



**HAL**  
open science

## La place du numérique dans la transition énergétique

Gilles Guerassimoff

► **To cite this version:**

Gilles Guerassimoff. La place du numérique dans la transition énergétique. Annales des mines - Série Responsabilité et environnement, 2023, Transitions énergétique et numérique (110), pp.52-56. hal-04058119

**HAL Id: hal-04058119**

**<https://hal.science/hal-04058119v1>**

Submitted on 4 Apr 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# La place du numérique dans la transition énergétique

Par Gilles GUÉRASSIMOFF

Professeur à l'École des Mines de Paris  
au Centre de mathématiques appliquées (CMA)

La transition énergétique est sur tous les fronts pour œuvrer à la limitation des effets du changement climatique. Le numérique est un candidat qui semble tout désigné pour contribuer à l'aboutissement de cette transition, vu l'adéquation entre l'urgence climatique et le dynamisme du développement du secteur. Pour tenter d'évaluer la place du numérique dans la transition énergétique, il est important de définir en premier lieu le périmètre de la notion de numérique. Ensuite, il est nécessaire de quantifier son impact énergétique pour évaluer les applications qui seront bénéfiques à cette transition. Enfin, il ne faut pas occulter les risques et les limites de son déploiement. Quelques exemples sont évoqués pour illustrer les domaines privilégiés de son application.

## Introduction

Le numérique prend une place de plus en plus importante dans notre société. Il est souvent d'une aide précieuse dans de nombreux domaines du quotidien, tous secteurs confondus. Ses applications sont encensées quand on pense aux progrès médicaux ou industriels qui en découlent. Néanmoins, elles peuvent être critiquées lorsque leur usage est exacerbé jusqu'à l'addiction, comme avec les jeux vidéo ou les réseaux sociaux.

Au-delà de l'intérêt et des écueils du numérique dans ses applications, que peut-on dire de la place qu'il occupe dans la transition énergétique que nous vivons actuellement ? Tout d'abord, il faut bien définir ce que l'on entend par numérique, afin d'avoir une grille de lecture commune. Ensuite, il s'agira d'évaluer sa place dans la transition énergétique. Nous désignerons cette transition par l'ensemble des transformations concernant les systèmes de production, les transports et l'usage de l'énergie dans le but d'une réduction de leur impact environnemental et de les rendre durables. Enfin, il ne faut pas oublier d'évoquer les risques et les limites inhérents au déploiement de ces technologies (Association Événement OSE, 2023).

## Qu'est-ce que le numérique ?

Depuis l'avènement de l'ordinateur au sortir de la Seconde Guerre mondiale grâce aux travaux de Von Neumann et Turing, les progrès n'ont cessé de croître suivant une loi de Moore prévoyant un doublement de la puissance de calcul tous les deux ans. Même si cette loi est aujourd'hui controversée, l'explosion des puissances de calcul n'est plus à prouver et a permis des développements toujours plus intensifs en termes de création et de transfert de données. De la création du

Web à l'élaboration de maquettes numériques à partir des *Big Data*, l'usage des données croît exponentiellement. Dans ce contexte, le déploiement du numérique et de son environnement a-t-il réellement un impact global bénéfique sur la transition énergétique ?

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à cette question, il est important de définir ce que l'on entend par le terme générique de « numérique ». Les technologies de l'information et de la communication engendrent une quantité de données et un trafic de celles-ci qui sont tous deux en croissance exponentielle. On exprime ces données numériques en bits (0 ou 1, unité la plus petite associée au transfert de l'information) ou en octets (en bytes de 8 bits, unité la plus petite de stockage de l'information). Passant d'un échange de 100 GB<sup>1</sup> de données par jour en 1992 à plus de 150 000 GB par seconde en 2022, la création de données est passée de 12 ZB<sup>2</sup> en 2015 à 47 ZB en 2020 et pourrait atteindre plus de 2 000 ZB en 2035 (Buss *et al.*, 2019 ; CISCO, 2022).

Ces données sont soit produites par des calculateurs, soit récoltées *via* des capteurs. Elles sont ensuite transportées et stockées afin de les valoriser, puis les échanger à nouveau. Toutes ces étapes demandent de disposer d'infrastructures lourdes (capteurs, ordinateurs, postes centraux, armoires de rue, lignes aériennes et souterraines, antennes, serveurs, sites spécifiques ou intégrés...). Tous ces composants ont un impact sur l'environnement tant au niveau de leur construction que de leur usage, notamment la nécessité de disposer de grandes quantités d'énergie.

