

Séance du 29 avril 2024

## La sobriété pour un monde numérique soutenable : défis, limites et solutions

Michel ROBERT

Professeur à l'Université de Montpellier  
Directeur du Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur  
Membre de l'Académie des Sciences et des Lettres de Montpellier

---

### MOTS CLÉS

Numérique, informatique, microélectronique, impacts environnementaux, sobriété, données, calculs, sciences, technologies, innovation, souveraineté, objets connectés.

### RÉSUMÉ

L'objectif de cette contribution est d'expliquer le contexte et les enjeux du monde numérique, d'identifier les limites des technologies et de leurs usages, d'alerter sur les dérives actuelles, et d'ouvrir quelques perspectives pour un monde numérique plus responsable et soutenable.

---

## 1. L'émergence du monde numérique

Le monde numérique est articulé autour d'objets (ordinateurs, smartphones, tablettes...) qui utilisent une représentation binaire (0,1) pour traiter et échanger des données au travers de réseaux. Il fonctionne en s'appuyant sur des terminaux (ordinateurs, tablettes, smartphones, consoles de jeux, écrans, téléviseurs...), des infrastructures (centres de calculs et de données, *data centers*...) et des réseaux de communications fixes et mobiles. Les usages numériques sont multiples : calculer, modéliser, simuler, s'informer, communiquer<sup>1</sup>, partager, se divertir.

L'histoire du monde numérique tel qu'on le connaît aujourd'hui est une histoire de convergences entre plusieurs disciplines (mathématiques et informatique, physique et chimie, microélectronique, télécommunications et multimédias) qui, associées à différentes découvertes en électronique depuis le XIX<sup>e</sup> siècle (tubes, transistors, circuits intégrés...), ont conduit aux ordinateurs, internet, et smartphones (Figure 1). Mais l'histoire du numérique est aussi une histoire de vitesse et d'accélération constante. Les impacts à l'échelle mondiale de l'invention de l'imprimerie, et des révolutions industrielle et électrique s'évaluent en siècles<sup>2</sup>. En comparaison, la révolution numérique

---

<sup>1</sup> Les objets numériques sont-ils des objets de communication ou de connexion des humains ?

<sup>2</sup> Une très brève histoire du temps :

- 10 000 ans, *Homo sapiens* découvre l'agriculture.
- 5 000 ans, naissance de l'écriture sur tablette d'argile puis d'autres supports
- 500 ans, naissance de l'imprimerie
- XIX<sup>e</sup> siècle, basculement vers une société industrielle (énergie, transport...)

s'est propagée en moins d'un demi-siècle, et les outils industriels d'intelligences artificielles génératives ont mis seulement quelques mois pour être plébiscités par des centaines de millions d'utilisateurs.

L'invention du transistor (1947) puis du circuit intégré (1957), et le développement de la technologie CMOS ont conduit l'industrie de la microélectronique à améliorer, au rythme de la loi de Moore, la densité d'intégration et les performances électriques des circuits intégrés sur silicium. On est ainsi passé de quelques transistors intégrés sur une puce de silicium, il y a 60 ans, à plus d'une centaine de milliards aujourd'hui, à des échelles nanométriques pour les systèmes intégrés les plus avancés. On parle de systèmes matériel-logiciel car plusieurs processeurs de calcul programmables sont intégrés sur la même puce. L'impact sur le développement de l'informatique a permis de passer d'un premier ordinateur unique sur la planète, à un ordinateur par pays, pour aboutir aujourd'hui à l'équivalent de plusieurs ordinateurs intégrés dans un smartphone. Ces progrès technologiques ont toutefois des limites en termes d'efficacité énergétique des circuits intégrés CMOS, ce qui conduit à stabiliser les fréquences de fonctionnement des transistors pour limiter la consommation électrique et l'échauffement, ou à ne pas alimenter l'ensemble des transistors d'une même puce en même temps.

Entre la théorie et l'expérimentation, la modélisation et la simulation numériques sont incontournables pour les scientifiques, ce qui crée de nouvelles exigences et des besoins croissants en moyens de calcul intensif (HPC), de données traitées et stockées, ainsi que de trafics réseau. Au début des années 80, l'ordinateur installé au CINES et fabriqué en circuit court par la société IBM avait une capacité de 5 millions d'instructions par seconde. Aujourd'hui, le supercalculateur ADAstra est 10 milliards de fois plus puissant que son prédécesseur de 1980. Les supercalculateurs atteignent des performances qui dépassent l'exaflops<sup>3</sup>, c'est-à-dire un milliard de milliards d'opérations par seconde, avec des consommations énergétiques de plusieurs mégawatts. Compte tenu des besoins en calcul des communautés scientifiques, mais aussi des caractéristiques et des limites des technologies utilisées dans les supercalculateurs actuels, l'évolution des coûts des infrastructures de calcul et les enjeux énergétiques liés à l'exploitation sont à considérer. L'heure est aussi à de nouveaux défis, notamment ceux posés par l'intelligence artificielle (IA) avec des besoins croissants en infrastructures de calcul et de données.

