contribution significative, car les cas actuels sont peu nombreux et les données sont insuffisantes pour mesurer le bénéfice global

pour le climat et l'environnement. Nous examinerons également de plus près le processus de fonctionnement de l'IA afin d'identifier en quoi elle contribue à impacter l'environnement et où ces impacts varient le plus.

Cela nous permettra de faire deux observations principales sur l'impact environnemental de l'IA. Premièrement, l'utilisation croissante des équipements des utilisateurs finaux ou des capteurs représente un défi toujours plus grand vis-à-vis des efforts nécessaires pour limiter les effets rebonds et donc les impacts environnementaux des cas d'usage de l'IA dans les années à venir. Deuxièmement, une augmentation de la capacité de calcul pourrait limiter les émissions de gaz à effet de serre pendant le processus de formation (*machine-learning*), mais augmenter l'empreinte environnementale du matériel utilisé par l'IA, car le matériel précédemment utilisé mais moins puissant devient donc obsolète encore plus rapidement.

Cela met également en lumière la nécessité d'un plus grand encadrement de l'IA afin de garantir que l'UE se saisisse des opportunités de frugalité et de souveraineté des données, ce qui est nécessaire pour éviter une plus grande augmentation de ses impacts environnementaux.

Définitions

La notion d'intelligence artificielle entre dans le langage courant, en tant que technologie profondément disruptive, au moment même où elle s'apprête à imprégner notre vie quotidienne, des loisirs au monde professionnel, en passant par les achats en ligne.

Qu'est-ce l'intelligence artificielle ?

L'intelligence artificielle (IA) est un concept générique désignant « *toute machine ou algorithme capable d'observer son environnement, d'apprendre et, sur la base des connaissances et de l'expérience acquises, d'entreprendre des actions intelligentes ou de prendre des décisions.* »¹ De cette façon, l'IA imite les capacités de l'esprit humain et la façon dont les humains interagissent avec leur environnement.

Les premiers développements méthodologiques en intelligence artificielle remontent aux années 1970, avec le développement des systèmes experts.² Il convient de noter que les systèmes experts, malgré les investissements considérables consentis par plusieurs industries, n'ont jamais connu de succès commercial et ont donc été abandonnés à la fin des années 1970. S'en est suivie une période d'« hiver de l'IA », et ce n'est que dans les années 2000 que la recherche a repris. Depuis lors, des avancées significatives ont été réalisées par le *machine-learning* (ML). Ces avancées ont été rendues possibles par la disponibilité croissante des données et de la puissance de calcul. D'énormes succès commerciaux ont été obtenus grâce aux systèmes de recommandation, en particulier dans des domaines tels que l'e-commerce et les publicités. D'autres succès ont été enregistrés dans des domaines industriels tels que la visualisation par ordinateur et la maintenance prédictive.

Ces progrès stupéfiants ne sont probablement que le début de ce que l'IA devrait être capable de faire à l'avenir : le développement de l'IoT ([voir notre étude de cas sur l'IoT et les objets connectés](#)), les technologies de capteurs et les volumes de données utilisés pour entraîner les algorithmes vont stimuler les capacités de l'IA et de ses cas d'usage dans la société.

Notions principales

Pour mieux comprendre les concepts qui sous-tendent l'intelligence artificielle, voici une brève explication des principales notions :

- **Machine-learning (ML)** : Le *machine-learning* est un sous-ensemble de l'IA qui lui permet d'apprendre par elle-même, puisqu'elle se reprogramme tout au long du processus d'apprentissage. Il s'agit d'un changement de paradigme majeur : alors que la programmation classique utilise des règles en entrée pour fournir une réponse en sortie, l'apprentissage automatique utilise des données en entrée pour fournir une réponse en sortie. Ici, les systèmes utilisant l'apprentissage automatique sont formés plutôt que programmés explicitement. L'apprentissage automatique est mieux à même de travailler avec des données structurées et étiquetées et d'en tirer des enseignements, mais il a encore du mal avec les données non structurées et non étiquetées.
- **Réseau neuronal** : Les réseaux neuronaux sont la colonne vertébrale des algorithmes d'apprentissage profond. Leur structure et leur nom sont inspirés de la façon dont les neurones biologiques interagissent par signaux dans le cerveau humain. Ils fonctionnent en plusieurs couches successives. Une fois que les réseaux neuronaux sont formés et réglés avec précision, ils peuvent traiter les données à une vitesse extrêmement élevée pour fournir des résultats.
- **Apprentissage profond (deep learning)** : « profond » fait référence au nombre de couches dans un réseau neuronal. L'apprentissage profond peut ingérer et traiter aussi bien des données structurées et étiquetées que des données non structurées et non étiquetées.
- **Données** : Informations quantitatives ou qualitatives, principalement utilisées pour des calculs, des interprétations et la compréhension d'un fait. Les données sont à la base du *machine learning*.
- **Big data** : Sets de données à plus grande échelle, impliquant des données provenant de sources multiples, en grande quantité, souvent en temps réel. L'utilisation des progrès récents des technologies de réseau et des capteurs intelligents pour la collecte de données permet au *big data* d'alimenter le *deep learning*.

1 Commission européenne, *Intelligence artificielle - une perspective européenne*, Centre commun de recherche, 2018

2 Russell, Stuart ; Norvig, Peter. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 1995

Quelques exemples non exhaustifs d'applications de l'IA

Il existe aujourd'hui de nombreuses formes d'applications de l'IA. Certaines d'entre elles ne nécessitent pas une IA très avancée, d'autres sont particulièrement disruptives sur le plan technologique. Voici quelques exemples non exhaustifs de ce que l'IA peut offrir aujourd'hui³ :

- **Reconnaissance de l'écriture manuscrite** : Capacité de reconnaître et de transcrire numériquement l'écriture manuscrite. Cette application de l'IA a été l'une des premières applications modernes de l'IA à la fin des années 1990. Aujourd'hui, cette application est couramment utilisée dans le secteur bancaire.
- **Reconnaissance vocale** : Capacité de reconnaître la parole et de la transcrire en texte par des moyens numériques. La capacité de reconnaissance vocale pilote les logiciels de dictée sur divers terminaux, des smartphones aux enceintes connectées, en passant par les ordinateurs équipés de logiciels de dictée, les GPS ou les télécommandes vocales des téléviseurs. Le traitement du langage naturel est généralement l'étape qui suit la reconnaissance vocale.
- **Natural language processing (NLP)** : Capacité à comprendre, interpréter et générer du texte humain. Le NLP est utilisé dans les assistants numériques tels que les enceintes connectées (par exemple Alexa) ou les assistants numériques des smartphones (par exemple Siri). Il peut également être utilisé dans certains chatbots. Certains NLP, utilisés par exemple dans l'analyse des commentaires sur l'expérience client, reposent sur l'analyse des sentiments pour détecter l'humeur et les qualités subjectives du langage.
- **Reconnaissance d'image** : Capacité de l'IA à identifier et à classer toute valeur (items, actions, personnes) sur la base d'une image. La reconnaissance d'images est principalement utilisée pour des tâches basées sur des machines, telles que l'analyse et l'octroi d'accès. On trouve des exemples de reconnaissance d'images dans la reconnaissance d'identité (visage et empreintes numériques), dans les voitures et robots autonomes, ou dans l'analyse médicale et financière.
- **Recommandation en temps réel** : Capacité de traiter les données et de fournir des recommandations en fonction des préférences de l'utilisateur, des consultations précédentes de l'utilisateur ou de tout autre paramètre. Elle est couramment utilisée pour proposer du contenu

similaire ou attrayant, des articles proposés à l'achat, ou tout autre type d'information liée à des demandes, besoins ou intérêts potentiels.

- **Systèmes de covoiturage dynamiques** : Système faisant correspondre plusieurs variables (distance, temps, qualité du service, etc.), qui peut être basé sur l'IA pour fournir le service le plus optimal, principalement pour le covoiturage. Ce système est également utilisé pour les courses courtes et les livraisons, comme la livraison de nourriture.
- **Robots domestiques basés sur l'IA** : Dispositifs robotiques utilisés à la maison qui font appel à l'intelligence artificielle pour simplifier et optimiser des tâches spécifiques. Ils apprennent généralement de l'endroit où ils opèrent en fonction de leurs caractéristiques et de leur niveau de technologie. Les robots de surveillance et les aspirateurs sont un exemple majeur de robots domestiques.

KDOG vs LYNA pour la détection du cancer du sein

Pour limiter les impacts environnementaux, l'IA doit être utilisée de façon complémentaire aux options *low-tech* existantes. Par exemple, le KDOG peut être utilisé de manière aléatoire pour la détection du cancer du sein, puis le LYNA utilisé de manière plus précise pour détecter les métastases nodales du cancer du sein :

- **Le KDOG est une méthode expérimentale de dépistage du cancer du sein** qui s'appuie sur l'extraordinaire sens de l'odorat du chien : les chiens sont entraînés à détecter le cancer en reniflant des compresses imbibées de sueur. Cette méthode simple est peu coûteuse, non invasive et indolore. Avec seulement 6 mois d'entraînement, les chiens sont capables d'atteindre un taux de réussite de plus de 90% au premier passage et de 100% au deuxième passage.
- **LYNA (Lymph Node Assistant) est un assistant médical expérimental basé sur l'IA de Google**, formé à la détection de tumeurs par reconnaissance d'images. Lors de tests, il a atteint une précision de 99,3 %. Même s'il n'est pas encore parfait, LYNA a obtenu de meilleures performances que les pathologistes dans les tests. Les prochaines investigations montreront si l'algorithme améliore la précision du diagnostic.

³ Les exemples d'usages permis par l'IA évoluent rapidement et il serait ardu d'en dresser la liste. Nous avons préféré ici proposer une sélection des cas les plus fréquents à ce jour, plutôt que de tenter d'en faire une liste exhaustive ou quasi exhaustive, qui serait de toute façon peu lisible et rapidement obsolète.

► **Technologies de pilotage automatique** : Système qui utilise des variables multiples (technologie GPS, reconnaissance d'image, technologie d'évitement des collisions, robotique et traitement du langage naturel) pour guider un moteur, comme dans les avions et les voitures. Les technologies de pilotage automatique existaient auparavant, mais l'IA permet aux moteurs de pilotage automatique d'aller plus loin, par exemple à des fins militaires. Les technologies de pilotage automatique dépendent fortement de la qualité des capteurs et du temps de réponse.

► **Maintenance prédictive** : Capacité à anticiper la maintenance et plus précisément sur quelle pièce et comment elle doit être effectuée, en se basant sur les données collectées sur les conditions et les tâches effectuées, et sur *le deep learning* à partir des défaillances précédentes.

Actuellement en 2021, nous pouvons diviser les capacités d'intelligence artificielle en trois catégories, « suffisantes », « en cours de recherche » et « fictives ». Les capacités suffisantes sont déjà utilisées pour les applications d'e-commerce, avec des succès commerciaux existants tels que les systèmes de ciblage publicitaire ou les systèmes de recommandation sur des plateformes bien connues comme Amazon ou Netflix. Pour ces applications « suffisantes », des performances telles que 92 à 95 % de précision ou de satisfaction du client sont acceptables compte tenu de l'objectif (recommandation d'un film, d'une pizzeria ou d'une chemise). Notez qu'une telle gamme de performances « suffisantes » est inacceptable pour des objectifs médicaux, tels que la prédiction d'un accident de santé, qui nécessiterait des performances « essentielles à la réussite » (99,9%, ou 99,99%, etc.).

La maintenance prédictive est un domaine dans lequel l'intelligence artificielle a fait beaucoup de progrès et atteint actuellement le stade « suffisamment bon » pour être commercialisé.

Les applications liées à la perception humaine, telles que la reconnaissance d'images, l'analyse audio et vidéo, ou la reconnaissance de l'écriture manuscrite progressent également vers la catégorie « suffisamment bonne ». La plupart d'entre elles existent sous forme d'algorithmes open source.

Actuellement, plus les capacités d'intelligence artificielle sont complexes, moins elles sont opérationnelles. Par exemple, la compréhension du langage naturel (NLP) a déjà fait d'énormes progrès au cours de la der-

nière décennie grâce au *deep learning* et au renforcement des processus d'apprentissage mais il est toujours nécessaire de traiter d'énormes quantités de données pour obtenir de meilleurs résultats

Aujourd'hui, des technologies et des capacités d'intelligence artificielle plus complexes sont en cours de développement, telles que le calcul quantique et les robots sociaux, mais ces progrès sont encore trop récents pour prévoir comment l'IA évoluera à l'avenir.

Les enjeux environnementaux liés à l'utilisation de l'IA

De nombreuses applications potentielles de l'IA commencent tout juste à émerger. Cependant, elles ont déjà un impact significatif sur les capacités déployées en matière d'informatique et de technologie (IoT, centres de données, puissance de calcul, etc.). Cet impact est synonyme de promesses alléchantes pour la recherche et les acteurs économiques, mais contribue déjà à augmenter l'impact environnemental du numérique. Dans certains cas, l'IA peut être utilisée à des fins d'optimisation, permettant de réduire encore la consommation de ressources, d'optimiser les distances parcourues pour les réduire au maximum, ou encore prévenir les pannes en effectuant une maintenance prédictive.

L'IA apparaît de plus en plus comme un outil, mais sera-t-elle un levier ou un obstacle à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux ?

L'intelligence artificielle : un levier pour atteindre les objectifs de la réduction des impacts environnementaux ?

Dans certains cas, l'IA peut être utilisée comme un levier d'optimisation, permettant de réduire l'impact environnemental de l'utilisation de certaines machines ou produits au sein d'industries spécifiques.

C'est le cas de la maintenance prédictive, qui a beaucoup progressé ces dernières années, notamment grâce à la connaissance acquise par l'IA des différents types de

pannes et comment les anticiper. La maintenance prédictive est désormais capable d'augmenter la durée d'utilisation des équipements et des composants, en permettant d'intervenir avant la casse.⁴ Elle peut réduire les déchets, grâce à de meilleures conditions d'utilisation des machines, et réduire les coûts de maintenance, puisque celle-ci est de plus en plus souvent effectuée uniquement lorsqu'elle est prédite, et uniquement sur les pièces présentant des dysfonctionnements possibles. Cependant, à ce jour, nous n'avons rien trouvé dans la littérature disponible qui nous permette de comparer les avantages/inconvénients en matière d'impacts environnementaux pour une étude de cas plus approfondie.

Un autre exemple d'optimisation permise par l'IA est le refroidissement des centres de données. Google a révélé en 2016 avoir réussi à déléguer le contrôle du refroidissement de plusieurs de ses centres de données à DeepMind, un algorithme d'IA, réduisant ainsi de 40 % la facture de refroidissement de ses centres de données.⁵ Alors que la consommation d'énergie par les centres de données était un problème pressant pour l'industrie technologique au cours des dernières décennies, des efforts importants ont été faits pour améliorer leur efficacité énergétique. Le refroidissement ne représente plus qu'une faible part de la consommation d'énergie d'un centre de données (**voir notre étude de cas sur le cloud**). Alors que les besoins de calcul, le trafic sur le réseau et la capacité de stockage ont explosé ces dernières années, l'efficacité énergétique des centres de données a été multipliée par 4, ce qui revient à une augmentation de la consommation des centres de données de seulement 6 % en 8 ans.⁶

Dans un document publié en 2019 par la Fondation Ellen MacArthur et Google, avec la recherche et le soutien de McKinsey & Company, une première exploration a été ébauchée à la croisée des mégatendances émergentes, de l'IA et de l'économie circulaire.⁷ Ce document présente les prémices d'une identification des cas d'usage intersectoriels de l'intelligence artificielle dans l'économie circulaire. Cependant, les études de cas ne sont pas suffisamment détaillées pour comparer les avantages et les inconvénients sur les impacts environnementaux à ce stade.⁸

Parmi les évolutions à venir de l'IA, les acteurs de l'énergie prévoient son utilisation dans l'optimisation de l'intégration des technologies d'énergies renouvelables variables (ERV) dans les systèmes électriques. L'IA est utilisée ou testée pour l'intégration des ERV afin d'améliorer la prévision de la production d'énergie renouvelable, maintenir la stabilité et la fiabilité du réseau, améliorer la prévision de la demande, optimiser les opérations de stockage d'énergie, etc.⁹

Le rôle de l'IA évolue progressivement, passant d'un outil de facilitation et d'optimisation à un contributeur central à la prise de décision intelligente et rapide. Alors que cette métamorphose est en cours, est-il possible pour l'IA d'être à la fois un catalyseur du progrès technologique et économique, tout en étant respectueuse de l'environnement et en contribuant à atteindre les objectifs climatiques de l'Accord de Paris ?

L'intelligence artificielle : un frein à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux ?

Pour comprendre si l'IA est un levier ou un frein à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux, il est nécessaire de comprendre le processus en cours lorsqu'un algorithme d'IA est utilisé.

Les applications de l'IA peuvent impliquer des types d'équipement complètement différents, mais il est impossible d'avoir une approche d'analyse du cycle de vie qui quantifie les impacts environnementaux globaux de l'IA.

Toutefois, en comprenant le processus général suivi par l'IA, il est possible de se faire une idée des domaines où les impacts environnementaux de l'IA peuvent varier le plus.

4 Bosch Connected World Blog, *Industry 4.0 : Les cas d'utilisation de la maintenance prédictive en détail* (dernière consultation 02/03/2021) ; IA Multiple, *Predictive vs Preventive: In-depth Maintenance Guide*, 2021, (dernière consultation le 02/03/2021)

5 DeepMind, *DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%*, 2016, (dernière consultation, 02/03/2021)

6 Koomey, Jonathan et al., *Recalibrating global data center energy-use estimates*, Science 28 février 2020, (dernière consultation le 02/03/2021)

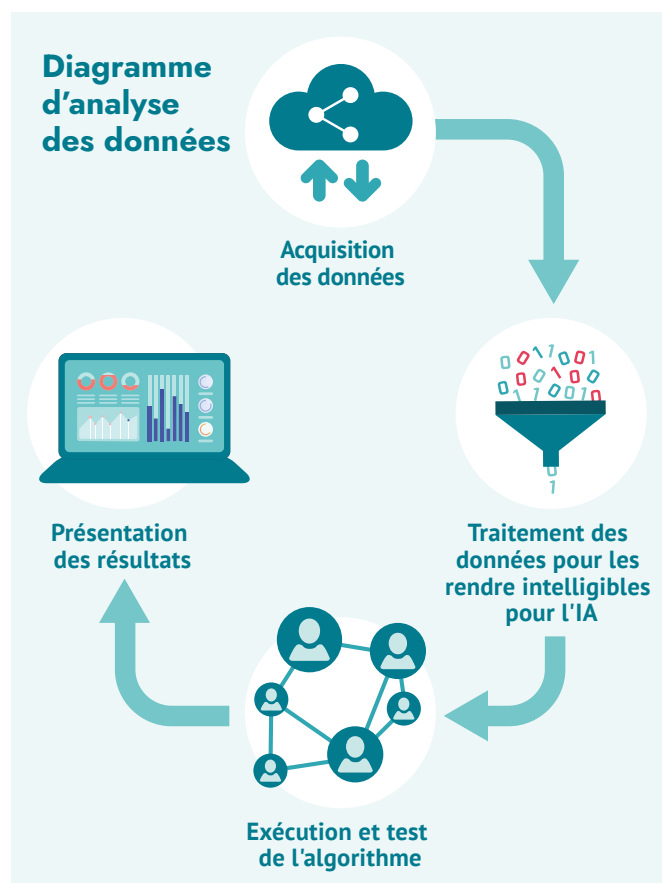
7 Ellen MacArthur Foundation, *Artificial intelligence and the circular economy - AI as a tool to accelerate the transition*, 2019

8 Ce document traite des cas pour lesquels les informations sont insuffisantes pour commencer une analyse. Les cas rapportés sont une première approche de ce qui pourrait être développé et ne correspondent pas à des cas actuellement déployés ou suffisamment matures. Pour aller plus loin, des cas plus détaillés seraient nécessaires.

9 Agence internationale pour les énergies renouvelables, *Innovation landscape brief: Artificial intelligence and big data*, 2019

Le schéma classique d'analyse des données est également valable pour l'IA :

1. L'acquisition des données
2. Le traitement des données pour les rendre intelligibles pour l'IA
3. L'exécution et test de l'algorithme
4. La présentation des résultats



« Plus l'objectif d'entraînement de l'IA est complexe, plus il faut de données pour entraîner l'algorithme et obtenir des résultats précis. »

1. L'acquisition des données

Pour alimenter l'IA et la former, il faut collecter un certain nombre de données. Les deux principales conditions préalables à la collecte de données pour former l'IA sont les mêmes que pour la documentation et les données à des fins de recherche : les données doivent être de bonne qualité et abondantes.

Des données de qualité

L'IA doit être alimentée par des données de la meilleure qualité possible pour entraîner l'algorithme et fournir des résultats précis. Un algorithme faible entraîné avec des données de haute qualité fournira des résultats plus précis qu'un algorithme fort entraîné avec des données de mauvaise qualité.

« Les capteurs utilisés pour la collecte de données ont eux-mêmes un impact environnemental, qui est globalement multiplié par le nombre de capteurs nécessaires pour fournir les données. »

Des données abondantes

Plus l'objectif d'apprentissage de l'IA est complexe, plus il faut de données pour entraîner l'algorithme et obtenir des résultats précis.

Aujourd'hui, une grande partie du processus d'apprentissage automatique effectué par l'IA utilise de grandes quantités de données. Ces données doivent être collectées, affinées pour être modifiables par l'IA, puis traitées pour produire des résultats.

En fonction de la nature, de la manière et de l'endroit où les données sont collectées et où elles sont stockées, les impacts environnementaux liés à l'utilisation de l'IA peuvent varier considérablement :

Quel type de données est collecté ? S'agit-il de milliers d'heures de vidéos HD ? Des images de 64x64 pixels ? Des tableaux Excel soignés et organisés ? Plus les données sont abondantes, plus leur impact environnemental est susceptible d'être important.

Comment les données sont-elles collectées ? Sont-elles collectées par des capteurs ? Sont-elles recueillies par l'observation du comportement des consommateurs en ligne (suivi de la souris, suivi des clics, suivi du temps de visite...) ?

Par exemple, les capteurs utilisés pour la collecte de données ont eux-mêmes un impact environnemental, qui est globalement multiplié par le nombre de capteurs nécessaires pour fournir les données.

Les traqueurs de comportement ont également un impact sur les besoins en ressources informatiques d'une page web, ce qui peut entraîner des exigences supplémentaires lorsque la page est chargée à l'aide d'une connexion Internet faible; une transmission en direct elle-même peut être très énergivore ([voir étude de cas sur le cloud](#)).

Où les données sont-elles collectées, où sont-elles stockées ? Les données sont-elles collectées dans le monde entier, chaque élément des données de l'utilisateur se trouvant dans le cloud de plusieurs centres de données ([voir notre étude de cas sur le cloud](#)) ? Les données sont-elles collectées et traitées localement avec un petit processeur ? ([voir nos études de cas sur l'IoT, ou les véhicules autonomes](#)). Si les données sont collectées et rassemblées dans le monde entier, leur impact environnemental peut être plus important que si elles sont collectées et traitées localement avec un petit processeur, mais cela dépend de nombreux paramètres.

« Une croissance prévue cinq fois supérieure à celle du reste de l'industrie des semi-conducteurs pour le secteur du numérique affecterait proportionnellement les ressources en matières premières. Ainsi, le déficit de restreindre l'utilisation des équipements liés à l'IA aux usages essentiels pourrait être un des déficits futurs les plus critiques pour les TIC. »

Source: McKinsey

Une étude publiée par McKinsey en 2018 prévoit que, dans les années à venir, « la plupart de la croissance des besoins de calcul proviendra de la demande accrue d'applications d'IA dans les centres de données du type cloud ». Cette étude prévoit également une croissance cinq fois plus importante pour les semi-conducteurs liés à l'IA que pour le reste du marché entre 2017 et 2025.¹⁰ Les opportunités émergentes révélées dans cette étude sont liées aux composants matériels utilisés pour la collecte, le transfert et le stockage des données (systèmes de stockage optimisés pour l'IA, nouveaux types émergents de mémoire non volatile, interconnexion à haut débit).

.....

10 McKinsey & Company, *Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies*, 2018

11 <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (dernière consultation : 29/06/2021)

12 En raison de l'exploitation des ressources, de la consommation d'équipements, [voir l'étude de cas sur les matières premières](#)

13 https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (dernière consultation : 29/06/2021)

14 Nous laisserons de côté la question des multiples biais possibles dus à une mauvaise sélection des données, qui est importante pour comprendre le travail des data scientists concernant l'IA, mais moins cruciale pour identifier les domaines susceptibles d'avoir le plus grand impact environnemental.

L'ensemble de ces éléments déclenche des alertes quant à l'augmentation exponentielle de la fabrication d'équipements de haute technologie, qui constitue déjà le plus grand défi à relever pour atténuer les impacts environnementaux du numérique ([voir résultats de notre ACV](#)).

Une croissance anticipée cinq fois supérieure à celle du reste du marché des semi-conducteurs est contraire aux objectifs de développement durable de l'ONU.¹¹ Elle affecterait proportionnellement les ressources en matières premières, qui s'épuisent déjà à vitesse grand V, et risquerait de provoquer d'importants effets rebonds en termes de gaz à effet de serre¹², ce qui irait à l'encontre des objectifs visés par l'Accord de Paris et le Green Deal européen.¹³ Ainsi, le défi de limiter l'utilisation des équipements liés à l'IA aux usages essentiels pourrait être l'un des défis futurs les plus critiques pour les TIC.

2. Le traitement des données pour les rendre intelligibles pour l'IA

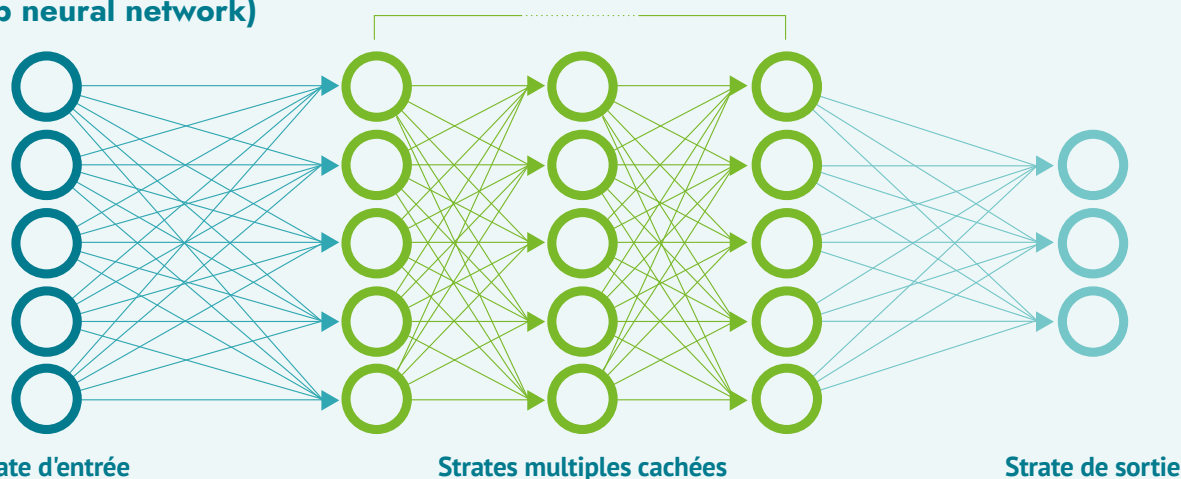
Comme nous l'avons vu plus haut, les données utilisées par l'IA doivent être de bonne qualité et abondantes. Les données ne sont pas toujours communiquées de manière propre et organisée, prêtes à être traitées par l'IA. Dans de nombreux cas, les données doivent être affinées, soit automatiquement, soit manuellement, pour que l'IA puisse les traiter.

Qu'il s'agisse d'un traitement manuel ou automatique, ce n'est pas la partie du processus qui cause le plus d'impact environnemental, car les impacts sont ceux des équipements utilisés pour affiner les données, prorata temporis. En revanche, elle représente une partie essentielle et très chronophage du travail effectué par les spécialistes des données et couvre de nombreux défis de l'IA, comme d'éviter les partis pris.¹⁴

3. L'exécution et test de l'algorithme

Pour comprendre cette étape du processus, il faut faire la distinction entre le scénario où l'algorithme apprend, et celui où l'algorithme exécute une décision.

Réseau neuronal profond (deep neural network)



Dans le scénario d'apprentissage, l'algorithme est « avide de données » : plus il est alimenté en données de qualité, plus il est susceptible d'être efficace. Ce phénomène est appelé « l'efficacité déraisonnable des données ».¹⁵

Le scénario dans lequel l'algorithme exécute une décision ne représente presque rien par rapport au scénario dans lequel l'algorithme apprend, mais il dépend de l'existence d'un scénario d'apprentissage efficace. Dans le cas de l'*edge computing*, l'algorithme peut être exécuté localement sans connexion au cloud, ce qui limite l'utilisation de la bande passante. Dans le cas d'un algorithme bien formé et optimisé (comme pour les véhicules autonomes), le processeur est embarqué à proximité des capteurs, et ne nécessite donc pas de connexion pour fonctionner.

Recherche d'architectures neuronales dans le traitement du langage naturel (NLP) : un exemple d'impact lourd sur les émissions de gaz à effet de serre

Dans un article publié en 2019 par l'Université de Massachusetts Amherst¹⁶, les chercheurs ont constaté que le coût énergétique du processus de formation de l'IA croît proportionnellement à la taille du modèle et peut augmenter considérablement lorsque la recherche d'architecture neuronale - un processus incrémentiel qui passe par une série exhaustive d'essais et d'erreurs - est utilisée pour augmenter la précision finale du modèle.

En effet, ils ont constaté que le modèle étudié le plus coûteux avait une empreinte carbone d'environ 1 400 livres d'équivalent dioxyde de carbone sans le processus de réglage de la recherche d'architecture neuronale, et a émis plus de 626 000 livres d'équivalent dioxyde de carbone lors de ce processus de réglage, ce qui correspond à environ 284 tonnes d'équivalent dioxyde de carbone : « près de cinq fois les émissions d'une voiture américaine moyenne sur toute sa durée de vie (et cela inclut la fabrication de la voiture elle-même) ».¹⁷

Cette étude, l'une des rares premières dans le domaine, met pour la première fois en évidence l'importance de l'empreinte carbone de l'IA au cours de son apprentissage. Si une étude similaire devait être réalisée concernant l'IA entraînée sur le territoire européen, il faudrait toutefois tenir compte des sources d'énergie européennes, qui sont différentes de celles des États-Unis utilisées dans l'étude de l'Université du Massachusetts. Cependant, il faut prendre en compte non seulement la consommation d'énergie, mais aussi les indicateurs d'impact environnementaux. Si l'on devait procéder à une analyse du cycle de vie d'une unité fonctionnelle dans un processus de formation à l'IA, il faudrait prendre en compte les impacts environnementaux des différents équipements utilisés au cours du processus global.

¹⁵ Norvig, Peter et al, *The Unreasonable Effectiveness of Data*, 2009 ; Sun, Chen et al, *Revisiting Unreasonable Effectiveness of Data in Deep Learning Era*, 2017 ; Google AI Blog, *Revisiting the Unreasonable Effectiveness of Data*, 11 juillet 2017 (dernière consultation 01/03/2021)

¹⁶ Emma Strubell et al., *Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP*, Université du Massachusetts Amherst, 2019

¹⁷ MIT Technology Review, *Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes*, 6 juin 2019 (<https://www.technologyreview.com/2019/06/06/239031/training-a-single-ai-model-can-emit-as-much-carbon-as-five-cars-in-their-lifetimes/>, dernière consultation 01/03/2021)

Avis d'expert



Michel Bénard est consultant indépendant depuis 2018. Il est expert chez Innosuisse et assure le contrôle des investissements et l'évaluation des technologies pour des clients privés. Michel Bénard a fait son master et son doctorat à Telecom ParisTech, et a occupé des postes de R&D, de commerce et de gestion chez IBM, EPFL, HP et Google.

“ Les premiers travaux sur l'IA ont eu lieu dans les années 1970 et 1980, principalement grâce aux efforts de l'industrie pétro-gazière pour développer et utiliser des systèmes dits experts pour l'exploration pétrolière. Toutefois, pour plusieurs raisons (rareté des données de qualité, puissance de calcul limitée et algorithmes rigides et régis par des règles), ces premiers efforts n'ont pas abouti à un succès technique et aucun résultat commercial n'a pu être obtenu. En conséquence, l'IA a ensuite traversé une « période d'hiver. »

Au début des années 2000, de nouveaux projets d'IA ont été lancés avec des données de meilleure qualité et plus nombreuses, une puissance de calcul beaucoup plus élevée et de nouveaux algorithmes d'apprentissage automatique basés sur les données. Le succès a été rapide et, depuis lors, les mises en œuvre de l'IA pour les publicités et les systèmes de recommandation ont fonctionné conformément aux attentes de l'industrie et des utilisateurs, générant d'énormes succès commerciaux (dans l'e-commerce, les divertissements en ligne et les réseaux sociaux). Encouragées par ces succès, d'autres industries ont développé et déployé l'IA avec un certain succès initial, par exemple dans la maintenance prédictive et la vision assistée par ordinateur. D'autres secteurs (soins de santé, éduca-

tion en ligne, etc.) expérimentent actuellement l'IA, et les premiers résultats semblent prometteurs.

Dans la plupart des cas, une IA puissante nécessite de grandes quantités de données de qualité, et dans le cas de certains algorithmes, comme les réseaux neuronaux, les performances augmentent de façon presque déraisonnable avec la disponibilité des données. En outre, la phase d'apprentissage de ces algorithmes nécessite une puissance de calcul très élevée pour obtenir de bonnes performances. Ces exigences génèrent une forte demande en énergie, qui doit être fournie aux centres de données dédiés à l'IA. Ce problème n'est pas nouveau, et l'industrie des équipements informatiques travaille depuis des décennies sur sa facture énergétique. De nouveaux efforts ont été déployés récemment, de nouvelles sources d'énergie durables font désormais partie de l'approvisionnement énergétique et des techniques d'optimisation axées sur l'énergie sont en cours de développement pour minimiser la consommation d'énergie des centres de données. Ces efforts doivent être poursuivis sans relâche.

Il reste encore beaucoup à faire pour que l'IA devienne plus omniprésente :

- Développer la capacité d'aborder et de résoudre des tâches critiques, telles que la détection des maladies, la prévision des catastrophes naturelles et des pannes d'équipement,
- La rendre plus explicable, surtout s'il s'agit de répondre à des tâches critiques dans des applications de santé, de mobilité ou industrielles,
- Optimiser sa consommation d'énergie en éliminant l'acquisition et le traitement inutiles des données, ou en tenant compte du coût réel des « applications gratuites » ou des « données gratuites ».

i Les résultats du projet peuvent être consultés sur le site Internet suivant : <http://www.rediscoverycentre.ie/research/q2reuse/>

ii Ina Rüdener, Siddharth Prakash, *Ökonomische und ökologische Auswirkungen einer Verlängerung der Nutzungsdauer von elektrischen und elektronischen Geräten*, Öko-Institut und VZBV, 2020

4. La présentation des résultats

Enfin, les résultats fournis par le modèle (généralement des prédictions) doivent être présentés. Les incidences sur l'environnement peuvent, là encore, varier énormément en fonction de l'utilisation qui sera faite des résultats :

- Les résultats sont-ils envoyés à un autre équipement numérique dans une approche de type machine à machine (M2M) ?
- Combien d'appareils y a-t-il ? Sont-ils connectés en permanence à Internet pour pouvoir fonctionner, et avec quelles technologies ?
- Les résultats sont-ils présentés à un humain qui les consulte à l'aide d'un ordinateur portable classique ?

L'impact à ce stade varie en fonction des impacts environnementaux des terminaux utilisés (ordinateurs, objets connectés, etc.) et de leur nombre.

Conclusion

À ce jour, il est impossible d'évaluer et de mesurer exactement les impacts environnementaux générés par l'intelligence artificielle : les cas d'utilisation de l'IA pour réduire les impacts environnementaux sont encore rares et aucune mesure de la balance entre les avantages environnementaux et les coûts n'a été effectuée. Au niveau mondial, les utilisations de l'IA sont extrêmement nombreuses mais difficiles à évaluer car le domaine est en constante évolution, et de nombreuses variables doivent être prises en compte pour mesurer les impacts environnementaux dans des cas d'utilisation spécifiques. Parallèlement, très peu d'études ont été publiées : la balance entre les avantages environnementaux et les coûts est un territoire inexploré dans la recherche sur l'IA.

Toutefois, en comprenant le fonctionnement de l'IA, il est possible d'avoir une vue d'ensemble des domaines ayant le plus d'impact. Il s'agit principalement du processus de formation de l'IA (surtout si une recherche d'architecture neuronale est impliquée) et de la collecte de données si l'on considère les émissions de gaz à effet de serre et l'épuisement des matières premières, ce qui signifie que l'efficacité des calculs devra être augmentée.

Si l'on regarde plus précisément l'impact environnemental dû à l'utilisation des ressources en matières premières, les impacts sont liés aux semi-conducteurs, aux puces et aux équipements utilisés pour collecter, rassembler et traiter les données, qui sont appelés à augmenter fortement ; et encore plus avec des dispositifs tels que les objets connectés pour la collecte de données par des capteurs ou comme équipement de l'utilisateur final. L'IA est de plus en plus sérieux catalyseur au recours à l'utilisation de multiples terminaux.

L'utilisation croissante de capteurs posera un défi toujours plus grand aux efforts visant à limiter les impacts environnementaux des usages de l'IA dans les années à venir. En outre, l'augmentation des capacités de calcul peut limiter les émissions de gaz à effet de serre liées au peaufinage de l'apprentissage automatique en fin de processus, mais augmente l'empreinte environnementale liée au matériel utilisé par l'IA, car elle rendra encore plus rapidement obsolète le matériel de calcul précédent, moins puissant, ce qui pourrait provoquer des effets rebonds. Il ne fait aucun doute que l'IA peut être considérée de plus en plus comme un catalyseur, une composante essentielle d'une économie fondée sur la technologie. Elle soulève de nombreuses questions fondamentales, l'une d'entre elles étant de savoir comment limiter ses impacts environnementaux. ■

Recommandations pour une évolution du numérique compatible avec le Green Deal

Dans une évolution numérique compatible avec le Green Deal, la maturité de l'IA signifie que l'IA n'est utilisée que pour optimiser les tâches critiques, en priorité pour détecter les maladies, prévoir les catastrophes naturelles et les pannes d'équipement si, après évaluation comparative, aucune alternative *low-tech* n'est possible avec les mêmes niveaux de réussite. L'IA est systématiquement couplée à la *low-tech* pour tirer le meilleur parti des deux au béné-

fice de la société et dans le respect des limites planétaires. La voie de la maturité consiste à réglementer l'utilisation de l'IA de manière à limiter l'utilisation des ressources et à prendre en considération les futures pénuries de ressources critiques pour la fabrication de l'équipement.

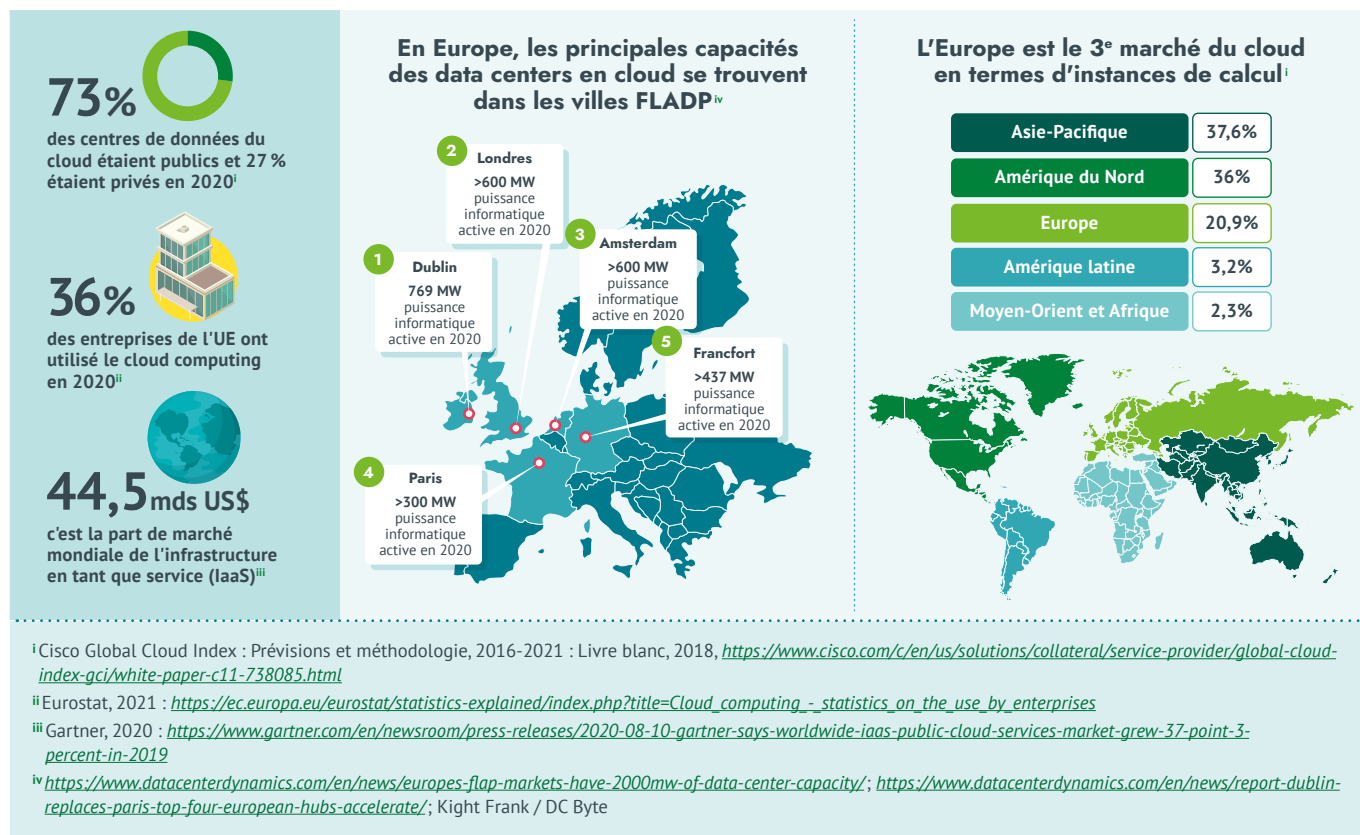
La maturité de l'IA limite rapidement l'acquisition et le traitement de données inutiles, et une directive européenne a ouvert la voie à la réglementation de l'utilisation et du traitement des données par les utilisateurs d'« applications gratuites ». Ce faisant, l'UE a saisi les opportunités de parvenir à la sobriété et la souveraineté des données.

Le cloud

Sommaire

Les clés pour comprendre.....	page 32
Résumé de l'étude de cas.....	page 32
Définitions	page 33
Qu'est-ce que le cloud ?.....	page 33
Notions principales.....	page 34
Quelques exemples non exhaustifs d'applications du cloud	page 35
Le développement du cloud en Europe et dans le monde	page 35
Comment évaluer les impacts environnementaux du cloud ?	page 39
Conclusion	page 41
<i>Recommandations pour une évolution du numérique compatible avec le Green Deal</i>	page 42

Les clés pour comprendre



Résumé de l'étude de cas

Le cloud est un changement de paradigme qui a modifié la façon dont les capacités de calcul informatique et de stockage sont consommées. Par conséquent, il a également influencé la gouvernance des systèmes d'information des organisations. Ce secteur connaît actuellement une forte progression. Cela signifie également des défis croissants concernant son impact sur l'environnement : si les ressources du cloud semblent illimitées, celles de la planète ne le sont pas.

À l'instar de nombreuses innovations technologiques dans le domaine du numérique, le « nuage » a transformé les organisations de façon spectaculaire : il est présenté comme un moyen de favoriser l'agilité, l'emploi et le développement économique. Qu'en est-il de la perspective environnementale ?

« Le principal défi au niveau de l'UE est de concilier les objectifs de durabilité avec la numérisation de masse via le cloud pour un cloud souverain et éco-responsable. »

Le principe de l'économie fonctionnelle¹ s'applique au cloud : au lieu d'acheter et d'exploiter un équipement informatique, les utilisateurs reçoivent directement des services tels que des capacités de calcul, de stockage ou des machines, et les exploitent virtuellement. À première vue, cette économie semble respectueuse de l'environnement, d'autant plus qu'il est dans l'intérêt économique des opérateurs du cloud de ne pas surestimer les ressources impliquées et de prolonger la durée de vie des équipements et des infrastructures.

1 L'économie de fonctionnalité est un modèle économique fondé sur le développement de solutions combinant des garanties de service et des fonctions d'usage de biens matériels appartenant au producteur.

Cependant, les impacts environnementaux de ces services sont nombreux, comme la contribution au changement climatique, épuisement des ressources non renouvelables (métaux, fossiles), utilisation de l'eau, la consommation d'énergie. En outre, on observe une augmentation massive de l'utilisation des services du cloud, qui peut également être liée à des effets rebonds ([voir l'étude de cas sur les effets rebonds](#)) et d'infobésité.² En gardant à l'esprit que si les ressources du cloud semblent illimitées, les ressources consommées pour les technologies numériques sont pour la plupart non renouvelables et donc limitées, même si certaines ressources renouvelables sont utilisées parmi les sources d'énergie de la consommation électrique des centres de données.

Tout compte fait, comment le cloud pourrait-il être davantage un levier qu'un frein pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris et limiter les impacts environnementaux, notamment le changement climatique ?

La réponse à cette question nécessite des mesures à plusieurs niveaux pour améliorer la transparence, l'affichage environnemental, développer des normes de bonnes pratiques et sensibiliser toutes les parties prenantes aux questions environnementales, afin d'éco-concevoir les services cloud.

Le principal défi au niveau de l'UE est de concilier les objectifs de durabilité avec la numérisation de masse via le cloud, pour un cloud souverain et éco-responsable.

Dans cette étude de cas, nous examinerons en détail la situation actuelle, nous exposerons les problèmes environnementaux liés au cloud et nous définirons des recommandations pour un cloud plus « vert ».

Définitions

Les premiers modèles de cloud computing remontent aux années 1950, avec des applications fonctionnant sur des systèmes centraux partagés. Le déploiement du réseau Internet a permis le développement des services cloud en rendant l'informatique, les plateformes et les applications utilisables à partir de tout type de terminal dans le monde entier.

Qu'est-ce que l'informatique dématérialisée ?

Le cloud est un terme largement utilisé qui regroupe une grande variété de services et de modèles économiques. Utilisé massivement tant au niveau professionnel que privé, et du fait de sa facilité d'utilisation, il favorise le développement du secteur numérique.

² On parle d'effet d'infobésité lorsque le volume d'informations reçues par un être humain dépasse sa capacité productive à traiter ces informations.

Le cloud computing : Équipements et infrastructures concernés



Centre de données

La construction et l'exploitation fournissent aux espaces la climatisation, une alimentation électrique de haute qualité et un niveau de sécurité élevé



Équipements

Sélection, mise en place, maintenance et mise hors service des équipements hébergés dans le centre de données (calcul, stockage, réseau)



Cloud

Conception, livraison et exploitation de services du nuage IAAS, PAAS, SAAS



Usage

Périphériques réseau et utilisateurs finaux requis pour accéder aux services

Notions principales

En 2011, le NIST³ (Institut national des normes et de la technologie des États-Unis), a défini le cloud computing comme « *un modèle pratique et omniprésent permettant un accès réseau sur demande, à un pool partagé de ressources informatiques configurables (réseaux, serveurs, stockage, applications et services...) qui peuvent être rapidement provisionnées et libérées avec un minimum d'efforts de gestion ou d'interaction avec le fournisseur de services.* »

Le NIST est chargé d'élaborer des normes et des lignes directrices, y compris des exigences minimales, afin de garantir une sécurité de l'information adéquate pour toutes les opérations et ressources des agences.

Les services du cloud comprennent trois types de services :

- **L'infrastructure en tant que service (IaaS)** : Ce service met à la disposition de l'utilisateur des ressources informatiques sous forme de capacité de calcul, de stockage et de réseau. Dans ce modèle, l'utilisateur doit gérer le système d'exploitation et les logiciels déployés sur l'IaaS.

- **La plateforme en tant que service (PaaS)** : Le service fournit la disponibilité de l'infrastructure à l'utilisateur, incluant l'IaaS et les systèmes d'exploitation. L'utilisateur reste responsable du logiciel.

- **Le logiciel en tant que service (SaaS)** : Le service fourni à l'utilisateur est un accès direct aux applications fonctionnant sur une infrastructure cloud.

Trois types d'hébergement différents sont couramment développés pour les services cloud :

- **Cloud privé** : L'infrastructure du cloud est exploitée pour une organisation uniquement. Elle peut être gérée par l'entreprise elle-même ou par un tiers et peut exister sur ou hors site.

- **Cloud public** : L'infrastructure du cloud est mise à la disposition du grand public ou d'un grand groupe industriel, et appartient à une entreprise qui vend des services de cloud.

- **Cloud hybride** : L'infrastructure cloud est alors composée de deux ou plus de types de cloud (privé, communautaire ou public). Ils restent des entités uniques mais sont connectés par une technologie normée ou

³ Définition de l'informatique cloud par le NIST, 2012

Définition du cloud informatique selon le NIST



Libre-service à la demande

"Un consommateur peut fournir unilatéralement des capacités informatiques, telles que du temps de serveur et du stockage réseau, selon les besoins, de manière automatique, sans nécessiter d'interaction humaine avec chaque fournisseur de services."



Mise en commun des ressources

"Les ressources informatiques du fournisseur sont mises en commun pour servir plusieurs consommateurs à l'aide d'un modèle multi-locataires, avec différentes ressources physiques et virtuelles attribuées et réattribuées de manière dynamique en fonction de la demande des consommateurs."



Accès à un réseau étendu

"Les capacités sont disponibles sur le réseau et sont accessibles par des mécanismes standard qui favorisent l'utilisation par des plateformes de clients légers ou lourds et hétérogènes (par exemple, téléphones mobiles, ordinateurs portables et assistants personnels numériques ou PDA)."



Flexibilité rapide

"Les capacités peuvent être provisionnées et libérées de manière élastique, dans certains cas automatiquement, pour évoluer rapidement vers l'extérieur et vers l'intérieur en fonction de la demande. Pour le consommateur, les capacités disponibles pour le provisionnement semblent souvent illimitées et peuvent être appropriées en n'importe quelle quantité et à n'importe quel moment."



Service mesuré

"Les systèmes du nuage contrôlent et optimisent automatiquement l'utilisation des ressources en exploitant une capacité de comptage à un niveau d'abstraction approprié au type de service."

Source : https://www.gsa.gov/cdnstatic/Best_Business_Practices_for_US_Government_Cloud_Adoption.pdf

brevetée qui permet le partage des données et des applications cloud).

L'image ci-dessous montre le périmètre de contrôle pour chacun des trois types de service, par utilisateur ou fournisseur de cloud. Il représente les zones où les utilisateurs/fournisseurs pourraient avoir un impact direct et mettre en œuvre une amélioration environnementale.

Différences entre SaaS, PaaS et IaaS		
IaaS	PaaS	SaaS
Application	Application	Application
Données	Données	Données
Temps d'exécution	Temps d'exécution	Temps d'exécution
Intergiciel	Intergiciel	Intergiciel
O/S	O/S	O/S
Virtualisation	Virtualisation	Virtualisation
Serveurs	Serveurs	Serveurs
Stockage	Stockage	Stockage
Mise en réseau	Mise en réseau	Mise en réseau
■ Géré par le client ■ Géré par le fournisseur de cloud		

En résumé, au lieu d'investir dans du matériel, les entreprises qui utilisent des systèmes de cloud computing s'abonnent à un service informatique externe. Le fournisseur s'occupe de tout, du stockage à la sécurité en passant par la mise en réseau et la maintenance des serveurs. En stockant leurs données en interne, elles doivent gérer ces fonctions elles-mêmes.