<sup>1</sup> GB : gigabytes ou gigaoctets, soit 10<sup>9</sup> octets. Attention à ne pas confondre avec Gb, ou Gigabit : 1 GB étant égal à 8 Gb.

<sup>2</sup> ZB : zettabytes ou zettaoctets, soit 10<sup>21</sup> octets.

Technologie	Débit théorique <sup>a</sup>	Consommation annuelle moyenne par ligne (kWh) <sup>b</sup>
ADSL	100 Mbit/s descendant 40 Mbit/s montant	16
Fibre	100 Mbit/s à plusieurs Gbit/s symétrique	5

<sup>a</sup> ARCEP (2022).

<sup>b</sup> Fédération française des télécoms (2020).

Débits théoriques et consommations d'énergie selon les différentes générations de technologies.

## Les réseaux

La partie la plus diffuse de cette infrastructure est la partie Réseaux. En effet, elle permet de relier tous les éléments entre eux, sur toute la planète, de la production des données jusqu'à leur usage terminal. Nous faisons ici référence aux réseaux filaires historiques qui ont été développés pour les télécommunications et qui ont été progressivement transformés, passant des paires de lignes de cuivre<sup>3</sup>, d'une efficacité limitée par des atténuations plus ou moins fortes selon les distances parcourues, à la fibre optique, qui offre des débits 100 fois supérieurs et qui ne subit aucune altération du signal sur de très longues distances. Ces lignes<sup>4</sup> qui relient les différents continents représentent les dorsales de tout échange d'information, en plus des compléments satellitaires. Dans les années 1980, des réseaux sans fil font leur apparition, d'abord pour le transport de la voix. Puis, rapidement, l'augmentation des performances des différentes générations<sup>5</sup> de technologies sans fil leur ont permis de transporter des volumes importants de données et ainsi de concurrencer la fibre optique pour les applications de courte distance. Ces technologies sans fil demandent aussi de disposer d'un maillage fin du territoire au travers d'antennes et de serveurs dédiés.

Ces deux réseaux cohabitent pour assurer la production et l'échange de toutes ces données numériques, en quasi-temps réel selon les applications.

Évaluons maintenant les consommations énergétiques liées au transit et au stockage de ces données.

Les progrès réalisés dans ces technologies ont permis une réduction drastique de la consommation d'énergie par octet transporté. Dans les réseaux fixes, il a

<sup>3</sup> xDSL (x Digital Subscriber Line : ADSL, HDSL, VDSL...) : technologies de transmission de l'information par ligne de cuivre, permettant l'émission et la réception de données sur des distances de quelques kilomètres avec des débits maximaux de quelques dizaines de Mbit/s.

<sup>4</sup> Pour la cartographie de toutes les lignes sous-marines en activité sur la planète, voir : <https://www.submarinecablemap.com/>

<sup>5</sup> Les différentes générations de technologies sans fil (GSM, UMTS, LTE et, dernièrement, MU-MIMO) sont nommées par leur ordre d'apparition (1G, 2G, ..., 5G...), passant de 1,9 Mbit/s pour la 2G à 10 Gbit/s pour la 5G, et les 1 000 Gbit/s sont envisagés pour la future 6G, dont l'arrivée sur le marché est annoncée aux alentours de 2028.

Génération	Débit théorique <sup>a</sup>	Consommation énergétique (kWh/Go) <sup>b</sup>
2G	1,9 Mbit/s	37
3G	42 Mbit/s	2,9
4G	1 Gbit/s	0,6
5G	10 Gbit/s	0,06

<sup>a</sup> PENDARIES (2022).

<sup>b</sup> Fédération française des télécoms (2020).

ainsi été possible de diviser par trois la consommation moyenne par ligne entre 2015 et 2020, tandis que l'évolution des réseaux mobiles a permis une division par sept de l'énergie consommée par gigaoctet.

Les tableaux ci-dessus montrent les différences de débits et d'énergie consommées selon les différentes technologies. Les chiffres et les périmètres de comptage sont nombreux ; il est dès lors impossible de donner un chiffre exact. Selon une analyse des articles scientifiques réalisée par Aslan (Aslan *et al.*, 2018) et par extrapolation, le transport sur le réseau d'un Go demandait en moyenne en 2019 une consommation d'énergie de 0,01 kWh. Cette énergie représentait alors 16 % de la consommation du numérique.