Quelques exemples non exhaustifs d'applications du cloud

Amazon Web Services, Microsoft Azure et Google Compute Engine sont parmi les principaux fournisseurs de services cloud IaaS.

Google App Engine et AWS Elastic Beanstalk sont deux exemples typiques de PaaS. Le PaaS est également basé sur l'abonnement, ce qui permet des options de prix flexibles basées sur les besoins de l'entreprise.

Un exemple connu de SaaS est Google G Suite, Microsoft Office 365 ou Dropbox.

Le développement du cloud en Europe et dans le monde

Le marché mondial des services de cloud public a augmenté de 24,1% sur l'année 2020, atteignant 312 milliards de dollars de revenus totaux.⁴

L'utilisation des services de cloud est en augmentation, tant pour un usage personnel que professionnel, ce qui signifie un plus grand nombre de tâches de calcul et des demandes de stockage plus élevées de la part des centres de données. En 2018, 56% des individus âgés de 16 à 74 ans ont utilisé internet pour les réseaux sociaux dans l'UE28.⁵ Selon Cisco, les applications grand public sont responsables d'environ 25%⁶ des charges de travail et des instances de calcul dans les centres de données du monde entier. Parmi celles-ci, environ deux tiers sont alloués aux recherches, aux réseaux sociaux et au streaming vidéo via des applications cloud.

De 2016 à 2021, en Europe de l'Est, le trafic dans le cloud a augmenté de 38 % en TCAC.⁷

Selon Eurostat, plus d'une entreprise européenne sur quatre a utilisé des services de cloud en 2018, notamment dans les États scandinaves : 65% en Finlande, 57% en Suède, 56% au Danemark. À l'autre extrémité de l'échelle, on trouve la Bulgarie (8%) et la Roumanie (10%).⁸

4 IDC, 13 mai 2021 : <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS47685521>

5 Eurostat, 2019 : <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tin00127/default/table?lang=fr>

6 Cisco, 2019 : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>

7 Annual Internet Report, Cisco, 2016-2021

8 Eurostat, 2020 : https://ec.europa.eu/eurostat/documents/portlet_file_entry/2995521/9-13122018-BP-FR.pdf/a21954b5-3d96-415b-8319-77a24fac10b3

Les services cloud sont particulièrement courants dans la collaboration bureautique pour les services de courrier électronique, le stockage de fichiers et les logiciels de bureau. La croissance de l'utilisation est soutenue par des effets de renforcement mutuel de la croissance entre les plus grandes capacités offertes (performance de calcul du matériel, plus de stockage, augmentation de la vitesse de communication) et les possibilités d'utiliser des applications et des logiciels émergents plus puissants⁹

Le cloud computing sera-t-il plus un levier qu'un obstacle à la réalisation des objectifs de l'accord de Paris et pour limiter les impacts environnementaux, notamment le changement climatique ?

Le cloud repose sur la mutualisation de ressources informatiques au sein de centres de données où ces ressources sont optimisées par des processus de virtualisation et de gestion de l'énergie. D'un côté, en permettant une mutualisation des ressources, cette technologie réduit la quantité de ressources impliquées et donc les impacts environnementaux associés par rapport aux salles de serveurs informatiques internes des organisations. D'autre part, et contrairement à ce que l'on imagine parfois, elle n'est pas stockée dans de véritables clouds météorologiques, mais reste fermement ancrée sur Terre dans des centres de données et dans le trafic de données circulant dans des câbles de fibre optique. Cela signifie que la croissance du cloud s'accompagne d'une demande accrue de ressources matérielles, et donc d'impacts environnementaux plus importants.

Tout d'abord, le matériel informatique que nous utilisons génère des impacts environnementaux significatifs, notamment lors des phases de fabrication et d'utilisation. En ce qui concerne les centres de données, la fabrication et l'utilisation des équipements de calcul contribuent beaucoup plus au changement climatique, à l'utilisation des ressources (minéraux et métaux)

.....

9 Liguu Yu. 2011. *Coevolution of information ecosystems: a study of the statistical relations among the growth rates of hardware, system software, and application software*. SIGSOFT Softw. Eng. Notes 36, 6 (November 2011), 1–5.

10 Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Doman, F., Prunel, D., Vateau, C. et Lees Perasso, E. GreenIT.fr. 2021. *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie*

11 Ces questions sont des idées reçues listées par la Green IT Alliance en 2014. Elle a apporté des éléments de réponse en analysant les éventuels bénéfices environnementaux du transfert de tout ou partie du SI d'une entreprise vers le cloud, afin de vérifier les arguments portés par les acteurs du cloud sur leur supposé avantage sur l'environnement. Source : *Alliance Green IT : le cloud est-il vert ?*

et aux rayonnements ionisants que la fabrication et l'utilisation des équipements de stockage ([voir notre rapport ACV¹⁰](#)).

Le principal avantage des services cloud est qu'ils permettent de fournir facilement des capacités supplémentaires et de gérer les pics d'activité (par exemple les achats en ligne à Noël). En outre, les services cloud peuvent faciliter le travail en offrant un accès simplifié aux appareils, à l'espace de travail numérique et aux systèmes informatiques. L'utilisation du cloud s'accompagne généralement d'attentes élevées en matière de sécurité, ce qui entraîne parfois un surdimensionnement de l'infrastructure physique. Parfois, ce surdimensionnement peut être le symptôme d'une gouvernance mal développée.

« Les changements institutionnels sont essentiels pour limiter les impacts environnementaux des ressources cloud non utilisées. »

Cependant, il est possible d'utiliser le cloud de façon informée, ce qui peut conduire à des gains environnementaux significatifs si les meilleures pratiques et directives sont suivies. Par exemple, dans une entreprise, le responsable informatique peut commencer par évaluer les besoins en achetant sur la base de ce qui est « suffisant ». Les responsables informatiques peuvent choisir un opérateur de cloud qui assure la transparence, la performance énergétique et la reconnaissance externe, et demander à cet opérateur des indicateurs de reporting afin de suivre sa consommation. Les responsables informatiques peuvent également sensibiliser les utilisateurs en interne et communiquer sur la consommation. Nous listerons ci-dessous les différentes questions environnementales¹¹ qui se posent sur le cloud et apporterons quelques éléments de réponse.

► La virtualisation des équipements permet la mutualisation, l'optimisation et donc la réduction des moyens physiques (serveurs, disques, etc.) pour gérer une quantité équivalente de données. Selon les opérateurs, la consolidation des serveurs permettrait de réduire les coûts d'équipement et d'exploitation de 50% et les coûts énergétiques jusqu'à 80%.¹²

► Oui, mais.

Il y a bien un effet d'optimisation de la mutualisation. Cependant, le serveur virtuel, quelle que soit son efficacité énergétique, repose sur une infrastructure physique. De plus, le taux d'utilisation du serveur physique associé n'est pas optimal immédiatement et peut varier en fonction des températures saisonnières (plus efficace par temps frais). De plus, il génère une forte augmentation des besoins en télécommunications : bande passante (centre de données et client), équipements, redondance des accès, etc. Par ailleurs, il est important de rappeler que la consommation finale d'énergie n'est pas un indicateur environnemental et que d'autres indicateurs, tels que la contribution au changement climatique, l'utilisation des ressources, minéraux et métaux, l'utilisation des ressources, fossiles, doivent être étudiés

► Dans le passé, chaque employé disposait de sa propre copie personnelle des documents et des applications. Avec le cloud, les données ne sont stockées qu'une seule fois :

- La limite à la multiplication des copies et au stockage des données est significative,
- Cela permet de libérer de la capacité sur les terminaux (pièces jointes) et même de prolonger leur durée de vie.

► Oui, mais.

La copie et l'archivage sont réduits, mais ouvrent la porte à un énorme effet rebond : la facilité d'utilisation incite à stocker de plus en plus d'informations (historique plus long, données plus détaillées, etc.). En conséquence, le volume des données stockées explose. Selon l'IDC, « la quantité de données créées au cours des trois prochaines années sera supérieure aux données créées au cours des 30 dernières années,

et le monde créera plus de trois fois plus de données au cours des cinq prochaines années qu'il ne l'a fait au cours des cinq précédentes¹³. » La pandémie de Covid-19 contribue à ce chiffre en modifiant les habitudes de consommation des utilisateurs.¹⁴ En outre, les serveurs d'origine ne sont pas systématiquement mis hors service après la migration des données vers le cloud.

► L'une des caractéristiques fondamentales du cloud est la facturation des services en fonction de l'utilisation. Ce mécanisme est vertueux car il oblige les utilisateurs à mesurer leur consommation de ressources et encourage ainsi une utilisation raisonnée.

► C'est incomplet.

Malheureusement, la granularité de la facturation (combinaison du volume stocké, de la durée d'utilisation, du transit Internet, etc.) rend le modèle économique difficile à prévoir.

La facilité de déploiement de nouvelles ressources informatiques comme les serveurs virtuels n'incite pas à la sobriété : en effet, lorsqu'il suffit de quelques clics de souris pour installer davantage de ressources de serveurs virtuels au lieu de mettre à niveau physiquement les serveurs internes, il est facile de consommer davantage de ressources. De plus, une quantité importante de ressources informatiques virtuelles est inutilisée. Ce point constitue un problème d'efficacité environnementale car les ressources virtuelles inutilisées continuent de fonctionner 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an. Actuellement, environ 30% des serveurs sont inutilisés.¹⁵ Il a été prouvé que ces serveurs zombies peuvent être efficacement réduits de 30% à 8% en un an seulement si une entreprise prend des mesures lorsqu'on lui présente des preuves de l'ampleur du problème,¹⁶ ce qui signifie que les changements institutionnels sont essentiels pour lier les impacts environnementaux des ressources inutilisées du cloud.

► Les impacts sociaux du cloud sont déjà visibles : déplacements limités, plus grande flexibilité dans les modes de travail, meilleur équilibre entre vie professionnelle et vie privée...

12 <https://www.vmware.com/solutions/consolidation.html>

13 IDC, 8 mai 2020 : Global DataSphere Forecast Shows Continued Steady Growth in the Creation and Consumption of Data. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46286020>

14 <https://www.infoworld.com/article/3586597/cloud-adoption-in-a-post-covid-world.html>

15 Jonathan Koomey et Jon Taylor, *Zombie/Comatose Servers Redux*, 2017

16 Etude sur la caractérisation des effets rebonds induits par le télétravail, ADEME, 2020, <https://www.ademe.fr/caracterisation-effets-rebond-induits-teletravail>

➤ Oui, mais.

Toutefois, ces avantages ne doivent pas occulter les effets directs et indirects négatifs sur le plan environnemental et social : multiplication des équipements informatiques et de leur impact sur l'environnement, augmentation de l'infobésité, burnouts et stress liés à l'hyperconnectivité, etc. Rien ne prouve que le télétravail se traduise par une amélioration globale de la qualité de vie, surtout s'il entraîne une augmentation du temps de travail et une frontière floue entre vie professionnelle et vie privée. L'isolement induit par l'utilisation massive du télétravail est également un risque social à prendre en compte, surtout en période de crise sanitaire du Covid. Par ailleurs, l'externalisation partielle ou totale d'une gouvernance de l'information soulève des questions de ressources humaines : pour les équipes internes (évolution des compétences, vision stratégique de l'informatique, etc.), et celles du fournisseur (lieu et condition de travail, etc.).

Il est également important de se rappeler que certains effets rebonds négatifs peuvent aller à l'encontre des avantages environnementaux de l'informatique dématérialisée que permet le travail à domicile. Par exemple, si les travailleurs doivent adapter leur bureau à domicile en construisant une extension, ou si le travail est associé à davantage de déplacements aériens simultanés.¹⁷

- La localisation des services cloud dans des centres de données à haut rendement permet de réduire la consommation d'énergie.

➤ Cela dépend.

Les centres de données HyperScale présentent généralement un excellent niveau d'efficacité énergétique, mesuré par l'IEE (Indicateur d'efficacité énergétique), qui se situe autour de 1,2 contre une moyenne de 1,6 ou plus dans les autres centres de données.¹⁸

Cependant, en raison de la duplication des données dans plusieurs centres de données pour éviter la panne du premier, cet ICP ne peut pas mesurer l'efficacité énergétique globale des services cloud.

De plus, l'IEE est incomplet pour mesurer l'efficacité énergétique d'une installation : « L'IEE peut également envoyer des signaux erronés car il ignore la charge de travail effective réelle effectuée. Imaginons deux installations : l'installation A a un IEE de 1,1 et traite 0,5 PB de données, tandis que l'installation B a un IEE de 1,2 et traite 1,0 PB de données sur une base annuelle. Sur la base du seul IEE, l'installation A serait préférée, mais l'installation B nécessite moins d'énergie pour traiter une quantité similaire de données, et devrait être préférée.

L'IEE peut également dépendre de la manière dont les directives de mesure sont interprétées. Google explique que l'IEE moyen de tous les centres de données Google est de 1,11, bien qu'ils puissent se vanter d'un IEE aussi bas que 1,06 lorsqu'ils utilisent des limites plus étroites. »^{19 20}

- L'augmentation de l'efficacité du cloud pourrait absorber l'augmentation des usages et des besoins informatiques.

➤ Il n'y a pas de consensus sur ce point pour la prochaine décennie.

Certains auteurs suggèrent un besoin énergétique stable d'environ 200 TWh dans le monde en 2030 quand d'autres prévoient environ 10 fois plus²¹. Entre 2010 et 2018, la consommation énergétique totale des centres de données n'a augmenté que de 6 % (de 194 TWh à 205 TWh) alors que la demande a été largement multipliée : ce résultat remarquablement faible s'explique principalement par les importants gains d'efficacité énergétique des infrastructures de traitement des données et des centres de données. Toutefois, la loi de Moore²² devrait cesser d'avoir une influence très prochainement (vers 2021-2025).²³ Un modèle de prévision de l'impact de l'utilisation sur les besoins en électricité des centres de données a récemment mis en évidence que, combinées, la fin de la loi de Moore et l'essor de l'IoT industriel pourraient entraîner une augmentation des besoins énergétiques des centres de données jusqu'à 752 TWh en 2030 (environ 364 TWh en 2030 pour l'IoT industriel sans

17 *Étude sur la caractérisation des effets rebonds induits par le télétravail*, ADEME, 2020

18 Commission européenne, *ICT Impact study. Final report*, préparé par VHK et Viegand Maagøe pour la Commission européenne, Juillet 2020

19 Ibid.

20 <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/>

21 Hintemann R, Hinterholzer S. *Energy consumption of data centers worldwide: How will the internet become green?* CEUR Workshop Proc.; 2019

22 La loi de Moore prévoit un doublement des performances tous les 2 ans. Pour en savoir plus sur la loi de Moore : https://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law

23 Shalf J. L'avenir de l'informatique au-delà de la loi de Moore. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci* 2020; 378:20190061. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0061>

la fin de la loi de Moore).²⁴ De plus, cette hypothèse se concentre uniquement sur la consommation finale d'énergie et est incomplète pour comprendre les différents impacts environnementaux du cloud et des centres de données, même si c'est souvent l'indicateur le plus discuté, car les centres de données peuvent exercer une pression sur le réseau électrique.

Pression sur le réseau électrique

Les centres de données consomment une grande quantité d'électricité. Ils peuvent potentiellement exercer une pression insoutenable sur le réseau électrique d'un pays. Cela a déjà été le cas en Irlande en 2021, lorsque la Commission de régulation des services publics (CRU) a averti dans un document de consultation en juin 2021 que le pays pourrait être confronté à des pannes de courant si le problème n'était pas résolu.²⁵ La possibilité de pannes prolongées causées par la demande d'énergie des centres de données a incité EirGrid, l'opérateur public national de transmission électrique, à tirer la sonnette d'alarme.

Trois scénarios ont été décrits, le troisième étant considéré comme « l'approche la plus équilibrée et la plus nécessaire » :

1. Statu quo : considéré comme inacceptable car il entraînerait probablement des délestages et des coupures de courant pour les consommateurs,

2. Un moratoire : « émettre une instruction à l'intention des opérateurs du système pour qu'ils cessent de traiter toutes les demandes de connexion de centres de données (y compris les modifications) et les nouvelles demandes de connexion pendant un certain nombre d'années²⁶ »,

3. Mesures de raccordement, y compris le traitement prioritaire des demandes de raccordement des centres de données en Irlande, sur la base des critères suivants :

• « *L'emplacement de chaque demandeur de centre de données, en précisant s'il se trouve dans une région du réseau électrique soumise à des contraintes ou non.* »

• *La capacité de chaque demandeur de centre de données à mettre en place une production expédiable (et/ou un stockage) égale ou supérieure à sa demande, qui répond à la disponibilité appropriée et aux autres exigences techniques spécifiées par EirGrid, afin de soutenir la sécurité de l'approvisionnement.* »

• « *La capacité de chaque demandeur de centre de données à assurer la flexibilité de sa demande en réduisant sa consommation lorsque le GRT le lui demande en cas de contrainte du système, grâce à l'utilisation d'une production sur site expédiable (et/ou d'un stockage) qui répond à une disponibilité appropriée [...] afin de soutenir la sécurité de l'approvisionnement.* »

• « *La capacité de chaque demandeur de centre de données à assurer la flexibilité de sa demande en réduisant sa consommation lorsque le GRT le lui demande en cas de contrainte du système, afin de soutenir la sécurité de l'approvisionnement.*²⁷ »

Comment évaluer les impacts environnementaux de l'informatique dématérialisée ?

La première étape pour améliorer la performance environnementale des services cloud est de disposer d'une méthodologie standardisée pour évaluer les impacts mondiaux de ces services, et la mettre en œuvre. Une telle méthodologie normalisée fournirait des modèles à la fois transparents et publics qui permettraient aux chercheurs et aux décideurs de travailler à partir de leurs propres hypothèses dans l'intérêt de l'élaboration des politiques. Actuellement, les centres de données publient très peu d'informations, ce qui rend très difficile la clarification des impacts des composants et des catégories d'utilisation précises.

Il est également crucial de disposer d'une méthodologie pour évaluer l'évolution des impacts environnementaux liés à la migration des centres de données traditionnels ou des salles ou armoires informatiques privées des entreprises vers les services d'informatique cloud, ainsi qu'un moyen d'inclure les conséquences sur les réseaux, les équipements et les effets indirects connexes, tels que les effets rebonds.

24 Martijn Koot, Fons Wijnhoven, *Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic for ecasting model*, Applied Energy, Volume 291, 2021

25 <https://www.cru.ie/wp-content/uploads/2021/06/CRU21060-CRU-consultation-on-Data-Centre-measures.pdf> et <https://www.lebigdata.fr/irlande-data-centers-pannes-electriques>

26 <https://www.cru.ie/wp-content/uploads/2021/06/CRU21060-CRU-consultation-on-Data-Centre-measures.pdf>

27 Ibid.

« Si vous ne pouvez pas le mesurer,
vous ne pouvez pas l'améliorer. »

Lord Kelvin

La plupart des études portant sur les impacts environnementaux de l'informatique cloud se concentrent sur la consommation d'énergie des centres de données. Cette approche est limitée car elle ne prend pas en compte l'ensemble des impacts liés à la phase de construction et de fin de vie des équipements concernés. Des malentendus apparaissent alors car cette méthode laisse de côté une partie des impacts qui peuvent varier en fonction des équipements informatiques, de la durée de vie des centres de données, des infrastructures, etc. Même si la phase d'utilisation représente généralement la plupart des impacts dans le cycle de vie environnemental d'un centre de données, les principaux impacts environnementaux du cloud ne peuvent être résumés en se limitant à la consommation d'énergie finale. Une approche globale sur la performance environnementale du service cloud nécessite d'englober à la fois le matériel et l'infrastructure et de considérer toutes les étapes du cycle de vie de l'équipement.

« Les études d'impact
environnemental sont
principalement basées sur la
consommation d'énergie des
centres de données et non sur une
analyse complète du cycle de vie
multicritère. »

Du point de vue du cycle de vie environnemental, et compte tenu de sa contribution au changement climatique, la phase d'utilisation est celle qui a le plus d'impact, car un centre de données doit fonctionner 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an. Selon la configuration et l'emplacement de l'infrastructure, la phase d'utilisation peut avoir plus ou moins d'impact.

28 <https://www.masterdc.com/blog/what-is-data-center-free-cooling-how-does-it-work/>

29 <https://www.anandtech.com/show/7723/free-cooling-the-server-side-of-the-story>

30 <http://tc0909.ashraetcs.org/>

31 Acton, M., Bertoldi, P., Booth, J., Flucker, S., Newcombe, L., Royer, A. et Tozer, R., 2019 *Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency*. Commission européenne, Ipsra, 2018, JRC114148.

32 Hainan Zhang, Shuangquan Shao, Hongbo Xu, Huiming Zou, Changqing Tian, *Free cooling of data centers: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 35, 2014, Pages 171-182, ISSN 1364-0321 ; <https://www.buildings.com/articles/27490/6-keys-free-cooling-data-centers>.

33 <https://www.ptisolutions.com/immersion-cooling-the-future-of-data-center-technology/>

Plus précisément, cela dépend fortement des besoins en refroidissement et des sources d'énergies.

En ce qui concerne le refroidissement, il est important de noter que dans de nombreux cas, les performances de calcul des serveurs ne seront pas affectées si la température de l'air ambiant reste autour de 35 à 40°C.²⁸ Au lieu de refroidir les centres de données jusqu'à 20 à 22°C, les ensembles de serveurs conformes à la norme ASHREA peuvent être utilisés avec un système simple appelé **refroidissement naturel** (free cooling)²⁹, ce qui implique d'importantes économies d'énergie. Si le centre de données est conforme aux normes ARSHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) les plus strictes (A1)³⁰ les impacts environnementaux liés au refroidissement seront moins importants que si le centre de données est uniquement conforme aux normes ARSHAE A4, voire à aucune norme ASHRAE. En Europe, le *guide des meilleures pratiques 2019 pour le code de conduite de l'UE sur l'efficacité énergétique des centres de données*³¹, s'est inspiré des normes ASHRAE.

Les impacts environnementaux (déchets, eau, utilisation de ressources (fossiles), etc.) peuvent varier considérablement en fonction de la configuration et de l'emplacement des infrastructures cloud considérées. Concernant la distinction entre le calcul et le stockage, les principaux impacts environnementaux du cloud sont liés au calcul plus qu'au stockage.

Des solutions sont mises en œuvre pour réduire l'impact environnemental de l'informatique cloud :

Le refroidissement naturel, qui utilise l'environnement extérieur du centre de données comme source d'air frais. L'air froid est directement injecté dans le circuit d'air de refroidissement des équipements informatiques.³²

Le refroidissement par immersion, qui consiste à immerger les composants dans un liquide diélectrique pour les refroidir, évitant ainsi les systèmes de climatisation et limitant la consommation d'énergie.³³

Il est également possible d'utiliser la chaleur des composants informatiques pour réaliser des économies d'énergie. Si le centre de données est situé près

d'une ville, la chaleur peut être utilisée pour le chauffage urbain, comme c'est actuellement le cas dans certaines villes telles que Stockholm (Suède)³⁴, Mäntsälä (Finlande)³⁵, Odense (Danemark)³⁶, ou pour chauffer une piscine publique à Paris (France).³⁷

Conclusion

À ce jour, les différents impacts environnementaux des services cloud ne sont pas suffisamment documentés par une méthodologie indépendante. La numérisation de l'économie a stimulé un fort développement de l'informatique cloud au cours des dernières années. Pour que cette activité soit compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris visant à limiter le changement climatique, il est crucial d'impliquer l'ensemble de la chaîne de valeur (fabricants, opérateurs de centres de données, opérateurs de cloud, utilisateurs), de mettre en œuvre des actions pour chaque période, et de comprendre de manière complémentaire les impacts environnementaux de l'edge computing et des centres de données traditionnels pour permettre des comparaisons.

Les principales incidences sur l'environnement sont liées à la phase d'utilisation, et notamment aux tâches informatiques.

Les principales questions relatives à l'évaluation environnementale des services cloud sont les suivantes :

- Les études d'impact sur l'environnement sont principalement basées sur la consommation d'énergie des centres de données et non sur une analyse complète du cycle de vie multicritère.
- Un manque de transparence et de possibilités de comparer ou de choisir son opérateur sur une base comparable
- Un manque d'informations environnementales normalisées pour les équipements informatiques
- Des études basées sur des étapes spécifiques du cycle de vie, ou sur un seul impact environnemental, avec des hypothèses et des simplifications, ce qui augmente le risque de transferts de pollution ou d'effet rebond si une démarche d'écoconception est mise en place sur cette base.

La forte croissance des services d'informatique cloud a un impact sur la charge du réseau et le renouvellement des appareils des utilisateurs finaux.

Les publications sur les solutions visant à réduire les impacts environnementaux de l'informatique dématérialisée se limitent souvent à l'infrastructure des centres de données. Afin d'avoir une approche globale de la performance environnementale des services d'informatique dématérialisée, il est nécessaire de prendre en compte à la fois le matériel et l'infrastructure et de considérer toutes les étapes du cycle de vie de l'équipement. ■

³⁴ <https://www.datacenterknowledge.com/design/data-center-firm-expects-halve-energy-cost-recycling-heat>

³⁵ <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/yandex-data-center-heats-finnish-city/>

³⁶ <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/facebook-denmark-data-center-will-supply-heat-to-city/>

³⁷ <https://www.greenit.fr/2017/07/25/stimergy-chauffe-piscine-parisienne/>

Effets environnementaux liés au Cloud Computing



✗ Centre de données

Impact potentiellement élevé sur la **consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre**, en fonction de l'efficacité énergétique du centre de données



✗ Équipement hébergé dans le centre de données

Impact potentiellement élevé principalement sur l'**épuisement des matières premières et l'eau** utilisée pour le processus de fabrication de l'équipement utilisé. Fort impact sur les consommations énergétiques



✗ Services du nuage

Impact potentiellement très élevé sur l'**épuisement des matières premières, l'eau et les émissions de gaz à effet de serre** en fonction des ressources informatiques nécessaires pour fournir les services mais aussi le réseau et les appareils des utilisateurs finaux



✗ Usage

Impact potentiellement élevé sur l'**épuisement des matières premières, les émissions d'eau et de gaz à effet de serre** en fonction à la fois des sources d'énergie et de la sollicitation des appareils des utilisateurs finaux pour accéder au service

✗ Impacts environnementaux potentiellement exponentiels ✗ Impacts environnementaux potentiellement très élevés ✗ Impacts environnementaux potentiellement élevés ✗ Impacts environnementaux atténués confirmés et compatibles avec les limites planétaires ✗ Impacts environnementaux positifs confirmés

Recommandations pour une évolution numérique compatible avec le Green Deal

Des normes sont élaborées au niveau de l'UE sur la base des meilleures pratiques environnementales, de la mesure de l'impact et du libre accès aux ICP environnementaux des centres de données. La mise en œuvre des meilleures pratiques est encouragée comme un comportement vertueux. La sensibilisation par des campagnes d'information et le libre accès à des données primaires transparentes et documentées sont associés à l'étiquetage environnemental des services cloud.

Les effets rebonds générés par l'informatique cloud sont abordés, ainsi que les nouvelles technologies émergentes liées au calcul et au transfert de données, telles que l'edge computing (edge computing), la chaîne de blocs (blockchain) ou l'exploration des données (mining), afin de façonner une vision toujours plus claire et complète des impacts environnementaux sur les TIC.

Dans la mesure du possible, la chaleur « perdue » des centres de données est réutilisée pour le chauffage urbain. Les centres de données à haute efficacité énergétique et s'appuyant sur le refroidissement naturel sont également encouragés. À cette fin, l'adhésion au Code de conduite i pour les centres de données est fortement encouragée.

Pour être efficace au niveau mondial, il est recommandé d'encourager l'application de plusieurs actions clés dans l'UE. Les actions devraient être divisées en quatre niveaux, chacun correspondant à plusieurs types d'acteurs.



Au niveau de l'infrastructure du centre de données

L'amélioration de l'impact environnemental d'un centre de données passe par le développement de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Les principales actions à mettre en œuvre sont :

- Augmenter l'efficacité des systèmes de refroidissement
- Faciliter la réutilisation de la chaleur perdue
- Mettre en œuvre massivement l'écoconception dans la construction des centres de données
- Construire des centres de données à haute efficacité énergétique, permettant l'utilisation d'énergies renouvelables (refroidissement naturel, climatisation naturelle) et la réutilisation de la chaleur perdue
- Encourager la souscription au code de conduite i pour les centres de données.



Équipements informatiques impliqués dans les services cloud et au niveau de l'architecture

L'amélioration de l'empreinte environnementale des équipements informatiques passe par la sélection et la gestion des ressources, afin de privilégier les équipements efficaces et prolonger leur durée de vie, en facilitant l'économie circulaire avec la réutilisation/réparation des composants et du matériel. Les principales actions à mettre en œuvre sont :

- Sélectionner des équipements informatiques à faible impact
- Optimiser la couche de virtualisation
- Accroître la durée de vie
- Réutiliser des composants et favoriser l'économie circulaire
- Recycler les déchets électroniques



Au niveau des IAAS, SAAS et PAAS

L'amélioration de l'empreinte environnementale au niveau des IAAS/PAAS/SAAS implique l'écoconception des services et l'optimisation des ressources nécessaires au fonctionnement des services au niveau mondial : centre de données, réseau et appareil de l'utilisateur final. Les principales actions à mettre en œuvre sont les suivantes :

- Publier des lignes directrices et des normes pour une efficacité environnementale des services d'informatique cloud (IAAS, SAAS, PAAS)
- Promouvoir la mise en œuvre des meilleures pratiques
- Promouvoir le développement de modèles d'affaires « à faible sollicitation de ressources »



Niveau interdisciplinaire

Au niveau mondial, pour sensibiliser et encourager le développement d'un cloud plus écologique, il faut :

- Développer des normes au niveau européen sur les mesures et les meilleures pratiques
- Assurer le suivi des impacts et des performances environnementales
- Mettre en place un référentiel de l'environnement numérique avec une approche ACV
- Mener une campagne d'information et de sensibilisation à l'échelle mondiale
- Discuter des effets rebonds qui surcompensent la dématérialisation directement induite par le progrès technique
- Créer des labels de « cloud vert »
- Intégrer des critères d'achat écologiques pour les services cloud requis par les autorités publiques
- Développer l'innovation pour réduire les impacts environnementaux des services cloud
- Avoir une approche globale de l'efficacité environnementale de l'informatique cloud qui inclut les réseaux et les appareils des utilisateurs finaux

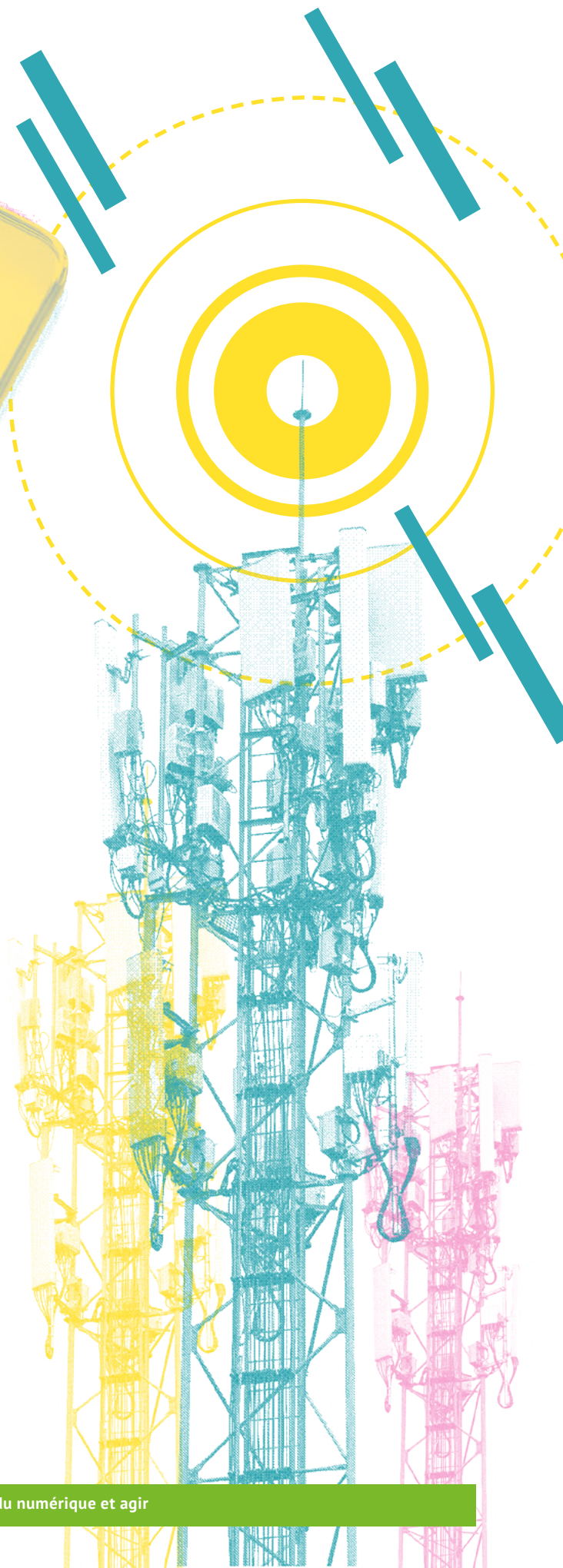
Recommandations de recherche

D'autres études de recherche pourraient être menées, notamment en ce qui concerne les impacts environnementaux des différents services du cloud, mais aussi les modèles commerciaux durables qui s'attaqueraient au développement économique local ainsi qu'aux impacts sociaux des services du cloud.

ⁱ Code de conduite, Commission européenne : <https://ec.europa.eu/jrc/en/energy-efficiency/code-conduct/datacentres>

ⁱⁱ Ibid.

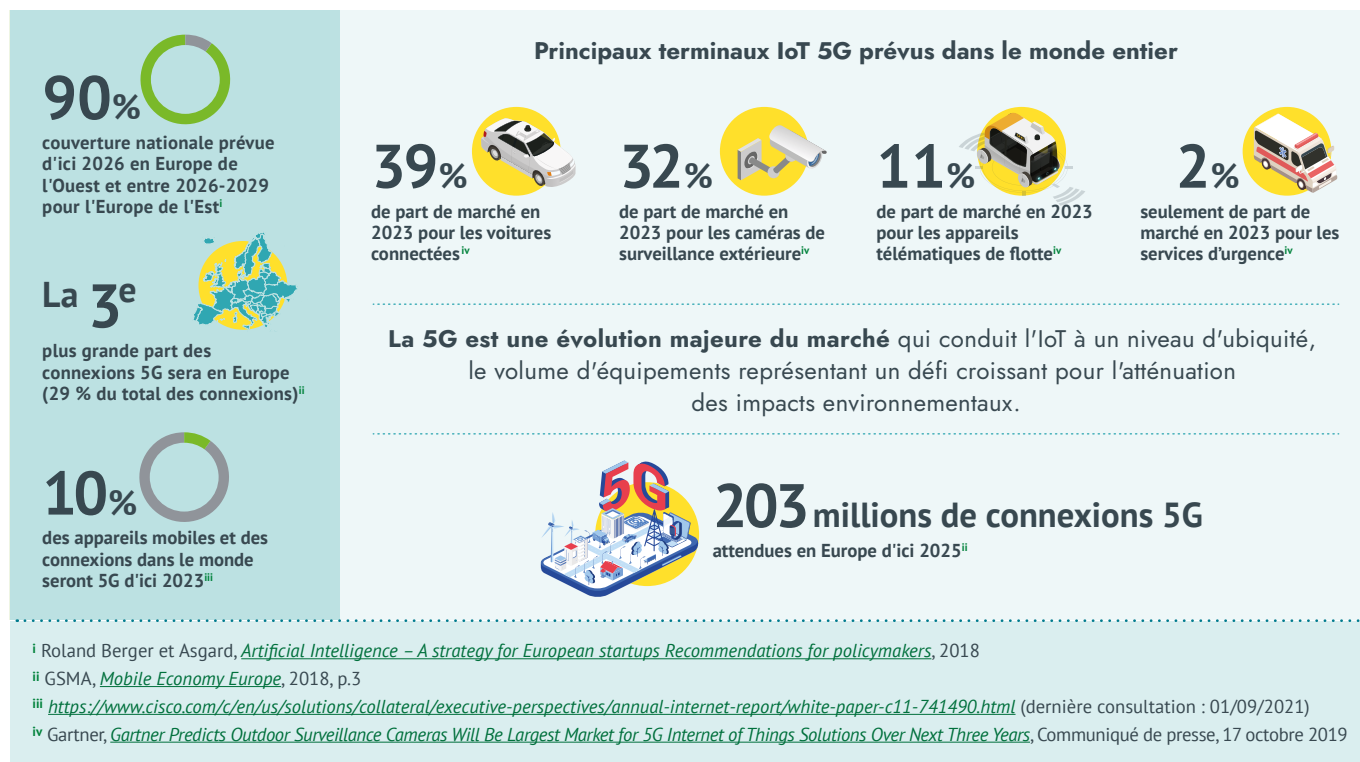
5G



Sommaire

Les clés pour comprendre.....	page 44
Résumé de l'étude de cas.....	page 44
Définitions.....	page 45
Notions principales.....	page 45
Enjeux environnementaux liés à la 5G.....	page 47
La 5G : un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux ?	page 48
La 5G : un obstacle à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux ?	page 49
Avis d'expert.....	page 52
Conclusion.....	page 53
Recommandations pour une évolution numérique compatible avec le Green Deal.....	page 54

Les clés pour comprendre



Résumé de l'étude de cas

Cette étude de cas se propose d'explorer la 5G, un sujet technologique nouveau et complexe pour lequel les impacts environnementaux sont encore difficiles à mesurer. L'objectif de cette étude de cas est d'aider les décideurs et les citoyens à mieux comprendre ce qu'est la 5G et ce que nous savons déjà sur les avantages et les coûts potentiels de la 5G d'un point de vue environnemental. Il ne s'agit pas d'être pour ou contre la 5G, mais de donner un aperçu des impacts environnementaux potentiels concernant l'écosystème du numérique tel qu'il est connu actuellement.

Le déploiement de la 5G étant actuellement en cours, il est difficile d'obtenir une perspective précise sur cette technologie : la littérature est prolifique sur le potentiel de la 5G pour le divertissement et les loisirs, mais nous n'avons trouvé aucune évaluation du cycle de

vie qui donne un aperçu des impacts environnementaux directs du réseau et des dispositifs associés. Cette étude de cas montre que les impacts environnementaux de la 5G peuvent être de différentes natures. Tout d'abord, ceux liés au nombre d'antennes de réseaux mobiles à déployer, qui devrait être environ trois fois supérieur à celui de la 4G pour obtenir la même couverture ; ensuite, ceux liés aux appareils 5G, avec non seulement une hausse du taux de renouvellement des smartphones, mais aussi le déploiement de milliards d'appareils connectés ; enfin, ceux liés à l'explosion de l'utilisation des données qui s'ensuivra.

Notre section de recommandations alimentera la réflexion globale sur la 5G par rapport à d'autres réseaux pour voir comment mieux aborder les enjeux environnementaux liés aux réseaux et aux TIC, en prenant en compte aussi bien les considérations environnementales que l'acceptabilité sociale, les perspectives économiques, et la souveraineté européenne.

Définitions

Qu'est-ce que la 5G ?

La 5G est la 5^e génération de téléphonie mobile. Elle a été conçue pour obtenir une bande passante élevée avec une faible latence, ce qui signifie qu'elle permet une très grande vitesse de propagation des ondes. Ce nouveau réseau s'appuie sur les générations précédentes de réseaux 3G et 4G. Il vise notamment à offrir un débit et une vitesse ultra fiables. La 5G est la base du développement de l'IoT massif, de la navigation autonome, des jeux vidéo en streaming, de la réalité augmentée/réalité virtuelle (RA/RV), de la couverture intégrale à haut débit des événements rassemblant une foule nombreuse et même des caméras des villes dites intelligentes.

1980-2020 : 40 ans de générations mobiles				
1980	1990	2000	2010	2020
1G	2G	3G	4G	5G
Voix	Voix et texte	Données mobiles	Haut débit mobile	Tout, partout, tout le temps, sans limite
NMT, AMPS, TACS	GSM, IS-95, D-AMPS	W-CDMA, UMTS CDMA1x EV-DO	LTE	IMT 2020
2.4 Kbps	64 Kbps	384 Kbps	100 Mbps 1 Gbps	10 Gbps
			Gigabit LTE	Multi-Gigabits 5G
Source : IDATE DigiWorld, état des marchés du LTE et de la 5G, juillet 2018.				

En Europe, la 5G repose principalement sur trois rangées de fréquences :

- **700 MHz : Cette bande est actuellement partiellement utilisée pour la 4G. Par rapport aux autres bandes 5G, la bande 700 MHz a un faible débit mais une très bonne pénétration à l'intérieur des bâtiments.** Cette bande supportera principalement la couverture longue distance par la 5G (environ 5 km ou moins selon les conditions de mise en œuvre).

- **3.4 – 3.8 GHz : Cette rangée est appelée la fréquence centrale de la 5G, car elle offre le meilleur compromis entre portée, vitesse et pénétration.** Elle se caractérise par une portée de 1 ou 2 km, et une meilleure pénétration des bâtiments que les bandes >24 GHz. Ces antennes seront installées sur des points hauts de l'environnement urbain, comme des tours, et nécessiteront dans certains cas de nouveaux supports. Elles se répartiront principalement en 2 types : les *macro cells* (pour les stations traitant un trafic plus important) et les *small cells* (assurant un débit élevé à des endroits précis). Les *small cells* seront principalement déployées dans les zones urbaines, pour relayer le signal vers les *macro cells*.

- **>24 GHz : Cette bande a un excellent débit mais une faible portée et des difficultés à pénétrer à l'intérieur des bâtiments.** Pour compenser ces faiblesses de pénétration et de portée, elle s'appuiera sur un important réseau de *small cells* pour relayer les signaux vers les *macro cells*. Elle aura besoin d'un grand nombre d'antennes de *small cells* pour assurer une couverture à très haut débit (1 Go/s). Les fréquences de >24 GHz sont des ondes millimétriques, ce qui les rend bien adaptées aux zones où il y a beaucoup de dispositifs à couvrir, mais dans le cas des villes, la densité de l'environnement urbain doit être compensée par de multiples *small cells*.

D'autres rangées sont en cours d'expérimentation, notamment 15 kHz (pour l'IoT spécifiquement) et les satellites 5G qui pourraient aider la 5G à couvrir les zones blanches (zones faiblement peuplées).

Notions principales

- **Petites cellules :** Les *small cells* sont des stations de base mobiles utilisées pour amplifier les signaux dans les zones intérieures. Le déploiement des ondes millimétriques (mm) de la 5G dans les zones urbaines nécessite actuellement des milliers d'antennes de *small cells* pour augmenter la portée du réseau. Les *small cells* relaient le signal vers les *macro cells*. Si le chemin direct entre la petite cellule et la macro cellule est bloqué par un obstacle (un arbre, par exemple), la petite cellule peut passer par d'autres *small cells* et continuer à communiquer avec la macro cellule la plus proche. Pour assurer une couverture à très haut débit, il faut un très grand nombre d'antennes de *small cells*.

► **Ondes millimétriques** : Les ondes millimétriques 5G constituent la base de la prochaine génération d'applications mobiles. Les bandes de haute fréquence fournissent d'énormes capacités quantitatives dans une zone géographique limitée. On évitait auparavant les ondes millimétriques pour les communications mobiles car leurs longueurs d'onde étroites et à courte portée étaient sensibles aux conditions atmosphériques, mais le spectre étant une ressource limitée, l'attention est désormais portée sur des bandes auparavant considérées comme inadaptées aux réseaux mobiles. Nombre de ces bandes ont été attribuées à d'autres groupes d'utilisateurs, comme l'armée ou l'industrie des événements publics, ou sont actuellement utilisées dans des domaines tels que la recherche scientifique et les systèmes d'armement.

► **Technologies sans fil versus technologies filaires** : Même si la 5G est une technologie sans fil, il est important de se rappeler qu'une antenne de réseau mobile est toujours connectée *in fine* au filaire pour transférer les données. Cela signifie que si une nouvelle fréquence améliore la vitesse de transfert des données, une fois captées par l'antenne, les données iront dans le réseau en fibre optique. On estime que le déploiement massif de la fibre optique pour supporter la 5G représentera un investissement de 130 à 150 milliards de dollars sur cinq à sept ans rien qu'aux États-Unis.¹ La mise à jour et le redimensionnement de l'infrastructure des serveurs, des alimentations électriques, des câbles et des fibres, du réseau de liaison, etc. font également partie de la garantie du très haut débit.

► **MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)** : Cette technologie est utilisée pour améliorer l'efficacité spatiale des réseaux sans fil. Par opposition à la technologie SISO (Single-Input Single-Output), la technologie MIMO permet à plusieurs antennes de l'émetteur et du récepteur de transférer des données à plus grande distance et avec un débit plus élevé.

► **Formation de faisceaux (beamforming)** : Cette technologie est utilisée pour contrôler et réduire les interférences. Pour ce faire, la formation de faisceaux, ou filtrage spatial, combine les éléments d'un réseau d'antennes de sorte que les signaux situés à des angles spécifiques subissent des interférences constructives tandis que les autres subissent des interférences destructives.

.....

► **Découpage du réseau (network slicing)** : Le découpage du réseau 5G est une architecture de réseau qui permet de disposer de réseaux logiques et virtualisés indépendants sur la même infrastructure de réseau physique. En d'autres termes, le découpage du réseau peut être comparé à la possibilité d'ajuster dynamiquement les voies d'autoroute en fonction du trafic, au lieu que les deux directions aient la même largeur, pour des applications particulières. Chaque tranche de réseau est un réseau isolé de bout en bout, conçu pour répondre aux diverses exigences d'une application particulière. L'avantage commercial du découpage en tranches du réseau est qu'il permet de donner la priorité à des ressources spécifiques (l'une peut exiger des vitesses plus élevées, l'autre une faible latence, etc.) pour adapter les solutions aux besoins particuliers des différentes industries; cela a cependant une conséquence directe sur la neutralité du net.

« Les avancées technologiques telles que l'IA, le machine-learning, l'analyse profonde et la RA/RV ne seront rendues possibles que par une connectivité à haut débit associée à un traitement des données à proximité de l'utilisateur final. »

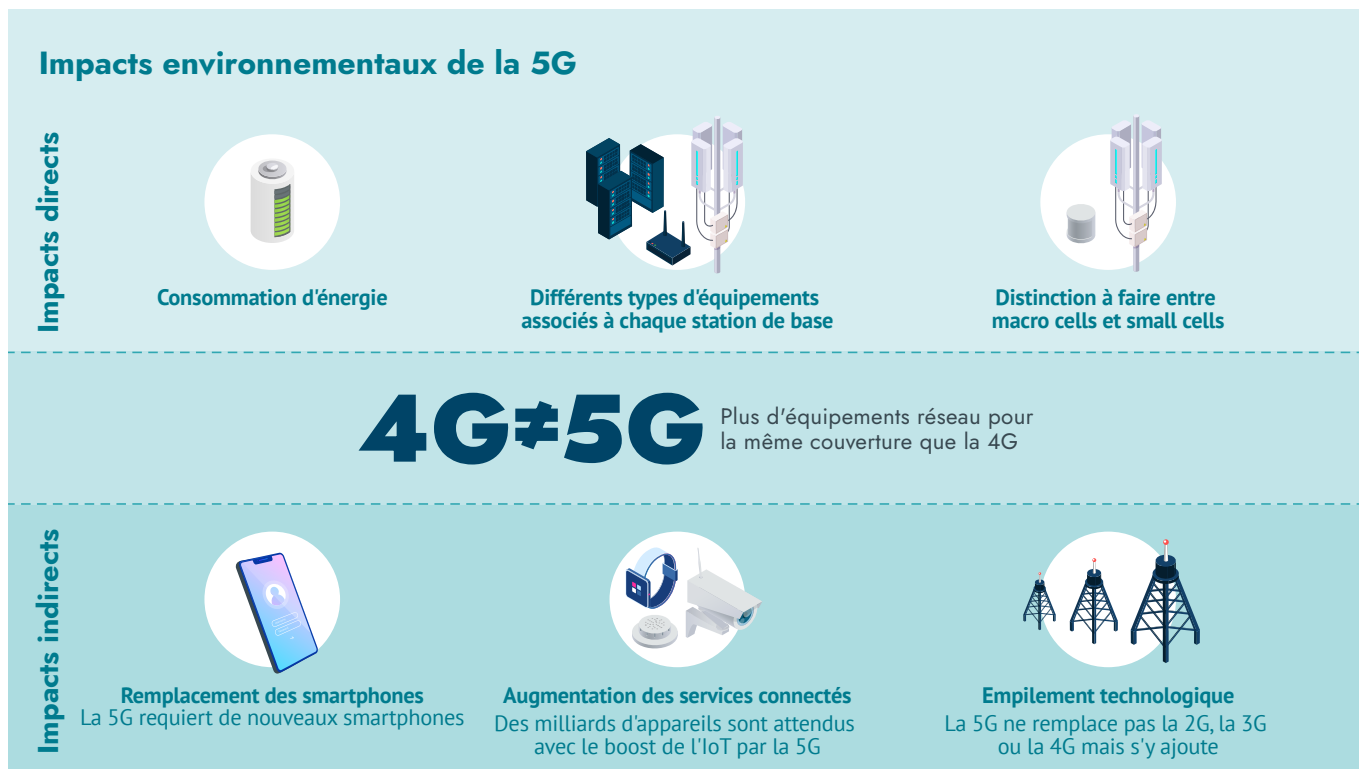
Rob Kasegrande

► **L'edge computing** : Tout type de programme informatique qui permet le calcul et le stockage des données à la demande, afin d'économiser la bande passante et d'améliorer les temps de réponse. L'edge computing est souvent associé à des usages liés à l'IoT, aux jeux, la réalité virtuelle (RV), les smart cities, l'industrie « smart » (IIoT), ou encore aux voitures connectées et aux voitures autonomes. Sanket Nesargi, de Deloitte, explique que « sans l'edge computing, la 5G est simplement une technologie de réseau rapide ». ² Dans le même article, Rob Kasegrande ajoute : « D'un point de vue commercial, la 5G et l'edge computing entretiennent une relation symbiotique. Les aspects transformationnels de la 5G sont étroitement liés à l'edge. Sans edge computing, la 5G ne serait pas en mesure de tenir les promesses qu'elle est censée tenir. Les avancées technologiques telles que l'IA, le machine-learning, l'analyse profonde et la RA/RV ne seront possibles que grâce à une connectivité à haut débit associée à un traitement des données à proximité de l'utilisateur final. »

¹ Deloitte, *Mise à niveau de l'infrastructure des communications : la nécessité de la fibre profonde*, 2017

² <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/consulting/articles/what-is-5g-edge-computing.html> (dernière consultation : 23/03/2021)

Enjeux environnementaux liés à la 5G



Conformément aux objectifs de l'Accord de Paris visant à atteindre la neutralité climatique dans l'UE d'ici 2050, le Conseil européen a entériné un objectif contraignant pour l'UE d'une réduction intérieure nette d'au moins 55% des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à 1990.³ Dans un rapport sur les effets d'un réchauffement climatique de 1,5°C publié en octobre 2018, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a précisé la quantité cumulée de CO₂ qu'il était encore possible d'émettre tout en ne dépassant pas un réchauffement climatique de 2°C d'ici 2100.⁴ En 2020, le Commissaire général au développement durable en France a publié un rapport montrant que « compte tenu de l'évolution de la population mondiale à l'horizon 2100 et en respectant une répartition strictement égale de la quantité de CO₂ restant à émettre, le « budget » CO₂ de chaque Terrien devrait être compris entre 1,6t (hypothèse basse) et 2,8t (hypothèse haute) de CO₂ par an entre aujourd'hui et 2100, sans inclure les émissions

résiduelles d'autres GES ».⁵ La 5G sera-t-elle un levier ou un obstacle à la réalisation de ces objectifs ?

Actuellement, la littérature disponible est encore trop rare pour évaluer spécifiquement les impacts environnementaux des réseaux 5G. Toutefois, en examinant l'essor des objets connectés, que la 5G devrait stimuler, et le remplacement des smartphones nécessaires pour accéder au réseau mobile 5G, nous pouvons mettre en évidence quelques premiers domaines d'impact potentiels et des questions clés pour placer le déploiement de la 5G dans le contexte de la durabilité.

La 5G : un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux ?

La 5G pourrait être un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux de deux manières : d'une part, si l'utilisation de la 5G se trouvait

³ <https://www.consilium.europa.eu/media/47296/1011-12-20-euco-conclusions-en.pdf> (dernière récupération : 08/04/2021)

⁴ Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Khesghi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférián et M.V. Vilariño, 2018 : *Voies d'atténuation compatibles avec 1,5°C dans le contexte du développement durable*, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, et T. Waterfield (eds.)]. Sous presse

⁵ Commissariat général au développement durable, *L'empreinte carbone des Français reste stable*, 2020

être suffisamment limitée pour ne pas accélérer le remplacement des smartphones et n'augmente pas le trafic de données - voire le réduit ; d'autre part, si les gains d'optimisation de la 5G dans le secteur industriel compensaient les coûts environnementaux de la 5G. Ces gains seront-ils suffisants pour faire une différence positive dans la réduction des émissions compatible avec les limites de la planète ?

Première hypothèse : un déploiement et une utilisation limités de la 5G à des usages spécifiques

Comme la 5G ajoute une couche supplémentaire aux réseaux 2G, 3G et 4G déjà existants pour les réseaux mobiles, ainsi qu'à la fibre et au DSL, il est impensable qu'une généralisation de la 5G réduise l'impact environnemental des réseaux.

Si la 5G est suffisamment limitée pour ne pas stimuler le renouvellement des smartphones et n'augmente pas le trafic de données, les gains d'optimisation de la 5G permettraient de réduire les impacts environnementaux, les stations 5G étant plus efficaces sur le plan énergétique que les stations 4G. Cependant, ce scénario impliquerait également de bouleverser complètement le scénario actuel de déploiement de la 5G pour le limiter à des zones spécifiques où aucune autre option plus durable n'est possible. En outre, cela signifierait également l'abandon des utilisations de divertissement principales pour lesquelles la 5G est prévue.

Deuxième hypothèse : des gains d'optimisation suffisants dans l'industrie pour compenser les coûts environnementaux du déploiement et de l'utilisation de la 5G.

Avec l'IA⁶ et l'IoT⁷, la 5G est souvent prévue comme permettant l'innovation et les optimisations industrielles. Cependant, nous n'avons pas trouvé assez de documentation et de connaissances durant la période de notre étude pour pouvoir juger si ces gains d'optimisation seraient suffisants pour compenser les coûts environnementaux du déploiement et de l'utilisation des réseaux et dispositifs 5G. Les documents promettant des gains environnementaux n'en apportent pour l'instant pas la preuve, leur chiffrage étant exclusivement axé sur les avantages économiques et pour le consommateur. Pour être certain que les gains d'optimisation compensent les coûts environnementaux des réseaux et dispositifs 5G, des analyses du cycle de vie (ACV) comparatives et conséquentielles doivent être réalisées sur au moins deux cas comparables, la différence étant que la 5G est utilisée ou non pour optimiser la production. L'ACV prenant en compte de multiples indicateurs environnementaux, une telle comparaison permettrait d'éviter de répercuter, ou pire d'augmenter, les impacts environnementaux d'un domaine à l'autre en choisissant une solution moins vertueuse qu'elle ne le prétend.

.....
⁶ Voir notre étude de cas sur l'intelligence artificielle

⁷ Voir notre étude de cas sur l'IoT et les objets connectés

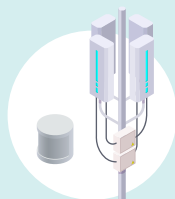
Illustration simplifiée de la 5G



Un appareil 5G (smartphone, objets connectés, M2M) émet ou reçoit un signal

Les appareils sont susceptibles d'être plus gourmands en ressources et plus complexes.

Le nombre d'appareils s'accroît rapidement pour permettre l'ubiquité de l'IoT



Une antenne 5G reçoit ou émet un signal

Plus d'antennes sont nécessaires pour couvrir une zone similaire à celle de la 4G.

Les antennes *macro cells* 5G peuvent être connectées en 5G à une multitude de *small cells*.

Les antennes 5G peuvent être équipées de dispositifs complémentaires tels que des batteries lithium-ion et des panneaux photovoltaïques en raison des pics de consommation d'énergie.



Une quantité exponentielle de données transite par les réseaux de liaison et de fibre vers les centres de données du cloud

Les cloudlets (petits clouds) peuvent être utilisés pour traiter les données plus près de la source.

Plus les données voyagent et sont traitées, plus elles sont gourmandes.

La 5G : un frein à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux ?

Il est actuellement trop tôt pour prédire précisément les impacts environnementaux de la 5G, ou estimer dans quelle mesure la 5G va accélérer le renouvellement des smartphones et la multiplication des IoT, et quels seront les effets rebonds associés. Cependant, il est évident que le déploiement de la 5G ira de pair avec un renouvellement des smartphones et une augmentation de la place des objets connectés dans notre quotidien.

« La course aux smartphones 5G est l'enjeu critique le plus immédiat lié aux impacts environnementaux de la 5G. »

Le remplacement des smartphones : un enjeu critique et immédiat

L'un des principaux problèmes liés à la 5G est le remplacement des smartphones, car les smartphones 4G ne sont pas compatibles avec la 5G. Actuellement, la pénétration des smartphones en Europe est remarquablement élevée.⁸ Cela signifie que pour bénéficier de la 5G, les Européens devront acheter un nouveau smartphone. Cela réduira la durée de vie des

smartphones 4G, qui fonctionnent encore parfaitement pour les usages actuels, et conduira potentiellement à un renouvellement massif du parc européen de smartphones, alors même que l'impact environnemental des smartphones est déjà élevé. Les résultats de notre ACV montrent que dans l'UE28 en 2019, les smartphones ont contribué à eux seuls à environ 9% des impacts environnementaux du numérique sur le climat⁹.

En outre, un rapport de 2020 comparant les smartphones 4G et 5G montre que les smartphones 5G intègrent davantage de composants (écran plus grand, plus de caméras, modem 5G) et une plus grande puissance de calcul¹⁰, ce qui est susceptible d'augmenter l'empreinte liée à la fabrication.

Ces aspects font de la course aux smartphones 5G l'enjeu critique le plus immédiat lié aux impacts environnementaux de la 5G dans l'état actuel de nos connaissances.

L'essor des appareils connectés

Avec la 5G, de nouveaux usages sont anticipés, portés par l'IoT. On s'attend à ce que les appareils connectés à usage personnel et professionnel se développent, comme les appareils de réalité augmentée ou de réalité virtuelle, les jeux, le streaming vidéo 4K et même 8K, potentiellement combinés avec des facilitateurs technologiques en plein essor comme l'IA ([voir nos études de cas sur l'IA et l'IoT](#)). Cisco prévoit que « d'ici à 2023, les appareils IoT

8 Dans notre étude ACV, nous utilisons une estimation du taux de pénétration du smartphone à 92% en EU-28 en 2019 avec plus de 473 500 000 unités pour environ 513 000 000 habitants.

9 Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. et Lees Perasso, E. GreenIT.fr. 2021. *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie*

10 Gauthier Roussilhe, Évolution des smartphones 4G vers 5G : *Comment évaluer la situation et l'empreinte environnementale*, 2020

représenteront 50% de l'ensemble des équipements réseau (près d'un tiers seront sans fil) » et qu'« une connexion 5G générera près de 3 fois plus de trafic qu'une connexion 4G ». ¹¹ Ces usages requièrent des dispositifs de plus en plus gourmands nécessitant de nombreux composants et une forte consommation énergétique (puissance de calcul, capteurs). Tout comme pour les smartphones 5G, la multiplication de ces composants pour les appareils connectés est un enjeu important compte tenu de l'augmentation spectaculaire anticipée des appareils connectés

Selon Gartner, les deux catégories de terminaux IoT 5G les plus importantes dans le monde sont les caméras de surveillance extérieures et les voitures connectées (voir le tableau ci-dessous).

Bases installées de terminaux IoT 5G dans le monde, 2020 et 2023 (en milliers d'unités)				
Segment	2020 Volume	Part de marché en 2020 (%)	2023 Volume	Part de marché en 2023 (%)
Voitures connectées-embarquées (grand public et commercial)-	393	11	19 087	39
Caméras de surveillance extérieures	2 482	70	15 762	32
Dispositifs télématiques pour flottes télématiques	135	4	5 146	11
Dispositifs de péage à bord des véhicules	50	1	1 552	3
Services d'urgence	61	2	1 181	2
Autres	400	11	5 863	12
Total	3 522	100	48 590	100
Estimations approximatives. En raison des arrondis, les chiffres peuvent ne pas correspondre précisément aux totaux indiqués – <i>Source: Gartner (October 2019)</i>				

En complément, la plupart des connexions IoT (incluant la 5G mais pas seulement) devraient être réalisées pour les maisons et les espaces de travail connectés. ¹²

« Avec les smartphones 5G, la prolifération des objets connectés est un enjeu environnemental crucial de la high-tech mis en évidence par la 5G. »

Cela montre que les appareils connectés 5G les plus importants en termes de part de marché devraient également nécessiter de nombreux composants embarqués. ¹³ Entre temps, les caméras de vidéosurveillance 5G devraient être de plus en plus haute définition ¹⁴ (Nokia parle même de caméras de vidéosurveillance 4K ou 8K) ¹⁵, ce qui entraînera une complexité supplémentaire en termes de miniaturisation des composants pour les caméras elles-mêmes et rendra également plus difficile la gestion du trafic de données dans les réseaux 5G.

La révolution des objets connectés constitue un défi particulièrement sérieux pour les efforts visant à limiter les impacts environnementaux des technologies numériques, car les objets connectés sont fortement susceptibles de proliférer et de gagner en complexité. À l'instar des smartphones 5G, la prolifération des objets connectés est un enjeu environnemental crucial de la high-tech mis en évidence par la 5G : à mesure qu'ils se multiplient, leur utilisation de ressources en matières premières critiques augmente également ¹⁶ (voir notre étude de cas sur les matières premières).

Quels sont les impacts environnementaux des équipements du réseau 5G ?

Le fait que la 5G utilise différentes bandes de fréquences signifie qu'elle n'utilisera pas nécessairement les mêmes emplacements que les générations de réseaux précédentes. Si pour les fréquences 700 MHz, la 5G pourra s'appuyer sur les pylônes précédemment déployés pour les réseaux 2G, 3G et 4G et le réseau de fibre existant associés, ce ne sera pas systématiquement le cas pour les autres bandes : celles-ci nécessiteront une réadaptation du réseau de fibre et du réseau électrique en fonction

¹¹ <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (dernière extraction : 24/03/2021)

¹² <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (dernière extraction : 01/09/2021)

¹³ En effet, les voitures connectées comptent de nombreux capteurs avec une grande capacité de calcul pour pouvoir conduire en toute sécurité, même dans des zones non couvertes par des réseaux sans fil, ce qui nécessite de nombreux composants différents (voir notre étude de cas sur les véhicules autonomes).

¹⁴ <https://www.isrmag.com/5g-implications-security-video-surveillance-safe-cities/> (dernière extraction : 24/03/2021)

¹⁵ <https://cities-today.com/industry/5g-video-surveillance-met-smart-city/> (dernière extraction : 24/03/2021)

¹⁶ Florinda F. Martins, Hélio Castro, *Épuisement des matières premières et évaluation des scénarios dans l'Union européenne - Une approche d'économie circulaire*, 2019.

de leur plus petite portée. Cela nécessitera une augmentation du réseau de fibre et du support électrique, ainsi que des travaux de génie civil supplémentaires.¹⁷ La fibre n'est pas la seule infrastructure à devoir être redimensionnée : les serveurs, les câbles d'alimentation et le réseau de liaison doivent également être pris en compte. C'est toute la chaîne qui est concernée, avec un coût essentiellement économique.

« Concernant les antennes 5G, je n'ai pas vu d'ACV à leur sujet, je ne peux donc pas quantifier leurs impacts. Les nouveaux équipements 5G comprennent des MIMO, c'est-à-dire des antennes comportant plus de modules d'entrée et de sortie que les anciens modèles. Quel est l'impact environnemental de ces nouveaux types d'équipements ? En l'absence de données ouvertes sur le sujet, nous ne savons pas. »

Gauthier Roussilhe

Par ailleurs, le décommissionnement des 2G et 3G prévu sur plusieurs réseaux¹⁸ soulève d'autres questions concernant le renouvellement des appareils des utilisateurs finaux et le risque non négligeable d'accroître la fracture numérique au lieu de la réduire.

.....

Cependant, comme plus de cellules (*macro cells* et *small cells*) seront nécessaires pour les gammes 3,5 GHz et >24 GHz, on peut s'attendre à une augmentation de l'impact environnemental du réseau au moins liée à la fabrication en raison de l'augmentation du volume d'équipements réseau déployés pour couvrir une zone donnée - jusqu'à trois fois plus d'antennes pour couvrir les zones rurales que pour une couverture similaire en 4G.¹⁹

Efficacité énergétique de la 5G

Bien qu'il y ait un consensus sur le fait qu'une station de base 5G est globalement plus économe en énergie qu'une station 4G toutes choses étant égales par ailleurs²⁰, il est clair que le trafic de données augmentera énormément avec ou sans la 5G, mais encore plus avec la 5G : Ericsson Consumer Lab prévoit qu'« un utilisateur sur cinq pourrait utiliser 200 Go par mois sur des appareils 5G, soit 10 fois plus que l'utilisation actuelle des données cellulaires²¹ » et GSMA prévoit même une augmentation potentielle du trafic de données jusqu'à 1 000 fois.²² Même si les gains d'efficacité des stations 5G sont intéressants, les opérateurs de téléphonie mobile s'attendent à une augmentation de la consommation d'énergie avec la 5G : « Augmentation de l'énergie dans la 5G, sans que le jury ne sache encore à quel point cette augmentation d'énergie peut être due à la densification et l'augmentation de la demande de trafic ». ²³ Les gains d'efficacité sont généralement compensés par une demande accrue, ce qui est connu sous le nom de paradoxe de Jevon, ou effet rebond (**voir notre étude de cas sur les effets rebonds**).

Cela signifie que la société doit faire un vrai choix dans les années à venir pour limiter à la fois l'expansion des objets connectés et les effets rebonds liés aux usages

17 La 5G est décrite comme pouvant « changer la donne, où le sans-fil ne peut plus exister sans fil » par le FETH Council Europe (<https://www.ftthcouncil.eu/documents/COM-190313-FibreFor5G-ConvergenceStudy-Presentation-RafMeersman%20-%20v4%20-%20publish.pdf>, p.5, dernière consultation le 23/03/2021) ; <https://www.corning.com/in-building-networks/worldwide/en/home/knowledge-center/5g-networks-impact-on-fibre-optic-cabling-requirements.html> (dernière consultation le 23/03/2021) ; <https://www.isemag.com/2020/11/telecom-5g-fibre-power-small-cells-partnerships/> (dernière consultation le 23/03/2021) voir notre étude de cas sur l'IoT et les objets connectés

18 <https://edition.cnn.com/2021/01/07/tech/verizon-3g-shutdown-paused/index.html> (dernière extraction : 08/04/2021) / <https://www.att.com/support/article/wireless/KM1324171> (dernière consultation : 08/04/2021)

19 Le cabinet de conseil Tactis, qui a participé aux essais 5G, a étudié les capacités de propagation de la 5G sur la bande 3,5 GHz. Pour ce faire, ils ont simulé, sur différentes topologies du territoire, un réseau 5G dans la bande 3,5 GHz. Ils l'ont ensuite comparé à la couverture de la bande 4G 800 MHz simulée depuis les mêmes sites. Ils en tirent deux conclusions : « 1. En zone périurbaine, 30 % de sites supplémentaires seraient nécessaires en 5G pour maintenir une couverture et un niveau de service équivalent à la 4G ; 2. En milieu rural, il faudrait construire deux fois plus de sites pour avoir une couverture équivalente, et même trois fois plus de sites pour délivrer un service haut débit, au moins 8 Mbps. Au-delà de ces problèmes de couverture, comme on peut déjà le constater pour la 4G, une densification du réseau conduisant à la création de sites supplémentaires est nécessaire pour absorber les demandes d'augmentation de capacité. » (<https://www.tactis.fr/simulation-couverture-5g/>, dernière consultation : 24/03/2021)

20 Des publications techniques décrivent des cas d'utilisation de la consommation d'énergie de la 5G et explorent l'architecture de réseau nécessaire pour être plus efficace sur le plan énergétique (<https://www.ericsson.com/en/blog/2019/9/energy-consumption-5g-nr>, dernière extraction : 24/03/2021), d'autres publications signalent que les stations de base de la 5G consomment beaucoup plus d'énergie que les stations de base de la 4G (dernière extraction : 24/03/2021).

21 <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/consumerlab/reports/5g-consumer-potential> (dernière consultation : 24/03/2021)

22 <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/energy-efficiency-2/> (dernière extraction : 24/03/2021) ; <https://www.fiercewireless.com/tech/5g-base-stations-use-a-lot-more-energy-than-4g-base-stations-says-mtn> (dernière extraction : 24/03/2021) ; <https://www.mtnconsulting.biz/product/operators-facing-power-cost-crunch/> (dernière extraction : 24/03/2021)

23 <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/energy-efficiency-2/> (dernière consultation : 24/03/2021)

Avis d'expert



Gauthier Roussilhe est un chercheur et designer spécialisé dans les impacts environnementaux du numérique. Il collabore avec tous les acteurs du domaine. Il a développé le plugin Carbonalyzer, assure de nombreuses conférences et cours à EcolInfo (CNRS) et collabore

avec avec GreenIT.fr. En 2020, il a rédigé un rapport sur la 5G et la transition écologique et une étude plus courte commandée par HOPⁱ évaluant l'impact environnemental du renouvellement du parc de smartphones avec l'arrivée de la 5G. Son dernier article, publié en mars 2021, s'intitule « Que peut faire le numérique pour la transition écologique ? ».

Quels sont les impacts environnementaux de la 5G ?

La 5G conduit à un renouvellement du parc de smartphones, au déploiement de capteurs et de nouveaux objets connectés qui doivent être compatibles avec la 5G, à la construction de nouvelles antennes et de nouveaux centres de données, ce qui entraînera vraisemblablement une augmentation du trafic. Au-delà de ces effets, la 5G conduit potentiellement à de nouveaux usages : on parle de vidéo 4K par exemple, de réalité virtuelle, de réalité augmentée, de streaming de jeux vidéo depuis des appareils mobiles. La 5G a également le potentiel de stimuler l'avènement des véhicules autonomes, même s'ils ne sont pas encore prêts à se généraliser.

Concernant les antennes 5G, je n'ai pas vu d'ACV à leur sujet, je ne peux donc pas quantifier leurs impacts. Les nouveaux équipements 5G comprennent des MIMO, qui sont des antennes comportant plus de modules d'entrée et de sortie que les anciens modèles. Quel est l'impact environnemental de ces nouveaux types d'équipement ? En l'absence de données ouvertes sur le sujet, nous ne le savons pas.

Concernant le secteur du numérique, on semble oublier que l'enjeu aujourd'hui n'est pas de geler les émissions à leur niveau actuel, mais de les diviser par quatre. Le secteur numérique tel qu'il est aujourd'hui consomme trop pour respecter les objectifs de l'Accord de Paris. L'ITU avait formulé un plan de réduction des émissions du secteur des opérateurs pour rester en dessous de 1,5°C. La recommandation de l'ITU vise une réduction de 50% d'ici 2030 et une diminution annuelle de 4,2%.ⁱⁱ

Si je suis un citoyen qui découvre ce sujet : quels sont les 3 points principaux que je dois retenir sur les impacts environnementaux positifs et négatifs de la 5G ?

Nous devons réfléchir à l'orientation que nous donnons au secteur numérique par rapport à des questions de transition extraordinairement importantes et non négociables si nous voulons atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. La question de politique publique que nous devons nous poser est la suivante : cette infrastructure, ce développement, nous permettent-ils de stabiliser le monde à moins de +2°C ?

La 5G est aujourd'hui l'incarnation d'un débat sur le modèle de développement numérique futur. Ce débat aura lieu, qu'on le veuille ou non, en relation avec les véhicules autonomes, la vidéosurveillance, etc. Il pose la question de savoir où nous voulons emmener le secteur numérique et le fait que cela peut être géré et décidé collectivement.

Individuellement, si je considère les impacts environnementaux en tant que citoyen, cela signifie que la 5G ne doit pas être un moteur pour renouveler mon équipement, et qu'il faut se battre politiquement pour savoir ce que l'on peut faire ou ne pas faire avec le secteur numérique et encore plus avec la 5G.

ⁱ HOP: Halte à l'Obsolescence Programmée

ⁱⁱ ITU, *Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement*, 2020, p.11

du numérique, et cela concerne tout le monde, des décideurs politiques aux citoyens en passant par les acteurs économiques.

« Cela signifie que la société doit faire un vrai choix dans les années à venir pour limiter à la fois l'expansion des objets connectés et les effets rebonds liés aux usages du numérique, et cela concerne tout le monde, des décideurs politiques aux citoyens en passant par les acteurs économiques. »

Conclusion

La 5G est un sujet complexe, et il y a encore trop d'inconnues pour mesurer ses impacts environnementaux. Si la littérature a beaucoup à dire sur les avantages économiques de la 5G pour les marchés des loisirs et de la sécurité, elle est muette sur le sujet des exemples concrets et quantifiés des impacts environnementaux potentiellement positifs de la 5G, tout comme elle l'est

sur la quantification de ses impacts directs. En l'état actuel des connaissances, les impacts environnementaux les plus critiques de la 5G sont liés en premier lieu à l'augmentation du nombre de nouveaux appareils qu'elle nécessite (smartphones et objets connectés) et l'augmentation de leurs performances, ce qui nécessite des quantités croissantes de matières premières. L'augmentation des ressources nécessaires à la fabrication de ces appareils signifie que l'UE est de plus en plus dépendante de ces matières premières critiques²⁴ et qu'elle contribue à leur épuisement. Plus ces ressources sont rares, plus leur extraction est gourmande en énergie et en eau et donc polluante (**voir notre étude de cas sur les matières premières**).

Aujourd'hui, il n'y a pas de preuve tangible que la 5G pourrait effectivement être un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux compte tenu des objectifs de son déploiement et de son utilisation. Si la 5G précipite la production de plus de terminaux et d'objets connectés, cela va indéniablement exacerber l'exploitation minière et contribuer à la non-durabilité du secteur numérique.

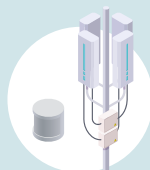
Étant donné que la 5G s'appuie sur des réseaux mobiles préexistants, comme l'ont fait toutes les générations précédentes de réseaux mobiles, la 5G soulève la question suivante : **est-il durable et utile de disposer, pour**

²⁴ https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en (dernière consultation : 25/03/2021)

Illustration simplifiée des zones d'impact environnemental de la 5G



Un appareil 5G (smartphone, objets connectés, M2M) émet ou reçoit un signal



Une antenne 5G reçoit ou émet un signal



Une quantité exponentielle de données transite par les réseaux de liaison et de fibre vers les centres de données du nuage

⊗ Les appareils sont susceptibles d'être plus gourmands en ressources et plus complexes

⊗ Plus d'antennes sont nécessaires pour couvrir une zone similaire à celle de la 4G

Les cloudlets (petits nuages) peuvent être utilisés pour traiter les données plus près de la source

⊗ Le nombre d'appareils monte en flèche pour atteindre l'ubiquité de l'IdO

⊗ Les antennes macrocellulaires 5G peuvent être connectées en 5G à une multitude de petites cellules

⊗ Plus les données voyagent et sont traitées, plus elles sont gourmandes

⊗ Les antennes 5G peuvent être équipées de dispositifs complémentaires tels que des batteries lithium-ion et des panneaux photovoltaïques en raison des pics de consommation d'énergie

⊗ Impacts environnementaux potentiellement exponentiels ⊗ Impacts environnementaux potentiellement très élevés ⊗ Impacts environnementaux potentiellement élevés ⊗ Impacts environnementaux atténués confirmés et compatibles avec les limites planétaires ⊗ Impacts environnementaux positifs confirmés

une même zone, d'un réseau filaire en fibre optique à très haut débit, d'un réseau mobile à très haut débit et encore du même réseau par satellite ?

La 5G peut être utile dans des cas spécifiques, notamment à des fins industrielles particulières et pour des zones où de nombreux appareils doivent être connectés en même temps, mais peut-on se permettre, d'un point de vue environnemental, de disposer du très haut débit partout, à partir de n'importe quel appareil, avec trois types de technologie haut débit différents, tout en multipliant par trois les impacts environnementaux de la connectivité à haut débit ?

« Est-il durable et utile de disposer, pour une même zone, d'un réseau filaire en fibre optique à très haut débit, d'un réseau mobile à très haut débit, et encore du même réseau par satellite ? »

La 5G est présentée par les opérateurs comme un relais de croissance. Alors que la 5G et les réseaux mobiles de nouvelle génération façonnent le paysage urbain et prennent de plus en plus une dimension politique et sociétale, les mises en œuvre de réseaux mobiles soulèvent le besoin de concertation entre les citoyens et les collectivités régionales et locales, ainsi que les autorités nationales de régulation des télécommunications. ■

Recommandations pour une évolution numérique compatible avec le Green Deal

Au niveau transnational, et motivés par les préoccupations concernant les futures générations de réseaux mobiles, les décideurs politiques de toute l'Europe ont saisi l'occasion d'asseoir **autour de la même table tous les acteurs - des décideurs politiques aux citoyens, en passant par les industriels, les ONG, les institutions telles que le BEREC et ses équivalents nationaux, les scientifiques des univers technologique, médical et des sciences sociales.**

Comme condition préalable au déploiement, les scientifiques ont mis en commun leurs efforts et leurs connaissances pour mesurer les impacts environnementaux, sanitaires et sociaux associés à trois scénarios de déploiement : scénario 1, déploiement complet ; scénario 2, déploiement limité à des usages industriels spécifiques ; scénario 3 : déploiement complémentaire tenant compte des besoins des citoyens et des options d'écoconception. Ensemble, ils ont dressé une feuille de route des futures infrastructures numériques dans les États européens, avec des orientations clés garantissant des objectifs efficaces et rigoureux pour diviser par six les impacts environnementaux du numérique d'ici 2050, et des objectifs spécifiques pour les équipements des utilisateurs, les réseaux et les centres de données.

Ce plan ambitieux a permis d'élaborer une stratégie résiliente pour le numérique en Europe, qui limite la superposition des réseaux à très haut débit et adopte plutôt une stratégie fondée sur la complémentarité et l'interopérabilité des réseaux et répond à la nécessité de réduire la fracture numérique.

Cette ambitieuse concertation numérique a permis de renouveler la gouvernance numérique et d'impliquer largement les citoyens européens, ce qui a débouché sur une plus grande confiance, les différentes préoccupations ayant été abordées et traitées.

En condition préalable au financement de l'innovation par les fonds européens, des analyses du cycle de vie comparatives, attributives et conséquentielles (impacts indirects, effets induits et effets rebonds) ont été rendues obligatoires pour mesurer la balance entre les bénéfices et les coûts environnementaux d'une technologie utilisée pour réduire l'empreinte environnementale.

Cela s'applique au financement de la 6G ainsi qu'au financement de toute autre innovation.

Des études indépendantes ont été menées sur les impacts sanitaires des bandes 3,5 GHz et >24 GHz afin d'établir clairement si ces ondes ont des effets néfastes sur la santé humaine ou pas.

Les véhicules autonomes

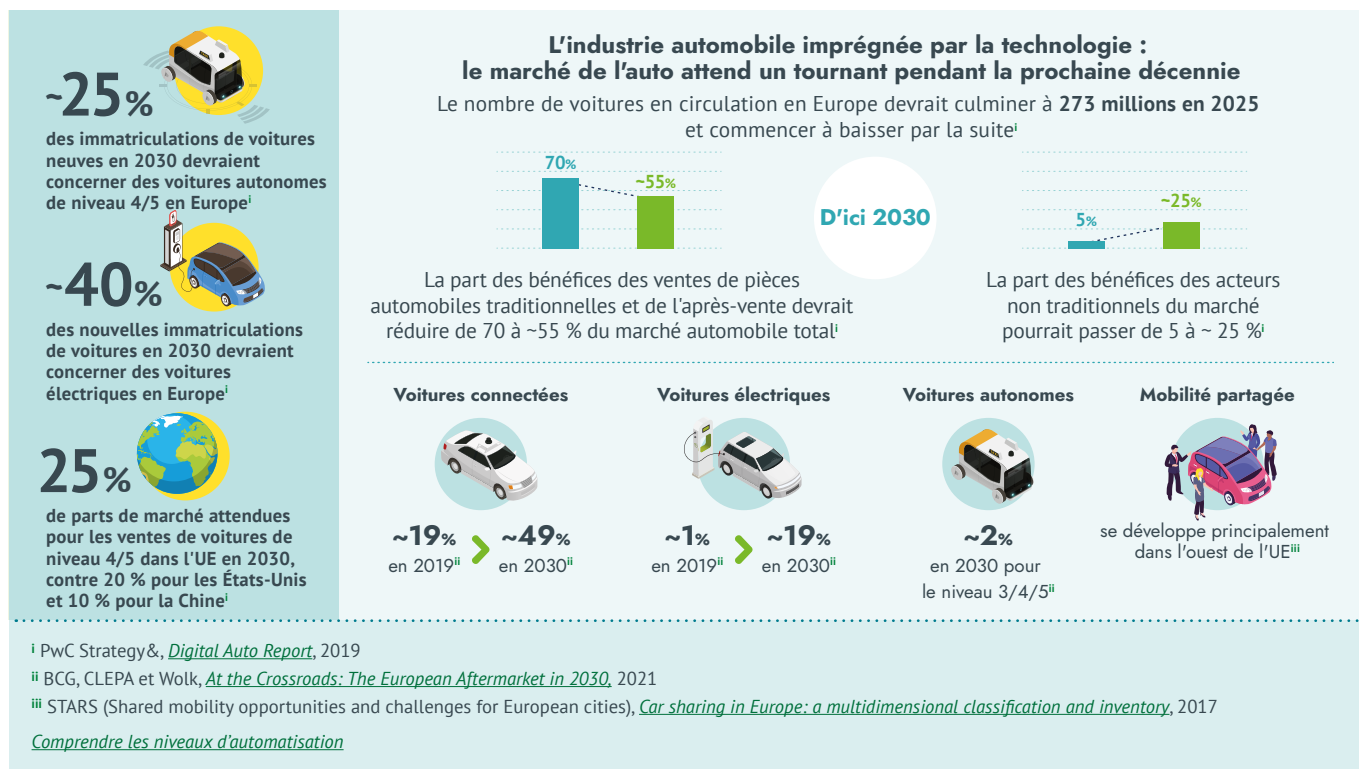


Sommaire

Les clés pour comprendre.....	page 56
Résumé de l'étude de cas.....	page 56
Définitions.....	page 56
Qu'est-ce qu'un véhicule autonome ?.....	page 56
Notions principales.....	page 57
Enjeux environnementaux liés à l'utilisation des véhicules autonomes	page 58
Les véhicules autonomes : un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux?.....	page 58
Les véhicules autonomes : un obstacle à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux ?.....	page 61
Conclusion	page 63
Recommandations pour une évolution du numérique compatible avec le Green Deal.....	page 63



Les clés pour comprendre



Résumé de l'étude de cas

Les véhicules autonomes sont au croisement des secteurs du transport et du numérique : ils sont connectés, disposent d'un système informatique interne pour traiter les données reçues par leurs multiples capteurs, et s'appuient plus que jamais sur des technologies avancées telles que l'IA, le haut débit mobile et l'IoT. Avec le développement des TIC, de nombreuses applications novatrices sont testées dans le but de développer de nouveaux marchés technologiques. Les voitures connectées et autonomes (VCA) entrent dans cette catégorie. L'engouement pour ce nouveau type de véhicule dépasse de loin l'ampleur de son entrée et de sa pénétration sur le marché de masse. Mais comment les véhicules autonomes peuvent-ils changer nos modes de transport et quels sont les défis à relever pour que les voitures autonomes soient davantage un levier qu'un obstacle en termes d'impact environnemental ?

Les émissions de gaz à effet de serre dues au transport en voiture représentaient environ 60,4 % des émissions

totales de GES provenant du transport routier dans l'UE28 en 2018, alors que le transport représentait 21,8 % des émissions totales de GES dans l'UE28.¹ Les projets de véhicules autonomes se développent mais ne sont pas encore sur le marché en raison de l'absence d'un cadre réglementaire qui leur permettrait d'emprunter régulièrement les routes. Parallèlement, le secteur des transports subit de nombreuses transformations qui influencent aussi fortement son empreinte environnementale : le développement du marché de la voiture électrique, l'essor des plateformes de réservation de trajets et le covoiturage sont quelques-unes des grandes transformations que connaît le secteur des transports.

Définitions

Qu'est-ce qu'un véhicule autonome ?

Une voiture autonome est un véhicule capable de se déplacer en toute sécurité en détectant son environnement grâce à une variété de capteurs, avec peu ou pas d'intervention humaine. Elle peut également être appelée voiture sans conducteur ou véhicule autonome.

¹ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> (dernière consultation : 13/04/2021)

Six niveaux de véhicules connectés et automatisés

Dans la norme SAE J3016, SAE International, anciennement connue sous le nom de Society of Automotive Engineers, définit six niveaux d'automatisation de la conduite, du niveau 0 (pas d'automatisation) au niveau 5 (autonomie complète: le véhicule peut conduire partout et dans toutes les conditions avec des fonctions de conduite automatisée).² Cette taxonomie est largement utilisée par l'industrie pour définir les fonctionnalités de la conduite autonome.

Dans cette taxonomie, l'automatisation de la conduite commence au niveau 3, avec une automatisation conditionnelle : le système exécute la direction et l'accélération/décélération, ainsi que la surveillance de l'environnement de conduite, mais le conducteur humain peut conduire si nécessaire. Le niveau 4 correspond à une automatisation poussée : l'homme assis à la place du conducteur n'est pas obligé de prendre le relais, mais le véhicule automatisé peut conduire dans des conditions limitées et ne fonctionnera que si ces conditions sont toutes remplies. Les véhicules de niveau 4 peuvent être utilisés pour des taxis locaux sans conducteur, par exemple. Au niveau 5, le système d'automatisation de la conduite peut conduire le véhicule dans toutes les conditions.³ McKinsey prévoit que la technologie de niveau 4 sera disponible entre 2020 et 2022, et que le niveau 5 arrivera en 2030 au plus tôt.⁴ PwC Strategy& prévoit que le niveau 4 sera disponible à faible vitesse et dans des zones restreintes à partir de 2023 dans l'UE, tandis que les voitures de niveau 5 prêtes à rouler ne devraient pas être disponibles avant 2028. Environ 25 % des nouvelles immatriculations de voitures devraient être dotées d'une autonomie de niveau 4/5 d'ici 2030.⁵

Notions principales

► **Société de réservation de trajets** : Une société de réservation de trajets (« *ride-sharing* » ou « *ride-hailing* ») fonctionne via une application mobile et un

site web pour mettre en relation des passagers avec des conducteurs de véhicules à louer. Contrairement aux taxis, ces sociétés ne peuvent pas légalement être hélées dans la rue. Les sociétés de réservation de trajets les plus connues en Europe sont Uber et Bolt. On sait que ce mode de transport contribue à la congestion routière, réduit l'utilisation des transports publics et n'a pas d'impact substantiel sur la possession d'un véhicule.⁶ On estime que la réservation de trajet sans mise en commun est plus polluante qu'un trajet en voiture privée en raison des émissions provenant des trajets « à vide », mais la réservation de trajet électrique et en commun peut contribuer à réduire les émissions.⁷

► **Le covoiturage** : Ce mode de mobilité permet d'utiliser toute la capacité d'accueil d'une voiture : le covoiturage réduit les coûts de déplacement de chacun (frais de carburant, péages) et est plus respectueux de l'environnement.

► **VMT (véhicules-miles parcourus) / VKT (véhicules-kilomètres parcourus)** : Mesure de la distance parcourue par les véhicules. Elle peut être utilisée à des fins de comparaison, pour voir si la distance parcourue par véhicule augmente ou diminue en fonction des scénarios et des hypothèses concernant la variation des comportements de déplacement.

► **Platooning / flochage** : Méthode utilisée pour conduire un groupe de véhicules ensemble afin d'augmenter la capacité des routes avec un système autoroutier automatisé. Le *platooning* est rendu possible par la conduite autonome, car il permet à de nombreux véhicules d'accélérer ou de freiner simultanément. Il permet de réduire la distance entre les véhicules en éliminant la distance nécessaire à la réaction humaine. Ce mode de transport est encore au stade de projet. Dans l'UE, le projet SARTRE a débuté en 2009, financé par la Commission européenne. En 2011, SARTRE a fait sa première démonstration réussie de la technologie de *platooning* au Volvo Proving Ground de Göteborg, en Suède. Une deuxième démonstration a eu lieu près de Barcelone,

2 <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic> (dernière consultation : 13/04/2021)

3 https://www.sae.org/standards/content/j3016_201401/ (dernière extraction : 13/04/2021)

4 <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/overview/autonomous-driving> (dernière consultation : 13/04/2021)

5 PwC Strategy&, *Digital Auto Report*, 2019, p.26

6 UCSUSA, *Ride-Hailing's Climate Risks Steering a Growing Industry toward a Clean Transportation Future*, 2020; Anne de Bortolli, *Environmental performance of shared micromobility and personal alternatives using integrated modal LCA*, 2021; Aggelos Soteropoulos, Martin Berger & Francesco Ciari, *Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies*, 2018.

7 UCSUSA, *Ride-Hailing's Climate Risks Steering a Growing Industry toward a Clean Transportation Future*, 2020

en Espagne, en 2012.⁸ Les avantages potentiels attendus du *platooning* sont une réduction de la congestion et des trajets pendant les périodes de pointe, une plus grande économie de carburant grâce à la réduction de la résistance de l'air, et moins de collisions. En termes de sécurité, il existe encore des inconvénients à cette technologie : en raison des risques de pirage, qui pourraient créer des situations de trafic dangereuses, et du problème d'attention si le conducteur doit réagir en cas de défaillance du logiciel ou du matériel.

Les enjeux environnementaux liés à l'utilisation des véhicules autonomes

Une sécurité routière accrue sans erreur humaine est de loin le changement le plus attendu des véhicules autonomes. Le confort de conduite et les possibilités accrues d'inclusion sociale sont également mis en avant pour promouvoir les avantages des véhicules autonomes. De même, les avantages pour le climat sont parfois mentionnés par la littérature, le plus souvent en termes vagues. Mais que savons-nous actuellement des avantages et des impacts environnementaux potentiels des véhicules autonomes ?

Véhicules autonomes : un levier pour atteindre les objectifs de réduction des impacts environnementaux ?

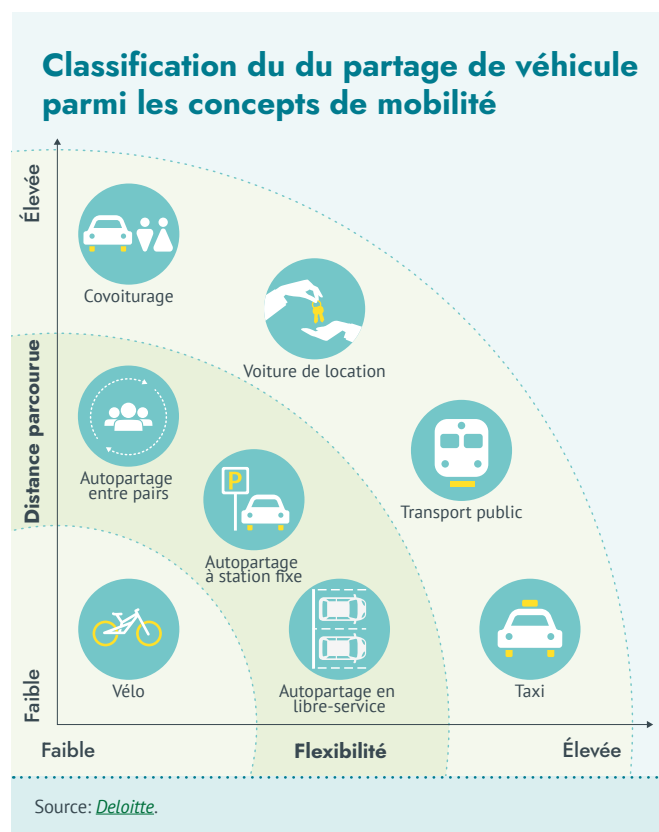
Le secteur des transports est en pleine mutation : le développement du marché de la voiture électrique, l'essor des plateformes de réservation de trajets et le covoiturage sont quelques-unes des transformations majeures que traverse le secteur des transports. Il serait inutile de chercher à comprendre les impacts environnementaux liés aux véhicules autonomes sans tenir compte de ces

autres innovations, qui se chevauchent et influencent déjà l'empreinte environnementale du secteur. En effet, les véhicules électriques contribuent à réduire la pollution atmosphérique dans les villes, et dans certains pays, en fonction des émissions de GES du mix énergétique, les véhicules électriques peuvent contribuer à réduire les émissions de GES produites pendant la phase d'utilisation du véhicule. Par ailleurs, le covoiturage permet de réduire le nombre de voitures utilisées et le nombre total de kilomètres véhiculés parcourus.

D'autre part, les plateformes de réservation de trajets ont un impact global négatif sur le secteur des transports, en déplaçant l'utilisation des transports publics vers la réservation de trajets privés.⁹

Mise en commun des véhicules pour répartir les impacts

En premier lieu, le meilleur moyen connu de réduire l'impact environnemental d'un voyage en voiture est de remplir le véhicule au plus fort de sa capacité en termes de nombre de passagers ou de marchandises, et de limiter le nombre de véhicules et la distance totale parcourue. En effet, lorsqu'un véhicule est partagé, les impacts environnementaux de ce véhicule sont égale-



⁸ <https://cordis.europa.eu/project/id/233683/reporting> (dernière consultation : 15/04/2021)

⁹ UCSUSA, *Ride-Hailing's Climate Risks Steering a Growing Industry toward a Clean Transportation Future*, 2020

ment partagés entre les passagers. Et ce n'est pas seulement l'énergie consommée par la conduite du véhicule qui est partagée, mais aussi les impacts liés au cycle de vie complet du véhicule (y compris sa production), proportionnellement à l'utilisation de chaque bénéficiaire. Si la conséquence du covoiturage est que les passagers n'achètent pas ou ne renouvellent pas leur voiture, les bénéfices environnementaux de cet effet de substitution sont encore plus importants. En revanche, cet avantage peut être réduit s'il accroît l'utilisation de la voiture au détriment d'autres méthodes de mobilité moins impactant pour l'environnement (transports publics, vélo, etc.).

Grâce aux méthodes d'optimisation rendues possibles par le numérique et à leur application éventuelle dans les systèmes de voitures autonomes, il pourrait être possible de réduire le trafic ; toutefois ces avantages théoriques sont limités par d'autres paramètres, tels que l'acceptation par les utilisateurs de temps de déplacement et d'attente plus longs, par exemple.¹⁰

« Le moyen le plus connu de réduire l'impact environnemental d'un trajet en voiture est de remplir le véhicule au plus fort de sa capacité en termes de nombre de passagers ou de marchandises et de limiter le nombre de véhicules et la distance globale parcourue [...] Lorsque des passagers partagent la même voiture, les impacts environnementaux sont également partagés proportionnellement. »

La contribution des véhicules électriques à la limitation des émissions de gaz à effet de serre

Dans un second temps, il est nécessaire de considérer les gains d'efficacité des véhicules électriques pour mieux comprendre comment les véhicules autonomes pourraient être un levier de réduction des impacts environnementaux. Une voiture autonome peut être un véhicule doté d'un moteur à combustion interne (parfois abrégé en ICEV ou ICE) ou un véhicule électrique, mais la tendance est au développement des véhicules électriques pour lutter contre le réchauffement climatique et les pics de pollution dans les villes - Il existe même aujourd'hui des camions électriques.

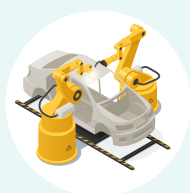
Une analyse comparative du cycle de vie du moteur à combustion interne et de la voiture électrique, publiée en 2018 par le département d'ingénierie industrielle de l'Université de Florence¹¹, montre que la voiture électrique permet une réduction importante de l'impact en termes de changement climatique en raison de la diminution des émissions de gaz pendant l'utilisation : en fonction du mix énergétique à la base de l'électricité utilisée pour charger la batterie, les émissions de gaz à effet de serre de la phase d'utilisation peuvent varier. Ils notent que cet avantage croît de manière significative à mesure que les sources renouvelables sont utilisées dans le mix pour la production d'électricité. D'autre part, cette étude montre également que le poids environnemental lié à la construction et à la fabrication des groupes motopropulseurs entraînent des impacts environnementaux plus importants en ce qui concerne l'acidification, la toxicité humaine, les particules, la formation d'ozone photochimique et l'appauvrissement de la couche d'ozone.¹² Ces constats concordants montrent que même si la voiture électrique présente effectivement de nombreux avantages en termes de réduction des émissions de GES dues aux transports, des améliorations sont encore possibles, notamment en ce qui concerne d'une part les impacts

10 L'acceptabilité de l'utilisateur est remise en question dans la section suivante, sur la base d'une étude passant en revue plusieurs comportements de déplacement et études sur l'utilisation des sols.

11 Francesco Del Pero, Massimo Delogu, Marco Pierini, *Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car*, 2018

12 L'étude conclut : « À la lumière des considérations précédentes, il apparaît clairement que l'évaluation des voitures électriques ne peut pas être effectuée à l'aide d'un seul indicateur, mais qu'elle doit plutôt être basée sur un système d'évaluation plus complexe. C'est pourquoi la pénétration des VEB sur le marché doit s'accompagner d'une politique prudente qui prenne en considération tous les aspects de la gestion de la LC. À ce jour, la mobilité électrique apparaît comme une stratégie efficace pour réduire les émissions de GES dans les régions où l'électricité est produite à partir de sources dont la contribution des sources fossiles est limitée. Cependant, la phase de production représente le principal obstacle à la pleine maturité de cette technologie du point de vue environnemental. Les futurs mélanges de réseaux électriques propres et le développement de processus de production plus durables pourraient fortement contribuer à la commodité des VEB en minimisant les émissions de GES ainsi qu'en contrant les revers potentiels en termes d'autres impacts environnementaux », dans Francesco Del Pero, Massimo Delogu, Marco Pierini, *Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car*, 2018, p.8 et 14-15.

Cycle de vie simple d'une voiture autonome



Fabrication
de la voiture



Expédition
de la voiture



Phase d'utilisation de la voiture
et utilisation *prorata temporis*
du réseau et des services



Fin de vie
de la voiture

environnementaux du processus de production des véhicules, que toute politique doit prendre en considération pour limiter les transferts d'impact, et d'autre part la composition du réseau électrique. Pour parvenir à une mobilité durable, ces paramètres doivent être pris en considération. Ce sera également le cas pour les véhicules autonomes, qu'ils soient conçus comme tels ou dans certains cas modifiés pour le devenir, et pouvant être aussi bien à combustion qu'électriques.

L'éco-conduite, le *platooning* et la connectivité des intersections pourraient-ils contribuer à réduire les impacts environnementaux des véhicules autonomes ?

La prochaine question que nous devons nous poser concerne les gains d'efficacité que les véhicules autonomes eux-mêmes peuvent réaliser. En effet, comme les véhicules autonomes comportent plus de capteurs et de composants électroniques que les véhicules à conduite humaine, ces composants informatiques sont considérés comme un « sous-système » dans le cycle de vie du véhicule. Une évaluation du cycle de vie, dont les droits d'auteur sont détenus par l'American Chemical Society¹³, portant sur les effets des sous-systèmes de détection et de calcul et des véhicules autonomes de niveau 4 (véhicules autonomes dans des conditions spécifiques) souligne que l'éco-conduite, le *platooning* et la connectivité entre les véhicules pourraient réduire les émissions d'énergie et de GES jusqu'à 9 % dans le cas évalué, bien que les sous-systèmes des voitures autonomes puissent augmenter la consommation d'énergie primaire des

véhicules et les émissions de GES de 3 à 20 %. L'étude évalue six scénarios différents : trois pour les véhicules électriques (petit, moyen et grand sous-système) et trois pour les véhicules à combustion interne (petit, moyen et grand sous-système). Les résultats de cette étude semblent montrer que l'éco-conduite, le *platooning* et les intersections connectées peuvent compenser l'énergie et les émissions de GES liées aux sous-systèmes de conduite autonome de véhicule dans quatre scénarios (sous-systèmes petits et moyens ajoutés aux véhicules électriques et sous-système petit et moyen ajoutés aux véhicules à combustion interne), cependant, cela ne se produit dans aucun des deux scénarios embarquant un grand sous-système de conduite autonome de véhicule.

« Les innovations numériques pour le transport doivent être envisagées en fonction des paramètres multiples et systémiques pour limiter les effets de bord : quels sont les autres modes de mobilité, et lesquels présentent le rapport distance/temps de parcours/impacts environnementaux le plus intéressant ? »

Sans surprise, les résultats montrent que le scénario ayant le moins d'impact parmi les six, en termes d'émissions de GES et de consommation d'énergie, est le véhicule électrique avec un petit sous-système : en effet, le sous-système plus léger nécessite moins de matériaux pour la phase de fabrication et, en raison de son poids plus léger, consomme moins d'énergie pendant la durée de la conduite. Pourtant, bien que ces

¹³ James H. Gawron, Gregory A. Keoleian, Robert D. De Kleine, et al, *Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Sub system and Vehicle Level Effects*, American Chemical Society, 2018 - Copyright © 2018, American Chemical Society.

résultats soient intéressants pour mettre à l'échelle les différents scénarios, une économie de 9 % de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre est encore peu de chose par rapport à l'enjeu climatique et aux bénéfices environnementaux que peut apporter le partage des trajets.

Cependant, la documentation qui explore les indicateurs environnementaux complémentaires tels que l'acidification, la toxicité humaine, les particules, la formation d'ozone photochimique, l'appauvrissement de la couche d'ozone ou l'épuisement des matières premières dans le cycle de vie des véhicules autonomes reste rare. Pour fournir un aperçu complet de la balance entre les bénéfices environnementaux et les coûts des véhicules autonomes, davantage d'études doivent être menées prenant également en considération les moyens de réduction directe - tels que le *platooning* et les intersections connectées - et l'utilisation au prorata de l'infrastructure et des services numériques rendant possible la mutualisation le regroupement et la connectivité des intersections.