Néanmoins, le trafic augmente plus vite que la baisse des consommations unitaires, montrant ainsi une progression de la part des consommations du numérique dans la consommation globale d'électricité. Le taux de croissance annuel des utilisateurs du réseau a été évalué par Cisco à 6 %, soit une prévision de 5,3 milliards d'utilisateurs en 2023 (CISCO, 2022).

L'utilisation des réseaux est donc un élément central de la consommation énergétique du numérique qui croît avec le nombre des utilisateurs et des équipements reliés.

## Serveurs et équipements

De part et d'autre du réseau, nous avons deux grandes catégories d'équipements : les *data centers* pour le stockage et les calculs centralisés, et les équipements terminaux.

Les *data centers* requièrent une attention particulière, car ils concentrent de nombreux équipements informatiques (serveurs de données et de calcul, alimentations redondantes...). Ces composants dégagent en chaleur la quasi-totalité de l'énergie qu'ils consomment, un problème majeur se pose pour assurer leur fonctionnement en toute sécurité, celui de leur refroidissement. Ces contraintes ainsi que le besoin d'une bonne répartition de ces centres pour assurer un temps de latence minimal au regard des capacités de connexion locale contraignent le *design* et le déploiement des *data centers*. Ces centres sont de toutes tailles, allant de simples pièces pour les accueillir au sein d'entreprises

aux bâtiments dédiés de plusieurs millions de mètres carrés.

Les études quantifiant l'énergie nécessaire pour alimenter ces centres sont nombreuses (Malmodin *et al.*, 2018 ; The Shift Project, 2020) et présentent des disparités, car la méthodologie de comptage et la définition du périmètre ne sont pas encore complètement normalisées (IEA 4 EDNA, 2022a). Au niveau mondial, cette énergie représentait en 2019 de 200 à 900 TWh selon les études. À ces consommations doit être ajoutée l'énergie dédiée au minage des cryptomonnaies (qui pourrait représenter 60 TWh) (Bergmark *et al.*, 2021).

Même si de gros efforts sont faits pour améliorer l'efficacité énergétique de ces systèmes, la demande en supercalculateurs (qui résulte du déploiement du calcul haute performance) est en constante augmentation. Les performances de calcul s'expriment aujourd'hui en exaflops<sup>6</sup>, ce qui correspond à la puissance nécessaire pour le développement, par exemple, des modèles d'IA (Wu *et al.*, 2022). Ces calculateurs, dont la puissance électrique nécessaire à leur alimentation peut atteindre près de 30 MW (à l'instar du super computer Fugaku), augmentent les contraintes pesant sur les *data centers*. Ils requièrent en effet une réduction du taux des pannes tolérées ou des connexions en temps réel. Néanmoins, une attention particulière est à porter à la conception de ces calculateurs pour en améliorer l'efficacité énergétique (ou leur PUE (Power Usage Effectiveness)) et ainsi accroître les performances des nouvelles générations (DATA4, 2021).

Nous constatons de ce côté du réseau que la centralisation des moyens contribue à une amélioration de l'efficacité énergétique, permettant ainsi de modérer leur impact au regard de la croissance de la demande. Regardons maintenant ce que représente l'incidence énergétique de l'autre côté des réseaux au regard de la profusion des équipements qu'ils permettent de connecter.

Des milliards d'équipements sont connectés au réseau (ordinateurs individuels, TV, tablettes, *smartphones* et autres équipements du quotidien). De 17 milliards d'objets en 2018, nous sommes passés à près de 30 milliards en 2023. (CISCO, 2022 ; IEA 4 EDNA, 2022b). La consommation unitaire de ces d'équipements en fonction de leur type et de leur usage s'échelonne de 5 à 300 kWh/an, représentant au total plus de 150 TWh en 2022. À ces équipements vient s'ajouter une nouvelle catégorie en très forte croissance liée à l'Internet des objets (IoT)<sup>7</sup>. Elle englobe tous les objets qui par leur fonction nécessitent une connexion au réseau et qui, en outre, doivent être alimentés. Leur consommation en 2020 a été estimée à plus de 60 TWh. Cependant, les prévisions montrent un accroissement de leur efficacité, qui va permettre de compenser en partie leur large

<sup>6</sup> Exaflops : unité qualifiant la rapidité de calcul des ordinateurs et correspondant à 10<sup>18</sup> flops (*floating operation per second*, ou opération de calcul en virgule flottante par seconde).

<sup>7</sup> IoT (Internet of Thing) : l'Internet des objets représente une constellation d'objets connectés au réseau qui permet la collecte d'informations émanant d'autres équipements et le contrôle de ces derniers.

déploiement ; il est ainsi prévu de passer le nombre des objets de contrôle de 7 milliards en 2020 à plus de 20 milliards en 2030 (IEA 4 EDNA, 2022c, 2021 ; IOT Analytics, 2022).