En résumé, pour être un levier pour l'atteinte des objectifs de réduction des impacts environnementaux, les innovations numériques pour les transports doivent être considérées en fonction des paramètres multiples et systémiques pour limiter les effets secondaires : quels autres modes de mobilité existent, et lesquels présentent le rapport distance / temps de parcours / impacts environnementaux le plus intéressant, tout en n'étant pas contrebalancés par un manque d'acceptabilité des usagers ? Si le covoiturage est assurément un levier, c'est plus complexe dans le cas des véhicules électriques, qui présentent de grands avantages en termes d'émissions de GES et de consommation d'énergie, mais des transferts d'impacts importants en termes d'autres indicateurs environnementaux tels que l'acidification, la toxicité humaine, les particules, la formation d'ozone photochimique et l'appauvrissement de la couche d'ozone. En ce qui concerne les composants informatiques des véhicules autonomes, plus le sous-système autonome de la voiture est léger, plus son impact est faible, mais ces composants ajoutent des impacts environnementaux aux impacts globaux

.....

¹⁴ Voir nos études de cas sur l'IA et sur la 5G

¹⁵ Voir notre étude de cas sur les effets rebonds

¹⁶ Aggelos Soteropoulos, Martin Berger et Francesco Ciari, *Impacts des véhicules automatisés sur les comportements de déplacement et l'utilisation des sols : une revue internationale des études de modélisation*, 2018.

du véhicule - et l'infrastructure globale sur laquelle ils reposent (5G, IA) doit également être prise en compte.¹⁴ Dans ces conditions, la route par laquelle les véhicules autonomes peuvent être un levier pour limiter les impacts environnementaux est glissante ; elle nécessite un encadrement en amont des tendances comportementales des usagers pour maximiser les bénéfices environnementaux et limiter le risque d'un *lock-in*¹⁵ qui ne ferait qu'ajouter aux problématiques existantes. Mais quels changements l'arrivée des véhicules autonomes devrait-elle avoir sur les comportements de mobilité ?

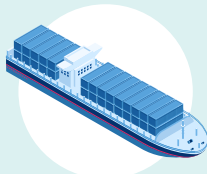
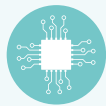
Véhicules autonomes : un obstacle à la réalisation des objectifs de réduction des impacts environnementaux ?

Dans la section précédente, nous avons vu que le covoiturage peut contribuer à réduire les impacts environnementaux du trafic routier, notamment lorsqu'il implique que les passants renoncent à posséder une voiture personnelle. L'arrivée des véhicules autonomes va-t-elle ou non stimuler ce comportement ? Plus largement, avec l'arrivée des voitures autonomes, à quels changements de comportement peut-on s'attendre qui diminueront ou augmenteront les impacts environnementaux ?

**« On constate surtout que les
véhicules autonomes augmentent
la distance parcourue par les
véhicules et réduisent la part des
transports publics et des modes de
transport lents. »**

Une étude autrichienne¹⁶ portant sur l'impact des véhicules automatisés sur les comportements de déplacement et l'utilisation des sols réalise une méta-analyse des études de modélisation existantes au niveau international (principalement en Europe et aux États-Unis) et compare les résultats concernant les différents scénarios et hypothèses étudiés.

Vue simplifiée des impacts environnementaux des voitures autonomes

	 Fabrication de la voiture	 Expédition de la voiture	 Phase d'utilisation de la voiture et utilisation <i>prorata temporis</i> du réseau et des services	 Fin de vie de la voiture
 Composants TIC	Importance de l'impact selon la taille du sous-système		 L'énergie de calcul, la contribution au poids du véhicule et l'utilisation au prorata des infrastructures de réseau et de services ajoutent aux impacts environnementaux	 Les composants TIC contribuent à augmenter l'impact environnemental du véhicule
 Véhicule doté d'un moteur à combustion interne	 Moins d'impact que le véhicule électrique en phase de production, fort impact sur l'épuisement des ressources	Selon le mode d'expédition et la distance	 Impact très élevé sur la plupart des indicateurs environnementaux : acidification, toxicité humaine, particules, appauvrissement de la couche d'ozone, formation photochimique d'ozone, etc.	 Contribue à une légère diminution de l'impact environnemental du véhicule
 Véhicule électrique	 Impact très élevé sur les émissions de gaz à effet de serre, les émissions de particules et la consommation d'énergie		<i>Selon les sources d'énergie utilisées pour alimenter le véhicule et son poids, les impacts de la phase d'utilisation peuvent être complètement différents</i>	 Contribue à une très légère diminution de l'impact environnemental du véhicule, les batteries électriques ne peuvent pas être entièrement recyclées
 Impacts environnementaux potentiellement exponentiels  Impacts environnementaux potentiellement très élevés  Impacts environnementaux potentiellement élevés  Impacts environnementaux atténués confirmés et compatibles avec les limites planétaires  Impacts environnementaux positifs confirmés				

L'un des résultats les plus importants de cette étude est que les véhicules autonomes augmentent la distance parcourue par les véhicules et réduisent la part des transports publics et des modes de transport lents.

Les études examinées montrent une augmentation des VMT (miles parcourus par véhicule) ou VKT (kilomètres parcourus par véhicule) en fonction du taux d'adoption : de 60 % si le taux d'adoption est élevé à 8 % si une petite partie des déplacements en véhicule privé sont remplacés par des véhicules autonomes partagés et entraînent des déplacements supplémentaires à vide.

Ces résultats indiquent que **les véhicules autonomes ont tendance à augmenter le nombre de kilomètres parcourus dans la plupart des cas**, car les trajets en voiture sont plus accessibles (pour les non-conducteurs, ou dans le cas des conducteurs, leur donne le temps de faire d'autres activités simultanément). Ils soulignent également que les véhicules autonomes « entraînent une réduction de l'utilisation des transports en commun et des modes lents, en particulier lorsque l'on fait l'hypothèse que les véhicules autonomes privés ou les véhicules autonomes partagés ne

sont pas utilisés pour le covoiturage et que la valeur du temps est fortement réduite ».

« Ignorer les comportements socio-induits des utilisateurs dans l'évaluation des mesures visant à limiter les impacts environnementaux des véhicules autonomes risquerait au contraire de déclencher un effet rebond, rendu possible par les gains d'efficacité induits par les innovations technologiques et infrastructurelles. »

D'autre part, **le kilométrage moyen parcouru par véhicule peut diminuer si une grande partie des voyageurs sont prêts à faire du covoiturage et acceptent une augmentation du temps de trajet de 30 à 50 %**, ce qui aurait pour effet une diminution du kilométrage moyen par véhicule entre 11 et 24 %. Cependant, cette supposition est très hypothétique : les gens accepteraient-ils volontiers une telle augmentation du temps de trajet

pour le covoiturage alors qu'il est possible d'utiliser la réservation de trajet sans partage et de faire le trajet plus rapidement seul ?

En effet, il est fort possible que les voyageurs soient plus sensibles au gain de temps et au confort d'une stratégie de répartition selon le principe du premier arrivé, premier servi. Cela signifie que sans le cadre d'une loi environnementale contraignante et la prise en compte des éventuels effets rebonds¹⁷ les voitures autonomes pourraient être davantage un obstacle qu'un levier pour atteindre les objectifs environnementaux.

Conclusion

Compte tenu de tous les points mentionnés ci-dessus, il semble clair que sans une politique appropriée, les

¹⁷ Voir notre étude de cas sur les effets rebonds

¹⁸ Voir notre étude de cas sur les effets rebonds

véhicules autonomes pourraient exacerber les émissions de GES. En effet, si les choix en matière d'infrastructure (concernant la stratégie d'infrastructure numérique mais aussi celle de la mobilité) ne sont pas supervisés par les décideurs politiques, l'arrivée des véhicules autonomes risque davantage de stimuler l'utilisation de la voiture comme principal moyen de transport en milieu urbain aux dépens des transports publics et de la mobilité douce. Pour éviter cet effet rebond prévisible, les comportements des usagers doivent être pris en compte dans les décisions politiques. Ignorer les comportements socio-induits des usagers dans l'évaluation des mesures visant à limiter les impacts environnementaux des véhicules autonomes risquerait, au contraire, de déclencher un effet rebond¹⁸, rendu possible par les gains d'efficacité induits par les innovations technologiques et infrastructurelles. ■

Recommandations pour une évolution numérique compatible avec le Green Deal

En 2022, l'arrivée imminente de la voiture autonome sur le marché a été régulée par des politiques ambitieuses et globales en amont prenant en compte les impacts environnementaux tant des véhicules que de l'infrastructure globale sur laquelle ils reposent. Les débats concernant les préparatifs de l'arrivée des véhicules autonomes ont été l'occasion de questionner la sécurité routière, non seulement du point de vue du véhicule, mais aussi de l'infrastructure globale inextricablement liée aux questions environnementales. Cela a permis de repenser de manière globale et coordonnée la politique des transports au sein des États membres de l'UE, avec l'objectif clair et concret de réduire les impacts environnementaux liés tant au transport (de personnes et de marchandises) qu'aux TIC, en se basant avant tout sur les objectifs de l'Accord de Paris et sur les aspirations des citoyens de toute l'Europe, quel que soit le type de territoire qu'ils habitent (les zones métropolitaines et urbaines comme les zones rurales).

Des politiques ambitieuses mais réalistes ont été élaborées en tenant compte des comportements d'utilisation, de la connaissance et des risques des *lock-in* sociotechniques, et des innovations numériques telles que la réservation de trajet ou les véhicules connectés et autonomes.

L'accent mis sur la modernisation des infrastructures ferroviaires des transports publics, le transport intermodal et l'accessibilité des gares, ainsi que le financement de l'éco-conception, qui englobe l'ensemble de la proposition de valeur d'un véhicule, ont permis de réduire radicalement les facteurs d'émission à la source et, par conséquent, la congestion routière.

Cela a permis de diminuer drastiquement les émissions de gaz à effet de serre et la pollution particulaire liées aux transports en stimulant les comportements vertueux et en les rendant accessibles. Les bénéfices indirects de cette politique ambitieuse sont qu'elle a permis à l'UE d'accroître sa souveraineté et sa résilience et a contribué à stimuler des innovations modèles dans tous les secteurs économiques de l'UE, tout en renforçant les réseaux régionaux grâce à un réseau de transport ferroviaire et public fiable. De plus, une véritable prise en compte des besoins des populations dans toute l'Europe a renforcé la cohésion et l'implication des citoyens.

La recherche sur les comportements des utilisateurs s'est poursuivie et des scénarios basés sur les sciences humaines ont été intégrés pour amplifier la robustesse des hypothèses dans l'évaluation des impacts environnementaux. Les analyses du cycle de vie ont été encouragées, notamment celles qui prennent en compte de multiples facteurs d'impact et des scénarios comparatifs basés sur divers modes de mobilité, et qui évaluent les unités fonctionnelles complètes de ces scénarios, y compris l'utilisation au prorata de l'infrastructure du numérique pour chaque type de véhicule connecté.

ÉTUDES DE CAS SUR LES EFFETS ENVIRONNEMENT- TAUX :

- Les effets rebonds
- Les matières premières du numérique
- Les déchets électroniques et l'économie circulaire

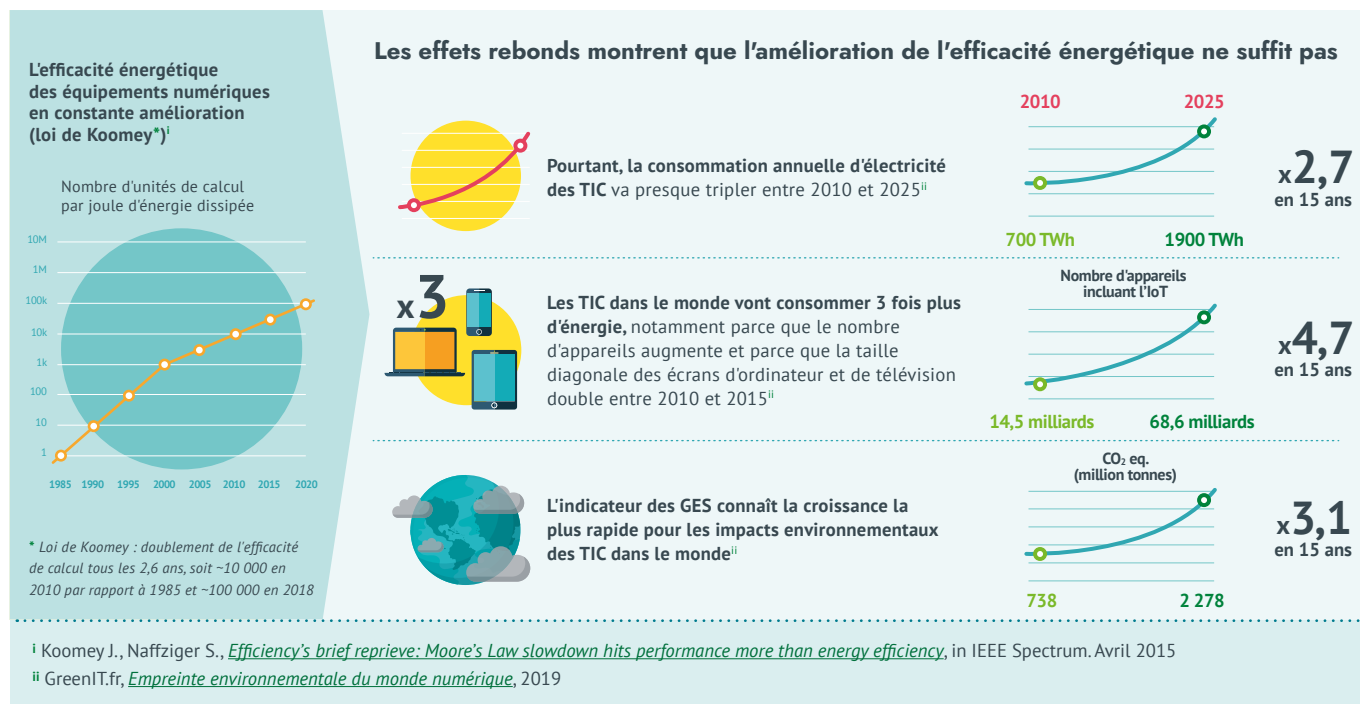
Les effets rebonds



Sommaire

Les clés pour comprendre.....	page 66
Résumé de l'étude de cas.....	page 66
Définitions.....	page 66
Qu'est-ce qu'un effet rebond ?.....	page 66
Notions principales.....	page 67
Enjeux environnementaux liés aux effets rebonds du numérique.....	page 68
Effets rebonds du numérique : quelques exemples.....	page 69
Le cas de locks-ins sociotechniques dans les TIC.....	page 70
Avis d'expert.....	page 74
Conclusion.....	page 75
Recommandations pour une évolution numérique compatible avec le Green Deal.....	page 76

Les clés pour comprendre



Résumé de l'étude de cas

Cette étude de cas se penche sur les effets rebonds et plus particulièrement ceux des technologies de l'information et de la communication (TIC). L'effet rebond est un terme utilisé pour décrire les effets secondaires négatifs des stratégies d'efficacité qui finissent par annuler les gains environnementaux visés. Les effets rebonds peuvent être systémiques, c'est-à-dire se produire à l'échelle de l'économie, où leur impact est le plus important ; indirects, si, par exemple, les économies sont réinvesties dans des activités ou des biens dont l'empreinte est plus importante ; ou directs, si l'amélioration d'un produit ou d'un service entraîne une plus grande consommation de ce produit ou service. En raison de la variété des paramètres qui peuvent être impliqués, quantifier les effets rebonds par des calculs est extrêmement difficile et incertain, comme le montrent les résultats de cette étude de cas. Nous constatons également que sans une prise en compte adéquate des structures établies, des habitudes et des objectifs pour...

1 Gossart, C., *Effets de rebond et TIC: Une revue de la littérature*, 2014

suivis par les parties prenantes, les mesures d'efficacité risquent de manquer leur cible, et peuvent même être contre-productives.

Définitions

Qu'est-ce qu'un effet rebond ?

La notion d'effet rebond est utilisée pour caractériser « les effets secondaires négatifs des politiques et stratégies d'efficacité qui ont fini par annuler les gains environnementaux » qu'elles visaient.¹

« Plus les améliorations technologiques augmentent l'efficacité avec laquelle une ressource est utilisée à un niveau micro, plus la consommation totale de cette ressource aura tendance à augmenter, plutôt qu'à diminuer, à un niveau macro. »

L'effet rebond peut être défini comme suit : plus les améliorations technologiques augmentent l'efficacité avec laquelle une ressource est utilisée, plus la consommation totale de cette ressource aura tendance à augmenter plutôt qu'à diminuer².

L'effet rebond est souvent associé à une augmentation de la consommation due à une augmentation de l'efficacité et à une baisse consécutive des prix. Néanmoins, les effets rebonds peuvent également être identifiés dans le temps, l'espace et la technologie³:

- **Rebond dans le temps** : Lorsque l'amélioration prend ou bien plus, ou bien moins de temps que le statu quo, elle entraîne des changements dans la consommation (voir nos études de cas sur la 5G et les voitures autonomes).

- **Rebond dans l'espace** : Lorsque l'amélioration utilise ou bien plus, ou bien moins d'espace que le statu quo, elle entraîne des changements dans la consommation (par exemple, il est plus facile de réaliser le rêve de Bill Gate d'un « ordinateur sur chaque bureau et dans chaque maison » aujourd'hui avec les ordinateurs de bureau et les ordinateurs portables qu'avec les premières générations d'ordinateurs comme les ordinateurs ENIAC qui étaient aussi grands qu'une salle).

- **Rebond technologique** : Lorsque l'amélioration modifie la disponibilité ou le caractère abordable de certaines ressources ou technologies, elle entraîne des changements dans la consommation.

L'identification et la prise en compte des effets rebonds sont cruciales pour garantir les bénéfices des politiques environnementales et des améliorations technologiques à grande échelle.

Notions principales

La littérature scientifique distingue habituellement trois niveaux de rebond : direct, indirect et à l'échelle économique.⁴

.....

² Définition de l'effet de rebond, GreenIT.fr, 2014

³ Maxwell, D., Owen, P., McAndrew, L., Muehmel, K., Neubauer, A., *Addressing the Rebound Effect, a report for the European Commission DG Environment*, 26 avril 2011.

⁴ Gossart, C., *Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature*, 2014; Sorrell, S., *Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency*, *Energy Policy* 37(4), 1456-1469 (2009); Maxwell, D., Owen, P., McAndrew, L., Muehmel, K., Neubauer, A., *Addressing the Rebound Effect, a report for the European Commission DG Environment*, 26 avril 2011

⁵ Faist et al. 2004, Girod et al. 2010, cités dans Maxwell, D., Owen, P., McAndrew, L., Muehmel, K., Neubauer, A., *Addressing the Rebound Effect, a report for the European Commission DG Environment*, 26 avril 2011, p.14 et p.51; Faist Emmenegger, M., Frischknecht, R., Stutz, M. et al., *Life Cycle Assessment of the Mobile Communication System UMTS: Towards Eco-efficient Systems*, (12 pp). Int J Life Cycle Assessment 11, 265-276 (2006)

⁶ Gossart, C., *Effets de rebond et TIC: Une revue de la littérature*, 2014

- **Effets rebonds directs** : Lorsqu'une amélioration d'un produit ou d'un service fait baisser le coût (en argent, en temps, en espace, etc.) de la consommation du produit, le résultat étant une plus grande consommation de ce produit/service. **Exemple de rebond direct : l'augmentation du trafic de données mobiles a annulé les gains d'efficacité du réseau 2G au 3G.**⁵

- **Effets rebonds indirects** : Lorsqu'une ressource est utilisée de manière plus efficace permettant des économies, cela entraîne une augmentation des revenus pour d'autres produits et services, potentiellement dans d'autres secteurs. **Exemple de rebond indirect : les économies d'efficacité réalisées par un consommateur ou une entreprise peuvent être réinvesties dans d'autres produits ou services, avec un impact potentiel sur l'environnement.**

- **Effets rebonds à l'échelle économique** : Une plus grande efficacité entraîne une plus grande croissance économique globale et provoque des changements structurels dans la production et la consommation à un niveau macro-économique. Ces effets combinent les résultats des effets rebonds directs et indirects et sont rarement pris en compte. Un exemple : l'arrivée d'Internet.

« Pour aborder les effets rebonds à l'échelle macro-économique, une approche comparant les gains d'efficacité et les effets rebonds à l'intérieur des limites planétaires est plus pertinente, en tenant compte également des paramètres économiques et sociaux. »

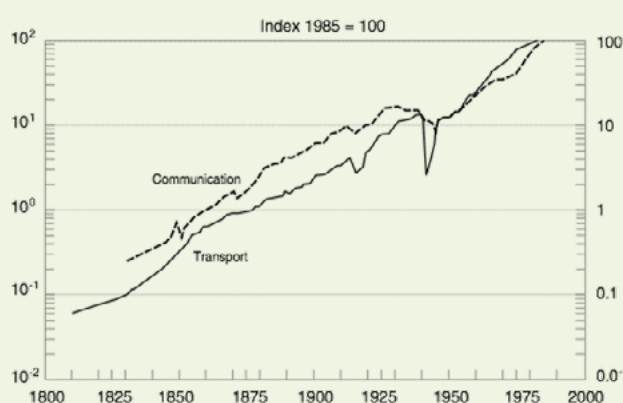
Une autre notion clé est celle du *backfire* (effet contre-productif). : Lorsque « en fait, la consommation globale d'énergie augmente après les mesures d'économie d'énergie ».⁶

Comment mesurer les effets rebonds ? Certains scientifiques ayant mesuré les effets rebonds ont essayé de résumer les différents paramètres en une équation qui pourrait être utilisée comme modèle. Dans le cas des

effets rebonds dus aux gains d'efficacité énergétique, les différents niveaux d'effet rebond constatés pour une amélioration énergétique sont ensuite comparés aux économies d'énergie attendues, et peuvent être exprimés en pourcentage :

- Si le pourcentage est inférieur à 100%, les économies d'énergie sont proportionnellement plus importantes que la consommation d'énergie supplémentaire.
- Si le pourcentage atteint 100 % ou plus, « les économies d'énergie attendues sont entièrement compensées, ce qui conduit à une économie nette nulle pour l'ensemble »⁷, ce qui signifie que ces économies font l'effet inverse (« backfire »).

Evolution comparée des flux d'information et de transport depuis 1800



Source: Arnulf Grübler, *The Rise and Fall of Infrastructures*, 1990, cité par le GIEC, 2001

Cependant, cette mesure mathématique des effets rebonds se limite aux mesures réellement quantifiables des rebonds directs ou indirects et est souvent évaluée à une échelle micro-économique. Pour aborder les effets rebonds à l'échelle macro-économique, il est plus pertinent d'adopter une approche combinant les gains d'efficacité et les effets rebonds à l'intérieur des limites planétaires, en tenant également compte des paramètres économiques et sociaux (**voir la section « Avis d'expert »**). En outre, « une technologie qui entraîne des gains d'efficacité au niveau micro peut en fait entraîner des pertes d'efficacité au niveau macro.⁸ » En effet, même

si une technologie permet une amélioration, il ne s'agit pas forcément d'une amélioration de notre empreinte environnementale, et des effets rebonds peuvent également provenir d'améliorations en termes de temps, d'espace ou de technologie, comme décrit ci-dessus.

Enjeux environnementaux liés aux effets rebonds du numérique

Les augmentations de l'efficacité énergétique entraînent des effets rebonds.⁹ Cependant, l'importance de ces effets rebonds dépend de multiples paramètres, et un seul changement d'efficacité peut avoir de nombreuses conséquences sur les comportements d'utilisation, ce qui rend les effets rebonds très difficiles à évaluer. Les principales difficultés à comprendre et estimer les effets rebonds du numérique sont liées au fait que les technologies de l'information et de la communication sont omniprésentes, c'est-à-dire qu'elles ont une grande influence sur de nombreux autres secteurs, et qu'elles sont un outil puissant pour stimuler et générer l'innovation. En effet, ces caractéristiques montrent que les TIC entretiennent une relation d'interdépendance forte et complexe avec de nombreux secteurs d'activité. Par conséquent, les gains d'efficacité engendrés par les TIC ont un effet d'entraînement dont les conséquences s'étendent à tous les secteurs, tout comme les effets rebonds connexes.

« De nombreuses études et publications de la littérature grise mettent l'accent sur le potentiel d'économie d'énergie des TIC pour des cas d'utilisation spécifiques. Par conséquent, il existe moins d'études sur les effets rebonds au niveau macro. »

De bien des façons, les TIC contribuent à l'efficacité énergétique : Les TIC peuvent réduire leur propre consommation d'énergie (**voir les études de cas sur l'IA et le cloud**), contribuer aux économies d'énergie dans d'autres secteurs tels que les transports, les

7 Sorrell, S., Le paradoxe de Jevons revisité : *The evidence for backfire from improved energy efficiency*. Energy Policy 37(4), 1456-1469 (2009), p. 1457

8 Gossart, C., *Rebound Effects and ICT : Une revue de la littérature*, 2014, p.5

9 Lange S, Pohl J., Santarius T., *Digitalization and energy consumption. Les TIC réduisent-elles la demande d'énergie ?* 2020

bâtiments, la surveillance urbaine, etc. Dans une étude publiée en 2012¹⁰ Coroama et al. évaluent le potentiel de réduction des gaz à effet de serre lié à l'organisation à distance de conférences internationales par vidéoconférence plutôt qu'en face à face sur un seul site. Les résultats montrent un potentiel de réduction de 37% à 50% des émissions de GES liées aux déplacements évités par rapport aux scénarios de conférence sur site, même en tenant compte de l'effet rebond de la participation accrue.

De nombreuses études et publications de littérature grise soulignent le potentiel d'économie d'énergie des TIC dans des cas d'utilisation spécifiques. Par conséquent, il existe moins d'études sur les effets rebonds au niveau macro. Dans un article publié en 2020, Santarius et al. soulignent que « *la littérature abonde sur le potentiel d'économie d'énergie des améliorations de l'efficacité basées sur les TIC dans divers processus de production et de consommation. Pourtant, ces études se concentrent uniquement sur les effets au niveau micro et négligent les effets globaux au niveau macro. De plus, elles décrivent surtout les potentiels plutôt que les développements réels. Les arguments théoriques en faveur d'une substitution incomplète et d'effets rebonds et d'induction (croissance) potentiels sont forts et sont étayés par des preuves anecdotiques, tandis que les preuves empiriques du lien de causalité entre la numérisation et les effets rebonds n'ont pas encore été suffisamment étudiées sur le plan empirique. Ces faits ambigus suggèrent que l'effet global des TIC sur la consommation d'énergie par le biais de l'efficacité énergétique et des effets rebonds n'est toujours pas clair.*¹¹ » Cela montre que la recherche sur les effets rebonds des technologies du numérique est encore incomplète.

Nous tenterons ci-dessous d'identifier certains domaines des TIC où des effets rebonds sont susceptibles d'être constatés, mais des recherches supplémentaires doivent être menées pour s'assurer que les effets rebonds ne sont pas négligés.

Effets rebonds du numérique : quelques exemples

Comme nous l'avons vu dans la section des notions principales, les effets rebonds peuvent être divisés en catégories d'effets rebonds directs, indirects et à l'échelle économique.

Effets rebonds directs :

Parmi les effets rebonds directs des TIC, le plus connu est lié à la loi de Moore : l'observation selon laquelle le nombre de transistors dans un circuit intégré double presque tous les deux ans. Comme cela permet de fabriquer des ordinateurs plus légers et plus puissants, cela génère des effets rebonds au niveau du temps (l'informatique est plus rapide, ce qui permet d'effectuer des tâches informatiques de plus en plus complexes), au niveau des matières premières (chaque génération successive de processeur étant plus petite, elle nécessite moins de matériaux pour être fabriquée que la précédente, mais la demande explose). Les nouveaux modèles remplacent rapidement les précédents, plus lents, contribuant ainsi à l'obsolescence du marché des ordinateurs ou des smartphones, même si de nombreux utilisateurs se seraient satisfaits de processeurs plus anciens.¹²

Un autre exemple d'effet rebond peut être trouvé dans le cas des centres de données ([voir notre étude sur le cloud](#)). Des progrès majeurs ont été réalisés en matière d'efficacité énergétique pour les centres de données : un serveur fournit 4 fois plus de calculs pour une consommation électrique identique qu'il y a 8 ans : le PUE (*Power-Usage Effectiveness*) des centres de données récents a été divisé par deux en 20 ans.¹³ Pourtant, au lieu d'observer une baisse proportionnelle de la consommation des centres de données, on observe une légère augmentation, avec une hausse de 6% de la consommation électrique entre 2010 et 2018. Pourquoi ? Parallèlement aux améliorations citées ci-dessus, les demandes de services ont augmenté. En effet, les besoins informatiques ont été multipliés par six entre 2010 et 2018 et le trafic réseau par dix, tandis que la capacité de stockage a été multipliée par 25 au cours de la même période.¹⁴ Bien que l'efficacité des

10 Coroama, V.C.; Hilty, L.M.; Birtel, M., *Effects of Internet - based multiple - site conferences on greenhouse gas emissions*. Telemat. Inform. 2012, 29, 362 – 374

11 Santarius T., Pohl J. et Lange S., *Digitalization and the Decoupling Debate: Les TIC peuvent-elles contribuer à réduire les incidences environnementales alors que l'économie continue de croître ?*, 2020

12 Gossart, C., *Effets de rebond et TIC : Une revue de la littérature*, 2014, p.6 ; Hilty, L.M. : Technologies de l'information et durabilité : Essais sur les relations entre les technologies de l'information et le développement durable. Books on Demand, Norderstedt (2008)

13 Eric Masanet, Arman Shehabi, Nuo Lei, Sarah Smith et Jonathan Koomey, *Recalibrating global datacenter energy - use estimates*, 2020 ; <https://www.greenit.fr/2020/03/04/data-center-seulement-6-de-hausse-en-8-ans/> (dernière consultation : 25/10/2021)

14 Eric Masanet, Arman Shehabi, Nuo Lei, Sarah Smith et Jonathan Koomey, *Recalibrating global datacenter energy - use estimates*, 2020 ;

centres de données soient compensée par une plus forte demande, l'impact de cette demande accrue sur les équipements et les réseaux est beaucoup plus important, ce qui constitue un effet rebond indirect.

Dans notre étude ACV, nous avons constaté que les équipements constituent le plus grand domaine d'impact au sein des TIC, représentant entre 62 et 89% de l'impact environnemental du numérique pour l'Europe en 2019 selon les indicateurs, avec plus de 65% des impacts du numérique concernant le changement climatique et environ 89% concernant les ressources, les minéraux et les métaux.¹⁵

Dans le cas de l'utilisation des smartphones, certains effets rebonds sont faciles à voir, même si la frontière entre les effets rebonds directs et indirects peut varier. Entre 2011 et 2019, le temps passé sur Internet via les téléphones mobiles dans le monde est passé de 32 à 132 minutes par jour, alors que simultanément, le temps passé sur Internet via les ordinateurs de bureau a lentement diminué, passant de 43 à 39 minutes par jour, ce qui représente une augmentation globale de 228% du temps passé sur Internet (une diminution de 9% pour les ordinateurs de bureau et une augmentation de 413% pour les smartphones).¹⁶

Les raisons d'une telle augmentation du temps passé sur Internet sont nombreuses et interdépendantes : des smartphones plus puissants¹⁷, une baisse des prix des données mobiles¹⁸, un accès au haut débit de plus en plus rapide (chaque génération de réseau mobile étant plus rapide que les précédentes)¹⁹, davantage d'applications pour accéder aux réseaux sociaux, aux médias, aux jeux, aux services de la vie quotidienne²⁰, etc. – souvent conçues pour augmenter le temps passé dessus²¹ –, une utilisation de plus en plus intuitive et une expérience utilisateur de plus en plus fluide²², etc. Au final, lorsque l'on passe plus de temps sur Internet via les réseaux mobiles, les taux de renouvellement des smartphones augmentent (pour un appareil plus puissant en termes de capacité ou d'autonomie de batterie), tout comme les impacts environnementaux du numérique.

.....

15 Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. et Lees Perasso, E. GreenIT.fr. 2021. *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie*

16 Zenith Media, *Prévisions de la consommation des médias*, 2019.

17 <https://www.androidauthority.com/smartphone-performance-improvements-timeline-626109/> (dernière récupération : 25/05/2021)

18 Empirica et TÜV Rheinland pour la DG Réseaux de communication, contenu et technologie de la Commission européenne, *Mobile broadband prices in Europe 2019*, Digital Single Market, 2019.

19 Vora L. J., *Evolution de la technologie de génération mobile : 1g à 5g et revue de la technologie sans fil à venir 5G*, IJMT, 2015.

20 <https://techcrunch.com/2021/01/13/app-stores-saw-record-218-billion-downloads-in-2020-consumer-spend-of-143-billion/> (dernière récupération : 25/05/2021)

21 Un documentaire de 2020, intitulé *The Social Dilemma*, explore les effets de dépendance des réseaux sociaux, tandis que des experts en technologie tirent la sonnette d'alarme sur leurs propres créations.

22 <https://www.textrequest.com/blog/history-evolution-smartphone/> (dernière consultation : 25/05/2021)

Le cas des *lock-ins* sociotechniques dans les TIC

Les *lock-ins* sociotechniques sont des rétroactions sociales et techniques positives ou des rendements croissants sur l'adoption d'une technologie sélectionnée.

* Cela signifie que l'utilisation de la technologie a des impacts sociaux ou socio-économiques positifs qui soutiennent l'utilisation de cette technologie.

Les *lock-ins* sociotechniques se produisent lorsqu'il y a coévolution d'une technologie et adoption de comportements sociaux liés à cette technologie.

Dans le cas des TIC, les utilisateurs connaissent bien les *lock-ins* sociotechniques. Par exemple : lorsque le taux d'adoption d'un logiciel (Microsoft Office), un réseau social (Facebook, WhatsApp, etc.) ou une technologie (smartphone, haut débit mobile, ordinateur) rend difficile d'interagir avec fluidité sans l'adopter, et encore plus difficile d'arrêter de l'utiliser.

Les *lock-ins* sociotechniques créent à l'échelle macro des dépendances qui peuvent constituer des obstacles à des habitudes plus durables. Ces dépendances comprennent les institutions et les infrastructures dans la « définition des règles » qu'elles impliquent. *

Étant donné qu'il est très difficile d'échapper à un lock-in sociotechnique une fois qu'il est établi, les politiques doivent se pencher sur la manière d'empêcher l'apparition de nouvelles dépendances. Limiter les *lock-ins* sociotechniques dans le domaine des TIC est également un moyen de créer une plus grande inclusion pour combler la fracture numérique. En outre, elle permet une innovation plus disruptive dans les TIC en permettant l'introduction de trajectoires technologiques radicalement nouvelles.

* Geels FW, *Les transitions technologiques comme processus de reconfiguration évolutive : une perspective multineau et une étude de cas*, 2002 ; Gregory C Unruh, *Understanding carbon lock-in*, 2000 ; Rip A, Kemp RPM, *Changement technologique*, 1998.

Exemples d'effets rebonds dans les TIC

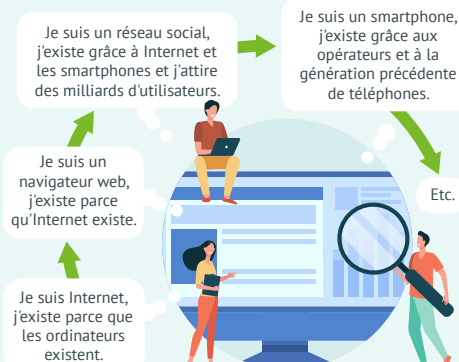


Effets rebond directs



Effets rebond systémiques

Transformation des normes sociales



Effets rebond systémiques

Effet cascade des innovations technologiques



Effets rebond indirects



Effets rebond systémiques

Accélérateur de production



Effets rebond systémiques

Accélérateur d'activité

Inspiré de : <https://ligue-enseignement.be/rapport/projet-europeen-conscience-numerique-durable/>

De même, la disponibilité croissante d'abonnements illimités (vidéo à la demande, musique en streaming, jeux vidéo à la demande, abonnement avec accès illimité aux archives de la presse ou des chaînes) va potentiellement stimuler l'équipement en terminaux (écrans de télévision plus grands²³ objets connectés tels que des enceintes connectées, etc.) et, de façon complémentaire, stimuler la demande cloud, ce qui signifie la construction de plus de centres de données.²⁴

En outre, comme de plus en plus de composants électroniques sont utilisés pour fabriquer de nouvelles voitures, y compris des voitures autonomes, et compte tenu de l'augmentation des ventes de voitures autonomes prévue au cours des prochaines décennies²⁵, il est possible que des effets rebonds soient observés en fonc-

tion des réglementations politiques et des comportements d'adoption et d'utilisation.

Il est probable qu'il en sera de même avec la production accrue d'objets connectés et l'engouement croissant pour l'IoT²⁶, ce qui signifie une augmentation spectaculaire de la demande en équipements numériques et des impacts environnementaux qui sont liés à la fabrication (émissions de gaz à effet de serre, épuisement des matières premières critiques²⁷ pollution de l'eau, etc.) et de leur obsolescence rapide (déchets électroniques²⁸).

L'adoption massive des nouvelles technologies a d'importants effets rebonds en stimulant le renouvellement des équipements. C'était le cas avec l'évolution de la 2G vers la 3G²⁹, et quelques années plus tard de la 3G vers la 4G³⁰, l'effet étant le remplacement généralisé

23 IFA, *Conférence de presse mondiale de l'IFA 2019*, avril 2019, page 13

24 Voir notre étude de cas sur le cloud

25 Voir notre étude de cas sur les véhicules autonomes

26 Voir notre étude de cas sur l'IoT

27 Voir notre étude de cas sur les matières premières

28 Voir notre étude de cas sur les déchets électroniques

29 Faist et al. 2004, Girod et al. 2010, cited in Maxwell, D., Owen, P., McAndrew, L., Muehmel, K., Neubauer, A., *Addressing the Rebound Effect, a report for the European Commission DG Environment*, 26 April 2011, p.14 and p.51; Faist Emmenegger, M., Frischknecht, R., Stutz, M. et al. *Life Cycle Assessment of the Mobile Communication System UMTS: Towards Eco-efficient Systems*, int J Life Cycle Assessment 11, 265–276, 2006

30 GSMA, *The Mobile Economy Europe 2018*, 2018

des smartphones pour accéder aux réseaux mobiles de nouvelle génération.

Ces divers effets rebonds potentiels actuels et futurs des TIC doivent être anticipés et, s'ils se produisent, mesurés et surveillés. Bien que la littérature ne s'accorde pas toujours sur l'ampleur d'un effet rebond³¹, il existe un consensus sur la nécessité de prévenir ces effets et sur le fait que cela exige la mise en place d'un « **cadre contraignant de limitation des émissions**³² », ce qui laisse entendre que les technologies d'efficacité énergétique ne suffisent pas à elles seules à favoriser les économies d'énergie.

Outre les gains d'efficacité énergétique rendus possibles par les TIC, ces technologies permettent également de nombreux gains en termes de confort et de temps, qui modulent profondément les usages et le niveau d'attente des consommateurs et des entreprises, comme on a pu le constater lors de la crise de Covid (*e-learning*, télétravail, e-commerce, etc.). Ces effets comportementaux sont susceptibles de contribuer aux effets rebonds des TIC.

Effets rebonds indirects :

Les effets rebonds indirects se produisent lorsqu'une ressource est utilisée plus efficacement. Cela occasionne alors des économies (de coût, de temps, ou autre), et subséquemment une augmentation du revenu disponible, du temps disponible ou autre, qui sera alors consacré à d'autres produits ou services, potentiellement dans d'autres secteurs. Les deux premières possibilités auxquelles nous pensons concernant les effets rebonds indirects sont les suivantes :

1. Effets rebonds visibles au niveau individuel : lorsqu'une utilisation est remplacée par une autre dont l'empreinte environnementale est plus importante. Un exemple concret pourrait être la célébration de petits efforts pour réduire son empreinte carbone par un voyage en avion, qui annulerait les petits efforts et entraînerait un énorme *backfire*.
2. Effets rebonds visibles au niveau collectif : développement de nouveaux usages axés sur des gains d'efficacité sociotechnique avec une large variété d'impacts sur de multiples secteurs, dont beaucoup ont une forte empreinte carbone (transport, construction, production de biens...).

.....

31 Gossart, *Effet rebond et TIC : Une revue de la littérature*, 2014, p.5

32 GeSI, *Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*, 2008; Lorenz M. Hilty, *Information Technology and Sustainability. Essays on the Relationship between ICT and Sustainable Development*, 2008, p. 41; Tilman Santarius, Johanna Pohl and Steffen Lange, *Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing?*, 2020 p. 6

33 Herring, H., Roy, R. : *Sustainable services, electronic education and the rebound effect. Environmental Impact Assessment Review* 22(5), 525-542, 2002.

34 Kitou E., Horvath A., *Energy-related emissions from Telework*, 2003; ADEME, *Étude sur la caractérisation des effets rebonds induits par le télétravail*, 2020

35 Dans certains cas rares, le télétravail et l'*e-learning* peuvent même permettre des modes de vie très impactant comme le travail à distance en nomadisme (voyages en avion).

Comme nous l'avons vu de manière spectaculaire lors de la récente crise du Covid entre 2020 et 2021, de nombreux secteurs d'activité sont désormais inextricablement liés aux TIC et profondément dépendants d'Internet pour fonctionner. Cette relation entre les activités commerciales et les TIC a été exacerbée pendant la crise Covid, et même s'il est trop tôt pour savoir quels seront les changements de comportement à long terme et les effets rebonds liés au rôle des TIC pendant la crise, il est clair que ce rôle a été prééminent dans le maintien des activités commerciales, de la scolarité et des relations.

« Dès que nous nous efforçons de quantifier de manière absolue, nous passons à côté de nombreux mécanismes non quantifiables. »

Jacques Combaz, ingénieur de recherche au CNRS

Outre les impacts socio-économiques positifs qui ne sont pas l'objet de cette étude, des impacts environnementaux positifs peuvent être démontrés dans la mesure où les TIC ont permis d'apprendre et de travailler entièrement à distance. C'est le cas pour l'*e-learning*³³ ou pour le télétravail³⁴. Cependant, dans les deux cas, les distances parcourues en voiture qui ne sont pas réduites³⁵ par l'*e-learning* ou le télétravail (réunions de groupe en classe, aller chercher les enfants à l'école en voiture, faire les courses en voiture, etc...) peuvent avoir des effets rebonds, car les nouveaux modes de déplacement quotidiens peuvent consommer davantage. D'autres effets rebonds associés au *e-learning* et au télétravail concernent la duplication du lieu de travail à la maison, annulant les avantages d'un espace de travail partagé : plus d'équipement, plus de chauffage à domicile, plus de consommation de papier. Pour le télétravail, les études évaluant son impact sur l'environnement tendent à montrer que, bien que le télétravail semble réduire les émissions de CO₂, de NO_x, de SO₂ et de CO (en raison de la diminution du transport automobile), ces résultats reposent en grande partie sur des hypothèses et « les effets rebonds peuvent affecter de manière

significative non seulement le transport, mais également l'impact lié à l'entreprise et au bureau à domicile. Le succès d'un programme de télétravail semble dépendre principalement des habitudes de déplacement, de la consommation d'énergie induite et des caractéristiques de l'utilisation de l'espace au bureau et à la maison. » ³⁶

En effet, si un travailleur se déplaçant habituellement en transports en commun ou par un mode de mobilité active travaille depuis son domicile plutôt que depuis son bureau et que, par conséquent, il chauffe davantage son logement et achète plus d'équipements informatiques, l'impact environnemental global du télétravail pour ce travailleur risque fort de provoquer de sévères effets rebonds, entraînant un « *backfire* », donc contrevenant aux bénéfices environnementaux potentiels du télétravail. Au contraire, si les travailleurs qui se déplacent habituellement en voiture travaillent à domicile plutôt qu'au bureau et que, par conséquent, ils réduisent considérablement les distances parcourues en voiture, ne chauffent pas plus leur domicile et utilisent les mêmes équipements informatiques qu'au bureau, les avantages du télétravail seront probablement beaucoup plus importants.

« La difficulté réside dans le cadre réglementaire, dans le projet de société que l'on veut avoir, le point d'arrivée, "où veut-on aller ?" J'ai l'impression qu'aujourd'hui, tout cela est occulté par des débats techniques. »

Jacques Combaz

E-commerce et livraison à domicile

Le-commerce est à l'origine d'une croissance importante et rapide de l'économie mondiale : selon les estimations, la part du e-commerce dans le commerce de détail mondial devrait passer de 10,4% en 2017 à 17% en 2020.³⁷

Dans le cas du e-commerce, les TIC ont clairement créé un changement profond dans les habitudes d'achat de nombreuses personnes. Au sein de l'UE, 72% des internautes ont acheté ou commandé des biens ou services en ligne en 2020, principalement des vêtements, chaussures et accessoires (64% des e-acheteurs).³⁸ Certaines études tendent à montrer qu'un achat en ligne est plus respectueux de l'environnement qu'un achat en magasin en raison de la moindre consommation d'énergie et de matériaux de l'infrastructure (par exemple, moins de bâtiments en raison de l'augmentation des taux de logistique et moins d'énergie par mètre carré dans un entrepôt que dans les magasins de détail).³⁹ Cependant, certains effets rebonds sont constatés en raison de l'augmentation des habitudes de consommation. De plus, dans le cas de la livraison à domicile, le dernier kilomètre génère potentiellement plus d'impacts environnementaux que le commerce de détail en magasin lorsque l'achat en ligne avec livraison à domicile remplace la marche, les transports publics ou les solutions de mobilité douce. Cet effet est amplifié par la livraison instantanée, qui entraîne une plus grande congestion du trafic⁴⁰. De même, l'explosion des livraisons de produits alimentaires et de petites marchandises due à la livraison en ligne et à l'utilisation de plateformes de livraison de produits alimentaires augmente considérablement les déchets plastiques et l'empreinte carbone, ce qui constitue un effet rebond majeur du numérique, mais est propre au secteur de l'alimentation et de la livraison. Une étude publiée en 2020 indique que, par conséquent, « *l'impact environnemental le plus grave de cette nouvelle industrie est la pollution par les déchets solides, suivie par la pollution de l'eau, la consommation de ressources et la pollution de l'air* »⁴¹. Par conséquent, cette nouvelle industrie rendue possible par les plateformes numériques a un effet très tangible, qui dépend fortement de l'acceptabilité sociale et des futures réglementations politiques.

36 Kitou E., Horvath A., *Energy-related emissions from Telework*, 2003

37 Nations Unies, *COVID-19 et e-commerce, Un examen global*, 2021

38 https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=E-commerce_statistics_for_individuals#Most_popular_online_purchases (dernière consultation : 20/05/2021)

39 Khurana A., Pal R., *Impact of e-commerce on environment*, 2013

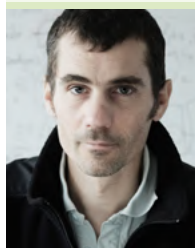
40 <https://www.cnbc.com/2020/01/14/last-mile-delivery-push-will-worsen-commutes-hurt-the-environment-world-economic-forum-says.html> (dernière consultation : 20/05/2021)

41 Charlene Li, Miranda Miroso and Phil Bremer, *Review of Online Food Delivery Platforms and their Impacts on Sustainability*, 2020

Avis d'expert



Fabrice FLIPO est philosophe en politique, science et technologie, professeur à l'Institut BS de Mines-Télécom et chercheur au Laboratoire du changement social et politique de l'Université de Paris. Il travaille sur la question de la transition écologique depuis plus de vingt ans. En 2020, il a publié un livre sur « L'impératif de sobriété numériqueⁱ » ainsi qu'un mémorandum sur « la face cachée du numériqueⁱⁱ ».



Jacques COMBAZ, ingénieur de recherche au CNRS, travaille dans un laboratoire de recherche appelé Verimag. Il a rejoint le groupe de service EcoInfo du CNRS en 2018 et participe à ce titre aux travaux sur les effets rebonds depuis cette date.

Qu'est-ce qu'un effet rebond ?

Jacques COMBAZ : Je vois les choses ainsi : on aborde un problème à plusieurs dimensions, et on essaie de jouer sur une des dimensions. Évidemment, comme le système est compliqué, quand on touche une dimension, on touche indirectement les autres. Si l'effet recherché était de toucher une seule des variables sans toucher les autres, le problème du rebond devient évident.

Fabrice FLIPO : Quand on regarde la structure des choix d'un point de vue sociologique (comment les gens consomment), on observe qu'il y a des normes de consommation. Ces régularités sociologiques, qui sont nécessaires à la régularité du système technique, sont parfaitement prévisibles. Pour moi, ce qu'on appelle l'effet rebond, ce sont des analyses d'ingénierie ou de type micro-économique qui intègrent mal ces structures sociales et qui s'étonnent ensuite que leur diagnostic et leurs mesures n'atteignent pas les objectifs qu'ils espéraient atteindre.

Quels sont les principaux enseignements que vous tirez de vos différents travaux sur les impacts environnementaux du numérique et les effets rebonds ?

Fabrice FLIPO : Nous avons montréⁱⁱⁱ que de nombreuses études, comme celles du GeSI, mettent en avant des solutions techniques ou des cas d'usage, à partir desquelles elles concluent à des promesses mirifiques de réduction de l'impact écologique – ainsi l'usage potentiellement généralisé du télétravail ou de la voiture autonome.^{iv} Mais elles ne tiennent pas compte des structures d'usage établies (habitudes, buts habituellement poursuivis par les acteurs, etc.). Mais elles ne tiennent pas compte des structures instituées d'usages (habitudes, buts usuellement poursuivis par les acteurs etc.). Des études tenant compte de cet aspect montraient à la même époque que sans changement normatif, les promesses escomptées n'avaient de chance de se produire, de manière partielle, que dans le cas du chauffage et de l'éclairage. Pas complètement inconscient de cette faiblesse, le GeSI conditionnait ses promesses à la mise en place d'un cadre contraignant sur les émissions de gaz à effet de serre tel que des taxes ou des permis, « pour éviter l'effet rebond ». Le problème réside non seulement dans ce que cette condition est dénuée de réalisme sociopolitique, mais aussi en ce que les solutions proposées par le GeSI se confondent au moins en partie avec celles que ses industries-membres poussent pour des raisons qui provoquent l'inverse de l'effet escompté. Ainsi, l'objectif réel du télétravail est de réduire les coûts du travail ou en accroître la flexibilité, et celui de la voiture autonome est de faire passer le plus de temps possible ses passagers face à de « l'infotainment ». Les objectifs écologiques sont contraints par des « solutions » inadaptées, une politique grossièrement déficiente, et n'atteignent donc pas leurs objectifs. Pendant ce temps, les buts économiques ou industriels sont assurés d'atteindre leurs résultats. Et ceux qui les portent ●●●

ⁱ Fabrice Flipo, *L'impératif de la sobriété numérique*, L'enjeu des modes de vies, 2020

ⁱⁱ <http://www.fondationecolo.org/blog/Note-de-la-FEP-23-La-face-cachee-du-numerique> (dernière récupération : 12/05/2021)

ⁱⁱⁱ Fabrice Flipo, François Deltour, Michelle Dobré, Marion Michot, *Peut-on croire aux TIC vertes ?*, 2012

^{iv} Maxwell, D., Owen, P., McAndrew, L., Muehmel, K., Neubauer, A., *Addressing the Rebound Effect, a report for the European Commission DG Environment*, 26 avril 2011

... se défaussent ensuite de leur responsabilité sur la société, comme si celle-ci avait tourné le dos en pleine conscience à l'écologie. Une analyse qui ne tient pas compte de ce jeu d'acteur et s'en tient à des approches microsociologiques se condamne à ne pas pouvoir anticiper de manière informée. Elle ne voit pas que les solutions qu'elle prend au sérieux sont du greenwashing au sens strict : des actions écologiques qui demeurent accessoires dans un jeu d'acteur qui demeure pour l'essentiel inchangé.

Jacques COMBAZ : Dans la plupart des cas, l'effet rebond n'est pas une surprise, il est volontaire. Si je prends l'exemple de la loi de Moore, pour les processeurs, le but est de mettre deux fois plus de transistors dans les nouveaux processeurs à chaque génération, et non pas de rendre les processeurs plus petits. De plus, le consommateur n'a pas vraiment le choix.

Dès que nous nous efforçons de quantifier de manière absolue, nous passons à côté de nombreux mécanismes non quantifiables. Il s'agit de mécanismes sociaux profonds, et finalement nous passons à côté d'une très grande partie de l'histoire. La quantification peut être potentiellement intéressante pour des réponses du consommateur à très court terme, car on va se baser sur des phénomènes qu'on connaît. Pour les transformations profondes au niveau de la société, cela n'est pas du tout opérant. Dans le cadre de la transition écologique, je pense qu'il ne faut surtout pas étudier l'effet rebond uniquement sous l'angle quantitatif, car c'est un leurre.

La difficulté de la transition écologique aujourd'hui n'est pas tant une question d'efficacité technologique, puisque c'est quelque chose que nous savons faire et que nous faisons de toute façon. La difficulté réside dans le cadre réglementaire, dans le projet de société que l'on veut avoir, le point d'arrivée, « où veut-on aller ? ». J'ai l'impression qu'aujourd'hui tout cela est occulté par des débats techniques.

Conclusion

Nous avons vu plus haut que les effets rebonds peuvent prendre différentes formes et avoir des impacts environnementaux très concrets. Pour identifier ces effets, il est nécessaire, autant que possible, de les inclure dans les évaluations environnementales d'un point de vue comportemental, incluant une évaluation des habitudes, des contraintes sociales et des objectifs poursuivis par les différents acteurs du système, chaque fois qu'une amélioration de l'efficacité énergétique, du temps, de l'espace ou de la technologie est proposée.

Il est également crucial de mettre en perspective les impacts environnementaux des TIC dans leur ensemble et de définir des objectifs environnementaux afin de respecter l'Accord de Paris et de limiter l'empreinte environnementale des TIC aux limites planétaires ([voir les résultats de notre étude ACV](#)).⁴² Lors de la définition de tels objectifs, il est nécessaire d'inclure une mesure de l'efficacité afin d'évaluer si les mesures politiques atteignent leurs buts, et de planifier un réajustement à la lumière des développements futurs observés. Tout comme les effets rebonds incluent les adaptations du comportement des utilisateurs aux gains d'efficacité, les futures politiques-cadres devraient envisager de stimuler les effets de « débord », c'est-à-dire l'inverse. ■

.....

42 Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. and Lees Perasso, E. GreenIT.fr. 2021. *Les technologies numériques en Europe : une approche du cycle de vie environnemental*.

Recommandations pour une évolution numérique compatible avec le Green Deal

Les effets rebonds (directs, indirects et systémiques) sont contrés en veillant à ce qu'à chaque fois qu'une mesure d'efficacité est activée, elle s'accompagne de mesures de sobriété proportionnelles.

Pour ce faire, le financement public de l'innovation est soumis à une analyse obligatoire du cycle de vie des impacts environnementaux de l'innovation, soumise à revue critique, qu'il s'agisse d'un produit ou d'un service, et concernant les scénarios d'utilisation complets de l'innovation.

Le fond européen à l'innovation du Green Deal est ouvert aux produits et services basés sur des innovations de modèles et de services éco-conçus de la fabrication à la fin de vie, en passant par le parcours utilisateur. Ce financement stimule l'économie circulaire et la résilience économique des États membres et de l'Union européenne dans son ensemble ; elle stimule l'emploi, comme l'avait anticipé l'Organisation internationale du travail*.

L'écoconception des produits et services contribue également à une plus grande inclusion sociale et à la réduction de la fracture numérique, avec un parcours utilisateur souvent plus fluide – comme par exemple lorsque des services web ou d'applications coûteux sont remplacés par un simple SMS ou un e-mail, qui consomment beaucoup moins qu'un service web. Comme le parcours utilisateur est axé sur les besoins les plus importants, il est moins touché par les effets rebonds et l'infobésité.

Parallèlement, les consommateurs ont pris conscience qu'il ne suffit pas d'acheter des équipements économes en énergie, mais qu'il faut parvenir à une réduction globale de la dépendance à l'égard des ressources et de l'énergie, en respectant les limites planétaires. Par exemple, en achetant moins d'équipements numériques, notamment des écrans plus petits, en conservant les appareils plus longtemps et en les réparant.

L'hyperconnexion, dont les limites sont reconnues tant au travail que dans la vie personnelle, notamment en ce qui concerne les risques pour la santé, a contribué à garantir le droit à la déconnexion, à l'initiative des États membres. La prise en compte des effets rebonds dans les TIC a également permis de poser des questions éthiques sur notre utilisation et dépendance à la technologie, et sur les *lock-ins* sociotechniques. Enfin, la recherche de solutions pour limiter les effets rebonds liés aux TIC nous a permis d'améliorer notre résilience face aux crises climatiques, économiques et sociales, et nous a encouragés à prendre du recul face à un monde en mutation rapide.

* Organisation internationale du travail - Genève : BIT, *Perspectives sociales et de l'emploi dans le monde 2018 : L'écologisation par l'emploi*, 2018

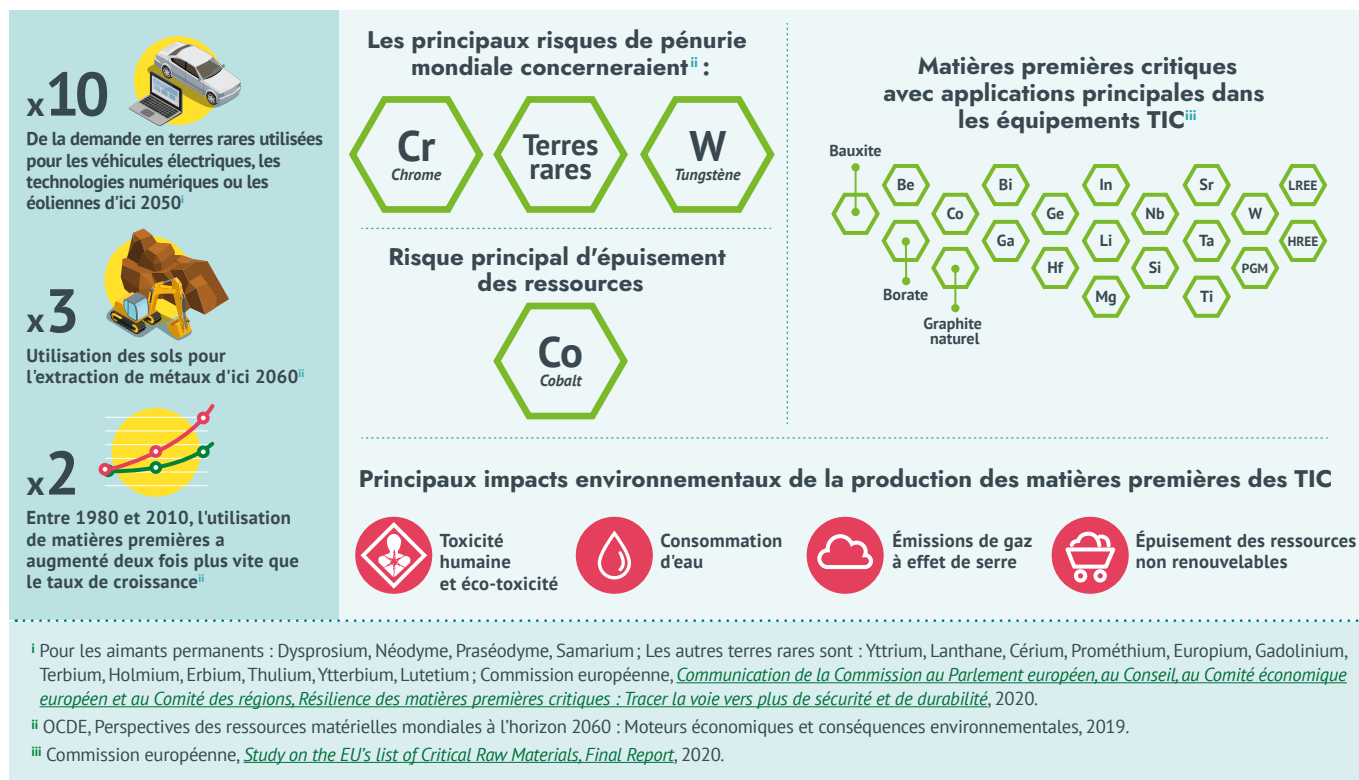
Les matières premières du numérique

Sommaire

Les clés pour comprendre.....	page 78
Résumé de l'étude de cas.....	page 78
Définitions.....	page 79
Notions principales.....	page 79
Les impacts environnementaux liés à l'extraction et au raffinage des matières premières pour produire des composants du numérique.....	page 81
1. Processus de production.....	page 81
2. En plus de l'impact environnemental, les minéraux ont des impacts sociaux et géopolitiques.....	page 82
3. Les impacts sur l'environnement.....	page 82
Avis d'expert.....	page 84
Les implications environnementales de la raréfaction des métaux et terres rares : un piège à éviter à tout prix.....	page 87
Conclusion.....	page 89
Recommandations pour une évolution du numérique compatible avec le Green Deal.....	page 89



Les clés pour comprendre



Résumé de l'étude de cas

Aussi paradoxal que cela puisse paraître à première vue, les mêmes technologies vertes qui sont à la base de la transition énergétique et numérique sont elles-mêmes à l'origine d'impacts environnementaux majeurs, principalement pendant la phase de fabrication. Bien que le secteur numérique ne représente qu'une faible part de la demande croissante de métaux et de terres rares, les TIC sont fortement tributaires de ces matières premières non renouvelables. Une communication de la Commission européenne de septembre 2020 souligne que « la demande de terres rares utilisées dans les aimants permanents, par exemple pour les véhicules électriques, les technologies numériques ou les éoliennes, pourrait être multipliée par dix d'ici à 2050 ».¹

1 Commission européenne, [Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique européen et au Comité des régions, Résilience des matières premières critiques : Tracer la voie vers une sécurité et une durabilité accrues](#), 2020.

La question de la dépendance à l'égard des métaux et terres rares est donc double pour l'UE, affectant à la fois sa responsabilité environnementale et sa stratégie géopolitique. Cette étude de cas a pour but d'expliquer quels sont les métaux et terres rares dont dépendent les TIC, quels sont les impacts environnementaux des matières premières utilisées dans ces équipements, et de formuler quelques recommandations pour aider l'UE à devenir plus résiliente face à d'éventuelles futures crises de pénurie, à réduire sa dépendance et à assurer une transformation numérique durable.

Définitions

Notions principales

➤ **Matières premières utilisées dans les TIC** : La fabrication des composants matériels constitue la chaîne d'approvisionnement la plus sophistiquée de l'histoire

de l'humanité.² Les matières premières utilisées dans les TIC sont toutes des matières non renouvelables. Certaines d'entre elles, comme l'aluminium, le carbone et le fer, sont présentes en très grandes quantités sur terre, mais pour fabriquer les composants essentiels des appareils TIC, des métaux et des éléments de terres rares sont également indispensables.

► **Métaux rares** : Contrairement aux métaux tels que le fer, le cuivre, le zinc, l'aluminium et le plomb, d'autres sont moins abondants dans la croûte terrestre. Par exemple, il y a en moyenne 2 650 fois moins de gallium que de fer dans le sol.³ Du plus au moins abondant, les métaux rares sont : le gallium, le béryllium, le germanium, le mercure, l'argent, l'indium, le palladium, le bismuth, le platine, l'or, l'osmium, le rhodium, l'iridium, le ruthénium, le tellure et le rhénium.

► **Les terres rares** : Ils sont identifiés comme rares car il est inhabituel de les trouver en grande concentration dans la croûte terrestre. Les terres rares ont des propriétés très similaires. « *Dans de rares cas, on les trouve ensemble dans des gisements. Contrairement à un élément comme l'or, les gisements naturels de terres rares ne se présentent jamais sous forme de métaux purs, mais sont mélangés avec des minéraux de faible valeur, ce qui rend leur extraction difficile.*⁴ » Il s'agit d'un ensemble de 17 métaux lourds presque indiscernables, lustrés, blancs argentés : cérium, néodyme, lanthane, yttrium, scandium, praséodyme, samarium, gadolinium, dysprosium, erbium, ytterbium, europium, holmium, terbium, lutécium, thulium et prométhium.

► **Caractéristiques de ces métaux rares et différence avec les autres métaux :**

- Environ 240 000 tonnes ont été produits en 2020 alors que 2 228 000 000 de tonnes de fer ont été produites la même année (environ 9 300 fois moins que les terres rares).
- Les métaux rares se trouvent souvent aux mêmes endroits que les métaux abondants dans la croûte terrestre, mais en très petites quantités (par exemple, il y a 1 200 fois moins de néodyme et jusqu'à 2 650 fois moins de gallium que de fer).⁵
- Ils possèdent des propriétés exceptionnelles, idéalement adaptées aux performances des équipements informatiques modernes et des équipements liés à la transition énergétique, dont la première est leur capacité magnétique.

► **Métaux non ferreux** : La plupart des métaux contenus dans un ordinateur portable sont des métaux non ferreux, tels que l'aluminium, le cuivre, l'étain, le nickel, l'or, l'argent, le lithium, le palladium ou le platine.

► **Cuivre** : Utilisé dans les circuits imprimés mais aussi dans de nombreux composants électroniques pour son excellente conductivité électrique et sa très bonne conductivité thermique.

► **Le cobalt** : Un composant majeur des batteries lithium-ion ou lithium-ion-polymère. Les batteries lithium-ion au cobalt sont actuellement celles qui ont la plus grande capacité de stockage d'énergie par unité de masse. Un rapport du JRC publié en 2018 prévoit que, « *dans des conditions moyennes, la demande dépassera l'offre de 64 000 tonnes en 2030.* » Même si la substitution du cobalt par d'autres métaux (comme le nickel) est possible, le même rapport indique que « *la substitution ne suffira pas à résoudre le déséquilibre à moyen et long terme* ». ⁶

2 <https://www.engineering.com/story/what-raw-materials-are-used-to-make-hardware-in-computing-devices> (dernière consultation : 14/06/2021)

3 Guillaume Pitron (trans. Bianca Jacobsohn), *La guerre des métaux rares : la face cachée des énergies propres et des technologies numériques*, 2021, chapitre 1

4 <https://idealmagnetsolutions.com/knowledge-base/extract-rare-earth-elements-from-acid-mine-drainage/> (dernière consultation : 03/06/2021)

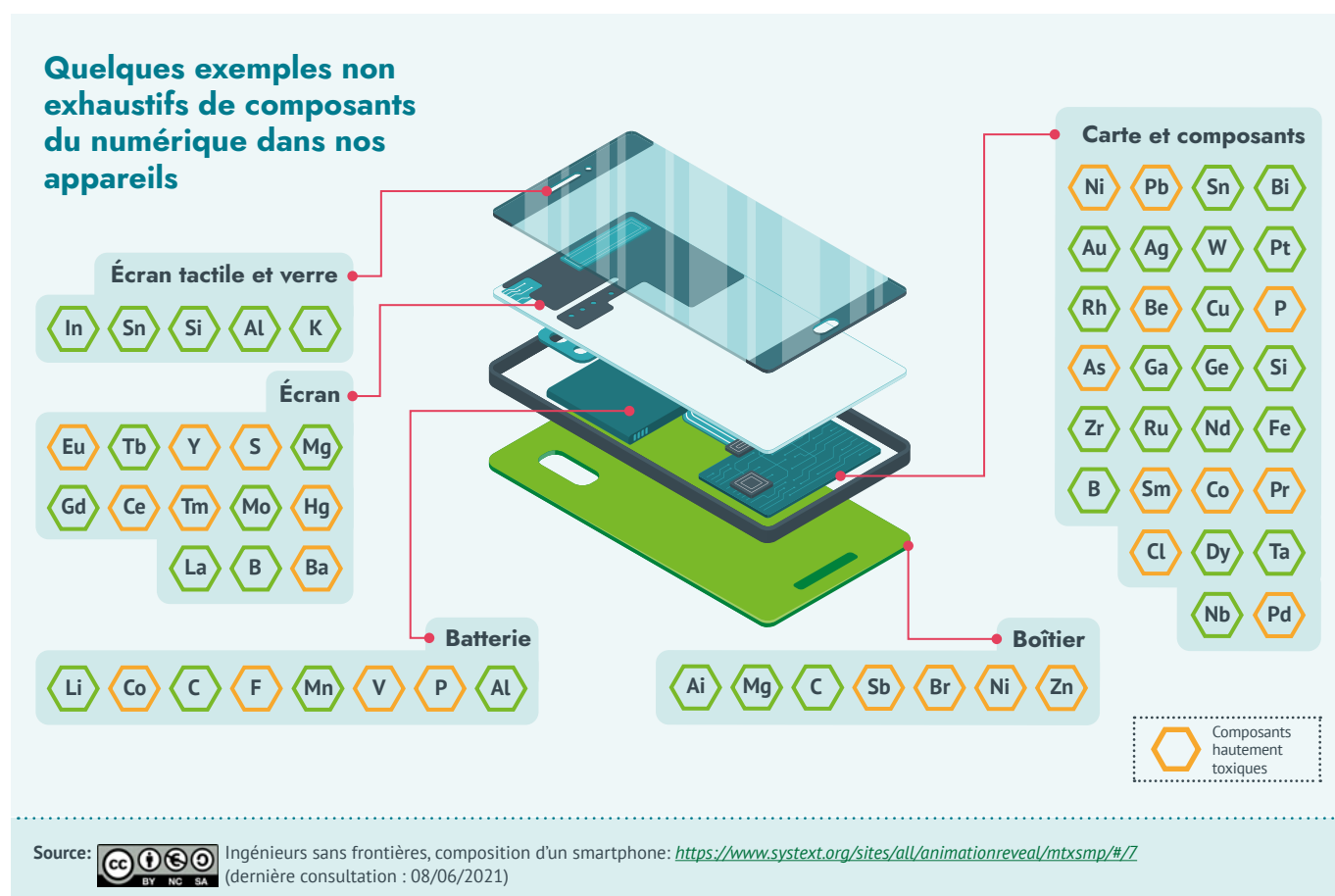
5 Guillaume Pitron (trad. Bianca Jacobsohn), *La guerre des métaux rares : la face cachée des énergies propres et des technologies numériques*, 2021, chapitre 1

6 Rapport du CCR, *Cobalt, équilibres offre-demande dans la transition vers la mobilité électrique*, 2018.

► **Le nickel:** Le nickel est principalement utilisé pour les batteries des véhicules électriques, mais on le trouve également dans de nombreuses autres batteries nickel-métal-hydrure (NiMH), comme dans les terminaux de paiement, l'électronique des avions, les contrôles d'accès et une foule d'équipements numériques. Le nickel est également l'un des principaux éléments d'alliage de l'acier inoxydable. Le JRC prévoit que « la demande mondiale de nickel augmentera de 2,6 Mt d'ici à 2040, alors qu'elle n'était que de 92 kt en 2020 » pour la seule électrification automobile, ce qui signifie que la demande mondiale serait multipliée par 28 en 20 ans. Dans l'UE-27, le même rapport prévoit que « la demande de nickel du secteur automobile augmentera de 543 kt, contre 17 kt en 2020 », ce qui signifie que la demande de l'UE-27 sera multipliée par 32 en 20 ans.⁷

► **L'or:** Utilisé dans les contacts électriques et comme couche anticorrosion et anti-oxydation sur les circuits imprimés pour sa stabilité et sa bonne conductivité électrique et thermique.

► **Le lithium:** En 2020, l'utilisation prédominante du lithium était la production de batteries lithium-ion tant pour les véhicules électriques (VE) que pour l'électronique portable (smartphones, tablettes, ordinateurs portables, objets connectés, etc.), qui représentait 65% de son utilisation en 2019.⁸



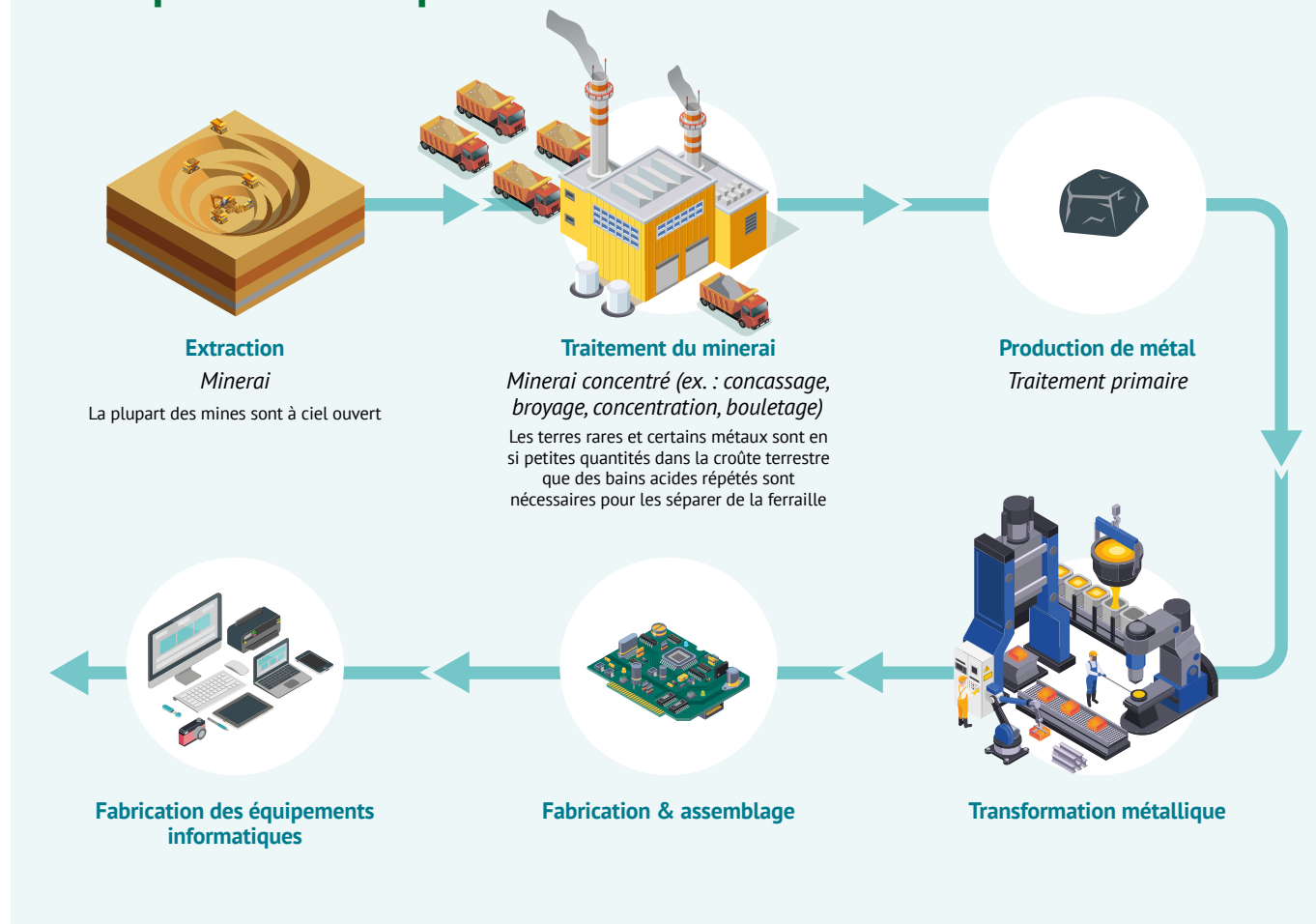
7 Fraser, Jake; Anderson, Jack; Lazuen, Jose; Lu, Ying; Heathman, Oliver; Brewster, Neal; Bedder, Jack; Masson, Oliver, Study on future demand and supply security of nickel for electric vehicle batteries, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2021.

8.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, janvier 2020.

Les impacts environnementaux liés à l'extraction et au raffinage des matières premières pour produire des composants du numérique

Le matériel permettant de stocker, transmettre et produire des données est communément appelé le « *hardware* ». Actuellement, les TIC sont basés sur une multitude d'équipements informatiques de plus en plus complexes et divers. Pour comprendre les impacts environnementaux des matières premières, il est nécessaire de se rappeler que les matières premières utilisées pour les TIC ne sont pas renouvelables et que, par conséquent, leur disponibilité dépend des stocks et de la demande. Il est également important de garder à l'esprit le processus de production d'extraction et de raffinage des métaux, qui est loin d'être neutre d'un point de vue environnemental.

1. Le processus de production



2. En plus des impacts environnementaux, les minéraux ont des impacts sociaux et géopolitiques

Dans de nombreux cas, l'extraction des minéraux se fait sans protection adéquate des travailleurs. Dans certains cas, comme celui du cobalt en République démocratique du Congo, quelque 200 000 travailleurs creusent sans aucun équipement de protection et souffrent de maladies pulmonaires et cutanées.⁹

De plus, les travailleurs des mines comptent aussi des enfants, ce qui est régulièrement dénoncé par les ONG de défense des droits de l'homme. En décembre 2019, l'association International Rights Advocates (IRA) a annoncé le dépôt d'une plainte contre sept entreprises transnationales telles qu'Alphabet (la maison mère de Google), Apple, Dell, Microsoft et Tesla, accusées de complicité dans la mort de quatorze enfants dans les mines de cobalt congolaises.¹⁰

Les métaux tels que l'étain, le tungstène, le tantale et l'or, sont souvent le résultat de conflits, de corruption, d'exploitation illégale et de travail des enfants.¹¹ Dans un rapport des Nations unies publié en 2016, le groupe d'experts du Congo déclare que l'or « fournit le bénéfice financier le plus important aux groupes armés »¹² et affirme qu'en 2010, « dans les provinces du Kivu au Congo, presque chaque gisement minier [était] contrôlé par un groupe militaire »¹³. Ceci a été illustré dans le documentaire danois *Blood in the Mobile*, produit en 2010 par Franck Piasecki Poulsen.¹⁴

9 <https://www.monde-diplomatique.fr/2020/07/BELKAID/61982>

10 <http://www.iradvocates.org/press-release/iradvocates-files-forced-child-labor-case-against-tech-giants-apple-alphabet-dell>

11 <https://www.numerama.com/tech/307318-minerais-et-conflits-au-congo-que-les-entreprises-de-la-tech-les-plus-responsables.html>

12 Conseil de sécurité de l'ONU, *Rapport final du Groupe d'experts* (2016), S/2016/166, p. 2, 23 mai 2016, disponible sur http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=S/2016/466.

13 Conseil de sécurité de l'ONU, *Rapport intérimaire du Groupe d'experts sur la RDC*, S/2010/252, para. 77, p.17, 24 mai 2010, disponible sur http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=S/2010/252

14 <https://www.youtube.com/watch?v=TV-hE4YxOLU> *Blood in the Mobile* est un film documentaire de 2010 du réalisateur danois Frank Piasecki Poulsen. Le film aborde la question des minéraux de conflit en examinant l'exploitation illégale de la cassitérite dans la province du Nord-Kivu, dans l'est de la RD Congo. Il se concentre en particulier sur la mine de cassitérite de Bisie.

15 Green Cross & Pure Earth Blacksmith Institute, *Les pires problèmes de pollution dans le monde*, 2016.

16 Perte d'habitat et réhabilitation, voir la figure 1 dans : Laura J. Sonter, Saleem H. Aliet James E. M. Watson, *Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science*, 2018.

17 Compensations de la biodiversité, rejets de déchets et pollution, fragmentation des habitats, voir la figure 1 dans : Laura J. Sonter, Saleem H. Aliet James E. M. Watson, *Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science*, 2018.

18 Changement climatique, espèces invasives, voir la figure 1 dans : Laura J. Sonter, Saleem H. Aliet James E. M. Watson, *Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science*, 2018.

19 Voir nos résultats d'ACV : impacts des TIC sur la toxicité humaine.

3. Impacts sur l'environnement

L'extraction et le raffinage des métaux et des terres rares pour produire les composants utilisés dans les TIC contribuent à de graves dommages environnementaux. En 2016, l'exploitation minière industrielle et le traitement des minerais figuraient au deuxième rang de la liste des pires problèmes de pollution dans le monde, juste après le recyclage des batteries au plomb usagées et avant la fusion du plomb.¹⁵ L'ampleur des menaces que l'exploitation minière fait peser sur la biodiversité est encore peu documentée : en effet, la plupart des publications se concentrent sur les impacts directs et sur site des activités d'extraction minière¹⁶, tandis que les impacts sur la biodiversité terrestre et à l'échelle régionale¹⁷, voire mondiale¹⁸, sont plus rarement documentés.

« Aujourd'hui, les données montrent un décalage imminent entre les grandes ambitions climatiques mondiales et la disponibilité des minéraux critiques, essentiels à la réalisation de ces ambitions. »

Dr Fatih Birol
Directeur exécutif de l'AIE

a. Toxicité pour l'homme

Le premier de ces impacts est la toxicité et, plus spécifiquement, la toxicité humaine.¹⁹ En effet, les personnes qui travaillent à l'extraction et au raffinage des minerais sont directement exposées aux poussières métalliques qu'elles respirent et ingèrent quotidiennement à

des concentrations très élevées. Or, les personnes qui travaillent directement avec les minéraux ne sont pas les seuls touchés : c'est toute la population à des kilomètres à la ronde autour d'une mine est qui est exposée à un risque accru de mortalité par cancer. C'est ce qu'a montré une étude publiée en 2012 et réalisée en Europe, où les industries minières sont réglementées par la Directive de prévention et de réduction intégrées de la pollution, et le Règlement européen sur le registre des rejets et transferts de polluants.²⁰ Dans le cas des terres rares, ces éléments ont la particularité de se trouver dans la croûte terrestre associés à des minerais radioactifs (thorium et uranium), ce qui les rend encore plus dangereux à traiter. L'exposition aux déchets radioactifs peut entraîner des pertes de dents, des problèmes respiratoires, des cancers et même la mort. Dans de nombreuses régions minières, le nombre de cancers et le taux de mortalité ont explosé.^{21 22}

b. Pollution de l'air, des sols et des rivières

La plupart des mines utilisent l'excavation en surface²³, ce qui a pour conséquence de laisser les particules métalliques à l'air libre, soufflées par le vent et emportées par la pluie, selon l'hydrologie régionale.²⁴ Les métaux peuvent donc être dispersés à la fois localement et sur de longues distances, aggravant la pollution dans les villes et le risque de mortalité des populations, et ayant également des impacts significatifs sur la pollution des cours d'eau et des cultures à proximité des mines,^{25 26} avec des risques accrus lors du raffinage.

La question des minerais métalliques est plus complexe que celle de l'exploitation des pierres, du sable ou du gravier, car pour être utilisés, ces métaux doivent être traités avec des réactifs chimiques. Par conséquent, l'extraction de métaux peut produire une pollution beaucoup plus grave que l'extraction de matériaux de construction, en libérant du mercure, de l'arsenic ou du cyanure.²⁷

L'expression « sac à dos écologique » est parfois utilisée dans la littérature pour décrire le volume de déchets extrait de la terre pour séparer les petites quantités de matériaux de valeur que ce sol contient. La quantité de déchets dépend du minéral extrait, mais pour les métaux, les déchets dépassent largement la production nette. Par exemple, pour une tonne de cuivre, 450 tonnes de déchets sont générées, pour le nickel 597 tonnes et pour l'or 1 069 000 tonnes.²⁸ Dans de nombreux cas, il n'existe pas de marché pour ces déchets. Tandis que le volume des déchets est l'un des problèmes rencontrés par les autorités publiques, les producteurs et les résidents, un autre problème est que les flux de déchets sont souvent chimiquement réactifs : la pollution chimique se produit parce que des réactifs sont libérés pendant le traitement ou par oxydation suite à l'exposition à l'air. Le procédé de lixiviation, qui consiste à transformer les métaux précieux en sels solubles tandis que les impuretés restent insolubles, est souvent utilisé pour les terres rares²⁹ ou les métaux tels que l'or car il nécessite moins d'énergie et ne provoque pas de pollution gazeuse ; il présente toutefois des inconvénients importants tels que la production de grandes quantités d'effluents toxiques, fortement acides ou alcalins.³⁰

597 tonnes de déchets générés pour 1 tonne de nickel



20 Pablo Fernandez-Navarro, et al, *Proximité de l'industrie minière et mortalité par cancer*, 2012.

21 <https://www.malaysianow.com/opinion/2020/12/08/the-toxic-risks-of-mining-rare-earths/> (dernière récupération : 03/06/2021)

22 Guillaume Pitron (trans. Bianca Jacobsohn), *La guerre des métaux rares : la face cachée des énergies propres et des technologies numériques*, 2021, chapitre 1

23 <https://pubs.usgs.gov/circ/2007/1294/paper1.html#table2> (dernière consultation : 04/06/2021)

24 Laura J. Sonter, Saleem H. Aliet James E. M. Watson, *Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science*, 2018.

25 Albert K. Mensah, Ishmail O. Mahiri, Obed Owusu, Okoree D. Mireku, Ishmael Wireko, Evans A. Kissi, *Environmental Impacts of Mining: A Study of Mining Communities in Ghana*, 2015

26 Guillaume Pitron (trad. Bianca Jacobsohn), *La guerre des métaux rares : le côté obscur des énergies propres et des technologies numériques*, 2021, chapitre 1.

27 Bridge G., *Contested terrain: mining and the environment*, 2004

28 Ibid.

29 Peelman, S., Kooijman, D., Sietsma, J. et al. *Récupération hydrométallurgique d'éléments de terres rares à partir de résidus miniers et de DEEE*, J. Sustain. Metall. 4, 367-377 (2018)

30 X. Jin Yang, Aijun Lin, Xiao-Liang Li, Yiding Wu, Wenbin Zhou, Zhanheng Chen, *China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation*, 2013

Avis d'expert



Guillaume Pitron est journaliste (Le Monde Diplomatique, National Geographic, etc.), et réalisateur de documentaires. En 2018, il a publié son premier livre, La guerre des métaux rares : La face cachée de la transition énergétique et numériqueⁱ, et en septembre 2021 un autre sur la pollution numérique.

Il concentre son travail sur les matières premières et les enjeux économiques, politiques et environnementaux liés à leur utilisation. Il est l'auteur d'une centaine de rapports, d'enquêtes et de documentaires dans plus de 40 pays et a reçu 14 prix de journalisme français et internationaux. Il a reçu le Prix Izraelezewicz du meilleur reportage d'investigation de l'année, décerné par le grand quotidien Le Monde, et le prix BMTV 2018 du livre économique de l'année pour La guerre des métaux rares.



Les métaux sont utilisés dans une très grande variété d'industries : aéronautique, immobilier, automobile, et bien sûr numérique. Aujourd'hui, de plus en plus de nouveaux matériaux utilisés sont des mélanges de métaux. Sous forme d'alliages, ces nouveaux matériaux augmentent les propriétés des matériaux initiaux et permettent de nouveaux types d'utilisation.

Le numérique n'échappe pas à cette consommation de métaux. Pour citer quelques chiffres précis et récents : 12,5% de la production mondiale de cuivre est utilisé spécifiquement pour les TIC, 7% pour l'aluminium, 15% pour le palladium, 23% pour l'argent, 63% pour le dysprosium, 70% pour le gallium et 87% de germanium, tous utilisés spécifiquement pour les différents usages des TIC - écrans, aimants, éclairage, condensateurs, etc.

Pour le cobalt spécifiquement, utilisé pour les TIC et les batteries des véhicules électriques, la production pourrait à l'avenir être insuffisante par rapport à la demande en raison d'un manque de ressources géologiques.

Pour les autres métaux, il n'y a pas de problème de pénurie géologique clairement identifié. Pour les métaux jugés critiques, il s'agit plutôt d'un risque de rupture d'approvisionnement car la production mondiale est concentrée dans certains pays. La production étant concentrée entre les mains de quelques acteurs étatiques, la défaillance d'une de ces nations pourrait entraîner une pénurie d'approvisionnement. C'est un risque industriel et géopolitique. C'est le cas des terres rares, du lithium, de l'antimoine, du tantale, etc.ⁱⁱ

L'un des problèmes des TIC est leurs effets rebondsⁱⁱⁱ : une technologie n'est pas faite pour que les gens consomment moins ; elle est faite pour que les gens consomment plus. Les gains énergétique et matériel pour une technologie peuvent être assez clairs, mais comme cette technologie permet des économies d'énergie et de matériaux, nous avons tendance à en consommer davantage. Appliqué au secteur des métaux, cela signifie qu'à l'avenir, nous consommerons plus de métaux au lieu de moins.

Malgré les progrès technologiques, il est à craindre que nos nouveaux usages et notre consommation croissante ne puissent être compensés. Il en va ainsi des métaux utilisés dans les TIC, qui sont les mêmes que ceux des technologies vertes, dont la demande va exploser et être multipliée par 10 à 40 dans les 20 à 30 prochaines années.

Les décideurs politiques commencent à se pencher sur ces sujets, comme en témoigne l'indice de réparabilité des outils électroniques et des appareils électroménagers désormais obligatoire en France. L'un des meilleurs moyens d'agir est l'économie circulaire.

Nous avons tous les moyens d'agir. Nous sommes responsables de la pollution liée au numérique. Céder à notre dépendance aux GAFAM est trop facile, nous devons tous prendre nos responsabilités.

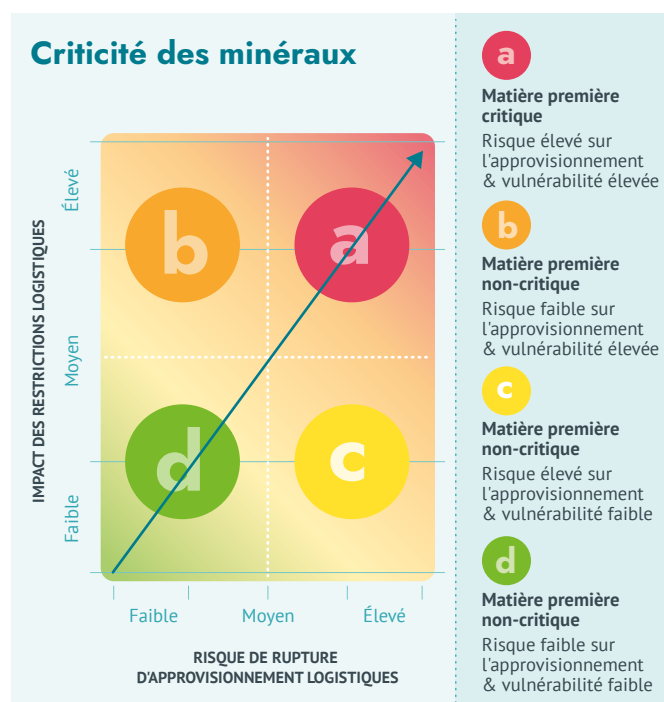
ⁱ Guillaume Pitron (trans. Bianca Jacobsohn), *The rare metals war: the dark side of clean energy and numérique technologies*, 2021.

ⁱⁱ Voir la liste des 30 métaux critiques établie par la Commission européenne : [European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final Report](#), 2020

ⁱⁱⁱ Voir notre étude de cas sur les effets rebonds des TIC.

^{iv} <https://www.vie-publique.fr/loi/268681-loi-lutte-contre-le-gaspillage-et-economie-circulaire> (dernière récupération : 05/07/2021).

Au Ghana, anciennement connu sous le nom de Côte-de-l'Or, l'exploitation minière de l'or, de la bauxite et du manganèse, tous trois utilisés pour les composants des TIC, « entraîne des effets environnementaux négatifs sur les rivières et les cours d'eau en raison du rejet d'effluents tels que le mercure, l'arsenic et les suspensions solides.³¹ » Il a été constaté que les rejets de mercure dans les masses d'eau entraînent également la désoxygénation et la mort des organismes aquatiques et de leur habitat, ce qui finit par diminuer leur population (le mercure est utilisé pour raffiner les amalgames d'or).³² L'exploitation minière a également un impact sur les écosystèmes et entraîne une perte de végétation, ce qui se traduit souvent par une déforestation massive, une perte de fertilité et de productivité des terres et une érosion massive. En Chine, qui est le premier producteur mondial de 28 ressources minérales, environ 80% de l'eau des puits souterrains est impropre à la consommation et 10% des terres arables chinoises sont contaminées par des métaux lourds³³, ce qui équivaut à la superficie d'un pays de la taille de la Grèce.^{34 35}



c. Stress hydrique³⁶

L'un des effets les plus importants de la production de métaux pour les TIC est le stress hydrique. En effet, l'exploitation minière utilise de grandes quantités d'eau, principalement pour le traitement des minéraux, la suppression des poussières, le transport des boues et les besoins des employés. Par exemple, environ 84 210 litres d'eau sont utilisés pour obtenir une tonne de cuivre.³⁷ Dans la plupart des opérations minières, l'eau provient des eaux souterraines, des ruisseaux, des rivières et des lacs, ou de fournisseurs commerciaux de services d'eau. Cependant, les sites miniers sont souvent situés dans des zones où l'eau est déjà rare, ce qui accroît le stress hydrique dans ces régions.³⁸ Mais l'approvisionnement en eau n'est pas le seul problème : principalement dans le cas des mines souterraines, l'eau doit être pompée hors du site minier. Cela peut conduire à un épuisement des eaux de surface et à la pollution des rivières locales. En raison du manque de données publiées sur l'eau par les entreprises, il est encore difficile de trouver des informations fiables pour se faire une idée complète de la consommation d'eau des entreprises minières. Toutefois, les données sur l'eau provenant des rapports de durabilité des entreprises montrent que les prélèvements varient considérablement en fonction du métal extrait et de la qualité du minerai.³⁹

Le drainage minier acide a un impact sur les ressources en eau environnantes, car les minéraux sulfurés contenus dans les roches stériles réagissent avec l'eau et l'oxygène de la surface, ce qui entraîne la création d'acide sulfurique, qui, entraîne à son tour, la dissolution des sels et des métaux lourds, toxiques pour les écosystèmes aquatiques. Comme la production future proviendra de minerais de plus en plus pauvres, la consommation d'eau par unité de métal produite sera un défi, tout comme les émissions de gaz à effet de serre, les déchets solides et autres polluants.

31 Albert K. Mensah, Ishmail O. Mahiri, Obed Owusu, Okoree D. Mireku, Ishmael Wireko, Evans A. Kissi, *Environmental Impacts of Mining: Une étude des communautés minières au Ghana, 2015*

32 Ibid.

33 Guillaume Pitron (trad. Bianca Jacobsohn), *La guerre des métaux rares : le côté obscur des énergies propres et des technologies numériques*, 2021, chapitre 1.

34 Estimation basée sur les terres arables de la Chine (en hectares) / 10. Données sur les terres arables de la Chine <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.ARBL.HA?end=2018&locations=CN&start=1961&view=chart> (dernière récupération : 03/06/2021)

35 <https://www.bbc.com/future/article/20150402-the-worst-place-on-earth> (dernière récupération : 04/06/2021)

36 Stephanie Yang, The Chip Shortage Is Bad. Taiwan's Drought Threatens to Make It Worse, The Wall Street Journal, 16 April 2021, <https://www.wsj.com/articles/the-chip-shortage-is-bad-taiwans-drought-threatens-to-make-it-worse-11618565400> (dernière consultation : 03/06/2021)

37 <https://www.csiro.au/en/work-with-us/industries/mining-resources/Processing/Water-footprint> (dernière consultation : 15/06/2021)

38 <https://www.mining-technology.com/features/feature-managing-water-consumption-mining-global-shortage/> (dernière consultation : 15/06/2021)

39 Michael Tost, Benjamin Bayer, Michael Hitch, Stephan Lutter, Peter Moser et Susanne Feiel, *Les pressions environnementales de l'extraction de métaux : Un examen et des estimations actualisées sur les émissions de CO₂, l'utilisation de l'eau et les besoins en terres*, 2018.

d. Émissions de gaz à effet de serre

L'extraction, le traitement et le transport sont également d'importants émetteurs de gaz à effet de serre : de l'excavation des minéraux au transport et au traitement, de grandes quantités d'énergie embarquées⁴⁰ (carburant et électricité) sont nécessaires pour produire des métaux suffisamment purs pour les utiliser dans la *high-tech*. Lorsque les minéraux carbonatés utilisés sont décomposés, du dioxyde de carbone est également libéré. Dans l'ensemble, **les estimations montrent que les émissions de gaz à effet de serre liées à la production primaire de minéraux et de métaux étaient équivalentes à environ 10% du total des émissions de gaz à effet de serre mondiales liées à l'énergie en 2018.**⁴¹ En outre, plus les ressources se raréfient, plus il faut d'énergie pour les extraire. L'extraction du cuivre au Chili en est un exemple : entre 2001 et 2017, la consommation de carburant a augmenté de 130% et la consommation d'électricité de 32% par unité de cuivre extraite, en grande partie en raison de la diminution de la teneur en minerai.⁴² Comme la demande de métaux devrait exploser dans les années à venir, cette tendance à l'augmentation de la demande d'énergie pour produire la même quantité de certains métaux se confirme, tout comme les émissions de gaz à effet de serre liées à l'extraction, au traitement et au transport devraient augmenter de façon saisissante au lieu de diminuer.⁴³

e. Épuisement des ressources⁴⁴

Consommer les ressources naturelles plus rapidement qu'elles ne peuvent être remplacées, c'est cela l'épuisement des ressources. Il peut être divisé en deux catégories : l'épuisement des ressources renouvelables et des ressources non renouvelables. **Les ressources utilisées pour fabriquer des équipements du numérique sont par nature limitées, car elles ne sont pas renouvelables.** Une question fréquemment posée au sujet des métaux utilisés pour des technologies telles que les TIC est : « Aurons-nous assez de métaux pour continuer à produire des équipements ? ». Cependant, la réponse est plus sub-

tile qu'un « oui » ou un « non », et dépend de nombreux facteurs tels que la disponibilité géologique, la disponibilité de métaux suffisamment purs pour les usages de la *high-tech*, les fluctuations de la demande de métaux sur le marché, la logique d'approvisionnement en flux tendu, les stratégies géopolitiques et les considérations environnementales.

« Pour un métal spécifiquement, le cobalt, utilisé pour les batteries des véhicules électriques et le numérique, la production sera insuffisante à l'avenir par rapport à la demande en raison d'un manque de ressources géologiques. Pour les autres métaux, il n'y a pas de problème de pénurie géologique clairement identifié. C'est un risque industriel et géopolitique. »

Guillaume Pitron

D'un point de vue géologique, les métaux utilisés pour le numérique sont nombreux et inégalement répartis sur la croûte terrestre, la Chine étant le premier producteur mondial, fournissant 66% des matières premières critiques figurant sur la liste 2020 de la Commission européenne.⁴⁵ Un récent rapport de l'OCDE prévoit que les utilisations mondiales de minerais métalliques passeront de 9 Gt en 2017 à 20 Gt en 2060 en l'absence de nouvelles politiques, dans un scénario *business-as-usual*.⁴⁶

Alors que nos économies en dépendent de plus en plus pour leurs technologies, extraire les métaux pour satisfaire la demande représente un défi croissant. Une étude très complète débattant de la durabilité de l'exploitation minière en Australie souligne la forte évidence que pour la plupart des produits minéraux,

40 « L'énergie embarquée est la somme de toute l'énergie nécessaire à la production de tout bien ou service, considérée comme si cette énergie était incorporée dans le produit lui-même » Wikipedia : https://en.wikipedia.org/wiki/Embodied_energy (dernière consultation : 08/06/2021)

41 Azadi, M., Northey, S.A., Ali, S.H. et al., *Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation*. Nat. Geosci. 13, 100–104 (2020)

42 Ibid.

43 OECD, *Perspectives des ressources matérielles mondiales à l'horizon 2060 : Economic Drivers And Environmental Consequences*, 2019

44 <https://www.greenit.fr/2021/03/30/nickel-des-tensions-des-2027/> (dernière consultation : 07/06/2021)

45 Commission européenne, *Étude sur la liste des premières critiques de l'UE, rapport final*, 2020

46 OECD, *Perspectives des ressources matérielles mondiales à l'horizon 2060 : Moteurs économiques et conséquences environnementales*, 2019

Les implications environnementales de la raréfaction des métaux et des terres rares : un piège à éviter à tout prix

« Peut-on substituer un métal non essentiel à un métal essentiel ? »

Actuellement, de nombreuses recherches sont en cours pour trouver des substituts aux métaux essentiels dans les équipements numériques. Cependant, dans de nombreux cas, les substituts sont des alliages composés d'autres métaux essentiels. C'est le cas de l'antimoine, par exemple, qui, au cours de la dernière décennie, a toujours été considéré par l'UE et les États-Unis comme une matière première critique. On estime que les réserves mondiales actuelles d'antimoine couvrent environ 12 ans de la consommation annuelle mondiale de 2019. Aujourd'hui, l'antimoine est encore utilisé dans les TIC pour les écrans de télévision et les semi-conducteurs, et a beaucoup d'autres applications en dehors du numérique, des agents ignifugeants (usage principal) aux médicaments pharmaceutiques. Cependant, de nombreux substituts de l'antimoine ont été développés, la plupart étant considérés comme moins efficaces que l'antimoineⁱ et basés sur d'autres métaux rares qui peuvent également être essentiels, tels que le titane (essentiel), le chrome et l'étain (tous deux quasi essentiels).ⁱⁱ Les substituts ouvrent donc la porte à d'autres enjeux, par exemple, comment s'assurer que des alliages de plus en plus complexes n'entravent pas le recyclage futur des métaux utilisés ? La substitution peut apporter une solution partielle, mais elle est impossible pour la plupart des métaux, n'empêchera pas la menace de pénurie, ne résoudra pas les problèmes de pollution liés à la production de composants et peut entraîner des difficultés supplémentaires pour la valorisation des composants dans les déchets électroniques. En effet, la plupart des métaux essentiels sont encore extrêmement difficiles à recycler (voir tableau ci-contre), et plus les alliages complexes sont utilisés, plus les possibilités de recyclage seront limitées.ⁱⁱⁱ

« Que dire des nouvelles mines qui s'ouvrent dans l'UE ? »

D'un point de vue environnemental, l'ouverture de nouvelles mines est associée à tous les impacts

environnementaux décrits ci-dessus. Même avec des réglementations et des mesures d'atténuation strictes, les projets miniers ont à la fois des impacts environnementaux importants sur la biodiversité locale et régionale et des impacts mondiaux sur les émissions de GES, ainsi que des impacts toxiques sur la santé humaine. Les nouvelles mines, même si elles sont réglementées plus strictement pour limiter leurs impacts environnementaux, ne seront jamais durables, car les ressources minérales sont « finies » ; elles ne constitueront pas non plus une solution à long terme à la dépendance de l'UE vis-à-vis des TIC ni, en fin de compte, aux importations en provenance de Chine. D'un point de vue économique, par exemple dans le cas des terres rares^{vi}, la domination de la Chine permet au pays de nourrir des producteurs régionaux en Afrique et en Asie à une rentabilité modérée, empêchant ainsi les producteurs extérieurs de gravir la chaîne de valeur de la production de métaux.^v En l'absence de toute production de métaux en dehors de la Chine, les producteurs de terres rares ne peuvent être que des fournisseurs de faible valeur à l'industrie manufacturière chinoise, alimentant le monopole de la Chine, selon les analystes du marché.^{vi}

Contribution du recyclage pour répondre aux besoins de matériaux (Taux d'Intrants du Recyclage)*

Taux d'Intrants du Recyclage	Matériau
0%	Niobium, Indium, Lithium, Tantalum, Bauxite, Beryllium, Bismuth, Coking Coal, Dysprosium, Gallium, Hafnium, Phosphorus, Scandium, Silicon metal, Strontium
1-5%	Neodymium, Fluorspar, Baryte, Cerium, Erbium, Gadolinium, Holmium, Thulium, Lutecium, Ytterbium, Rubber, Samarium, Borate, Germanium, Vanadium, Natural graphite
6-10%	Terbium, Praseodymium
11-20%	Ruthenium, Magnesium, Iridium, Phosphate rock, Titanium
21-30%	Cobalt, Platinium, Antimony, Palladium, Rhodium
31-45%	Yttrium, Europium, Tungsten

*Le taux d'intrants du recyclage (TIR) est le pourcentage de la demande globale qui peut être satisfait par des matières premières secondaires. Tableau tiré de : Commission européenne, *Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final Report*, 2020.