Le numérique, tel que nous venons de le définir, s'accompagne d'une consommation d'énergie allant toujours croissant en dépit des efforts d'efficacité réalisés à tous les niveaux de la chaîne. La demande exponentielle d'équipements connectés est à l'origine de cette constante augmentation. Les répercussions ne se résument pas uniquement à l'énergie consommée, mais se font aussi sentir au niveau des matières premières entrant dans la composition de tous ces composants, venant alourdir leur bilan environnemental lorsque l'on regarde les analyses de leur cycle de vie.

Alors quelle est la place de ce numérique dans la transition énergétique ? Quels sont les usages et les bonnes pratiques qui peuvent contribuer à l'accélération de cette transition ?

## Les applications à la transition énergétique

On peut citer trois grands domaines du numérique profitant à la transition énergétique, il s'agit du *Big Data*, de l'intelligence artificielle (IA) et de la *blockchain*. En effet, la combinaison de ces trois domaines est source de nombreuses applications en faveur de cette transition (Ferrebœuf, 2019 ; Roussilhe, 2021 ; The Shift Project, 2020).

Le vecteur électrique est un bon exemple d'illustration des bénéfices liés aux progrès du numérique. Le besoin de modularité sur les réseaux électriques devient prépondérant avec la part croissante de la production renouvelable non pilotable et la gestion des pics de consommation. Des solutions de flexibilité, comme les effacements, peuvent être pilotées grâce au *Big Data* et à l'IA. La gestion des stockages diffus, comme l'eau chaude sanitaire, les véhicules électriques, mais également l'utilisation d'électrolyseurs facilitent aussi une meilleure valorisation des productions renouvelables. Le traitement de données toujours plus abondantes améliore la prévisibilité de la ressource. Par ailleurs, les supercalculateurs accroissent l'efficacité des modèles météorologiques et climatiques. Un autre usage du numérique, par le biais du comptage individuel (*smart metering*), permet d'envisager de nouveaux modèles économiques : par exemple, le déploiement d'une tarification dynamique peut assurer une meilleure fluidité dans l'adéquation entre l'offre et la demande sur les réseaux électriques. Toujours dans le domaine du comptage et de l'intégration des objets connectés, la gestion technique centralisée en coordonnant le contrôle des équipements œuvre à une meilleure efficacité énergétique dans les bâtiments ou les procédés industriels. Enfin, la sécurisation et le partage de l'information se prêtent à l'optimisation de bien d'autres domaines d'application, comme la logistique, l'agroalimentaire et même au sein du secteur énergétique.



La *blockchain*, par l'absence d'intermédiaires dans les transactions, permet d'envisager dans le domaine de l'énergie de nouveaux modèles plus sobres : développement du rôle des prosommateurs (ou consommateurs) (EEA, 2022) ; facilitation de l'autoconsommation (Ecochain<sup>8</sup>, Ethereum<sup>9</sup>) ou encore incitation à l'usage des technologies solaires (Solarcoin<sup>10</sup>). Pour que cette technologie puisse se développer plus largement, il est impératif que les validations des transactions par minage (les preuves) changent de concept. En effet, la méthode standard (Proof of work) peut demander une consommation d'énergie pouvant aller jusqu'à 700 kWh par transaction, ce qui efface complètement l'intérêt de la *blockchain* pour les applications précédemment citées. Le passage récent à une méthode de preuve d'enjeu (Proof of stake) pourrait permettre de réduire la consommation à moins de 10 kWh par transaction (CCRI, 2022), ce qui permettrait d'envisager une utilisation plus sobre.

La réduction de l'usage des énergies fossiles grâce à l'électrification des procédés industriels nous fait entrer dans l'ère de l'industrie 4.0, qui devient possible, d'une part, grâce au couplage de l'instrumentation par les objets connectés et, d'autre part, par l'utilisation de codes de calcul performants. Ces évolutions permettent d'envisager l'usage de méthodes d'IA pour procéder à des calculs en temps réel, ainsi qu'à l'identification des problèmes au travers de maquettes numériques et du calcul distribué. Ces modèles sont, par exemple, utilisés pour assurer une maintenance prédictive aboutissant à une réduction des consommations globales des systèmes. Nous pouvons aussi citer la généralisation du télétravail, des téléconsultations, de la téléchirurgie et de l'usage de la réalité augmentée. Tous ces exemples témoignent de la réduction de l'impact environnemental de chacune des applications correspondantes grâce à l'usage du numérique.