ⁱ CRM, InnoNet, *Profil de substitution des matières premières critiques*, 2015

ⁱⁱ U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries*, janvier 2018 ; Commission européenne, *Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final Report*, 2020

ⁱⁱⁱ Xiuyan Li, K. Lu, *Improving sustainability with simpler alloys*, 2019

^{iv} Dans le cas des terres rares, qui sont utilisées dans les appareils TIC, par exemple pour les aimants très puissants et miniatures, et pour régler les différentes échelles de couleur à l'écran, la majeure partie de l'extraction minière et du raffinage est actuellement effectuée par la Chine.

^v Stuart Burns, *Rare earths are the next geopolitical chess game*, MetalMiner, février 2021

^{vi} Resource World, *Le secteur des terres rares, un défi : qui peut tenir tête aux Chinois ?* 2020

les teneurs moyennes en minerai ont diminué au fil du temps. L'étude conclut que pour les matières premières présentes en Australie, l'extraction de certaines d'entre elles pourrait être maintenue pour « *quelques décennies* », tandis que pour l'or, le zinc et le plomb, « *les ressources économiques actuelles dureront environ trois décennies ou moins* » au moment de l'étude.⁴⁷

Le département US Geological Survey (USGS) publie une enquête annuelle⁴⁸ qui suit au plus près la quantité de chaque minéral produite chaque année, ainsi que les réserves estimées pour chaque minéral, et les ressources globales estimées. La quantité produite d'un minéral correspond à la quantité extraite et traitée (exploitation minière), les réserves estimées correspondent aux ressources minérales accessibles dans les projets miniers en cours, et les ressources globales prennent en compte l'ensemble des ressources de la planète, tant sur terre que dans l'océan. Pour de nombreux métaux, les estimations des ressources et des réserves mondiales sont partielles, ce qui rend difficile l'évaluation précise du degré d'épuisement des ressources, même s'il est clair, puisqu'il s'agit de ressources non renouvelables, qu'il existe un phénomène d'épuisement et que ce phénomène est suffisamment important pour que l'on s'y intéresse.⁴⁹

Il est important de comprendre que la grande majorité des ressources mondiales théoriques en métaux rares sont souvent présentes dans la croûte terrestre dans des concentrations extrêmement faibles, ce qui signifie que seule une petite partie de ces minéraux est économiquement, énergétiquement et technologiquement exploitable. C'est ce que l'on appelle la barrière minéralogique.⁵⁰ Au rythme actuel de production, les réserves rentables d'une quinzaine de métaux de base et de métaux rares seront épuisées dans moins de 50 ans.⁵¹

Les métaux concernés sont l'antimoine, l'étain, le plomb, l'or, le zinc, le strontium, l'argent, le nickel, le tungstène, le bismuth, le cuivre, le bore, la fluorine, le manganèse et le sélénium.⁵²

Au fur et à mesure de l'évolution de la technologie, la barrière minéralogique peut varier à petite échelle⁵³, mais avec des effets négatifs considérables sur l'environnement local, régional et mondial, car l'exploitation minière nécessitera plus d'énergie et des opérations de plus en plus profondes et étendues. À terme, le coût économique du recyclage des déchets électroniques devrait devenir de plus en plus compétitif par rapport au coût écologique de l'extraction des métaux les plus demandés⁵⁴ (**voir notre étude de cas sur les déchets électroniques et l'économie circulaire**).

Bien qu'ils ne sont pas directement liés à l'épuisement des ressources, les prix très volatils et les pénuries à court terme devraient se produire de plus en plus souvent, car la demande augmente plus et plus vite que l'offre, ce qui donne un premier aperçu de notre dépendance actuelle et croissante aux métaux. C'est le cas depuis le début de l'année 2021 avec la pénurie de semi-conducteurs. Cette pénurie affecte la production de véhicules à grande échelle, en raison d'une croissance significative du marché des ordinateurs personnels pendant la crise de 2020 Covid-19, de l'intérêt croissant concomitant pour les automobiles électriques (forte demande de circuits intégrés) et de la pénurie de matières premières pour les circuits imprimés qui en résulte.⁵⁵

47 Mudd, G M, *The Sustainability of Mining in Australia: Key production trends and Environmental Implications*, Research Report No RR5, Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute, 2009

48 <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries> (dernière consultation : 14/06/2021)

49 van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hirsch, R. pour le PNUE, *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*, 2013.

50 Bihouix P., de Guillebon B., *Quel futur pour les métaux ? Rarefaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, 2010

51 Guillaume Pitron (trad. Bianca Jacobsohn), *La guerre des métaux rares : la face cachée des énergies propres et des technologies numériques*, 2021, chapitre 8.

52 Myrtille Delamarche, *De surprises matières critiques*, L'usine nouvelle, 10 juillet 2017 ; Myrtille Delamarche, *Les nouvelles matières critiques*, L'usine nouvelle, 2018.

53 Parfois, l'ouverture de nouvelles mines, l'exploration et la découverte de nouvelles réserves peuvent modifier la criticité géologique d'un métal, mais ce n'est qu'exceptionnellement le cas et cela ne change pas fondamentalement les problèmes de criticité et d'épuisement d'un métal. Ces dernières années, cela a été particulièrement vrai pour le lithium, dont les réserves mondiales ont été estimées par l'USGS à 14 000 000 de tonnes métriques en 2016 et en 2017, avec un bond à 17 000 000 de tonnes métriques en 2018 et à 21 000 000 de tonnes métriques en 2018 parce que de nouvelles explorations approfondies ont entraîné l'ouverture de nouvelles mines, en particulier en Amérique du Sud dans une région connue sous le nom de Triangle du lithium, qui détiendrait environ 54 % des réserves mondiales de lithium. Ces explorations supplémentaires ont été motivées par la demande croissante, régulière et soutenue de lithium pour les batteries, pour les smartphones et les appareils intelligents et encore bien plus pour les batteries des véhicules électriques ; Ellsworth Dickson, *South America's prospective-The Lithium Triangle*, Resource World, 2017.

54 OCDE, *Perspectives mondiales des ressources en matériaux jusqu'en 2060 : Economic Drivers And Environmental Consequences*, 2019

55 Mario McKellop, *Raw Material Shortage Marks Latest Setback for Components Industry*, 24 mai 2021

Conclusion

Il faut rappeler que l'humanité n'a pas toujours été aussi dépendante à ces métaux et en de telles quantités : de l'Antiquité à la Renaissance, l'humanité n'a utilisé que sept métaux, seulement 10 au cours du 20^e siècle et une vingtaine dans les années 70. Actuellement, la quasi-totalité du tableau périodique de Mendeleïev est utilisée (environ 80 éléments sur 90).⁵⁶

« Malgré les progrès technologiques, il est à craindre que nos nouveaux usages et notre consommation croissante ne puissent être compensés. »

Guillaume Pitron

Cette dépendance menace les réserves économiquement disponibles pour les générations futures et la stabilité économique et géopolitique, et représente un recul phénoménal de l'ambition de la transition écologique, car elle a des effets toxiques irréversibles sur les écosystèmes, la biodiversité et les vies humaines, et contribue à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et du stress hydrique à un moment où les activités humaines doivent réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre et préserver l'eau douce pour les besoins primaires.

Si le secteur du numérique ne représente qu'une faible part de la demande mondiale de métaux, plusieurs ressources importantes pour les TIC se raréfient, et l'augmentation des composants nécessaires au numérique et prévue pour l'IoT⁵⁷ va à l'encontre d'une utilisation durable des technologies numériques. Pour ce faire, il est essentiel de comprendre que les TIC reposeront toujours sur de l'équipement, et que l'équipement reposera toujours sur les métaux, qui sont des ressources non renouvelables. Cela signifie que nous devons considérer les avantages économiques et sociaux quotidiens que nous offrent les TIC comme un stock limité qu'il est de notre devoir de préserver, et hiérarchiser nos besoins

dans le cadre de la transition numérique et environnementale afin d'identifier précisément où nous pouvons être les plus efficaces. En cela, la sobriété et les solutions low-tech⁵⁸ peuvent être extrêmement bénéfiques, en abordant à grande échelle les multiples problèmes environnementaux décrits dans cette étude de cas, ainsi que des questions sociales et économiques, telles que la réduction de la fracture numérique, la limitation de la dépendance aux écrans et des pathologies associées, la limitation de la dépendance de l'UE aux importations et la contribution à la résilience de l'Europe. ■

Recommandations pour une évolution numérique compatible avec le Green Deal

Dans une perspective d'évolution numérique idéale, l'efficacité de la *high-tech* a été ingénieusement couplée aux innovations *low-tech* pour proposer le meilleur des deux, stimulant la compétitivité de l'UE et renforçant sa position de précurseur et de leader actif d'une innovation disruptive pour le climat et l'environnement.

Le secteur de la réparation et du réemploi est un important pourvoyeur d'emplois dans de nombreuses régions et les équipements numériques sont collectés à une échelle suffisamment grande pour soutenir la massification du réemploi.

Les appareils tels que les smartphones, les téléphones fixes, les ordinateurs portables, les téléviseurs et les écrans ont souvent une deuxième, troisième ou quatrième vie avec d'autres utilisateurs. La ruée sur les appareils les plus puissants a fait place à une utilisation équilibrée de dispositifs à longue durée de vie adaptés aux besoins quotidiens. L'écoconception et la robustesse des appareils, ainsi que leur grande réparabilité sont encouragées. La plupart des équipements TIC, tels que les boîtiers Wi-Fi, sont partagés.

Les gens gardent leur équipement plus longtemps et ont été massivement responsabilisés dans leurs choix afin qu'ils puissent opter pour le type d'appareil qui offre le meilleur compromis entre la durabilité et leurs besoins.

La dépendance aux écrans, qui était un problème croissant depuis 2020, est aujourd'hui très faible: en effet, les appareils TIC sont utilisés comme des outils, et le divertissement a fait des progrès impressionnants avec un retour au partage réel plutôt que virtuel, loin de l'isolement.

⁵⁶ Guillaume Pitron (trans. Bianca Jacobsohn), *La guerre des métaux rares : le côté obscur des énergies propres et des technologies numériques*, 2021

⁵⁷ Tilman Santarius, Johanna Pohl et Steffen Lange, *Digitalization and the Decoupling Debate: Les TIC peuvent-elles contribuer à réduire les impacts environnementaux alors que l'économie continue de croître ?* 2020; voir notre étude de cas sur l'IoT.

⁵⁸ Par exemple, la pénurie mondiale actuelle de semi-conducteurs a suscité l'intérêt du marché pour les anciens équipements de fabrication de puces, ce qui montre que les solutions dites *low-tech* permettent une résilience rapide en cas de pénurie massive et immédiate. Cela souligne également le fait que cette solution est trop souvent laissée de côté, mais qu'elle est précieuse et qu'elle doit être envisagée et planifiée pour être aussi efficace que possible. (Équipe Sourceengine, Global Semiconductor Shortage Drives Interest in Older Chip-making Equipment, 9 mars 2021)

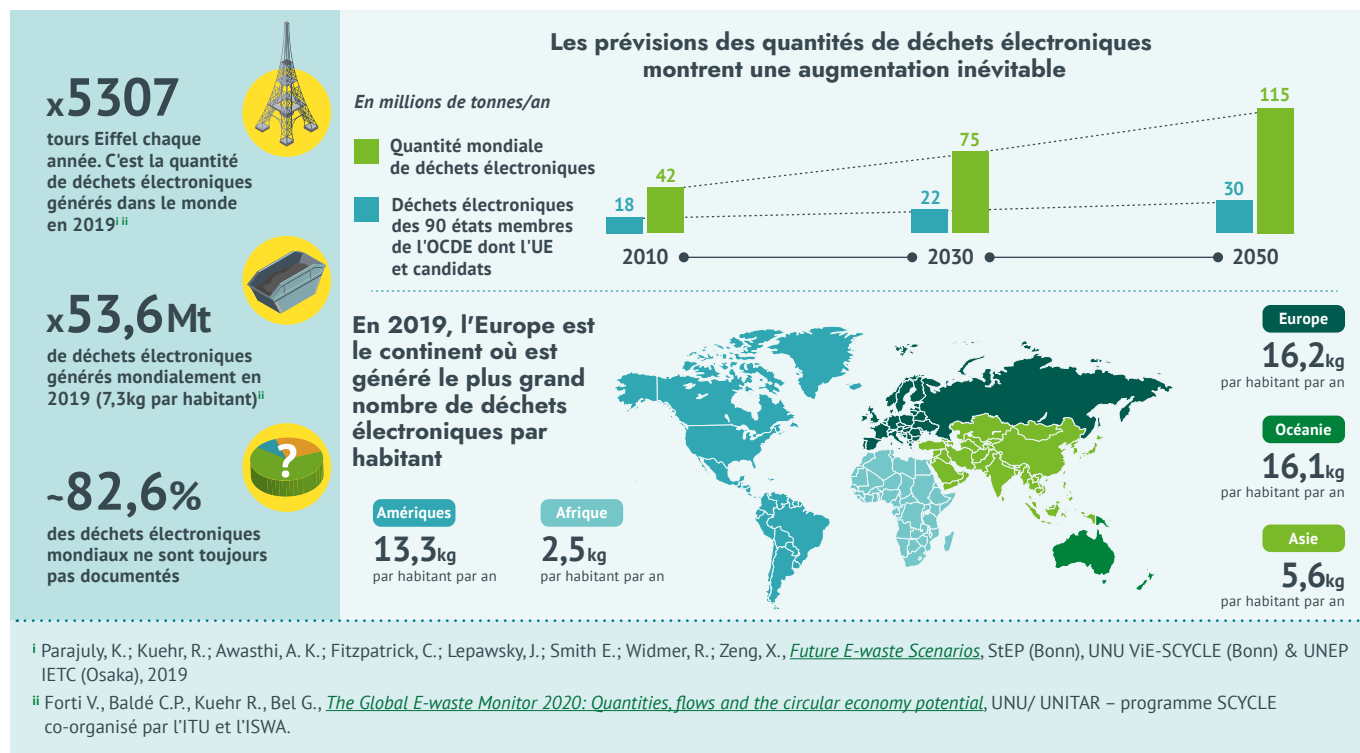
Les déchets électroniques et l'économie circulaire

Sommaire

Les clés pour comprendre.....	page 91
Résumé de l'étude de cas.....	page 91
Définitions.....	page 91
Qu'est-ce que l'économie circulaire ?.....	page 91
Qu'est-ce qu'un déchet électronique ?.....	page 92
Notions principales.....	page 92
Que deviennent les déchets électroniques lorsqu'on jette un appareil ?.....	page 93
Que deviennent les déchets électroniques collectés pour le recyclage dans l'UE ?.....	page 95
De la collecte à l'usine de prétraitement.....	page 95
Du prétraitement au traitement final.....	page 95
Bénéfices environnementaux du recyclage.....	page 96
Que deviennent les déchets électroniques qui ne sont pas correctement collectés pour le recyclage ?.....	page 97
Les déchets électroniques à la poubelle.....	page 97
Les déchets électroniques et la Convention de Bâle.....	page 97
Les déchets électroniques collectés en dehors du système de collecte spécifique, comme les restes de ferraille.....	page 98
Les déchets électroniques collectés en dehors du système de collecte spécifique dans les pays ne disposant pas d'une infrastructure de gestion de déchets électroniques développée.....	page 98
Solutions émergentes pour les TIC dans l'économie circulaire.....	page 98
Avis d'expert.....	page 99
Pourquoi les enfants sont-ils particulièrement sensibles à l'exposition aux déchets électroniques.....	page 100
Conclusion.....	page 100
Recommandations pour une évolution du numérique compatible avec le Green Deal.....	page 101



Les clés pour comprendre



Résumé de l'étude de cas

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) sont reconnus comme l'un des problèmes les plus urgents à résoudre, car leur impact sur l'environnement peut être positif ou négatif. Pourquoi positifs ? Parce que les déchets électroniques contiennent des matières premières critiques - certaines dangereuses, d'autres non - qui peuvent être dépolluées, recyclées et réutilisées et peuvent donc réduire la pollution environnementale, les risques sanitaires et l'épuisement des matières premières ([voir notre étude de cas sur les matières premières](#)). Mais avant qu'ils ne deviennent des déchets électroniques, la durée de vie des équipements peut être prolongée afin de réduire la production d'autres équipements qui deviendront eux aussi, à terme, des déchets électroniques. C'est le principe d'un système d'économie circulaire, qui n'en est qu'à ses débuts.

Cette étude de cas examine l'état actuel de la gestion des déchets électroniques dans l'UE et explique les notions

clés liées à l'économie circulaire émergente et appliquée aux appareils numériques. Nous expliquons également les impacts environnementaux et sanitaires liés aux déchets électroniques inadéquatement collectés et traités, qui d'une part peuvent avoir des effets néfastes sur la biodiversité, les émissions de gaz à effet de serre, la pollution de l'eau et des sols, et d'autre part des effets dangereux sur la santé, notamment celle des enfants.

Alors que les prévisions anticipent un inévitable accroissement des déchets électroniques dû à la croissance démographique et à l'augmentation du pouvoir d'achat, il est crucial de comprendre la contribution du numérique aux déchets électroniques et les leviers permettant de s'attaquer aux racines de ce problème mondial.

Définitions

Qu'est-ce que l'économie circulaire ?

Économie circulaire : l'économie circulaire est un système économique visant à prévenir le gaspillage et l'épuisement continu des ressources. Elle vise à créer un système en boucle fermée pour minimiser l'utilisa-

tion des ressources et la pollution due à la production de déchets et aux émissions de gaz à effet de serre. Le partage, la réutilisation, la réparation, la remise à neuf, le reconditionnement et le recyclage sont les principes clés de l'économie circulaire. Actuellement, l'économie circulaire est encouragée par le plan d'action européen pour l'économie circulaire¹, mais nous n'avons trouvé aucun exemple de projet d'économie circulaire soutenu par l'UE concernant les appareils numériques pour réduire les déchets électroniques.²

Qu'est-ce qu'un déchet électronique ?

Déchets électroniques : les « e-déchets » ou « e-waste », sont abréviation d'origine anglophone de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Un produit entre dans la catégorie des « déchets » lorsqu'il a été « *jeté par son propriétaire sans intention de le réutiliser* ». ³ Un équipement électrique et électronique peut être « *tout article ménager ou commercial comportant des circuits ou des composants électriques et alimenté par une pile ou une batterie* ». Dans l'UE, la directive DEEE exige la collecte séparée et le traitement approprié des déchets électroniques et établit des quotas pour la quantité minimale de déchets électroniques à collecter par les États membres de l'UE, ainsi que pour leur valorisation et leur recyclage. La directive rend également plus difficile pour les exportateurs de dissimuler les expéditions illégales de déchets électroniques.⁴ Comme décrit ci-dessous, la directive DEEE établit une distinction entre six catégories d'équipements :

1. Équipement d'échange de température (TEE)	4. Gros équipement
2. Écrans et moniteurs	5. Petit équipement
3. Lampes	6. Petit équipement informatique

Dans la mesure du possible, cette étude de cas se penchera spécifiquement sur les 2^e et 6^e catégories (2. Écrans et moniteurs, 6. Petit équipement informatique), car elles comprennent la majorité des équipements numériques.⁵ Cependant, il est souvent difficile de trouver des données détaillées par catégorie : dans ces cas, nous considérerons toutes les catégories de déchets électroniques.

Notions principales

Les 5R appliqués aux équipements numériques

Réduire : Chaque équipement qui n'est pas produit est un équipement qui ne polluera pas. C'est le premier principe de l'approche 5R.

Réutilisation : Chaque pièce d'équipement réutilisée contribue à réduire notre dépendance à l'égard des équipements les plus récents. À l'échelle de l'économie, il contribue à promouvoir l'économie circulaire, à combler la fracture numérique et à réduire les inégalités. Il s'agit du deuxième principe de l'approche 5R.

Réparation & Remise à neuf : Chaque pièce d'équipement réparée a une durée de vie plus longue. Chaque pièce d'équipement réparée ou remise à neuf à partir de composants d'occasion réduit l'épuisement des ressources et l'entropie. À l'échelle de l'économie, cela contribue également à promouvoir l'économie circulaire et à créer des emplois qualifiés.

Recycler : Un équipement recyclé aura deux avantages principaux : il émettra moins de pollution en fin de vie et, une fois démonté, ses composants pourront être valorisés pour des usages secondaires. Globalement, le recyclage des déchets électroniques présente d'importants bénéfices à long terme pour l'environnement et contribue à préserver l'utilisation future des métaux. Il s'agit du dernier principe de l'approche des 5R.

1 https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_action_plan.pdf (dernière consultation : 22/06/2021)

2 Basé sur des recherches effectuées en juin 2021 sur la plateforme de données ouvertes : <https://data.europa.eu/>

3 Initiative Step, *Solving the E-Waste Problem (Step) Livre blanc : Une définition globale des déchets électroniques*, 2014

4 https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en (dernière consultation : 21/06/2021)

5 Certains équipements, tels que les petits appareils électroniques grand public (écouteurs, télécommandes), ou les haut-parleurs, les appareils photo, les lecteurs vidéo et les projecteurs, peuvent être trouvés dans la 5^e catégorie (Petit équipement), mais de nombreux autres équipements électroniques non TIC, tels que les appareils ménagers, les équipements ménagers de surveillance et de contrôle ou les équipements médicaux, peuvent être trouvés dans la même catégorie de petit équipement, nous ne nous concentrons donc pas sur cette 5^e catégorie.

Que deviennent les déchets électroniques lorsqu'on jette un appareil ?

Les différents circuits de déchets électroniques



Magasin et point de collecte

Les déchets électroniques sont ramenés au magasin ou sont apportés par leur propriétaire à un point de collecte. Ils seront collectés et signalés. Ensuite, ils seront traités conformément aux normes de l'UE.



Mélangé avec d'autres déchets

Les déchets électroniques sont mélangés à d'autres déchets et des substances dangereuses contaminent le reste des déchets.

Les déchets électroniques seront soit brûlés (émissions de gaz à effet de serre) soit mis en décharge (pollution des sols et de l'eau).



Mélangé à la ferraille

Les déchets électroniques sont mélangés à des déchets métalliques sans traitement approprié des composants dangereux.

Les travailleurs risquent d'être exposés à des substances dangereuses, il existe un risque de pollution.



Réutilisation

Les déchets électroniques sont exportés pour être « réutilisés ». Les travailleurs risquent d'être exposés à des substances dangereuses, il existe un risque de pollution.



Récupération manuelle

Les déchets électroniques sont collectés par des fouilleurs intéressés par leurs composants.

Les fouilleurs risquent d'être exposés à des substances dangereuses, il existe un risque de pollution.



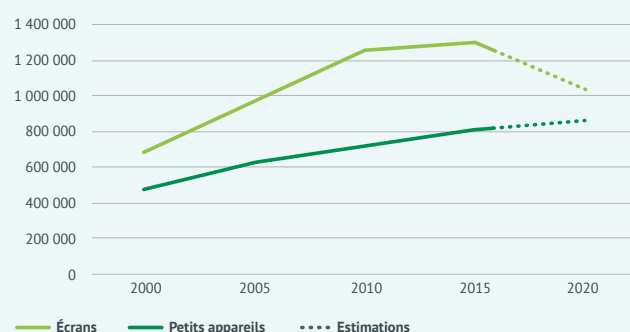
Recyclage

Les déchets électroniques peuvent être collectés pour un recyclage permettant en complément de réparer ou de mettre à niveau d'autres produits électroniques. Cette activité commence tout juste à se développer. Parfois, les déchets électroniques collectés dans les circuits officiels sont envoyés au secteur de la réparation.

Actuellement, bien qu'il existe des directives réglementaires et des incitations pour collecter et déclarer les déchets électroniques générés, un très grand volume de déchets électroniques finit toujours dans la poubelle ou est traité avec d'autres déchets métalliques. D'autres situations possibles bien qu'extrêmement difficiles à estimer sont, par exemple, l'exportation d'équipements informatiques en vue de leur réutilisation, le nettoyage des composants et le recyclage complémentaire en tant que produits.

Les déchets électroniques sont souvent collectés et mélangés à de la ferraille et sont donc enregistrés comme ferraille dans les statistiques sur les déchets au lieu de déchets électroniques. Dans ce cas, il existe plusieurs flux possibles, qui vont des circuits de ferrailleurs et d'entrepôts de ferraille rudimentaires, à la casse autorisée et à grande échelle, de véhicules hors d'usage. Certains déchets électroniques mélangés à de la ferraille sont également exportés vers d'autres pays pour y être traités.

Production de déchets électroniques en tonnes par an dans l'UE28



Il est prévu que le poids des écrans au stade de déchets diminue en raison de la plus petite taille des écrans et des moniteurs. Toutefois, le nombre de déchets électroniques générés pour la catégorie des écrans devrait encore augmenter, passant d'environ 1 800 000 000 de pièces par an à 2 400 000 000 de pièces par an dans l'UE28 + Norvège + Suisse.

<http://www.urbanmineplatform.eu/urbanmine/eee/weightpercolcat>

<http://www.urbanmineplatform.eu/urbanmine/eee/quantity>

(dernière consultation : 22/06/2021)

Catégories de déchets électroniques pour le numérique



Petits appareils

Routeurs, souris, claviers, lecteurs externes, accessoires, ordinateurs de bureau (hors moniteurs), imprimantes (scanners, multifonctions, télécopieurs), équipements de télécommunication, téléphones portables, consoles de jeux



Écrans

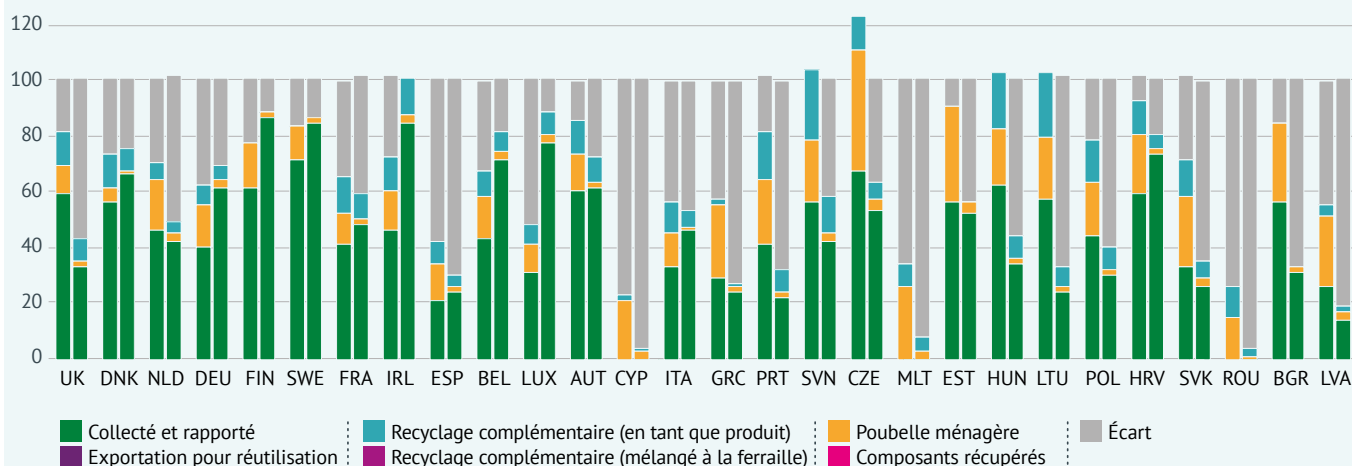
Ordinateurs portables, tablettes, moniteurs et téléviseurs à tube cathodique, moniteurs et téléviseurs à écran plat (LCD, LED, plasma)

Le projet Urban Mine Platform estime qu'en fonction du pays de l'UE et avec un degré d'incertitude extrêmement élevé (nous manquons de données pour environ un tiers des petits équipements informatiques), entre 0 et 25% des petits équipements informatiques (y compris les ordinateurs de bureau) ont été recyclés avec d'autres déchets métalliques en 2015, tandis que 5 à 43% des petits équipements informatiques ont fini à la poubelle et que seuls 12 pays de l'UE ont dépassé 55% des petits équipements informatiques collectés et

correctement déclarés comme déchets électroniques.⁶ Pour les écrans et moniteurs (y compris les ordinateurs portables et les tablettes), il est encore plus difficile d'obtenir des données fiables car nous perdons la trace d'environ la moitié des écrans en fin de vie. La disparité entre les pays est encore plus grande dans cette catégorie, puisque seuls 9 pays de l'UE dépassent les 55% d'écrans collectés et correctement déclarés en déchets électroniques et 13 pays dépassent 55% de données manquantes (voir le tableau ci-dessous).

⁶ Certains équipements, tels que les petits appareils électroniques grand public (écouteurs, télécommandes), ou les haut-parleurs, les appareils photo, les lecteurs vidéo et les projecteurs, peuvent être trouvés dans la 5^e catégorie (Petit équipement), mais de nombreux autres équipements électroniques non TIC, tels que les appareils ménagers, les équipements ménagers de surveillance et de contrôle ou les équipements médicaux, peuvent être trouvés dans la même catégorie de petit équipement, nous ne nous concentrons donc pas sur cette 5^e catégorie.

Part des équipements collectés comparés aux autres flux traitant les DEEE produits en 2015 dans l'UE-28 (pour les catégories petits équipements IT/écrans)



Source : [the Urban Mine Platform](https://www.urbanmineplatform.eu/). « Le manque d'harmonisation entre les États membres dans la déclaration des volumes de DEEE collectés, notamment en ce qui concerne la répartition du volume total de DEEE entre les différentes catégories de collecte, peut entraîner des divergences entre la quantité de déchets générés et la quantité collectée. En outre, en raison du manque d'harmonisation dans la quantification de la poubelle ménagère, de l'exportation pour la réutilisation, du recyclage complémentaire et de la récupération, les incertitudes affichées ici sont élevées. »

Que deviennent les déchets électroniques collectés pour le recyclage dans l'UE ?

« Même si le recyclage présente des avantages environnementaux, il est encore imparfait et en voie d'amélioration. Il est donc important de chercher à limiter le renouvellement et augmenter la durée de vie, ainsi que réutiliser nos équipements le plus longtemps possible avant de les jeter. »

De la collecte à l'usine de prétraitement

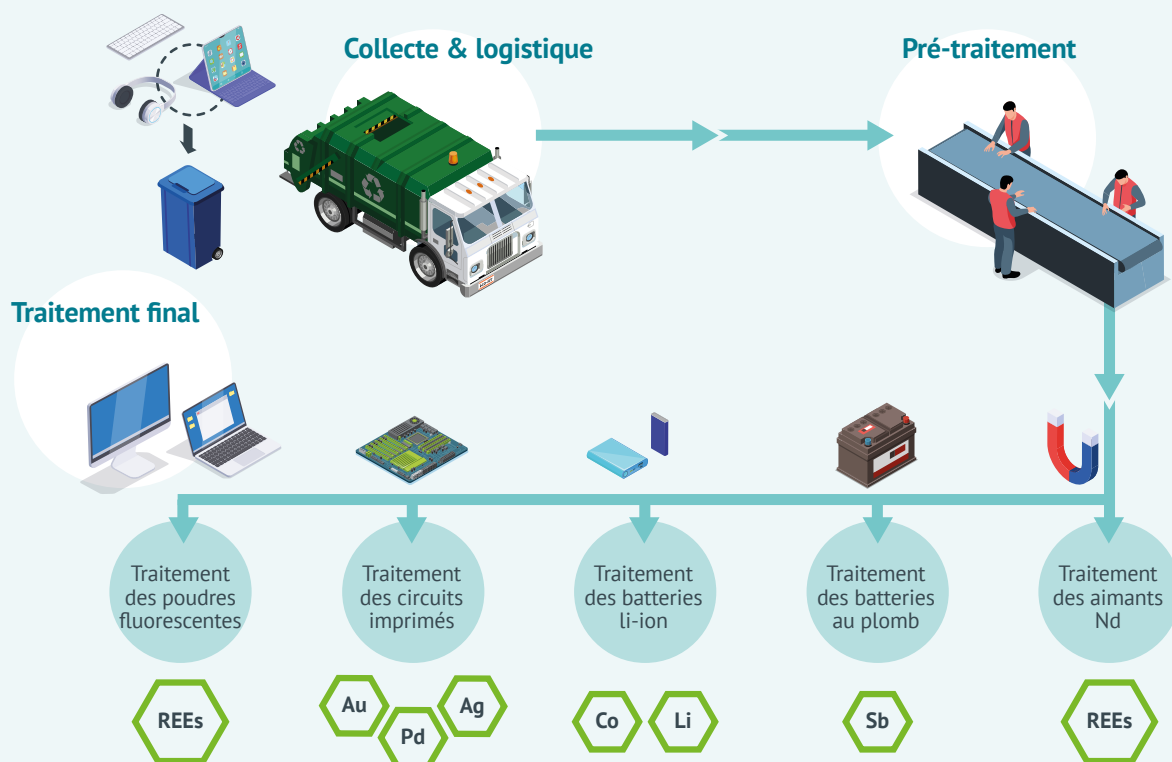
Lorsqu'un équipement est jeté par un consommateur et accepté dans un point de collecte ou une usine de collecte, il est expédié vers une usine de prétraitement où il est évalué pour voir s'il peut être réutilisé et s'il contient des matières premières critiques. Si l'équipement peut être réutilisé, il est préparé en vue de sa réutilisation ; s'il ne peut pas l'être, les batteries externes sont retirées en vue d'un traitement approprié (les batteries au plomb et lithium-ion sont très difficiles à traiter et sont conditionnées séparément) et les différentes parties démontées sont envoyées vers des usines de traitement final.

Du prétraitement au traitement final

Si l'équipement contient des substances dangereuses - ce qui est le cas de tout équipement numérique - ils passent par un processus de dépollution qui permet de séparer les substances dangereuses des matières premières critiques qui peuvent être valorisées après un traitement final dans une usine appropriée. Les substances dangereuses sont traitées ou éliminées, et les parties de déchets électroniques qui ne sont ni dangereuses ni des matières premières critiques sont traitées.

Les usines de traitement final peuvent traiter et valoriser différents types de matières premières critiques telles

Processus de recyclage des déchets électroniques



que les éléments de terres rares présents dans les écrans, l'or, l'argent et le palladium présents dans les circuits imprimés, le cuivre et le lithium présents dans les batteries li-ion, etc.⁷

Avantages environnementaux du recyclage

Le recyclage réduit le risque que les déchets électroniques soient disséminés, brûlés ou mis en décharge, avec tous leurs métaux et produits chimiques se dégradant avec le temps, la pluie ou le feu et une manipulation inadéquate. En fonction de l'importance des investissements réalisés pour optimiser la collecte des déchets électroniques, le recyclage peut avoir des effets bénéfiques sur divers aspects environnementaux tels que :

- Limiter l'eutrophisation des eaux douces (qui se produit lorsque l'eau est trop riche en nutriments et en minéraux, les effets écologiques étant une diminution de la biodiversité, l'invasion par de nouvelles espèces et la toxicité),
- Limiter l'acidification terrestre (qui endommage les plantes et les organismes du sol et met en danger les espèces),
- Limiter les effets négatifs sur la qualité des écosystèmes,
- Limiter les effets négatifs sur la qualité des écosystèmes,
- Limiter la formation de particules fines,
- Limiter la raréfaction des ressources fossiles,
- Limiter le réchauffement de la planète,
- Limiter la raréfaction des ressources minérales,
- Limiter la toxicité humaine non cancérigène.

Une étude de 2019 sur les avantages économiques et environnementaux des réseaux de valorisation des déchets électroniques en Europe⁸ montre que plus les déchets électroniques sont collectés et recyclés dans des conditions optimales, plus les avantages potentiels pour la préservation de l'environnement sont importants, y compris les opportunités économiques dans certains cas, avec des scénarios de compromis possibles entre la satisfaction des objectifs environnementaux multicritère et les objectifs économiques.

.....

7 CEWASTE, une contribution au futur recyclage des matières premières critiques (2021), <https://cewaste.eu/wp-content/uploads/2021/04/CEWASTE-Final-Public-Rapport.pdf>

8 Lukas Messmann, Christoph Helbig, Andrea Thorenz, Axel Tuma, Economic and environmental benefits of recovery networks for WEEE in Europe, 2019

9 Ibid.

10 CEWASTE, A contribution to future Critical Raw Materials Recycling : Rapport final du projet CEWASTE, 2021, p.19

Cependant, tous les objectifs environnementaux ne convergent pas toujours parfaitement et demandent, à partir d'un certain niveau d'exigence, des investissements⁹ ou des recherches très importants pour progresser, d'autant plus que les équipements à recycler sont de plus en plus divers et les alliages des équipements de plus en plus complexes (**voir nos études de cas sur l'IoT et les matières premières**).

« Les objectifs de collecte et de recyclage des déchets électroniques dans l'UE, fondés sur le poids, sont insuffisants pour résoudre le problème des petites quantités de métaux critiques disséminées dans divers équipements. »

Parmi les principaux obstacles au bon recyclage des déchets électroniques dans l'UE actuellement recensés, on peut citer¹⁰:

1. Des taux de collecte des déchets électroniques insuffisants qui empêchent les systèmes de collecte spécifique de déchets électroniques de traiter ces derniers à leur plein potentiel.
2. Un manque de financement qui empêche le recyclage des matières premières critiques, même lorsqu'il est techniquement réalisable moyennant un effort supplémentaire acceptable et un rapport coût-bénéfice raisonnable.
3. L'absence d'exigences claires concernant le recyclage des matières premières critiques, étant donné que la collecte fondée sur le poids et les objectifs de recyclage des déchets électroniques dans l'UE ne suffisent pas à résoudre le problème des petites quantités de métaux critiques disséminées dans divers équipements.
4. La difficulté d'accès aux composants contenant des matières premières critiques qui pourrait être amélioré par l'écoconception des produits, et le manque d'informations détaillées et quantitatives et de marquage des composants de matières premières critiques et des composants chimiques.

Une étude ACV de 2017 sur une importante usine autrichienne de pré-traitement a montré qu'en termes de gain de matériaux secondaires, un taux de recyclage de 80,5 % permet de récupérer un peu plus de 50 % de la matière entrante, tandis que pour un recyclage proche de l'objectif légal minimum de 62,5 %, la quantité de matériaux récupérés est d'environ 45 %.¹¹

Même si le recyclage présente des avantages pour l'environnement, il est encore imparfait et en voie d'amélioration. Il est donc important de chercher à limiter le renouvellement et à augmenter la durée de vie, ainsi qu'à réutiliser nos équipements le plus longtemps possible avant de les jeter afin de laisser le temps au secteur du recyclage de s'améliorer.

Que deviennent les déchets électroniques qui ne sont pas correctement collectés pour le recyclage ?

Les déchets électroniques dans la poubelle

Les déchets électroniques qui ne sont pas correctement collectés pour être recyclés sont simplement jetés, avec pour conséquence d'être comprimés dans les véhicules de collecte des déchets, augmentant le risque de se briser et de libérer des composants dangereux qui contamineront le reste des déchets. Selon l'infrastructure de gestion des déchets du pays, ces déchets sont très probablement incinérés ou mis en décharge sans recyclage des matériaux. Les principaux effets environnementaux sont la pollution toxique, avec un impact dangereux sur la santé et la biodiversité, et des pertes de ressources critiques. Les produits chimiques libérés par les déchets électroniques ne sont pas biodégradables : ils restent dans l'environnement pendant de longues périodes, ce qui augmente le risque d'y être exposé.

11 N. Unger, P. Beigl, G. Höggerl, S. Salhofer, 'The greenhouse gas benefit of recycling waste electrical and electronic equipment above the legal minimum requirement: An Austrian LCA case study' (2017), Journal of Cleaner Production, Volume 164, (p. 1635-1644)

Les déchets électroniques et la Convention de Bâle

La Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et leur élimination est un traité international adopté par 188 pays. Le traité vise à empêcher le transfert de déchets dangereux des pays développés vers les pays moins développés, à réduire le taux et la toxicité des déchets générés et à garantir que les déchets dangereux sont gérés de manière écologiquement rationnelle, aussi près que possible de la source de production. La convention stipule que le trafic illégal de déchets dangereux est criminel.

La Convention de Bâle exempte de la réglementation les cas d'exportation d'équipements électroniques et électriques destinés à être réutilisés. Dans l'absolu, la réutilisation est une pratique respectueuse de l'environnement puisqu'elle permet de prolonger la durée de vie des équipements et limiter l'utilisation de nouveaux équipements. Cependant, le niveau de qualité nécessaire à la réutilisation des équipements ainsi exportés peut être discutable, et la finalité de la réutilisation est parfois détournée pour devenir un moyen de se débarrasser des déchets électroniques.

Pour limiter ces abus, le rapport 2020 de Global E-Waste Monitor met en évidence « deux décisions politiques judicieuses qui peuvent être prises unilatéralement en vue d'assurer une application plus efficace et mieux adaptée de la législation* » :

- Fournir davantage de ressources aux agents des douanes et des ports pour les aider à lutter contre le commerce illégal de déchets électroniques.
- Augmenter les sanctions en cas de tentative d'exportation illégale de déchets électroniques.

* Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*, UNU/UNITAR – Programme SCYCLE co-organisé, ITU & ISWA, p.54

L'incinération des déchets électroniques entraîne des émissions de particules toxiques aux effets environnementaux désastreux. Selon la qualité du service d'incinération, il peut libérer dans l'air des particules, des dioxines et des furanes provenant de la combustion du plastique et métaux lourds toxiques tels

que le cadmium, le mercure, le plomb, le zinc, le chrome et le nickel, ayant des effets désastreux sur la santé humaine (cancer et autres maladies) et contribuant aux émissions de gaz à effet de serre.¹²

La mise en décharge avec des déchets électroniques a également des effets environnementaux désastreux, tels que la pollution de l'eau et du sol.¹³

Les déchets électroniques collectés en dehors du circuit de collecte officiel, comme les restes de ferraille

Lorsque les déchets électroniques sont collectés par le système de recyclage des métaux et des plastiques mais ne sont pas renvoyés vers les flux officiels de collecte et de traitement des déchets électroniques, les composants dangereux ne seront très probablement pas dépollués. Les déchets électroniques ne seront pas traités dans une usine de recyclage spécialisée dans la gestion des déchets électroniques, ce qui signifie que le recyclage des métaux (tels que le cuivre) et des plastiques des déchets électroniques inclura très probablement des substances polluées.¹⁴ Dans ce cas, les déchets électroniques sont parfois exportés vers des pays en développement où les usines de recyclage des déchets électroniques sont moins avancées ou ne sont pas appropriées.

Les déchets électroniques collectés en dehors du circuit de collecte officiel dans les pays ne disposant pas d'une infrastructure de gestion de déchets électroniques développée

Dans la plupart des pays en développement, il n'existe pas d'installations appropriées pour le recyclage des déchets électroniques, ce qui engendre un « recyclage improvisé »

12 Charu Gangwar, Ranjana Choudhari, Anju Chauhan, Atul Kumar, Aprajita Singh, Anamika Tripathi, *Assessment of air pollution caused by illegal e-waste burning to evaluate the human health risk*, (2019) Environment International, Volume 125 ; <https://orlandorecycles.com/2021/01/5-effects-of-e-waste-on-the-environment/> (dernière extraction : 22/06/2021) ; Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*, UNU/ UNITAR – programme SCYCLE co-organisé, ITU & ISWA.

13 Lee, G. F., and Jones-Lee, A., *Electronic Wastes and MSW Landfill Pollution of Groundwater*, Rapport de G. Fred Lee & Associates, El Macero, CA, septembre 2009

14 Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*, (2020) UNU/ UNITAR – co-hosted SCYCLE Programme, ITU & ISWA, <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf>

Solutions émergentes pour les TIC dans l'économie circulaire

Pour limiter les impacts de la production de smartphones et des déchets électroniques, une entreprise sociale nommée Fairphone* a été fondée en 2013 aux Pays-Bas pour produire un nouveau smartphone, le Fairphone.

Le Fairphone est éco-conçu pour être aussi facile à réparer que possible et pour durer beaucoup plus longtemps que les smartphones habituels. Le Fairphone ne contient pas de minéraux de conflit tels que l'or, l'étain, le tantale et le tungstène et garantit autant que possible des conditions de travail équitables pour la main-d'œuvre tout au long de la chaîne de production. L'entreprise s'engage également à aider les gens à utiliser leur téléphone plus longtemps avant de le remplacer. Fairphone a l'intention d'ouvrir prochainement un service de recyclage.

Une autre initiative est la coopérative Commown**, qui loue des ordinateurs de bureau, des ordinateurs portables, des smartphones (fairphones) et des écouteurs responsables.

Commown conserve la responsabilité de l'ensemble des équipements selon l'idée d'un « bien commun » (d'où le nom, contraction de *commonly owned*). La coopérative est actuellement accessible en France et en Belgique.

* <https://www.fairphone.com/>

** <https://commown.coop/>

dans des conditions de travail dangereuses nuisant gravement à la santé humaine et à l'environnement.

Le recyclage informel des déchets électroniques entraîne une contamination de l'environnement en raison du déversement d'acide (utilisé pour extraire l'or) dans les rivières, de la lixiviation de substances provenant des décharges ou des déchets électroniques stockés, de la présence de particules, de dioxines et de furanes résultant du démantèlement inapproprié des composants électroniques et des contaminants qui pénètrent dans les systèmes d'eau et la chaîne alimentaire (poissons, cultures, bétail). Les habitants sont

Avis d'expert



Claire Downey est directrice du Community Resources Network Ireland (CRNI). Elle est titulaire d'un diplôme en ingénierie et possède plus de 15 ans d'expérience dans le secteur des déchets et des ressources. Elle siège dans des comités de politique nationale et européenne, est

vice-présidente et membre du conseil d'administration du réseau REUSE Europe et membre du Chartered Institute of Waste Management. Par le biais du CRNI, Claire a participé à Q2Reuse, un projet majeur de deux ans financé par l'Agence irlandaise pour l'environnement et la protection (EPA). Dirigé par le Clean Technology Centre (CTC), et entrepris en collaboration avec le Rediscovery Centre, le CRNI et l'Eastern Midlands Waste Region, l'objectif du projet est de rassembler des informations sur l'échelle et la taille du secteur de la réutilisation, de le comparer avec d'autres États membres et d'informer les décideurs politiques sur les objectifs potentiels.ⁱ

“ En 2018, les déchets électroniques ont pesé 50 millions de tonnes à l'échelle mondiale. Il est évident, au vu de ce chiffre, que les équipements électriques et électroniques (EEE) mis sur le marché ne sont pas correctement valorisés ou utilisés à leur plein potentiel. En prolongeant la durée de vie de nos appareils électroniques et électriques, des millions de tonnes de CO₂ pourraient être économisées.ⁱⁱ

Fixer des objectifs peut contribuer à remédier à de telles défaillances du marché en fournissant une politique forte et en exigeant la mise en place de mesures. Les objectifs de réutilisation pourraient favoriser la croissance de la réutilisation des équipements qui changent de mains mais deviennent des déchets beaucoup plus tard - par exemple, les équipements numériques donnés pour être réutilisés. Les objectifs de préparation à la réutilisation pourraient favoriser la vérification, le nettoyage et la réparation des équipements devenus des déchets - par exemple, les équipements collectés dans le cadre de programmes de reprise.

L'un des principaux obstacles à la fixation d'objectifs de réutilisation en particulier a été la difficulté de mesurer le réemploi. Comme la réutilisation n'implique aucun déchet, elle n'est pas réglementée et peut se faire par le biais de divers canaux tels que les échanges informels entre familles, les marchés aux puces, les centres de réutilisation en ligne ou centralisés. Pour cette raison, l'Agence irlandaise pour l'environnement et la protection (EPA) a financé un important projet de recherche de deux ans appelé Q2Reuse afin de développer une méthode qualitative et quantitative pour mesurer le réemploi en Irlande.

Dans le cadre de ce projet sur le point de s'achever, l'équipe de recherche dirigée par le Clean Technology Centre, en collaboration avec le Rediscovery Centre et le CRNI a identifié plus de 1200 débouchés pour le réemploi. Les premières estimations indiquent que l'activité de réutilisation représente moins de 1% de tous les déchets produits en Irlande, ce qui laisse une grande marge de progression. Il est important de noter que ce projet a aidé le gouvernement irlandais à s'engager à introduire et à développer un cadre légal pour les objectifs de réemploi dans le récent plan général du projet de loi sur l'économie circulaire.

Des méthodologies sont désormais disponibles pour mesurer le recours au réemploi. Nous ne pouvons pas continuer à gaspiller de grandes quantités d'équipements gourmands en énergie et en ressources, ni même d'autres biens de consommation. Le développement d'objectifs de réutilisation à travers l'Europe est actuellement trop lent si l'on considère l'urgence de notre crise climatique. Ce projet a démontré qu'il est possible d'affiner une méthodologie et de fixer des objectifs dans un court laps de temps. Les autres États membres devraient être encouragés à s'inspirer de ces exemples pour faire en sorte que la prévention et la réutilisation soient correctement mises en avant dans le cadre de la transition vers une économie plus circulaire.

ⁱ Les résultats du projet peuvent être consultés sur le site Internet suivant: <http://www.rediscoverycentre.ie/research/q2reuse/>

ⁱⁱ Ina Rüdener, Siddharth Prakash, *Ökonomische und ökologische Auswirkungen einer Verlängerung der Nutzungsdauer von elektrischen und elektronischen Geräten*, Öko-Institut und VZBV, 2020

exposés à cette même pollution par la contamination de l'air, de l'eau et des aliments, et dans les ateliers, par l'inhalation des fumées provenant de la combustion des fils et du chauffage des circuits imprimés.

Actuellement, un nombre croissant d'études montrent les dangers du recyclage non réglementé des déchets électroniques pour la santé humaine : effets néfastes sur la natalité¹⁵, dommages de l'ADN¹⁶, effets cardio-vasculaires¹⁷, effets respiratoires¹⁸, maladies de la peau¹⁹, perte auditive, cancer²⁰, perturbation du système immunitaire, troubles du développement neurologique²¹, etc. ²²

Pourquoi les enfants sont-ils particulièrement sensibles à l'exposition aux déchets électroniques ?

Comparé aux travailleurs adultes du recyclage des déchets électroniques, le risque potentiel pour la santé des enfants s'est avéré huit fois plus élevé. Le corps des enfants est particulièrement sensible aux dangers des déchets électroniques pour de nombreuses raisons. Ils ont un métabolisme plus élevé, une plus petite taille et une surface plus grande proportionnellement à leur poids. De plus, les enfants portent fréquemment leurs mains, des objets ou de la terre à leur bouche, ce qui augmente le risque d'exposition par ingestion. Certains produits chimiques peuvent également être transmis de la mère à l'enfant pendant la grossesse et l'allaitement.

Un rapport de 2017 de l'Organisation internationale du travail estime qu'environ 73 millions d'enfants âgés de 5 à 17 ans effectuent des travaux dangereux, dont un nombre inconnu dans le secteur informel du recyclage des déchets électroniques.²³ Les enfants et adolescents

travaillant dans la collecte, le démantèlement et le recyclage sont particulièrement exposés.

Un rapport récent de l'Organisation mondiale de la santé sur l'exposition aux déchets électroniques et la santé de l'enfant montre que l'exposition des enfants aux déchets électroniques a des répercussions sur la santé et le développement, allant des blessures et effets à court terme, à un impact sur la croissance, le développement neurologique, l'apprentissage et le comportement, des effets néfastes sur les fonctions des système immunitaire, thyroïdien et pulmonaire, des symptômes respiratoires et d'asthme, la santé cardiovasculaire, dommages de l'ADN, etc. Le rapport souligne les co-bénéfices potentiels de la lutte contre les déchets électroniques dans le cadre des programmes climatiques et sanitaires²⁴.

Conclusion

Bien que la collecte et le recyclage dans l'UE aient globalement progressé en termes de technique et de volume ces dernières années, le recyclage est actuellement limité par le volume même des déchets électroniques qui ne sont pas correctement collectés et traités (poubelles, ferraille, expédition illégale vers d'autres pays où les usines de traitement sont moins efficaces ou inexistantes, etc.) Concernant les flux de déchets électroniques, il est possible d'apporter des améliorations et de garantir, par le biais d'une nouvelle réglementation, un suivi et une surveillance plus approfondis des déchets électroniques. Pour l'UE, il ne s'agit pas seulement de suivre et de recycler les déchets électroniques aussi efficacement que possible, mais aussi de veiller à ce que des objets de réemploi et

15 Kim SS, Xu X, Zhang Y, et al., *Birth outcomes associated with maternal exposure to metals from informal electronic waste recycling in Guiyu, China*, (2020) Environ Int, < <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7257595/> >

16 Alabi, O.A., Adeoluwa, Y.M. & Bakare, A.A., *Elevated Serum Pb, Ni, Cd, and Cr Levels and DNA Damage in Exfoliated Buccal Cells of Teenage Scavengers at a Major Electronic Waste Dump site in Lagos, Nigeria*, (2020) Biol Trace Elem Res 194, 24-33, < <https://link.springer.com/article/10.1007/s12011-019-01745-z#citeas> >

17 Cong X, Xu X, Xu L, Li M, Xu C, Qin Q, Huo X, *Elevated biomarkers of sympatho-adrenomedullary activity linked to e-waste air pollutant exposure in preschool children*, (2018) Environ Int 115:117-126.

18 AmoabengNti AA, Arko-Mensah J, Botwe PK, Dwomoh D, Kwarteng L, Takyi SA, Acquah AA, Tettey P, Basu N, Batterman S, Robins TG, Fobil JN, *Effect of Particulate Matter Exposure on Respiratory Health of e-Waste Workers at Agbogbloshie, Accra, Ghana*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020.

19 Decharat, S., & Kiddee, P., *Health Problems Among Workers Who Recycle Electronic Waste in Southern Thailand*, Osong Public Health and Research Perspectives, 11, 34 - 43, 2020; Seith R, Arain AL, Nambunmee K, Adar SD, Neitzel RL., *Self-Reported Health and Metal Body Burden in an Electronic Waste Recycling Community in North eastern Thailand*, J Occup Environ Med, 2019.

20 Davis JM, Garb Y, *Une forte association spatiale entre les sites de combustion de déchets électroniques et les lymphomes infantiles en Cisjordanie, Palestine*, Int J Cancer, 2019.

21 Haoxing Cai, Xijin Xu, Yu Zhang, Xiaowei Cong, Xueling Lu, Xia Huo, *Niveaux élevés de plomb provenant de l'exposition aux déchets électroniques sont liés à des difficultés d'intégration sensorielle chez les enfants d'âge préscolaire*, NeuroToxicology, Volume 71, 2019.

22 Forti V, Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*, UNU/ UNITAR – co-hosted SCYCLE Programme, ITU & ISWA, 2020; Nithya, R., Sivasankari, C. & Thirunavukkarasu, A., *Electronic waste generation, regulation and metal recovery: a review*, Environ Chem Lett 19, 1347–1368, 2021

23 Organisation internationale du travail, *Estimations globales du travail des enfants : résultats et tendances*, 2012-2016, 2017.

24 *Children and digital dumpsites: e-waste exposure and child health*. Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

de recyclage contribuent à renforcer la position de l'UE sur le marché des matières premières. Faire du recyclage des déchets électroniques un secteur efficace et mature est une question non seulement environnementale mais aussi géostratégique ([voir notre étude de cas sur les matières premières](#)).

« Alors que l'héritage des équipements numériques devrait s'accroître dans les années à venir, il est urgent de devenir plus efficace dans la collecte des déchets électroniques, et de stimuler la confiance dans les appareils réparés et d'occasion en structurant et en soutenant le développement d'une industrie qualifiée et appropriée. »

Bien que le recyclage des déchets électroniques au sein de l'UE soit un élément clé pour limiter l'épuisement des ressources ainsi que la pollution et les risques sanitaires liés aux déchets électroniques, il n'est nécessaire qu'à la toute fin de vie de l'équipe-

ment. À cet égard, le circuit de l'économie circulaire - qui permet de partager, de réutiliser, de réparer ou de remettre en état des équipements - est encore très jeune et encore insuffisamment exploré et soutenu pour répondre aux défis actuels et futurs en matière de climat, d'environnement, de santé et de souveraineté sur les matières premières. A ce titre, les indicateurs de réparabilité sont une première étape, de même que l'indexation de l'écotaxe sur la recyclabilité.

Alors que l'héritage des équipements numériques devrait s'accroître dans les années à venir avec le renouvellement rapide des appareils et la diversification des équipements, il est urgent de devenir plus efficace dans la collecte, le tri, l'enlèvement et le suivi des déchets électroniques, et de renforcer la confiance dans les appareils réparés et d'occasion en structurant et en soutenant le développement d'une industrie qualifiée et appropriée. ■

Recommandations pour une évolution du numérique compatible avec le Green Deal

Dans une évolution numérique compatible avec le Green Deal, la durée de vie des équipements numériques est prolongée par l'écoconception du matériel et des logiciels. L'écoconception facilite la réparation et la mise à niveau, ce qui repousse leur fin de vie. Elle facilite également le recyclage, car les équipements sont conçus en tenant compte de leur fin de vie.

Toute personne connaissant l'approche et le système réglementaire des 5R, les solutions d'écoconception et le flux circulaire en place peut facilement et efficacement appliquer les 5R à son usage personnel ou professionnel.

La transparence quant à la réparabilité d'un équipement et à la traçabilité de ses composants et produits chimiques est garantie par un « passeport produit » fiable, une sorte de carte grise du produit qui aide les consommateurs à choisir et les réparateurs et recycleurs à mieux comprendre les composants du produit.

Le traitement des flux de déchets électroniques garantit avec une grande certitude que la majorité des déchets électroniques est efficacement collectée, triée, désassemblée et traitée de la manière la plus efficace possible. Les mécanismes de financement assurent une amélioration

continue pour maximiser la récupération des matières premières critiques et des matériaux de valeur, et pour limiter autant que possible les impacts environnementaux des déchets électroniques.

Les systèmes européens d'économie circulaire et de gestion des déchets électroniques permettent de déployer des installations complémentaires intéressantes au sein de l'UE qui stimulent l'emploi et ouvrent la voie au recrutement de compétences professionnelles recherchées qui renforcent les bassins d'emploi locaux.

Ce système d'économie circulaire et de gestion des déchets confère à l'UE des avantages en matière de coopération internationale, renforce sa résistance aux crises et lui permet de se positionner en tant que pionnier et leader avec des avantages commerciaux majeurs grâce à la qualité des équipements réutilisables remis à neuf ou réparés.

La législation européenne définit clairement les flux de déchets (vers le recyclage) et d'équipements (vers le réemploi). La réglementation oblige les États membres à privilégier le réemploi par rapport au recyclage, tout en tenant compte des deux. Les éco-organismes ont l'obligation de réacheminer les équipements qui fonctionnent ou peuvent être réparés vers la filière du réemploi. Chaque appareil est vendu avec un indicateur de réparabilité, et l'écotaxe est évaluée sur la base de la facilité avec laquelle le produit peut être recyclé.

RECOMMENDATIONS

Introduction

Dans le deuxième chapitre de son rapport spécial (SR15) expliquant les impacts d'un réchauffement climatique de 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels, le GIEC présente le budget carbone restant en GtCO₂éq. : pour limiter le réchauffement climatique à 1,5°C avec un niveau de certitude de deux tiers, le budget carbone restant pour l'humanité est estimé à environ 420 GtCO₂éq. au 01/01/2018.¹

L'UE28 était directement responsable de 9% des émissions de gaz à effet de serre en 2019² et même davantage si l'on tient aussi compte des émissions importées, c'est-à-dire des émissions de produits fabriqués en dehors de l'UE mais consommés à l'intérieur de ses frontières.³

En 2019, le numérique a contribué à l'émission de 185 Mt de CO₂éq. pour l'UE28 à elle seule, comme le montre notre ACV⁴, ce qui représente 4,2% des émissions de l'UE28 en 2019⁵, mais 40,7% de son budget GES pour rester en dessous de 1,5°C de réchauffement climatique. En outre, pour la même période, les TIC ont utilisé 5760 tonnes équivalent-antimoine de ressources, ce qui signifie que 116 Mt de déchets ont été produits pour les besoins des TIC dans l'UE28, soit l'équivalent du poids de 3,6 humains pour une consommation moyenne du numérique pour un européen. Cela montre à quel point il est important de ne pas considérer uniquement les indicateurs de changement climatique, mais d'adopter une approche multicritère pour comprendre les impacts globaux du numérique sur l'environnement et prendre les mesures politiques appropriées pour réduire leur contribution au changement climatique sans transfert de pollution.

Dans ce chapitre, nous présentons nos principales recommandations pour une feuille de route numérique qui réduise les impacts environnementaux et soit compatible avec l'accord de Paris et le récent Green Deal. Ces recommandations mériteraient d'être analysées plus avant pour estimer dans quelle mesure une combinaison des éléments proposés pourrait contribuer efficacement à réduire la contribution du numérique dans le changement climatique ; ces analyses ne faisant pas partie du scope prévu pour cette étude.

Nos recommandations visent à réduire la contribution du numérique, non seulement au changement climatique, mais aussi à d'autres impacts environnementaux concomitants, tels que l'épuisement des ressources, la pollution par les déchets électroniques et les risques sanitaires.

En 2018, l'OIT a publié une étude montrant qu'« une transition juste vers une économie plus durable offre un grand potentiel pour la création d'emplois et la promotion du travail décent »⁶. La feuille de route numérique que nous recommandons présente également des avantages économiques et sociaux pour l'UE, qui sont énumérés dans le tableau ci-dessous. Nos recommandations visent à aborder les questions environnementales liées au numérique à un niveau systémique, ce qui est nécessaire pour responsabiliser les citoyens dans leurs choix en tant que consommateurs et pour garantir des avantages économiques et stratégiques au niveau européen, ainsi que pour stimuler les économies régionales et l'emploi. Pour ce faire, nos recommandations n'opposent pas *high-tech* et *low-tech*, mais visent à créer des ponts en prenant le meilleur des deux : en combinant des technologies à moindre intensité dans une approche innovante mêlant efficacité et sobriété.

1 Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Ffytche, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshti, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférián, and M.V. Vilariño, 2018: *Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development*. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

2 https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=regions-ABSOLUTE_VALUE&end_year=2018®ions=EUU%2CGBR%2CWORLD&source=PIK&start_year=1850 (dernière consultation : 27/08/2021) ; Daniel Moran, KGM & Associates, Ali Hasanbeigi et Cecilia Springer, Global E-cency Intelligence, THE CARBON LOOPHOLE IN CLIMATE POLICY Quantifying the Embodied Carbon in Traded Products, août 2018.

3 <https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds-largest-co2-importers-exporters> (dernière consultation : 14/06/2021)

4 Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. et Lees Perasso, E., GreenIT.fr. 2021. *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie*

5 Remarque : les comparaisons à l'échelle de l'UE28 visent à fournir une échelle des incidences connexes et ne doivent pas être considérées comme des résultats absolus. Les champs d'application sont différents : certaines émissions liées aux services numériques dans l'UE28 se produisent en dehors de l'UE28 et sont prises en compte dans le champ d'application de l'étude (fabrication des appareils) ; tandis que les émissions totales prises en compte pour l'UE par l'AIE sont uniquement des émissions se produisant à l'intérieur des frontières de l'UE. Pour en savoir plus sur les émissions importées : <https://www.idhsustainabletrade.com/news/hidden-co2-emissions-europes-imported-responsibility/>

6 Organisation internationale du travail - Genève : BIT, *Perspectives sociales et de l'emploi dans le monde 2018 : L'écologisation par l'emploi*, 2018

Priorité	#	Objectifs environnementaux	Principales parties prenantes	Bénéfices économiques	Bénéfices sociaux
1	1	Diminuer les impacts environnementaux en réduisant le nombre de dispositifs • Réduire le nombre de dispositifs nécessaires • Mutualiser • Écoconcevoir	Décideurs politiques + Experts + Acteurs économiques*	Stimuler l'innovation, attirer et retenir les talents, réduire la dépendance aux importations, réduire les coûts liés à la maintenance et aux déchets électroniques	Réduire la fracture numérique (écoconception/mutualisation)
1	2	Lutter contre toutes les formes d'obsolescence : augmenter la durée de vie.	Décideurs politiques + Experts + Citoyens + Acteurs économiques	Réduire la dépendance aux importations, réduire les coûts liés aux déchets électroniques	Accroître l'égalité des chances, réduire la fracture numérique
1	3	Massifier le réemploi	Décideurs politiques + Experts + Acteurs économiques	Stimuler les économies régionales, stimuler l'économie circulaire	Stimuler l'emploi dans les secteurs émergents et réduire la fracture numérique
1	4	Fournir aux citoyens européens des données fiables sur la responsabilité numérique	Experts + Décideurs politiques + Citoyens	Créer des vocations et des opportunités d'innovation disruptive	Faire émerger de la cohésion sociale, donner aux citoyens les capacités d'agir
1	5	Généraliser le diagnostic environnemental : un produit n'est considéré « vert » que si cela est démontré	Experts + Acteurs économiques + Décideurs politiques + Citoyens	Stimuler la position européenne de précurseur et leader de l'expertise environnementale	Donner les capacités d'agir aux citoyens
1	6	Soutenir l'innovation mixte <i>low-tech</i> et <i>high-tech</i> pour le climat	Décideurs politiques + Acteurs économiques	Stimuler les innovations permettant de diviser efficacement les émissions de GES, stimuler les économies régionales	Stimuler l'emploi, réduire la fracture numérique, accroître l'égalité des chances, faire émerger la cohésion sociale
2	7	Rendre les marchés publics éco-responsables pour les institutions publiques	Décideurs politiques + Experts	Stimuler l'économie circulaire et l'industrie du réemploi, réduire les coûts	Réduire la fracture numérique, accroître l'égalité des chances, favoriser la cohésion sociale
2	8	Encadrer l'IoT	Décideurs politiques + Experts + Acteurs économiques	Stimuler l'émergence d'API concurrentes originaires de l'UE	Donner aux citoyens les capacités d'agir
2	9	Aller vers des réseaux complémentaires plutôt que superposés	Décideurs politiques + Experts + Acteurs économiques + Citoyens	Réduction des coûts et de la maintenance	Réduire l'exposition aux ondes électromagnétiques, accroître l'égalité des chances, réduire la fracture numérique
2	10	Amener le cloud à une maturité durable	Décideurs politiques + Experts + Acteurs économiques	Bénéfices liés à la réduction des coûts, moins de maintenance, amélioration de la sécurité du cloud	Responsabiliser les utilisateurs dans leurs choix
3	11	IA : saisir les opportunités d'une gestion frugale et souveraine des données	Décideurs politiques + Experts + Acteurs économiques	Garantir la souveraineté des données en Europe, stimuler la position de l'Europe en tant que précurseur et leader en matière de données frugales	Répondre aux préoccupations des européens en matière de confidentialité des données.
3	12	Fixer des conditions environnementales obligatoires d'accès au marché européen pour les véhicules autonomes	Décideurs + Experts en mobilité + Citoyens + Acteurs économiques	Stimuler les échanges économiques au sein de l'UE avec une stratégie d'éco-mobilité partagée et planifiée	Prévenir l'accroissement d'inégalité régionale en matière de mobilité

* Les acteurs économiques peuvent inclure, par exemple, les fabricants du secteur numérique, les fournisseurs de services ou de produits numériques. Cette catégorie englobe aussi bien les grands acteurs multinationaux que les petits acteurs locaux.

Proposition de définition pour deux concepts clés : sobriété numérique & *low-tech*

La **sobriété numérique** consiste à concevoir volontairement des services et produits numériques aux impacts environnementaux limités (ressources, émissions de GES, consommation, production de déchets, écotoxicité, etc.) et à modérer son usage quotidien du numérique.

La *low-tech* fait référence à des technologies et à une logique visant à la sobriété dans l'utilisation de l'énergie et des matériaux, à une durabilité élevée et à la résilience collective. Il s'agit d'une approche qui encourage le techno-discernement. L'objectif est de fixer un niveau logistique optimal (le niveau le plus bas pour assurer les fonctionnalités essentielles). L'approche *low-tech* repose sur trois principes :

1. Penser comment réduire à la source et autant que possible l'extraction des ressources et la pollution qu'elle génère.
2. Penser en amont ce qui est produit pour augmenter la durée de vie des produits.
3. Penser des méthodes de production permettant de rendre nos modes de vie plus résilients.*

* Cette définition de *low-tech* est basée sur la note suivante d'un groupe de travail de La Fabrique Ecologique : Philippe Bihouix, Emiline Baume de Brosse, Geneviève Besse, Fabrice Bonnifet, Marc Darras, Thomas Désaunay, Jean-Marc Gancille, Amandine Garnier, Thierry Groussin, Thomas Guillerrou, Arthur Keller, Catherine Lapierre, Dominique Py, Sandrine Roudaut, Agnès Sinai, Mathilde Soyer, Bruno Tassin, Arnaud Vanhove, Dominique Viel [*Vers des technologies sobres et résilientes – Pourquoi et comment développer l'innovation « low-tech » ?*](#), avril 2019

Nos recommandations : Priorité n°1

Diminuer les impacts environnementaux en réduisant le nombre de dispositifs

Réduire le nombre de dispositifs nécessaires

Notre recommandation la plus importante est de réduire le nombre d'appareils au niveau des consommateurs, des professionnels et des entreprises. Chaque acquisition ou changement potentiel d'appareil doit être évalué en fonction de l'équilibre entre les gains (comme l'efficacité énergétique) et les coûts (comme le renouvellement des équipements).

La plupart des impacts environnementaux liés aux ressources dans le cycle de vie d'un appareil utilisateur ont lieu pendant la phase de fabrication. Le changement d'un équipement numérique en vue d'une plus grande efficacité énergétique a des effets négatifs sur les ressources non renouvelables, qui sont limitées (**voir les résultats de notre étude concernant les ressources, minérales et métalliques, les résultats normalisés et pondérés, et notre étude de cas sur les matières premières**). Chaque fois que nous remplaçons un appareil par un autre, nous puisons dans un capital limité, car les ressources utilisées pour fabriquer les équipements informatiques ne sont pas renouvelables. Pour réduire le nombre d'équipements nécessaires à l'échelle de l'économie, il est également crucial de considérer l'impact du déploiement de toute nouvelle technologie en termes d'obsolescence et de risque de renouvellement massif des équipements actuels des

utilisateurs. Il faut également faire attention aux gains d'efficacité, qui vont souvent de pair avec une augmentation de la consommation (**voir notre étude de cas sur les effets rebonds**).

Lorsque l'on envisage de renouveler du matériel tel qu'un écran, il est important de se rappeler à quel point un téléviseur est gourmand en énergie et en ressources, et donc de choisir plutôt de ne pas le remplacer, ou de le remplacer par un écran plus petit. Plutôt que d'acheter un nouveau téléviseur plus grand, opter pour un achat d'occasion et une taille diagonale plus petite.

Mutualiser

► Au niveau de l'économie globale

Dans la mesure du possible, privilégier les solutions mutualisées plutôt qu'individuelles pour réduire les impacts environnementaux. Par exemple, équiper un bâtiment d'une seule box Internet plutôt qu'une par foyer.

D'autres cas de mise en commun au niveau de l'économie dans son ensemble doivent être évalués par des analyses du cycle de vie. Les entreprises et les initiatives à but non lucratif qui mettent à disposition des utilisateurs un pool d'équipements numériques pouvant être partagés ou réutilisés devraient être encouragées et incitées, car elles stimuleront l'économie circulaire et la résilience de l'Europe.

Dans l'UE28, on compte environ 202030000 boîtiers DSL ou fibre optique installés dans les foyers⁷. Pour les ménages vivant dans des immeubles en zone dense, les

⁷ 90 % des ménages équipés en 2019, source : https://ec.europa.eu/eurostat/product?code=isoc_ci_in_h&mode=view&language=EN; 224 478 700 ménages dans l'UE28 en 2019, source : https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/lfst_hnhnhtych/default/table?lang=en

box pourraient être mutualisées, comme c'est déjà le cas pour les hôtels, les entreprises, les hôpitaux et certaines résidences étudiantes. La mutualisation permettrait également une exposition moins intensive aux ondes électromagnétiques. Il faudrait cependant tenir compte des pics de consommation en soirée, qui peuvent réduire le bénéfice de la mutualisation des boîtiers.

➤ Équipement

La mise en commun des fonctionnalités peut apporter des avantages accrus. Par exemple, le fait de disposer d'un appareil multifonctionnel - tel qu'un smartphone - au lieu de plusieurs appareils connectés offrant des fonctionnalités identiques ou similaires : podomètre, GPS, montre connectée, modems mobiles haut débit autonomes.

De même, l'utilisation d'un écran plus petit pour des usages multiples au lieu d'avoir différents types d'écrans pour des usages différents, y compris un grand téléviseur, réduira l'empreinte écologique.

La production et l'utilisation d'un appareil multifonctionnel ont un impact environnemental plus faible que la production et l'utilisation de plusieurs appareils de différents types (voir les résultats de notre étude concernant les impacts environnementaux des terminaux utilisateurs, notamment les impacts environnementaux par type d'appareil).

➤ Baser le développement technologique sur les équipements existants

Encourager la mise à niveau des équipements existants pour réduire l'impact environnemental.

Encourager la modularité par la normalisation.

La faisabilité du développement de nouvelles technologies basées sur des équipements existants doit être étudiée et promue par des mesures incitatives pour réduire l'impact environnemental.

À court terme, cela contribuerait à réduire la fracture numérique en garantissant l'égalité de service aux utilisateurs. À moyen terme, cela facilitera la remise en état et le recyclage des déchets électroniques. À long terme, cela contribuera à la résilience et à la souveraineté de l'Europe sur les matières premières critiques.

Écoconcevoir

L'écoconception est un levier de résilience, d'indépendance et d'autonomie géopolitique. Trois facteurs permettront à l'Europe d'être autonome dans le domaine du numérique : premièrement, les équipements actuellement en stock⁸ ; deuxièmement, les déchets électroniques des équipements précédents ; troisièmement, des ressources humaines qualifiées. L'UE a la possibilité de se différencier de la Chine et des États-Unis **en s'appuyant sur le capital immatériel**, qui est plus résilient et dépend moins des marchés extérieurs. Comme l'UE n'a pas les ressources nécessaires pour être indépendante en extrayant ses propres métaux précieux et critiques⁹, l'écoconception dans le cadre d'une économie circulaire est une solution économique qui pollue moins¹⁰, peut nécessiter moins d'investissements et peut être plus rapide à mettre en place.¹¹

.....
⁸ En ce qui concerne les ressources, les minéraux et les métaux, les équipements existants ont déjà produit la majeure partie de leur impact sur l'environnement pendant la phase de fabrication (voir les résultats de notre ACV multicritère pour les terminaux utilisateurs).

⁹ Voir notre étude de cas sur les matières premières

¹⁰ Voir notre étude de cas sur les déchets électroniques et l'économie circulaire

¹¹ Voir les retours d'expérience de Greenconcept sur <http://www.greenconcept-innovation.fr/temoignages/> comme pour ELA INNOVATION : http://www.greenconcept-innovation.fr/wp-content/uploads/2020/02/ELA_INNOVATION_fiche_Ademe_GreenConcept2409.pdf, PriceComparator : http://www.greenconcept-innovation.fr/wp-content/uploads/2020/02/PriceComparator_fiche_Ademe_GreenConcept2108.pdf

➤ Écoconcevoir les équipements

Rendre obligatoire l'écoconception des équipements en recourant à une ACV multicritère, conforme à la norme ISO 14040-44, avant et après l'écoconception, et en respectant la norme ISO 14062 pour l'écoconception.

➤ Écoconcevoir les services numériques

L'innovation sous contrainte est reconnue comme un stimulus efficace pour l'innovation de grande envergure, nous recommandons donc de :

Rendre obligatoire l'écoconception des services numériques en mettant l'accent sur les principales fonctionnalités et nécessités des utilisateurs, en tenant compte des limites planétaires et en utilisant une ACV multicritère conforme à la norme ISO 14040-44 avant et après l'écoconception, et en respectant la norme ISO 14062 pour l'écoconception.

Encourager l'exploitation complète du potentiel des technologies existantes et généralisées avant d'en déployer une autre, par exemple en récompensant les services innovants qui utilisent les technologies existantes et généralisées dans une approche éco-conçue de la chaîne de valeur du service.

Se concentrer sur les principales fonctionnalités signifie alléger les sites web, les applications et les logiciels qui contribuent à la congestion des infrastructures et ralentissent les temps de réponse. Les avantages immédiats sont des services plus rapides qui fonctionnent sur un plus grand nombre d'appareils, y compris les plus anciens, et moins d'infobésité, ce qui permet également aux utilisateurs de trouver plus facilement les informations clés qu'ils recherchent.

L'écoconception des services numériques est un moyen de développer des infrastructures économes et

résilientes et d'optimiser la transmission des données et l'informatique. L'écoconception est une démarche globale qui passe par un code plus « léger », mais pas seulement. Elle peut être un levier pour réduire le trafic de données, voire le nombre de serveurs nécessaires. L'optimisation de la solution technologique permet d'augmenter la durée de vie des équipements et, dans une moindre mesure, de réduire les besoins énergétiques.

Lutter contre toutes les formes d'obsolescence : augmenter la durée de vie

Réduire l'obsolescence fonctionnelle

Renforcer la législation contre l'obsolescence programmée :

Encourager des taux élevés de recyclabilité et de réemploi des équipements, assurer la compatibilité entre les accessoires et les générations (de technologies de réseau, de matériel, de logiciels), encourager la disponibilité des pièces de rechange. Faire participer les intervenants du recyclage à la définition des critères et des objectifs de recyclabilité sur la base d'analyses du cycle de vie multicritères.

Encourager le développement d'activités en faveur du marché de l'occasion : fixer des objectifs et un calendrier pour le développement d'une industrie de la réparation des équipements numériques, avec des étapes clés initiales telles qu'un passeport produit.

Le passeport produit serait une première étape clé pour rendre les réparations de produits plus fiables et renforcer la confiance dans les appareils d'occasion. Il contribuerait à structurer le secteur de la réparation en Europe pour en assurer la fiabilité et la maturité.

Réduire l'obsolescence indirecte : obsolescence psychologique et d'incompatibilité

Au-delà des problèmes mécaniques et de ressources d'un appareil qui peuvent être résolus en le réparant, la connaissance publique des impacts environnementaux du numérique ainsi que l'écoconception des services numériques ont également un rôle à jouer.

► Communiquer avec le grand public

Sensibiliser toutes les générations aux impacts environnementaux du numérique en communiquant publiquement sur les impacts environnementaux des terminaux et du numérique en général.

Interdire la publicité au profit du renouvellement des équipements.

► Au niveau de l'écoconception

On peut distinguer deux types d'obsolescence d'incompatibilité : l'une entre les nouveaux logiciels et les anciens équipements et systèmes d'exploitation, l'autre entre les nouvelles versions d'un système d'exploitation et les anciens logiciels.

Rendre obligatoire la compatibilité des logiciels avec les anciens équipements et les anciens systèmes d'exploitation (OS).

Rendre obligatoire la compatibilité du système d'exploitation (OS) avec les anciens logiciels.

Dans le premier cas, les principales fonctionnalités des applications pour smartphone ou des logiciels pour ordinateur doivent encore être prises en charge et accessibles sur les systèmes d'exploitation précédents. Dans le second cas, lorsqu'une nouvelle version de l'OS est installée sur l'appareil, les principales fonctionnalités de l'ancien logiciel doivent encore être accessibles.

L'incompatibilité rétroactive est le résultat d'un échec de l'écoconception (dû à un manque de motivation), qui a pu être incitée au départ. Les développeurs de l'industrie doivent travailler ensemble pour assurer des efforts communs de rétrocompatibilité. L'application des meilleures pratiques d'écoconception pour les systèmes d'exploitation, les logiciels et les applications garantira la rétrocompatibilité, avec des avantages complémentaires en termes de rapidité et de réactivité des services, ainsi qu'une utilisation moindre de la mémoire et de la consommation de données ([voir notre recommandation sur l'écoconception des services numériques](#)). L'écoconception des services numériques peut également prolonger la durée de vie d'un appareil : comme la conception est plus légère et délibérément compatible avec les anciens équipements, les anciens appareils peuvent continuer à être utilisés.

Massifier le réemploi

Nous recommandons trois outils pour massifier le réemploi :

Introduire une directive européenne sur le réemploi. Cette directive devrait viser à mesurer les flux de réemploi, à renforcer les liens entre les organisations de responsabilité des producteurs (OPR) de déchets électroniques et le secteur du réemploi, et à limiter les fuites de déchets électroniques hors d'Europe. Elle devrait également contribuer à promouvoir le réemploi dans l'économie circulaire et à fixer des objectifs.

L'Europe dispose d'une réserve d'équipements actifs et dormants qui constituent un coût irrécupérable. Cette directive réemploi encouragera le report du moment où les appareils deviennent inévitablement des déchets. La directive européenne réemploi doit être cohérente avec la directive existante sur les déchets électroniques afin de garantir qu'il n'y a pas de contradiction entre l'encouragement de la collecte des déchets électroniques et l'encouragement de la collecte des équipements réutilisables, et de fixer des tarifs cohérents pour les deux.

Introduire un passeport produit similaire à la carte d'immatriculation des véhicules afin d'assurer la traçabilité des produits et de leurs composants et, surtout, d'encadrer plus strictement la remise à neuf.

Ce passeport produit est un premier pas vers la définition du terme « reconditionnement » et l'élaboration d'un cadre réglementaire pour le secteur du reconditionnement.

Établir des spécifications strictes pour les reconditionneurs et mettre en place des tests techniques obligatoires et normalisés pour les appareils électroniques, avec une garantie produit qui devrait être comprise entre 100 % et 50 % de la garantie de temps d'un nouveau produit.

Comme pour le contrôle technique des véhicules, le contrôle technique des appareils électroniques permettrait de renforcer la confiance des consommateurs dans les appareils d'occasion. L'absence d'un tel contrôle technique nuit à la crédibilité de l'ensemble du secteur : les utilisateurs potentiels se méfient des appareils réparés. Les contrôles techniques aideraient à construire une économie circulaire et un secteur de la réparation actifs, fiables et prospères en Europe.

Fournir aux citoyens européens des données fiables sur le numérique responsable

Créer et gérer une plateforme d'information contenant des données fiables, consensuelles et multicritères sur l'impact environnemental des TIC afin de mettre fin au greenwashing.

Au niveau européen, disposer d'un ensemble d'experts indépendants qui garantissent la qualité du contenu et valident les informations mises en ligne sur la plateforme par une évaluation collégiale afin de garantir la fiabilité et l'exhaustivité des données auxquelles les décideurs, ainsi que les enseignants de toute l'UE et de l'étranger, auront accès.

Inciter l'industrie à utiliser les outils disponibles sur cette plateforme et à alimenter la plateforme avec les données les plus récentes dans un souci d'ouverture et de transparence des données.

Les données sur l'impact environnemental de cette plateforme pourraient, par exemple, être tirées d'ACV sur les usages numériques fréquents des Européens et les mesures clés à mettre en œuvre (comme promouvoir le réemploi des smartphones) pour démontrer leur efficacité. La plateforme pourrait également permettre de réfuter les fausses bonnes idées.

Généraliser les diagnostics environnementaux : un produit n'est considéré « vert » que si cela est démontré.

Concernant la communication environnementale ou le financement d'un produit ou d'un service innovant pour la préservation du climat ou des ressources, il convient de s'appuyer systématiquement sur des analyses du cycle de vie (ACV) multicritères, conformes à la norme ISO 14040/44, en prenant en compte et en distinguant 1) les impacts positifs et négatifs et 2) les impacts directs et indirects.

L'analyse doit également faire la distinction entre les effets sur le marché et les effets sur l'écosystème du produit ou du service, tels que le type et le nombre d'accessoires liés au produit ou au service.

Les analyses de cycle de vie multicritères conformes à la norme ISO 14040/44 étant le moyen le plus fiable de mesurer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service, un produit ne peut être considéré « vert » que si cela est démontré, et son développement ne devrait être financé par les fonds européens pour le climat que si les études préliminaires le prouvent.

Soutenir l'innovation mixte *low-tech* et *high-tech* pour le climat

Les innovations qui apportent les plus grandes avancées ne sont pas toujours technologiques : cela peut être une innovation de modèle. Les innovations que nous recommandons pour parvenir à un avenir plus durable sont des innovations orientées vers le progrès. La *low-tech* est un catalyseur pour de nouveaux modèles organisationnels et commerciaux progressistes et qui doit être considérée au même niveau que la *high-tech*.¹²

Considérer le financement d'un mix d'innovations *low-tech* et *high-tech* en tant que technologies de pointe prioritaires, dans le cadre du Fond pour l'innovation intitulé « pionniers pour le climat et les ressources » (*climate and resources frontrunners*).

Il existe une distinction sémantique entre innovation et progrès : l'innovation est un moyen, le progrès est un objectif. Nous recommandons de rechercher l'objectif du progrès et de choisir ensuite les outils appropriés en fonction de cet objectif. Le moyen d'atteindre cet objectif peut être l'innovation, aussi bien par la *low-tech* que par la haute technologie, et les deux peuvent être combinés, pour obtenir le meilleur des deux.¹³

12 Voir la définition de « *low-tech* ».

13 Quelques exemples :

1. Weather Force est l'éditeur du service numérique de prévision des précipitations destiné aux agriculteurs, Last Mile Agriculture. L'application pour smartphone Last Mile Agriculture 4G permet de consulter des prévisions de pluie détaillées pour le jour même et le lendemain. Elle permet donc aux agriculteurs d'optimiser le rendement des cultures. L'unité fonctionnelle retenue est : « Consulter l'indicateur de prévision de pluie pour aujourd'hui et demain ». Dans une opération financée par l'ADEME, et menée par GreenIT.fr, LCIE CODDE Bureau Veritas, Neutreo by APL, les impacts environnementaux (PED, GWP, WD, ADP) ont été divisés par un facteur 2 à 5 via une démarche d'écoconception alliant *low-tech* et *high-tech*. Source : Greenconcept v3, 2019

2. La société Makina Corpus édite le service numérique Geotrek qui permet de créer des itinéraires de randonnée qui sont ensuite disponibles sous forme de documents en ligne (web) et PDF. L'unité fonctionnelle retenue est : « Construire et utiliser un itinéraire ». Dans une opération financée par l'ADEME, et menée par GreenIT.fr, LCIE CODDE Bureau Veritas, Neutreo by APL, les impacts environnementaux (PED, GWP, WD, ADP) ont été réduits de -23% à -65% via une démarche d'écoconception combinant *low-tech* et *high-tech*. Source : Greenconcept v3, 2019

3. La société BS We exploite le service numérique Price Comparator, qui surveille le prix des produits vendus en ligne. L'unité fonctionnelle retenue est : « Surveiller le prix de 200 produits de 5 concurrents une fois par semaine pendant 1 an ». Dans une opération financée par l'ADEME, et menée par GreenIT.fr, LCIE CODDE Bureau Veritas, Neutreo by APL les impacts environnementaux (PED, GWP, WD, ADP) ont été divisés par quatre via une démarche d'écoconception (remplacement de l'interface de l'application par une alerte email). Source : Greenconcept v1, 2017

Vous trouverez d'autres exemples de réactions à des innovations mêlant des combinaisons de *high-tech* et de *low-tech* sur <http://www.greenconcept-innovation.fr/temoignages/>

Nos recommandations :

Priorité n°2

Rendre les marchés publics éco-responsables pour les institutions publiques

Anticiper la fin de vie et la réutilisation de tous les nouveaux appareils achetés pour les institutions publiques. Pour ce faire, la seconde vie de l'appareil doit être prévue dans les appels d'offres.

Cela contribuera à augmenter l'offre d'appareils d'occasion et à développer le marché du réemploi.

Encadrer l'IoT

La croissance de l'IoT doit être questionnée étant donné que la technologie numérique est soumise à des contraintes et limitée en ressources, qui sont non renouvelables et non biodégradables. L'encadrement de l'IoT permettra également à l'Europe de planifier et d'anticiper sa stratégie de résilience dans un monde où la pression sur les métaux, et donc sur le numérique, est de plus en plus forte.

► Design

Rendre obligatoire l'ouverture de l'interface de communication des objets connectés (API) pour permettre aux utilisateurs de continuer à utiliser leurs objets connectés même si le service n'est plus supporté par le fabricant d'origine. Transférer la compétence aux régulateurs publics sur cette question.

Aujourd'hui, nous sommes obligés d'acheter des appareils propriétaires, comme s'il était impossible de vendre un téléviseur avec plusieurs chaînes. Cette limitation a d'énormes conséquences en termes d'obsolescence : si un consommateur n'est pas satisfait du service, ou si l'API n'est plus maintenue, l'ensemble du dispositif est écarté et, dans la plupart des cas, n'est pas réutilisé.

Comme aucun régulateur ne concevrait d'avoir un téléviseur pour une seule chaîne, rendre obligatoire l'ouverture de l'interface de communication (API) des objets connectés permettrait aux utilisateurs de continuer à utiliser leurs objets connectés.

► Utilisation et réemploi

Promouvoir un modèle économique basé sur la fonctionnalité, pour l'IoT, incluant l'installation temporaire et la gestion de capteurs pouvant être mutualisés et réinstallés ailleurs une fois les bonnes pratiques de gestion mises en place.

Dans de nombreux cas, les capteurs IoT peuvent être installés et gérés pendant une certaine période, puis réinstallés ailleurs, car il n'est pas nécessaire de les conserver une fois que les bonnes pratiques et les réflexes sont en place. Puisqu'ils sont mis en commun et utilisés pendant une durée limitée, cela limite à la fois la consommation d'énergie des dispositifs IoT et la consommation de ressources et la production de déchets résultant de la production des dispositifs.

À l'inverse, acheter des objets « connectables » embarquant les éléments de connectivité de l'IoT mais désactivés, au lieu d'un même appareil conçu sans intégrer les composants, est un non sens.

► Fin de vie

Limiter le nombre d'appareils et promouvoir la collecte des déchets électroniques dans les villes pour limiter la pollution en fin de vie.

En valeur absolue, les quantités de ressources matérielles brutes - et dans de nombreux cas, critiques - disséminées dans le monde sont énormes, mais la quantité contenue dans chaque appareil électronique est minuscule¹⁴. Comme, du fait de l'IoT, les ressources sont réparties sur de plus en plus de milliards de petits appareils, le défi de la collecte et du recyclage de ces composants s'accroît et reste excessivement difficile, d'autant plus lorsque les composants sont rassemblés en alliages. Des propositions doivent donc être faites pour réguler et limiter le nombre de dispositifs et, in fine, le phénomène d'entropie des composants, des plus concentrés aux plus petits, comme les étiquettes RFID (dans les textiles, les livres et de nombreux autres biens).¹⁵

Aller vers des réseaux complémentaires plutôt que superposés

Nos réseaux sont à un stade de développement où plus de 97% des ménages de l'UE bénéficient d'une couverture fixe à haut débit et où la couverture 4G moyenne dépasse 96%¹⁶. D'un point de vue environnemental, la question de la superposition des réseaux à très haut débit doit être abordée. La superposition de la 5G sur le haut débit par fibre et par satellite a un triple coût environnemental.

L'enjeu de politique publique est de savoir comment compléter ces réseaux plutôt que de les superposer, par exemple en imaginant dans les villes des zones Wi-Fi publiques auxquelles les smartphones se connectent préférentiellement plutôt qu'au réseau mobile, afin d'éviter de supporter inutilement les coûts

.....

¹⁴ Voir nos études de cas sur l'IoT et les objets connectés, sur les matières premières et sur les déchets électroniques électroniques et l'économie circulaire.

¹⁵ Voir notre étude de cas sur l'IoT et les objets connectés.

¹⁶ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/broadband-coverage-europe-2019> (dernière consultation : 10/06/2021)

¹⁷ Voir les résultats de notre étude ACV

de trois réseaux différents superposés avec un impact environnemental triple, plus l'effet rebond du remplacement massif des terminaux lors d'un changement de génération (réduisant aussi la durée de vie des boîtiers d'accès Internet et des smartphones).

En attendant, il faut veiller à ce que les réseaux *lower-tech* comme la 2G, soient maintenus pour garantir un accès minimum abordable à tous, y compris aux personnes utilisant un téléphone portable basique, et éviter ainsi d'accroître la fracture numérique en matière d'utilisation. Les avantages de compléter les réseaux au lieu de les superposer sont multiples : rappelons que la fabrication des équipements représente environ 40 % impacts environnementaux des technologies numériques dans l'UE28.¹⁷ La réduction du nombre d'appareils nécessaires aux réseaux permet de diminuer le coût environnemental global de la fabrication de ces appareils et de la consommation globale du réseau, et de faire en sorte que les utilisateurs soient moins exposés aux ondes électromagnétiques. Elle permet également de réduire les coûts de maintenance et de renouvellement.

Amener le cloud à une maturité durable

► Serveurs de centres de données

Identifier et réduire les serveurs zombies à moins de 8%.

A l'heure actuelle, le cloud génère un effet rebond car il supprime les anciennes frustrations : il permet un accès plus facile aux ressources informatiques. Les responsables informatiques peuvent étendre leurs capacités en quelques clics, tandis qu'à l'autre extrémité, l'équipement est toujours nécessaire. Les ressources informatiques étant facilement accessibles, on oublie à quoi sert notre machine virtuelle (VM) et on la laisse tourner pour rien : actuellement, environ

30% des serveurs sont inutilisés¹⁸. Il a été prouvé que ces serveurs zombies peuvent être efficacement réduits de 30 % à 8 % en un an si une entreprise prend des mesures lorsqu'on lui présente la preuve de l'ampleur du problème. L'élimination des serveurs zombies peut entraîner des économies considérables de capital et d'exploitation (puissance, matériel, maintenance des licences, personnel et espace au sol). Cela peut également améliorer la sécurité du centre de données, car les serveurs zombies sont beaucoup moins susceptibles d'avoir des mises à jour de sécurité.

► *Edge computing*

S'interroger sur la nécessité de s'appuyer sur l'*edge computing* et le réglementer pour s'assurer qu'il ne contribue pas à accroître les impacts environnementaux des TIC.

Aujourd'hui, l'*edge computing* est de plus en plus souvent mise en avant pour gagner quelques millisecondes de *ping*. Cependant, bien qu'il fasse une différence dans des secteurs spécifiques (médecine, finance, voitures autonomes), l'*edge computing* génère-t-il plus ou moins d'impacts environnementaux ? Puisqu'il va à l'encontre du principe de mutualisation - le même principe qui permet actuellement aux plus grands centres de données d'être plus efficaces sur le plan énergétique que les plus petits - il est nécessaire d'approfondir les recherches quant à ses impacts environnementaux.

Quand faut-il préférer les centres de données, qui mutualisent la capacité de calcul, à l'*edge computing*, et quand faut-il privilégier l'inverse ? Quels sont les impacts environnementaux de la fabrication, de l'installation et de la maintenance de nombreuses unités de calcul périphérique à l'échelle d'un pays ou d'un continent ? Quels sont les coûts environnementaux et les effets rebonds potentiels de la superposition de la capacité des centres de données existants, et pour quels avantages ? Ce sujet n'étant qu'émergent au moment de la rédaction de ce rapport, nous suggérons d'approfondir cette question lors de futures analyses du cycle de vie.

.....

18 Jonathan Koomey et Jon Taylor, *Zombie/Comatose Servers Redux*, 2017 ; <https://www.koomey.com/post/159279936533> (dernière récupération : 10/06/2021)

19 Voir notre étude de cas sur les effets rebonds

► Utilisations induites par le marketing

À l'instar du RGPD, mettre en place un mode « éco » obligatoire sur les plateformes (sites web et applications). L'objectif est de favoriser la liberté de choix des utilisateurs sur leurs modes de consommation.

Ce mode « éco » doit être accessible à tout utilisateur sans achat, aussi bien sur les versions sites que sur les versions applis des plateformes. Le mode « éco » doit inclure : la prévention du lancement automatique des vidéos, la désactivation du défilement infini et du suivi des données, et sur les plateformes de streaming vidéo et audio, la possibilité de lire de la musique et des vidéos hors ligne avec une option de chargement local.

L'objectif du mode « éco » est de limiter les effets rebonds liés à la consommation d'Internet. En effet, le lancement automatique de vidéos, le défilement infini, les traceurs de données, la musique et la vidéo en ligne sont utilisés pour augmenter le temps passé par les utilisateurs sur le service. Ceci se fait au détriment de la santé (mentale et physique) de l'utilisateur et joue sur des stimuli d'addiction. Par conséquent, l'utilisation de la télévision et des écrans augmente, ce qui entraîne une plus grande consommation d'énergie. De plus, l'augmentation de la consommation de données entraîne une consommation d'énergie constante ou plus importante des centres de données (même en tenant compte des gains d'efficacité énergétique, aussi énormes soient-ils)¹⁹, alors que la consommation doit être réduite pour respecter l'Accord de Paris et l'objectif de limitation à 1,5 °C. De plus, elle incite à renouveler plus fréquemment ses appareils pour disposer des versions les plus récentes et les plus puissantes, ce qui va à l'encontre de notre première recommandation.

Nos recommandations :

Priorité n°3

IA : saisir les opportunités d'une gestion frugale et souveraine des données

Actuellement, l'IA est principalement utilisée pour accroître l'usage numérique (recommandations de ventes croisées, propositions d'articles et de produits). Les effets environnementaux des applications de l'IA sont loin d'être neutres en termes de carbone : l'IA est souvent couplée au big data pour l'apprentissage automatique, et le *machine-learning* consomme d'énormes quantités de données.²⁰

Cependant, comme pour les statistiques, lorsque la qualité des données est élevée, moins de données sont nécessaires pour former l'IA (apprentissage automatique). Pour atteindre une précision très élevée de l'IA, d'énormes quantités de données sont nécessaires pour l'entraînement, ce que les scientifiques de Google appellent « l'efficacité déraisonnable des données²¹ ».

Nous devons donc nous demander s'il faut réglementer l'utilisation de l'IA avec pour objectif de limiter la consommation de ressources et de limiter les futures pénuries de ressources critiques nécessaires à la fabrication d'équipements informatiques.

Investir en priorité dans la frugalité et la souveraineté des données pour assurer la résilience à long terme de l'Europe.

Limiter le déploiement de l'IA aux projets dont il est prouvé que le gain environnemental global est supérieur au coût environnemental par une analyse du cycle de vie multicritère indépendante et conforme à la norme ISO 14040-44.

La low-tech²² doit donc être considérée comme une priorité, non pas dans le sens d'une opposition entre basse et haute technologies, mais pour les combiner afin d'obtenir le meilleur des deux²³ au bénéfice de la société et dans le respect des limites planétaires, dans une approche qui exploite à la fois la sobriété et l'efficacité.

Fixer des conditions environnementales obligatoires d'accès au marché européen pour les véhicules autonomes

Dans le cadre d'un vaste plan de mobilité à évaluer à l'échelle européenne, incluant une comparaison de tous les modes de transport actuellement possibles, fixer des conditions environnementales obligatoires d'accès au marché européen pour les véhicules autonomes qui garantissent d'éviter les effets rebonds et de promouvoir les modes de transport les plus respectueux de l'environnement.

La voiture autonome n'est pas encore prête à être généralisée, c'est donc une occasion unique de se demander comment faire en sorte qu'elle ne se développe pas au détriment du climat, des ressources planétaires et, par conséquent, des générations futures. L'enjeu principal de la voiture autonome à ce stade est que les TIC permettent de remplir les véhicules afin d'optimiser le coût environnemental du transport, plutôt que de faire rouler les véhicules à vide, et de limiter les éventuels effets

20 Voir notre étude de cas sur l'intelligence artificielle

21 Alon Halevy et Peter Norvig and Fernando Pereira, *The Unreasonable Effectiveness of Data*, 2009

22 Voir la définition de « low-tech ».

23 Voir l'exemple d'utilisation de l'IA et de détections non IA de cancers dans notre étude de cas sur l'intelligence artificielle.

rebonds en intégrant cette question dans un débat à grande échelle pour réguler la transition vers la mobilité du futur. Cette question se situe au carrefour des technologies numériques et de la mobilité. À la lumière des connaissances actuelles, pour chaque avantage environnemental que les voitures autonomes pourraient réaliser, les trains ou les transports publics en réalisent d'avantage²⁴. Ce domaine est à la frontière de notre expertise et soulève des questions de politique de mobilité, d'incitations aux transports publics et de comportements sociaux. Nous recommandons de considérer les voitures autonomes non pas comme un remplacement des voitures actuelles, mais dans le cadre d'une réflexion plus large sur la mobilité de demain à l'échelle européenne, et de veiller à ce que les modes de transport les plus résilients, efficaces et largement accessibles soient toujours promus et privilégiés. ■

.....

²⁴ Voir notre étude de cas sur les véhicules autonomes

BIBLIOGRAPHIE

Étude de cas : L'IoT et les objets connectés

Accenture, 2017. *Digital Industrial Transformation with the Internet of Things*. [en ligne] Lien : <https://www.accenture.com/_acnmedia/pdf-49/accenture-numérique-industrial-transformation-with-the-internet-of-things.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

IoT Analytics, 2020. *State of the IoT 2020: 12 billion IoT connections, surpassing non-IoT for the first time*. [en ligne] Lien : <<https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

McKinsey Global Institute, 2020. *Connected world: An evolution in connectivity beyond the 5G revolution*. [en ligne] Lien : <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Technology Media and Telecommunications/Telecommunications/Our Insights/Connected world An evolution in connectivity beyond the 5G revolution/MGI_Connected-World_Discussion-paper_February-2020.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

ITU. n.d. *Internet of Things Global Standards Initiative*. [en ligne] Lien : <<https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Harvard Business Review. 2014. *How Smart, Connected Products Are Transforming Competition*. [en ligne] Lien : <<https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Castorani et al., V., 2018. *Life cycle assessment of home smart objects: kitchen hood cases*. [en ligne] Lien : <https://www.researchgate.net/publication/324624605_Life_Cycle_Assessment_of_Home_Smart_Objects_Kitchen_Hood_Cases> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Lelah, A., Mathieux, F. and Brissaud, D., 2011. *Contributions to eco-design of machine-to-machine product service systems: the example of waste glass collection*. [en ligne] Doi.org. Lien : <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.003>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Bonvoisin, J., Lelah, A., Mathieux, F. and Brissaud, D., 2014. *An integrated method for environmental assessment and ecodesign of ICT-based optimization services*. [en ligne] Lien : <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.003>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Ingemarsdotter, E., Diener, D., Andersson, S. et al., 2021. *Quantifying the Net Environmental Impact of Using IoT to Support Circular Strategies—The Case of Heavy-Duty Truck Tires in Sweden*. [en ligne] Lien : <<https://link.springer.com/article/10.1007/s43615-021-00009-0>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

H. Vo, J. Kattleus, S. Karki, S. Shopneel, 2020. *Life Cycle Assessment Summary Samsung Galaxy Watch*. [en ligne] Lien : <https://www.researchgate.net/publication/338801291_Life_Cycle_Assessment_Summary_Samsung_Galaxy_Watch> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Xiuyan Li, K. Lu, 2019. *Improving sustainability with simpler alloys*. [en ligne] Lien : <<https://science.sciencemag.org/content/364/6442/733>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. and Lees Perasso, E., GreenIT.Fr. 2021. *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie*.