Pour que l'effet du numérique reste bénéfique, il faut cependant veiller à respecter de bonnes pratiques, notamment en se fiant aux analyses des cycles de vie des différents équipements. Ces pratiques doivent se mettre en place dès l'acquisition des équipements, en se référant notamment aux différents labels certifiant la prise en considération de l'impact environnemental de leur conception et de leur fabrication (écolabel, l'ange blue ou energy star)<sup>11</sup>.

Une fois l'équipement certifié choisi, la question de l'impact de son usage se pose. Il faut veiller à éviter le sous- ou le suréquipement afin de maximiser l'usage des appareils correspondants. Ces considérations peuvent jouer sur le choix entre l'acquisition de matériels neufs ou de matériels reconditionnés. Durant leur utilisation, une optimisation de la gestion énergétique pourrait également permettre une économie de 25 % sur le plan de la consommation d'énergie.

<sup>8</sup> <https://ecoc.io/>

<sup>9</sup> <https://ethereum.org/fr/>

<sup>10</sup> <https://solarcoin.org/>

<sup>11</sup> Ces labels institutionnels ou privés sont définis au niveau national ou européen.

Quant à la fin de vie de ces équipements, l'application de la règle des trois R (réduire, réutiliser et recycler) permettrait de minorer encore plus leur impact matière sur leur cycle de vie complet. Une analyse de l'obsolescence qu'elle soit technique, logicielle ou économique contribue à un meilleur amortissement des équipements. Pour aider à œuvrer dans ce sens, un indice de réparabilité a également été défini.

Le numérique, s'il est utilisé sans s'affranchir des bonnes pratiques que nous venons d'énoncer, s'avère être un atout indispensable pour être en mesure de réaliser une transition énergétique en phase avec l'urgence climatique. Néanmoins, l'explosion du numérique n'est pas sans risques et présente certaines limites qu'il est important de mentionner.

## Risques et limites

Tout d'abord, la centralisation des données au sein d'un petit nombre d'entreprises, plus précisément les GAFAM<sup>12</sup>, permet des avancées considérables pour tendre vers une neutralité carbone du numérique. Les connaissances acquises, grâce au développement d'algorithmes performants basés sur toutes les données recueillies, leur donnent une légitimité de plus en plus importante dans le monde de l'énergie (présence accrue sur les marchés, une offre d'outils d'information plus large, aide aux énergéticiens en matière de prévision...). Néanmoins, ces effets bénéfiques pourraient engendrer des dérives inquiétantes. En effet, l'hégémonie des GAFAM dans le numérique pourrait s'étendre à la fourniture d'énergie, ce qui fragiliserait la sécurité des États. En effet, leur accès à des domaines touchant à la protection des données et à la cybersécurité dans l'industrie énergétique, combiné à l'extraterritorialité des lois américaines (Cloud Act, 2018<sup>13</sup>), représenterait une réelle menace pour la souveraineté des États.

Les ressources naturelles nécessaires à la production de tous les composants du numérique sont considérables. Toutes les analyses de cycle de vie les concernant s'accordent sur ce constat (Malmodin *et al.*, 2018).

De plus, certains minerais rares indispensables à la filière peuvent engendrer de grandes tensions sur les ressources. Quelles soient de nature environnementale, économique ou géopolitique, ces tensions viennent réduire le bilan positif du numérique au regard de la transition.

Enfin, comme dans tout développement de nouvelles technologies, les effets rebond (GDS CNRS, 2022 ; Nuageo, 2021) sont inévitables. Dans le numérique, l'exemple du streaming vidéo (60 % du trafic) est édifiant. Son usage s'est amplifié et devient compulsif au travers du développement de technologies de plus en plus performantes qui génèrent de nouveaux besoins. Qu'il soit matériel, économique, structurel ou psychologique, l'effet rebond vient irrémédiablement réduire l'impact positif initialement envisagé.

<sup>12</sup> GAFAM : Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft.

<sup>13</sup> <https://www.justice.gov/criminal-oia/cloud-act-resources>

## Conclusion

Le numérique tel que nous l'avons défini est indiscutablement un accélérateur de la transition énergétique. Pour optimiser son impact, il faut veiller à maîtriser son déploiement en intégrant dès la conception des équipements des analyses de cycle de vie pour en limiter l'impact environnemental. Il est également impératif d'informer et d'éduquer les utilisateurs afin qu'ils aient conscience de l'impact de leur usage quand celui-ci devient futile.