Pirson, T. and Bol, D., 2021. *Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach*. [en ligne] Lien : <<https://www.semanticscholar.org/paper/Assessing-the-embodied-carbon-footprint-of-IoT-edge-Pirson-Bol/49ac45f5d59ac2047548fd168eff62393dfd2ed>> [Consulté le 30 Septembre 2021].

Freitag C., Berners-Lee M., Widdicks K., Knowles B., Blair G., and Friday A., 2021. *The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations*. [en ligne] Lien : <<https://arxiv.org/abs/2102.02622>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Anses.fr. 2021. *ANSES*. [en ligne] Lien : <<https://www.anses.fr/en/content/presentation-anses>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Gossart, C., 2010. *Les enjeux environnementaux des technologies RFID*. [en ligne] Lien : <<https://journals.openedition.org/terminal/1801?lang=fr>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

DRAETTA, L. and DELANOË, A., 2012. *RFID, une technologie controversée : ethnographie de la construction sociale du risque* (Collection Mondialisation, Hommes et Sociétés). [en ligne] Youscribe.com. Lien : <<https://www.youscribe.com/catalogue/ebooks/actualite-et-debat-de-societe/medias/rfid-une-technologie-controversee-ethnographie-de-la-construction-2393274>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Csi.minesparis.psl.eu. 2014. [en ligne] Lien : <https://www.csi.minesparis.psl.eu/debatinginnovation/wp-content/uploads/2020/11/ResPInnov_RFID_ConferenceProgram_2014.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Draetta, L. and Delanoë, A., 2012. *RFID, une technologie controversée : ethnographie de la construction sociale du risque* (Collection Mondialisation, Hommes et Sociétés). [ebook] Lien : <https://www.csi.minesparis.psl.eu/debatinginnovation/wp-content/uploads/2019/05/DI_2014_04-01_009-015.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Bucchi M. & Neresini F., 2002. *Biotech remains unloved by the more informed*. [en ligne] Nature, 416: 261. Lien : <<https://www.nature.com/articles/416261a>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Raimi K. & Carrico A., 2016. *Understanding and beliefs about smart energy technology*. [en ligne] Energy Research & Social Science, 12: 68-74. Lien :

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629615301018>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Environnement-magazine.fr. 2015. *Quelle fin de vie pour les puces RFID ?*. [en ligne] Lien : <<https://www.environnement-magazine.fr/recyclage/article/2015/12/01/46697/quelle-fin-vie-pour-les-puces-rfid>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Higginbotham, S., 2020. *Sustainability is the elephant in the IoT room*. [en ligne] Lien : <<https://staceyoniot.com/sustainability-is-the-elephant-in-the-iot-room/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

French SME use case of ELA Innovation, from the GreenConcept ADEME Operation, between 2017 and 2019 : http://www.greenconcept-innovation.fr/wp-content/uploads/2020/02/ELA_INNOVATION_fiche_Ademe_GreenConcept2409.pdf

Étude de cas : L'intelligence artificielle

Gartner, 2019. *Gartner Survey Shows 37 Percent of Organizations Have Implemented AI in Some Form*. [en ligne] Lien : <<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-01-21-gartner-survey-shows-37-percent-of-organizations-have>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Roland Berger and Asgard, 2018. *Artificial Intelligence – A strategy for European startups Recommendations for policymakers*. [en ligne] Lien : <<https://asgard.vc/wp-content/uploads/2018/05/Artificial-Intelligence-Strategy-for-Europe-2018.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

McKinsey & Company, 2018. *Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies*. [en ligne] Lien : <<https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/artificial-intelligence->

[hardware-new-opportunities-for-semiconductor-companies](#)> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

European Commission, 2018. *Artificial Intelligence – A European Perspective*. [en ligne] Joint Research Centre. Lien : <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC113826>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Russell, S. and Norvig, P., 1995. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. [en ligne] Lien : <[https://web.archive.org/web/20140505045226/http://stpk.cs.rtu.lv/sites/all/files/stpk/materiali/MI/Artificial Intelligence A Modern Approach.pdf](https://web.archive.org/web/20140505045226/http://stpk.cs.rtu.lv/sites/all/files/stpk/materiali/MI/Artificial%20Intelligence%20A%20Modern%20Approach.pdf)> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Bosch ConnectedWorld Blog, n.d. *Industry 4.0: Predictive maintenance use cases in detail*. [en ligne] Lien : <<https://blog.bosch-si.com/industry40/industry-4-0-predictive-maintenance-use-cases-in-detail/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

AIMultiple. 2021. *Predictive vs Preventive: In-depth Maintenance Guide [2021 update]*. [en ligne] Lien : <<https://research.aimultiple.com/predictive-maintenance-vs-preventive-maintenance/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Deepmind. 2016. *DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40%*. [en ligne] Lien : <<https://deepmind.com/blog/article/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-40>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N. and Koomey, J., 2020. *Recalibrating global data center energy-use estimates*. [en ligne] Science. Lien : <<https://doi.org/10.1126/science.aba3758>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Ellen MacArthur Foundation, 2019. *Artificial intelligence and the circular economy - AI as a tool to accelerate the transition*. [en ligne] Lien : <<https://ellenmacarthurfoundation.org/artificial-intelligence-and-the-circular-economy>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

IRENA International Renewable Energy Agency, 2019. *Innovation landscape brief: Artificial intelligence and big data*. [en ligne] Lien : <<https://www.irena.org/-/media/>

[Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_AI_Big_Data_2019.pdf](#)> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

McKinsey & Company, 2018. *Artificial-intelligence hardware: New opportunities for semiconductor companies*. [en ligne] Lien : <<https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/artificial-intelligence-hardware-new-opportunities-for-semiconductor-companies>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Norvig, Peter et al., 2009. *The Unreasonable Effectiveness of Data*. [en ligne] Lien : <https://www.researchgate.net/publication/224396640_The_Unreasonable_Effectiveness_of_Data> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Sun, Chen et al., 2017. *Revisiting Unreasonable Effectiveness of Data in Deep Learning Era*. [en ligne] Lien : <<https://arxiv.org/abs/1707.02968>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Data, R., 2017. *Revisiting the Unreasonable Effectiveness of Data*. [en ligne] Google AI Blog. Lien : <<https://ai.googleblog.com/2017/07/revisiting-unreasonable-effectiveness.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Emma Strubell and al., 2019. *Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP*, University of Massachusetts Amherst. [en ligne] Lien : <<https://arxiv.org/abs/1906.02243>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

MIT Technology Review. 2019. *Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes*. [en ligne] Lien : <<https://www.technologyreview.com/2019/06/06/239031/training-a-single-ai-model-can-emit-as-much-carbon-as-five-cars-in-their-lifetimes/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Étude de cas : Le cloud

Cisco, 2018. *Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016-2021: White Paper*. [en ligne] Lien : <<https://virtualization.network/>

Resources/Whitepapers/0b75cf2e-0c53-4891-918e-b542a5d364c5_white-paper-c11-738085.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Eurostat. 2021. *Cloud computing - statistics on the use by enterprises - Statistics Explained*. [en ligne] Lien : <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Cloud_computing_-_statistics_on_the_use_by_enterprises> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Gartner, 2020. *Gartner says worldwide IaaS Public Cloud services market grew 37.3% in 2019*. [en ligne] Lien : <<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-08-10-gartner-says-worldwide-iaas-public-cloud-services-market-grew-37-point-3-percent-in-2019>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Judge, P., 2021. *Europe's FLAP markets have 2,000MW of data center capacity*. [en ligne] DatacenterDynamics.com. Lien : <<https://www.datacenterdynamics.com/en/news/europes-flap-markets-have-2000mw-of-data-center-capacity/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Judge, P., 2020. *Report: Dublin replaces Paris in the top four, as European hubs accelerate*. [en ligne] DatacenterDynamics.com. Lien : <<https://www.datacenterdynamics.com/en/news/report-dublin-replaces-paris-top-four-european-hubs-accelerate/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

DC Byte. 2021. *Global market data and analytics for the data centre sector - DC Byte*. [en ligne] Lien : <<https://dcbyte.com/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Mell, P. and Grance, T., 2011. *The NIST Definition of Cloud Computing: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology*. [en ligne] NIST National Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce. Lien : <<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

IDC. 2021. *Worldwide Public Cloud Services Market Totaled \$312 Billion in 2020 with Amazon Web Services and Microsoft Vying for the Top Position Overall, According to IDC*. [en ligne] Lien : <<https://www.idc.com/>

getdoc.jsp?containerId=prUS47685521> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Cisco, 2015. *Cisco Global Cloud Index 2014– 2019: 2015 Update*. [en ligne] Lien : <https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/service-provider/ciscoknowledgenetwork/files/547_11_10-15-DocumentsCisco_GCI_Deck_2014-2019_for_CKN_10NOV2015_.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Eurostat. 2019. [en ligne] Lien : <<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tin00127/default/table?lang=fr>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Perspectives, E. and Report, C., 2020. *Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018– 2023) White Paper*. [en ligne] Cisco. Lien : <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Eurostat, 2018. *Les services de cloud computing sont utilisés par plus d'une entreprise sur quatre dans l'UE*. [en ligne] Lien : <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/portlet_file_entry/2995521/9-13122018-BP-FR.pdf/a21954b5-3d96-415b-8319-77a24fac10b3> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Yu, L., 2011. *Coevolution of information ecosystems: a study of the statistical relations among the growth rates of hardware, system software, and application software*. [en ligne] Association for Computing Machinery. Lien : <<https://doi.org/10.1145/2047414.2047435>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

VMware. n.d. *Server Virtualization | Server Consolidation | VMware*. [en ligne] Lien : <<https://www.vmware.com/solutions/consolidation.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

IDC. 2020. *IDC's Global DataSphere Forecast Shows Continued Steady Growth in the Creation and Consumption of Data*. [en ligne] Lien : <<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46286020>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

- Linthicum, D., 2020. *Cloud adoption in a post-COVID world*. [en ligne] InfoWorld. Lien : <<https://www.infoworld.com/article/3586597/cloud-adoption-in-a-post-covid-world.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Koomey, J. and Taylor, J., 2017. *Zombie/Comatose Servers Redux*. [en ligne] Lien : <<https://www.anthesisgroup.com/report-zombie-and-comatose-servers-redux-jon-taylor-and-jonathan-koomey/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Jonathan G. Koomey, Ph.D. 2017. *Our newest work on comatose/zombie servers, out this week*. [en ligne] Lien : <<https://www.koomey.com/post/159279936533>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
2020. *Etude sur la caractérisation des effets rebonds induits par le télétravail*. [en ligne] ADEME. Lien : <<https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/3776-caracterisation-des-effets-rebond-induits-par-le-teletravail.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
2020. *ICT Impact Study Prepared by VHK and Viegand Maagøe for the European Commission, Assistance to the European Commission - ICT Impact study - FINAL REPORT*. [en ligne] European Commission - Energy. Lien : <<https://circabc.europa.eu/sd/a/8b7319ba-ce4f-49ea-a6e6-b28df00b20d1/ICT%20impact%20study%20final.pdf>> [Consulté le 30 Septembre 2021].
- Google Data Centers. 2021. *Efficiency – Data Centers – Google*. [en ligne] Lien : <<https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Hintemann, R. and Hinterholzer, S., 2019. *Energy consumption of data centers worldwide: How will the internet become green?*. [en ligne] CEUR Workshop Proc. Lien : <https://www.researchgate.net/publication/341427004_Energy_consumption_of_data_centers_worldwide_How_will_the_Internet_become_green> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Shalf, J., 2020. *The future of computing beyond Moore's Law*. [en ligne] Royal Society. Lien : <<https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0061>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Koot, M. and Wijnhoven, F., 2021. *Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic forecasting model*. [en ligne] Applied Energy, Volume 291. Lien : <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116798>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
2021. *CRU proposed Direction to the System Operators related to Data Centre grid connection. Consultation Paper*. [en ligne] Commission for Regulation of Utilities. Lien : <<https://www.cru.ie/wp-content/uploads/2021/06/CRU21060-CRU-consultation-on-Data-Centre-measures.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- LeBigData.fr. 2021. *Irlande : les Data Centers principaux responsables des pannes électriques - LeBigData.fr*. [en ligne] Lien : <<https://www.lebigdata.fr/irlande-data-centers-pannes-electriques>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- MasterDC. 2015. *How Data Center Free Cooling Works and Why it is Brilliant*. [en ligne] Lien : <<https://www.masterdc.com/blog/what-is-data-center-free-cooling-how-does-it-work/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Gelas, J., 2014. *Free Cooling: the Server Side of the Story*. [en ligne] Anandtech.com. Lien : <<https://www.anandtech.com/show/7723/free-cooling-the-server-side-of-the-story>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Tc0909.ashraetcs.org. 2021. *Index | ASHRAE 9.9 Mission Critical Facilities, Data Centers, Technology Spaces and Electronic Equipment*. [en ligne] Lien : <<http://tc0909.ashraetcs.org/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Acton, M., Bertoldi, P., Booth, J., Flucker, S., Newcombe, L., Royer, A. and Tozer, R., 2018. *2019 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency*. [en ligne] European Commission, Ispra, JRC. Lien : <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/publications/jrc114148_best_practice_guide_2019_final.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Hainan Zhang, Shuangquan Shao, Hongbo Xu, Huiming Zou, Changqing Tian, 2014. *Free cooling of data centers: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 35*. [en ligne] pp.Pages 171-182. Lien :

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002445>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Wilson, A., 2021. *Immersion Cooling - The Future of Data Center Technology - Predictive Technology, Inc.*. [en ligne] Predictive Technology, Inc. Lien : <<https://www.ptisolutions.com/immersion-cooling-the-future-of-data-center-technology/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Branscombe, M., 2021. *Data Center Firm Expects to Halve Energy Cost by Recycling Heat*. [en ligne] Data Center Knowledge. Lien : <<https://www.datacenterknowledge.com/design/data-center-firm-expects-halve-energy-cost-recycling-heat>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

DatacenterDynamics.com. 2016. *Yandex data center heats Finnish city*. [en ligne] Lien : <<https://www.datacenterdynamics.com/en/news/yandex-data-center-heats-finnish-city/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Judge, P., 2017. *Facebook's Denmark data center will supply heat to city*. [en ligne] DatacenterDynamics.com. Lien : <<https://www.datacenterdynamics.com/en/news/facebook-denmark-data-center-will-supply-heat-to-city/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Green IT. 2017. *Stimergy chauffe une piscine parisienne*. [en ligne] Lien : <<https://www.greenit.fr/2017/07/25/stimergy-chauffe-piscine-parisienne/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

EU Science Hub - European Commission. n.d. *Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres - EU Science Hub - European Commission*. [en ligne] Lien : <<https://ec.europa.eu/jrc/en/energy-efficiency/code-conduct/datacentres>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Étude de cas : La 5G

Roland Berger and Asgard, 2018. *Artificial Intelligence – A strategy for European startups Recommendations for policymakers*. [en ligne] Lien : <<https://asgard.vc/wp-content/uploads/2018/05/Artificial-Intelligence-Strategy-for-Europe-2018.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

GSMA, 2018. *The Mobile Economy 2018*. [en ligne] Lien : <<https://www.gsma.com/northamerica/wp-content/uploads/2018/08/The-Mobile-Economy-2018.pdf>> [Consulté le 30 Septembre 2021].

Perspectives, E. and Report, C., 2020. *Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. [en ligne] Cisco. Lien : <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Gartner, 2019. *Gartner Predicts Outdoor Surveillance Cameras Will Be Largest Market for 5G Internet of Things Solutions Over Next Three Year*. [en ligne] Lien : <<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-10-17-gartner-predicts-outdoor-surveillance-cameras-will-be>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

IDATE DigiWorld. 2018. *state of LTE & 5G markets*. [en ligne] Lien : <<https://5gobservatory.eu/about/what-is-5g/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Deloitte, 2017. *Communications infrastructure upgrade: The need for deep fiber*. [en ligne] Lien : <<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/technology-media-telecommunications/us-tmt-5GReady-the-need-for-deep-fiber-pov.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Deloitte. n.d. *5G and Edge Computing Use Cases*. [en ligne] Lien : <<https://www2.deloitte.com/us/en/pages/consulting/articles/what-is-5g-edge-computing.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

European Council, 2020. *European Council meeting (10 and 11 December 2020) - Conclusions EUCO 22/20 CO EUR 17 CONCL 8*. Brussels: General Secretariat of the Council, chapter III p.5-9. [en ligne] Lien : <<https://www.consilium.europa.eu/media/47296/1011-12-20-euco-conclusions-en.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Ffita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño, 2018. *Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the*

Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press ; [en ligne] Lien : <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Commissariat général au développement durable, 2020. *L'empreinte carbone des Français reste stable*. [en ligne] Lien : <<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-01/datalab-essentiel-204-l-empreinte-carbone-des-francais-reste-stable-janvier2020.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Gauthier Roussilhe, 2020. *Évolution des smartphones 4G vers 5G : Comment évaluer la situation et l'empreinte environnementale*, (in English: Evolution of 4G smartphones to 5G: How to assess the situation and the environmental footprint). [en ligne] Lien : <<http://gauthierroussilhe.com/pdf/Smartphones4G5G-Septembre2020.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Perspectives, E. and Report, C., 2020. *Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. [en ligne] Cisco. Lien : <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Gartner, 2019. *Gartner Predicts Outdoor Surveillance Cameras Will Be Largest Market for 5G Internet of Things Solutions Over Next Three Years*. [en ligne] Lien : <<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-10-17-gartner-predicts-outdoor-surveillance-cameras-will-be>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Industrial Health & Safety Review. 2018. *5G implications for security - video surveillance & safe cities* | Industrial Health & Safety Review. [en ligne] Lien : <<https://www.isrmag.com/5g-implications-security-video-surveillance-safe-cities/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Florinda F. Martins, Hélió Castro, 2019. *Raw material depletion and scenario assessment in European Union – A circular economy approach*. [en ligne] Lien : <<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.082>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

2019. *5G and FTTH: The Value of Convergence* Raf Meersman, CEO Comsof. FTTH Conference March 13, 2019. [en ligne] Amsterdam: FTTH Council Europe, p.5. Lien : <<https://web.archive.org/web/20201230150852/https://www.ftthcouncil.eu/documents/COM-190313-FibreFor5G-ConvergenceStudy-Presentation-RafMeersman%20-%20v4%20-%20publish.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Corning.com. 2018. *5G Fiber Optic Networks | How 5G will Impact Optical Fiber Cabling Requirements and Infrastructure* | Corning. [en ligne] Lien : <<https://www.corning.com/in-building-networks/worldwide/en/home/knowledge-center/5g-networks-impact-on-fiber-optic-cabling-requirements.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

ISEMAG. 2020. *5G Requires New Power and Fiber Strategies - ISEMAG*. [en ligne] Lien : <<https://isemag.com/2020/11/telecom-5g-fiber-power-small-cells-partnerships/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Duffy, C., 2021. *Verizon delaying shutdown of its 3G wireless network*. [en ligne] CNN. Lien : <<https://edition.cnn.com/2021/01/07/tech/verizon-3g-shutdown-paused/index.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

AT&T. 2021. *Act NOW - 3G is Going Away in 2022*. [en ligne] Lien : <<https://www.att.com/support/article/wireless/KM1324171>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Tactis.fr. 2021. *Vers une couverture 5G inférieure à la 4G ?*. [en ligne] Lien : <<https://www.tactis.fr/simulation-couverture-5g/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

2019. *A technical look at 5G energy consumption and performance*. [en ligne] Lien : <<https://www.ericsson.com>>

[com/en/blog/2019/9/energy-consumption-5g-nr](https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/energy-efficiency-2/)

[Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Huawei. 2019. *5G Power Whitepaper*. [en ligne] Lien :

<https://www.huawei.com/minisite/5g-ultra-lean-site-2019/pdf_v1.0/5G-Power-White-Paper-en.pdf>

[Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Future Networks. 2019. *Energy Efficiency: An Overview*. [en

ligne] Lien : <<https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/energy-efficiency-2/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

FierceWireless. 2020. *5G base stations use a lot more energy than 4G base stations: MTN*. [en ligne] Lien :

<<https://www.fiercewireless.com/tech/5g-base-stations-use-a-lot-more-energy-than-4g-base-stations-says-mtn>>

[Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Mtnconsulting.biz. 2020. *Operators facing power cost*

crunch – MTN Consulting. [en ligne] Lien : <<https://www.mtnconsulting.biz/product/operators-facing-power-cost-crunch/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

ITU. 2020. *Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement*. [en

ligne] Lien : <https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.1470-202001-I!!PDF-E&type=items> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

European Commission. n.d. *Critical raw materials - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*

- European Commission. [en ligne] Lien : <https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Étude de cas : Les véhicules autonomes

2019. *Digital Auto Report*. [en ligne] PwC Strategy&.

Lien : <<https://www.strategyand.pwc.com/de/de/studie/2019/numérique-auto-report.html>> [Consulté le

1^{er} octobre 2021].

BCG, CLEPA and Wolk, 2021. BCG, CLEPA and Wolk.

[en ligne] Lien : <<https://web-assets.bcg.com/36/39/e80d073a4067bfe89c7482d6db69/the-european-aftermarket-in-2030.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

STARS (Shared mobility opportunities and challenges for European cities), 2017. *Car sharing in Europe: a multidimensional classification and inventory*. [en

ligne] Lien : <<http://stars-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/06/STARS-D2.1.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

2021. *Data viewer on greenhouse gas emissions and removals, sent by countries to UNFCCC and the EU*

Greenhouse Gas Monitoring Mechanism (EU Member States). [en ligne] Lien : <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

SAE. 2019. *SAE J3016 automated-driving graphic*. [en

ligne] Lien : <<https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

SAE. 2014. *J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems - SAE International*. [en ligne] Lien :

<https://www.sae.org/standards/content/j3016_201401/> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

McKinsey & Company. n.d. *Autonomous Driving*. [en

ligne] Lien : <<https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/overview/autonomous-driving>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

UCSUSA, 2020. *Ride-Hailing's Climate Risks Steering a Growing Industry toward a Clean Transportation Future*. [en ligne] Lien :

<https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2020-02/Ride-Hailings-Climate-Risks-Methodology_0.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

de Bortolli, A., 2021. *Environmental performance of shared micromobility and personal alternatives using integrated modal LCA*. [en ligne] Lien :

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/>

[S136192092100047X?dgcid=author](#) [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Aggelos Soteropoulos, Martin Berger & Francesco Ciari, 2018. *Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies*. [en ligne] Lien : <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1523253> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

CORDIS | European Commission. 2012. *Safe Road Trains for the Environment; developing strategies and technologies to allow vehicle platoons to operate on normal public highways with significant environmental, safety and comfort benefits*. [en ligne] Lien : <https://cordis.europa.eu/project/id/233683/reporting> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Deloitte, 2021. *Car sharing in Europe: Business Models, National Variations and Upcoming Disruptions*. Monitor Deloitte. [en ligne] Lien : <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/consumer-industrial-products/CIP-Automotive-Car-Sharing-in-Europe.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Francesco Del Pero, Massimo Delogu, Marco Pierini, 2018. *Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car*. [en ligne] Lien : <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2452321618301690?token=54ABE050E03B0AC57E1F1D2F920B95E549B5C1434DB3BDBFACB7D4D0D264178A266210D801D1F8E433845ED4DB329E2B&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210414084035> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

James H. Gawron, Gregory A. Keoleian, Robert D. De Kleine, et al, 2018. *Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects*. [en ligne] American Chemical Society - Copyright © 2018. Lien : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b04576> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Étude de cas : Les effets rebonds

Koomey J., Naffziger S., 2015. *Efficiency's brief reprieve: Moore's Law slowdown hits performance more than energy efficiency*. [en ligne] IEEE Spectrum. Lien : <http://spectrum.ieee.org/computing/hardware/moores-law-might-be-slowing-down-but-not-energy-efficiency> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

GreenIT.fr, 2019. *Environmental Footprint of the numérique world*. [en ligne] Lien : <https://www.greenit.fr/environmental-footprint-of-the-numérique-world/> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Gossart, C., 2014. *Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature*. [en ligne] Lien : https://gossart.wp.imt.fr/files/2014/10/Rebound_Effects_and_ICT.pdf [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

GreenIT.fr. 2014. *L'effet rebond dans le numérique est-il évitable ? - Green IT*. [en ligne] Lien : <https://www.greenit.fr/2014/02/19/l-effet-rebond-dans-le-numerique-est-il-evitable> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Maxwell, D., Owen, P., McAndrew, L., Muehmel, K., Neubauer, A., 2011. *Addressing the Rebound Effect, a report for the European Commission DG Environment*. [en ligne] Lien : <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/416089fa-1a08-4772-97fc-c9258d2349c5/language-en/format-PDF/source-203469145> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Sorrell, S., 2009. *Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency*. *Energy Policy* Volume 37, Issue 4. [en ligne] pp.1456-1469. Lien : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421508007428> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Faist Emmenegger, M., Frischknecht, R., Stutz, M. et al., 2006. *Life Cycle Assessment of the Mobile Communication System UMTS: Towards Eco-efficient Systems*. [en ligne] Int J Life Cycle Assessment 11, pp.265–276. Lien : <https://doi.org/10.1065/lca2004.12.193> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

1^{er} octobre 2021].

Grübler, A., 1990. *The Rise and Fall of Infrastructures*. [en ligne] Lien : <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/Publications/The_Rise_and_Fall_of_Infrastru/the_rise_and_fall_of_infrastru.html> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Lange S., Pohl J., Santarius T., 2020. *Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?*. [en ligne] Lien : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800919320622>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Coroama V.C., Hilty L.M., Birtel M., 2012. *Effects of Internet-based multiple-site conferences on greenhouse gas emissions*. [en ligne] Telemat. Inform, pp.362–374. Lien : <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tele.2011.11.006>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Santarius T., Pohl J. and Lange S., 2020. *Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing?*. [en ligne] Lien : <<https://doi.org/10.3390/su12187496>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Hilty L.M., 2008. *Information technology and sustainability: Essays on the relationships between information technology and sustainable development*. [en ligne] Books on Demand, Norderstedt. Lien : <https://books.google.fr/books/about/Information_Technology_and_Sustainability.html?id=2vVVFfS_2YC&redir_esc=y> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N. and Koomey, J., 2020. *Recalibrating global data center energy-use estimates*. [en ligne] Science. Lien : <<https://doi.org/10.1126/science.aba3758>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

GreenIT.fr. 2020. *Data center : seulement 6% de hausse en 8 ans - Green IT*. [en ligne] Lien : <<https://www.greenit.fr/2020/03/04/data-center-seulement-6-de-hausse-en-8-ans>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. and Lees Perasso, E., GreenIT.Fr. 2021. *Le numérique en Europe : une*

approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie.

Zenith Media, 2019. *Media Consumption Forecasts*. [en ligne] Lien : <<https://www.zenithmedia.com/product/media-consumption-forecasts-2019/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Android Authority. 2015. *How far we've come: a look at smartphone performance over the past 7 years*. [en ligne] Lien : <<https://www.androidauthority.com/smartphone-performance-improvements-timeline-626109/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Empirica and TÜV Rheinland for the European Commission DG Communications Networks, Content & Technology, 2019. *Mobile broadband prices in Europe 2019. Digital Single Market*. [en ligne] Lien : <<https://numérique-strategy.ec.europa.eu/en/library/mobile-broadband-prices-europe-2019>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Vora L.J., 2015. *Evolution of mobile generation technology: 1g to 5g and review of upcoming wireless technology 5G*. [en ligne] Lien : <<https://ijmter.com/papers/volume-2/issue-10/evolution-of-mobile-generation-technology-1g-to-5g-and-review-of-5g.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Techcrunch.com. 2021. *TechCrunch is now a part of Verizon Media*. [en ligne] Lien : <<https://techcrunch.com/2021/01/13/app-stores-saw-record-218-billion-downloads-in-2020-consumer-spend-of-143-billion/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

The Social Dilemma. 2020. [documentary] <https://www.imdb.com/title/tt11464826/>.

Andrew, O., 2018. *The History and Evolution of the Smartphone: 1992-2018*. [en ligne] Textrequest.com. Lien : <<https://www.textrequest.com/blog/history-evolution-smartphone/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

IFA, 2019. *IFA Global Press Conference 2019*. [en ligne] p.13. Lien : <https://www.gfu.de/fileadmin/media/downloads/190427_GPC_Kamp_Praesentation.pdf>

[Consulté le 1^{er} octobre 2021].

GeSI, 2008. *Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age*. [en ligne] Lien : <<https://gesi.org/research/download/7>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Hilty, L., 2008. *Information Technology and Sustainability. Essays on the Relationship between ICT and Sustainable Development*. [en ligne] p.41. Lien : <https://www.researchgate.net/publication/301660679_2008_Hilty_ICT_and_Sustainability_Chapters_1_2> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Herring, H., Roy, R., 2002. *Sustainable services, electronic education and the rebound effect. Environmental Impact Assessment Review*. [en ligne] Lien : <[http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0195-9255\(02\)00026-4](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0195-9255(02)00026-4)> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Kitou E., Horvath A., 2003. *Energy-related emissions from Telework*. [en ligne] Lien : <<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es025849p>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

2020. *Etude sur la caractérisation des effets rebonds induits par le télétravail*. [en ligne] ADEME. Lien : <<https://bibliothèque.ademe.fr/mobilite-et-transport/3776-caracterisation-des-effets-rebond-induits-par-le-teletravail.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Eurostat. 2020. *E-commerce statistics for individuals - Statistics Explained*. [en ligne] Lien : <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=E-commerce_statistics_for_individuals#Most_popular_en_ligne_purchases> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Khurana A., Pal R., 2013. *Impact of e-commerce on environment*.

Kaft, E., 2020. *'Last mile' delivery push will worsen commutes, hurt the environment, World Economic Forum says*. [en ligne] CNBC.com. Lien : <<https://www.cnbc.com/2020/01/14/last-mile-delivery-push-will-worsen-commutes-hurt-the-environment-world-economic-forum-says.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Charlene Li, Miranda Miroso and Phil Bremer, 2020. *Review of En ligne Food Delivery Platforms and their Impacts on Sustainability*. [en ligne] Lien : <<http://dx.doi.org/10.3390/su12145528>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Flipo, F., 2020. *L'impératif de la sobriété numérique, L'enjeu des modes de vies*. Editions Matériologiques. [en ligne] <<https://materielogiques.com/fr/essais-2427-4933/315-limperatif-de-la-sobriete-numerique-lenjeu-des-modes-de-vie-9782373612585.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021]

Fondation de l'Ecologie Politique. 2020. *Note de la FEP #23 - La face cachée du numérique*. [en ligne] Lien : <<http://www.fondationecolo.org/blog/Note-de-la-FEP-23-La-face-cachee-du-numerique>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Fabrice Flipo, François Deltour, Michelle Dobré, Marion Michot, 2012. *Peut-on croire aux TIC vertes ?* [en ligne] Lien : <<https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2017-3-page-105.htm>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

International Labour Organisation – Geneva: ILO, 2018. *World Employment and Social Outlook 2018: Greening with jobs*. [en ligne] Lien : <http://oit.org/global/publications/books/WCMS_628654/lang--en/index.htm> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Étude de cas : Les matières premières du numérique

European Commission, 2020. *Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and the committee of the regions, Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*. [en ligne] Lien : <<https://eur-lex>

europea.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474 [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

OECD, 2019. *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers And Environmental Consequences*. [en ligne] Lien : <<https://www.oecd.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060-9789264307452-en.htm>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

European Commission, 2020. *Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final Report*. [en ligne] Lien : <<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/1/translations/en/renditions/native>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Wheeler, A., 2018. *What Raw Materials Are Used to Make Hardware in Computing Devices?* [en ligne] Engineering.com. Lien : <<https://www.engineering.com/story/what-raw-materials-are-used-to-make-hardware-in-computing-devices>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Guillaume Pitron (trans. Bianca Jacobsohn), 2021. *The rare metals war: the dark side of clean energy and numérique technologies*. [en ligne] Lien : <<https://scribepublications.co.uk/books-authors/books/the-rare-metals-war>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Ideal Magnet Solutions. n.d. *Extract Rare Earth Elements from Acid Mine Drainage*. [en ligne] Lien : <<https://idealmagnetsolutions.com/knowledge-base/extract-rare-earth-elements-from-acid-mine-drainage/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

JRC, 2018. *Cobalt, demand-supply balances in the transition to electric mobility*. [en ligne] European Commission Joint Research Center. Lien : <<https://ec.europa.eu/jrc/en/news/cobalt-potential-bottleneck-transition-electric-mobility>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Fraser, Jake ; Anderson, Jack ; Lazuen, Jose ; Lu, Ying ; Heathman, Oliver ; Brewster, Neal ; Bedder, Jack ; Masson, Oliver, 2021. *Study on future demand and supply security of nickel for electric vehicle batteries*. [en ligne] Luxembourg: Publications Office of the European Union. Lien : <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/>

repository/bitstream/JRC123439/roskill-jrc_classi_ni_market_study_identifiers_final.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

U.S. Geological Survey, 2020. *Mineral Commodity Summaries*. [en ligne] Lien : <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Systext.org. 2021. *ISF SystExt - Smartphone 2017*. [en ligne] Lien : <<https://www.systext.org/sites/all/animationreveal/mtxsmp/#/7>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

IEA. 2021. *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – Analysis - IEA*. [en ligne] Lien : <<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Belkaid, 2020. *La face honteuse du «>métal bleu»*. [en ligne] Le Monde diplomatique. Lien : <<https://www.monde-diplomatique.fr/2020/07/BELKAID/61982>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

International Rights Advocates. 2019. *IRAdvocates Files Forced Child Labor Case Against Tech Giants Apple, Alphabet, Dell, Microsoft and Tesla for Aiding and Abetting Extreme Abuse of Children Mining Cobalt in DRC*. [en ligne] Lien : <<http://www.iradvocates.org/press-release/iradvocates-files-forced-child-labor-case-against-tech-giants-apple-alphabet-dell>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Cadot, J., 2017. *Minerais et conflits au Congo : quelles sont les entreprises de la tech les plus responsables ?*. [en ligne] Numerama. Lien : <<https://www.numerama.com/tech/307318-minerais-et-conflits-au-congo-queelles-sont-les-entreprises-de-la-tech-les-plus-responsables.html>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

UN Security Council, 2016. « *Final report of the Group of Experts (2016)*, »S/2016/166. [en ligne] Lien : <http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=S/2016/466> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

UN Security Council, 2010. « *Interim report of the*

- Group of Experts on the DRC, »S/2010/252. [en ligne] Lien : <http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=S/2010/252> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Youtube.com. 2010. « *Blood in the Mobile* » documentary film. [en ligne] Lien : <<https://www.youtube.com/watch?v=Tv-hE4Yx0LU>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Worstopolluted.org. 2016. *WorstPolluted.org: Reports*. [en ligne] Lien : <<http://www.worstopolluted.org/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Laura J. Sonter, Saleem H. Aliand James E. M. Watson, 2018. *Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science*. [en ligne] Lien : <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2018.1926>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Pablo Fernandez-Navarro, et al., 2012. *Proximity to mining industry and cancer mortality*. [en ligne] Lien : <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22846765/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Kader, M., 2020. *The toxic risks of mining rare earths*. [en ligne] MalaysiaNow. Lien : <<https://www.malaysianow.com/opinion/2020/12/08/the-toxic-risks-of-mining-rare-earths/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Pubs.usgs.gov. 2007. *Global Nonfuel Mineral Resources and Sustainability*. [en ligne] Lien : <<https://pubs.usgs.gov/circ/2007/1294/paper1.html#table2>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Albert K. Mensah, Ishmail O. Mahiri, Obed Owusu, Okoree D. Mireku, Ishmael Wireko, Evans A. Kissi, 2015. *Environmental Impacts of Mining: A Study of Mining Communities in Ghana*. [en ligne] Lien : <<https://ir-library.ku.ac.ke/bitstream/handle/123456789/13131/Environmental%20Impacts%20of%20Mining%20A%20Study%20of%20Mining%20Communities%20in%20Ghana.pdf;sequence=1>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Bridge G., 2004. *Contested terrain: mining and the environment*. [en ligne] Lien : <<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.energy.28.011503.163434>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Peelman, S., Kooijman, D., Sietsma, J. et al., 2018. *Hydrometallurgical Recovery of Rare Earth Elements from Mine Tailings and WEEE. J. Sustain. Metall 4*. [en ligne] pp.367–377. Lien : <<https://doi.org/10.1007/s40831-018-0178-0>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- X. Jin Yang, Aijun Lin, Xiao-Liang Li, Yiding Wu, Wenbin Zhou, Zhanheng Chen, 2013. *China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation*. [en ligne] Lien : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211464513000316>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Data.worldbank.org. 2018. *Arable land (hectares) - China | Data*. [en ligne] Lien : <<https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.ARBL.A?end=2018&locations=CN&start=1961&view=chart>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Maughan, T., 2015. *The dystopian lake filled by the world's tech lust*. [en ligne] Bbc.com. Lien : <<https://www.bbc.com/future/article/20150402-the-worst-place-on-earth>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Yang, S., 2021. *The Chip Shortage Is Bad. Taiwan's Drought Threatens to Make It Worse*. [en ligne] Wall Street Journal. Lien : <<https://www.wsj.com/articles/the-chip-shortage-is-bad-taiwans-drought-threatens-to-make-it-worse-11618565400>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Csiro.au. n.d. *Understanding water use in mining and mineral processing - CSIRO*. [en ligne] Lien : <<https://www.csiro.au/en/work-with-us/industries/mining-resources/Processing/Water-footprint>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Mining-technology.com. 2013. *Managing water consumption in mining*. [en ligne] Lien : <<https://www.mining-technology.com/features/feature-managing-water-consumption-mining-global-shortage/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].
- Michael Tost, Benjamin Bayer, Michael Hitch, Stephan Lutter, Peter Moser, and Susanne Feiel, 2018. *Metal Mining's Environmental Pressures: A Review and Updated Estimates on CO2 Emissions, Water Use, and Land Requirements*. [en ligne] Lien : <<http://dx.doi.org/10.3390/>>

[su10082881](#)> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Azadi, M., Northey, S.A., Ali, S.H. et al., 2020. *Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation*. *Nat. Geosci.* 13. [en ligne] pp.100–104. Lien : <<https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Mudd, G M., 2009. *The Sustainability of Mining in Australia: Key production trends and Environmental Implications*. [en ligne] Research Report No RR5, Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute. Lien : <<https://users.monash.edu.au/~gmudd/files/SustMining-Aust-Report-2009-Master.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hirschier, R for the UNEP, 2013. *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*. [en ligne] Lien : <<https://www.wrforum.org/wp-content/uploads/2015/03/Environmental-risks-and-challenges-of-anthropogenic-metals-flows-and-cycles-20138-Environmental-Risks-and-Challenges-of-Anthropogenic-Metals-Flows-and-Cycles-1.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Bihouix P., de Guillebon B., 2010. *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*. [en ligne] Lien : <<https://laboutique.edpsciences.fr/produit/9782759805495>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Delamarche, M., 2017. [Infographie] *De surprenantes matières critiques*. [en ligne] usinenouvelle.com. Lien : <<https://www.usinenouvelle.com/article/infographie-de-surprenantes-matieres-critiques.N563822>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Delamarche, M., 2018. *Les nouvelles matières critiques*. [en ligne] usinenouvelle.com. Lien : <<https://www.usinenouvelle.com/article/les-nouvelles-matieres-critiques.N712199>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Ellsworth, D., 2017. LITHIUM TRIANGLE – *Resource*

World Magazine. [en ligne] Resourceworld.com. Lien : <<https://resourceworld.com/lithium-triangle/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Mckellop, M., 2021. *Materials shortage is the latest setback for components industry*. [en ligne] Sourcingengine.com. Lien : <<https://www.sourcingengine.com/blog/components-industry-raw-material-shortage-latest-2021-01-20>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

CRM_InnoNet, 2015. *Critical Raw Materials Substitution Profiles*. [en ligne] Lien : <<http://www.criticalrawmaterials.eu/wp-content/uploads/D3.3-Raw-Materials-Profiles-final-submitted-document.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Xiuyan Li, K. Lu, 2019. *Improving sustainability with simpler alloys*. [en ligne] Lien : <<https://science.sciencemag.org/content/364/6442/733>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Burns, S., 2021. *Rare earths are the next geopolitical chess game*. [en ligne] Steel, Aluminum, Copper, Stainless, Rare Earth, Metal Prices, Forecasting | MetalMiner. Lien : <<https://agmetminer.com/2021/02/16/rare-earths-are-the-next-geopolitical-chess-game/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

2020. *Rare Earths sector a challenge: can anyone stand up to the Chinese? – Resource World Magazine*. [en ligne] Resourceworld.com. Lien : <<https://resourceworld.com/rare-earths-sector-a-challenge-can-anyone-stand-up-to-the-chinese/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Sourcingengine.com. 2021. *Global chip shortage sparks demand for older tools* | Sourcingengine. [en ligne] Lien : <<https://www.sourcingengine.com/blog/global-semiconductor-shortage-drives-interest-older-chip-making-equipment-2021-03-10>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Vie publique.fr. 2021. *Loi du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire*. [en ligne] Lien : <<https://www.vie-publique.fr/loi/268681-loi-lutte-contre-le-gaspillage-et-economie-circulaire>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Étude de cas : Les déchets électroniques et l'économie circulaire

Parajuly, K.; Kuehr, R.; Awasthi, A. K.; Fitzpatrick, C.; Lepawsky, J.; Smith E.; Widmer, R.; Zeng, X., 2019. *Future E-waste Scenarios*. [en ligne] Bonn: StEP, UNU ViE-SCYCLE & UNEP IETC. Lien : <https://step-initiative.org/files/_documents/publications/FUTURE_E-WASTE_SCENARIOS_UNU_190829_low_screen.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G., 2020. *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. [en ligne] UNU/ UNITAR – co-hosted SCYCLE Programme, ITU & ISWA. Lien : <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Toolbox/GEM_2020_def.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

European Commission, n.d. *Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. [en ligne] Lien : <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_action_plan.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Data.europa.eu. n.d. data.europa.eu. [en ligne] Lien : <<https://data.europa.eu/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

StEP Initiative, 2014. Solving the E-Waste Problem (Step) *White Paper: One Global Definition of E-waste*. [en ligne] Lien : <https://step-initiative.org/files/_documents/whitepapers/StEP_WP_One> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

European Commission. n.d. *Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*. [en ligne] Lien : <https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Urbanmineplatform.eu. 2021. *Urban Mine Platform*.

[en ligne] Lien : <<http://www.urbanmineplatform.eu/urbanmine/eee/weightpercolcat>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Urbanmineplatform.eu. 2021. *Urban Mine Platform*. [en ligne] Lien : <<http://www.urbanmineplatform.eu/wasteflows/eee/percentage>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

CEWASTE, 2021. *A contribution to future Critical Raw Materials Recycling*. [en ligne] Lien : <<https://cewaste.eu/wp-content/uploads/2021/04/CEWASTE-Final-Public-Raport.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Lukas Messmann, Christoph Helbig, Andrea Thorenz, Axel Tuma, 2019. *Economic and environmental benefits of recovery networks for WEEE in Europe*. [en ligne] Lien : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619306493>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

N. Unger, P. Beigl, G. Höggerl, S. Salhofer, 2017. *The greenhouse gas benefit of recycling waste electrical and electronic equipment above the legal minimum requirement: An Austrian LCA case study*. [en ligne] Journal of Cleaner Production, Volume 164, pp.1635-1644. Lien : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261731394X>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Charu Gangwar, Ranjana Choudhari, Anju Chauhan, Atul Kumar, Aprajita Singh, Anamika Tripathi, 2019. *Assessment of air pollution caused by illegal e-waste burning to evaluate the human health risk*. [en ligne] Environment International, Volume 125, pp.191-199. Lien : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018312662#f0005>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Orlandorecycles.com. 2021. *5 Effects of E-Waste On the Environment | Orlando Recycles*. [en ligne] Lien : <<https://orlandorecycles.com/2021/01/5-effects-of-e-waste-on-the-environment/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Electronicstakeback.com. 2013. *E-Waste In Landfills*. [en ligne] Lien : <<http://www.electronicstakeback.com/>>

[designed-for-the-dump/e-waste-in-landfills/](#) [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Kim SS, Xu X, Zhang Y, et al., 2020. *Birth outcomes associated with maternal exposure to metals from informal electronic waste recycling in Guiyu, China*. [en ligne] Lien : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7257595/> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Alabi, O.A., Adeoluwa, Y.M. & Bakare, A.A., 2020. *Elevated Serum Pb, Ni, Cd, and Cr Levels and DNA Damage in Exfoliated Buccal Cells of Teenage Scavengers at a Major Electronic Waste Dumpsite in Lagos, Nigeria*. [en ligne] Lien : <https://link.springer.com/article/10.1007/s12011-019-01745-z#citeas> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

AmoabengNti AA, Arko-Mensah J, Botwe PK, Dwomoh D, Kwarteng L, Takyi SA, Acquah AA, Tettey P, Basu N, Batterman S, Robins TG, Fobil JN., 2020. *Effect of Particulate Matter Exposure on Respiratory Health of e-Waste Workers at Agbogbloshie, Accra, Ghana*. [en ligne] International Journal of Environmental Research and Public Health. Lien : <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/9/3042#cite> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Decharat, S., & Kiddee, P., 2020. *Health Problems Among Workers Who Recycle Electronic Waste in Southern Thailand*. [en ligne] Osong Public Health and Research Perspectives, 11, pp.34 – 43. Lien : <https://www.semanticscholar.org/paper/Health-Problems-Among-Workers-Who-Recycle-Waste-in-Decharat-Kiddee/2ec000ef544ccb19edfb051accdb0829f9732588> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Seith R, Arain AL, Nambunmee K, Adar SD, Neitzel RL., 2019. *Self-Reported Health and Metal Body Burden in an Electronic Waste Recycling Community in Northeastern Thailand*. [en ligne] J Occup Environ Med. Lien : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31464817/> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Davis JM, Garb Y, 2019. *A strong spatial association between e-waste burn sites and childhood lymphoma in the West Bank, Palestine*. [en ligne] Int J Cancer. Lien :

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30259977/> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Haoxing Cai, Xijin Xu, Yu Zhang, Xiaowei Cong, Xueling Lu, Xia Huo, 2019. *Elevated lead levels from e-waste exposure are linked to sensory integration difficulties in preschool children*. [en ligne] NeuroToxicology, Volume 71. Lien : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0161813X18303905> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Nithya, R., Sivasankari, C. & Thirunavukkarasu, A., 2021. *Electronic waste generation, regulation and metal recovery: a review*. [en ligne] Environ Chem Lett 19, pp.1347–1368. Lien : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-020-01111-9#citeas> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

International Labour Organisation - ILO, 2017. *Global estimates of child labour: results and trends, 2012–2016*. [en ligne] Lien : https://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS_575499/lang--en/index.htm [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Rediscoverycentre.ie. n.d. *Qualifying and Quantifying the Reuse Sector | Rediscovery Centre*. [en ligne] Lien : <http://www.rediscoverycentre.ie/research/q2reuse/> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Ina Rüdenauer, Siddharth Prakash, 2020. *Ökonomische und ökologische Auswirkungen einer Verlängerung der Nutzungsdauer von elektrischen und elektronischen Geräten*. [en ligne] Öko-Institut und VZBV. Lien : https://www.vzbv.de/sites/default/files/downloads/2020/11/25/vzbv_verlaengerung_nutzungsdauer_20201218_mit_engl.pdf [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Recommendations

Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño, 2018 : *Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in*

the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. Lien : <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021]

Climatewatchdata.org. 2021. | *Greenhouse Gas (GHG) Emissions | Climate Watch*. [en ligne] Lien : <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=regions-ABSOLUTE_VALUE&end_year=2018®ions=EUU%2CGBR%2CWORLD&source=PIK&start_year=1850> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Daniel Moran, KGM & Associates, Ali Hasanbeigi and Cecilia Springer, Global Efficiency Intelligence, 2018. *THE CARBON LOOPHOLE IN CLIMATE POLICY Quantifying the Embodied Carbon in Traded Products*. [en ligne] Lien : <<https://www.climateworks.org/wp-content/uploads/2018/09/Carbon-Loophole-in-Climate-Policy-Final.pdf>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Carbon Brief. 2017. *Mapped: The world's largest CO2 importers and exporters - Carbon Brief*. [en ligne] Lien : <<https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds-largest-co2-importers-exporters>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Bordage, F., de Montenay, L., Benqassem, S., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Prunel, D., Vateau, C. and Lees Perasso, E., GreenIT.Fr. 2021. *Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie*.

IDH - the sustainable trade initiative. 2020. *Hidden CO2 emissions: Europe's imported responsibility - IDH - the sustainable trade initiative*. [en ligne] Lien : <<https://www.idhsustainabletrade.com/news/hidden-co2-emissions-europes-imported-responsibility/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

www.idhsustainabletrade.com/news/hidden-co2-emissions-europes-imported-responsibility/ [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

International Labour Organisation – Geneva: ILO, 2018. *World Employment and Social Outlook 2018: Greening with jobs*. [en ligne] Lien : <http://oit.org/global/publications/books/WCMS_628654/lang--en/index.htm> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Philippe Bihouix, Emiline Baume de Brosse, Geneviève Besse, Fabrice Bonnifet, Marc Darras, Thomas Désaunay, Jean-Marc Gancille, Amandine Garnier, Thierry Groussin, Thomas Guillermou, Arthur Keller, Catherine Lapierre, Dominique Py, Sandrine Roudaut, Agnès Sinai, Mathilde Soyer, Bruno Tassin, Arnaud Vanhove, Dominique Viel, 2019. *Vers des technologies sobres et résilientes – Pourquoi et comment développer l'innovation « low-tech » ?*. [en ligne] Lien : <<https://www.lafabriqueecologique.fr/vers-des-technologies-sobres-et-resilientes-pourquoi-et-comment-developper-linnovation-low-tech/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Eurostat. 2021. [en ligne] Lien : <https://ec.europa.eu/eurostat/product?code=isoc_ci_in_h&mode=view&language=EN> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Eurostat. 2021. [en ligne] Lien : <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/lfst_hhnhtych/default/table?lang=en> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

GreenConcept Innovation. n.d. *Témoignages - GreenConcept Innovation*. [en ligne] Lien : <<http://www.greenconcept-innovation.fr/temoignages/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Greenconcept-innovation.fr. 2021. *ELA INNOVATION : RÉDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UN SERVICE NUMÉRIQUE (OPÉRATION GreenConcept) - MONTPELLIER (34)*. [en ligne] Lien : <http://www.greenconcept-innovation.fr/wp-content/uploads/2020/02/ELA_INNOVATION_fiche_Ademe_GreenConcept2409.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Greenconcept-innovation.fr. 2021. *REDUCTION*

DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UN SERVICE NUMÉRIQUE DANS LE CADRE DE L'OPERATION GREENCONCEPT. [en ligne] Lien : <http://www.greenconcept-innovation.fr/wp-content/uploads/2020/02/PriceComparator_fiche_Ademe_GreenConcept2108.pdf> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

European Commission. 2020. *Shaping Europe's numérique future - Broadband Coverage in Europe 2019.* [en ligne] Lien : <<https://numérique-strategy.ec.europa.eu/en/library/broadband-coverage-europe-2019>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Koomey, J. and Taylor, J., 2017. *Zombie/Comatose Servers Redux.* [en ligne] Lien : <<https://www.anthesisgroup.com/report-zombie-and-comatose-servers-redux-jon-taylor-and-jonathan-koomey/>> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].

Norvig, Peter et al., 2009. *The Unreasonable Effectiveness of Data.* [en ligne] Lien : <https://www.researchgate.net/publication/224396640_The_Unreasonable_Effectiveness_of_Data> [Consulté le 1^{er} octobre 2021].



THE GREENS/EFA
in the European Parliament

60 rue Wiertz
1047 Bruxelles, Belgique
www.greens-efa.eu
contactgreens@ep.europa.eu