## Bibliographie

- ARCEP (2022), « Grands dossiers/Réseaux fixes », <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-fixes.html>
- ASLAN J., MAYERS K., KOOMEY J. G. & FRANCE C. (2018), "Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates", *Journal of Industrial Ecology* 22, pp. 785-798, <https://doi.org/10.1111/jiec.12630>
- ASSOCIATION ÉVÉNEMENT OSE (2023), « La place du numérique dans la transition énergétique », coll. « Énergie et développement durable », Presses des Mines, Paris (à paraître).
- BERGMARK P., STEPHENS A. & KAMIYA G. (2021), "Assessing the net climate impact of digitalization", CONNECT University Summer School 2021: Digital for our Planet, 81.
- BUSS S., NÖLDEKE G., BECKER D., BLUMTRITT C., DANIELS M. & STRIAPUNINA K. (2019), *Digital Economy Compass*.
- CCRI (2022), "The Merge – Implications on the Electricity Consumption and Carbon Footprint of the Ethereum Network".
- CISCO (2022), "Cisco Annual Internet Report (2018-2023)", White Paper No. c11-741490.
- DATA4 (2021), "What is PUE? (Power Usage Effectiveness)", DATA4 – Smart Data Centers at Scale, <https://www.data4group.com/en/datacenter-dictionary/what-is-pue/>
- EEA (2022), "Energy prosumers in Europe – Citizen participation in the energy transition", Publication n°01/2022.
- FÉDÉRATION FRANÇAISE DES TÉLÉCOMS (2020), « Étude économique 2020 – Les Télécoms : premiers acteurs du numérique ».
- FERREBOEUF H. (2019), « Lean ICT – Pour une sobriété numérique », *Futuribles* 429, 15, <https://doi.org/10.3917/futur.429.0015>
- GDS CNRS (2022), « Effets rebond du numérique », *Ecoinfo, pour une informatique éco-responsable*, <https://ecoinfo.cnrs.fr/thematiques/consequences-du-numerique/effets-rebond-du-numerique/>
- IEA 4 EDNA (2022a), *Energy Efficiency Metrics for Data Centres*, Electronic Device & Networks Annex EDNA.
- IEA 4 EDNA (2022b), *Mobile device efficiency*, Electronic Device & Networks Annex EDNA.
- IEA 4 EDNA (2022c), *Total Energy Model*, 4E Energy Efficient End-use Equipment, <https://www.iea-4e.org/edna/tem/>
- IEA 4 EDNA (2021), *Harnessing IoT for Energy Benefits*, Electronic Device & Networks Annex EDNA, Paris.
- IOT ANALYTICS (2022), *State of IoT 2022: Number of connected IoT devices growing 18% to 14.4 billion globally. IoT Analytics*, <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- MALMODIN J., BERGMARK P. & MATINFAR S. (2018), "A high-level estimate of the material footprints of the ICT and the E&M sector", in "EPIc Series in Computing", presented at the *ICT4S2018 – 5<sup>th</sup> International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability*, EasyChair, pp. 168-186, <https://doi.org/10.29007/q5fw>
- NUAGEO (2021), « Confort marginal et usages raisonnés dans le numérique », *L'atelier du numérique responsable*, <https://nuageo.fr/2021/11/confort-marginal-usages-raisonnes-numerique/>
- PENDARIES C. (2022), « Réseaux mobiles : connaissez-vous les différences entre 2G, 3G, 4G et 5G ? », *Échos du Net*, <https://www.echosdunet.net/dossiers/reseaux-mobiles-differences-entre-2g-3g-et-4g>
- ROUSSILHE G. (2021), *Que peut le numérique pour la transition écologique ?*
- THE SHIFT PROJECT (2020), « Déployer la sobriété numérique ».
- WU C.-J., RAGHAVENDRA R., GUPTA U., ACUN B., ARDALANI N., MAENG K., CHANG G., BEHRAM F. A., HUANG J., BAI C., GSCHWIND M., GUPTA A., OTT M., MELNIKOV A., CANDIDO S., BROOKS D., CHAUHAN G., LEE B., LEE H.-H. S., AKYILDIZ B., BALANDAT M., SPISAK J., JAIN R., RABBAT M. & HAZELWOOD K. (2022), "Sustainable AI: Environmental Implications, Challenges and Opportunities", *Proceedings of the 5<sup>th</sup> MLSys Conference*, Santa Clara, CA, USA 19.