Ces développements, associés à l'émergence des réseaux fixes puis mobiles, ont conduit au développement d'internet et des objets connectés. Aujourd'hui, les données échangées au travers des réseaux sociaux recouvrent les formes les plus diverses : texte, images, vidéos, musique... L'explosion des applications et du nombre d'utilisateurs a conduit à de nouveaux types d'infrastructures comme les *data centers* mutualisés et distribués sur la planète, pour calculer et stocker des données. Depuis une vingtaine d'années, la diffusion massive de ces technologies soulève de nouveaux enjeux comme la sobriété, la souveraineté, la cybersécurité, mais aussi les impacts environnementaux et les pollutions associées au monde numérique et sa réalité physique [1].

---

- XX<sup>e</sup> siècle, basculement vers une société numérique

- XXI<sup>e</sup> siècle, basculement vers une société de transitions (énergétiques, écologiques...);

explosion du nombre d'objets connectés, du volume de données, de l'intelligence artificielle.

<sup>3</sup> Quelques grandeurs physiques du monde numérique : le nanomonde numérique (circuits intégrés) ; Micro 10<sup>-6</sup> Nano 10<sup>-9</sup>; Le monde numérique : Kilo 10<sup>3</sup> Méga 10<sup>6</sup> Giga 10<sup>9</sup> Téra 10<sup>12</sup> Péta 10<sup>15</sup> Exa 10<sup>18</sup> (1 milliard de milliards) Zetta 10<sup>21</sup>

1800 : pile de Volta
1826 : loi d'Ohm
1831 : premier relais électrique
1837 : <i>télégraphe de Morse</i>
1834, calculateur mécanique de Babbage
1847 : lois de Kirchhoff
1854 : algèbre de Boole
1866 : dynamo
1876 : <i>téléphone (Bell)</i>
1904 : la diode, premier tube à vide
1907 : la triode à vide ( <i>Lee de Forest</i> )
1909 : <i>premier central téléphonique automatique</i>
1914 : premiers circuits électroniques
1936 : machine de Turing
1945 : architecture de von Neumann
1946 : ENIAC : <i>premier calculateur électronique</i> (10 <sup>3</sup> instructions/s)
1947 : transistor à pointes germanium (Brattain, Bardeen, Shockley)
1948 : <i>Shannon, théorie de l'information</i>
1954 : transistor silicium (G. Teal, TI)
1959 : circuit intégré (R. Noyce, J. Kilby)
1959 : technologie planar
1959 : transistor à effet de champ (FET) : transistor MOS
1970 : mémoire DRAM 1024 bits Intel (1988 : 4 Mbits)
1971 : microprocesseur 4004 Intel, micro-ordinateur, premier mail @
1980 : microcontrôleur 8 bits <i>Microélectronique CMOS ...</i>
1980 : premier calculateur IBM installé au CNUSC-CINES (10 <sup>6</sup> instructions/s)
1981 : Personal Computer PC 5150 d'IBM
1982 : Minitel, « <i>Médium interactif par numérisation d'information téléphonique</i> »
1984 : Macintosh (Apple)
1989 : <i>Internet, World Wide Web</i>
1990 : microcontrôleur 32 bits
1992 : <i>premier Short Message Service (SMS)</i>
1997 : <i>iphone (Apple)</i>
1999 : <i>internet des objets (IoT)</i>
2022 : ChatGPT (IA générative)
2023 : Supercalculateur ADASTRA au CINES (75 pétaflops)
2024 : 100 milliards de transistors sur une puce, MP-SoC, CPU GPU
2024 : Supercalculateur El Capitan (2 exaflops soit 10 <sup>18</sup> instructions/s)

Figure 1 : Histoire des Sciences et Techniques : convergences électronique, microélectronique, communications, informatique.

## 2. L'explosion du volume des données numériques

Quels que soient nos domaines d'activités – travail, santé, loisirs – nous échangeons, volontairement ou pas, des données numériques qui sont traitées et conservées sur divers

supports (magnétiques, électroniques...) dans les diverses machines à calculer que sont historiquement les ordinateurs et les systèmes électroniques actuels intégrant des processeurs (smartphones, tablettes mais aussi véhicules automobiles, appareils électroménagers...).

Une des conséquences de la diffusion massive des objets numériques interconnectés à l'échelle de la planète est la croissance exponentielle des données échangées sur les réseaux fixes et mobiles, qui conduit à la multiplication de centres de données et de calculs (plusieurs milliers de *data centers* aux USA) énergivores et distribués (*cloud*).

Aujourd'hui, on estime à 328 millions de téraoctets, le nombre de données créées chaque jour (données nouvellement générées, capturées, copiées ou consommées), ce qui représente 120 zettaoctets de données générées en 2023, avec une projection de 181 zettaoctets de données pour 2025 (à comparer à 2 zettaoctets en 2010) [2]. On estime ainsi que 90 % des données mondiales ont été générées au cours des deux dernières années seulement. Les vidéos représentent plus de la moitié du trafic de données internet mondial (54 %), suivies par les réseaux sociaux (13 %) et les jeux (10 %), ces trois catégories, constituant ainsi plus des trois quarts de tout le trafic de données internet. La circulation des données à caractère personnel sur les réseaux sociaux, leur stockage et leur exploitation par des sociétés privées fait l'objet d'un encadrement juridique à l'échelle européenne : le Règlement Général sur la Protection des Données » (RGPD, voir *infra*). Circulation et traitement de ces données sont des enjeux de souveraineté qui deviennent cruciaux face à la domination des GAFAM<sup>4</sup>.

Donnons quelques exemples de données et d'usages de type *streaming* permettant de visionner des vidéos ou d'écouter de la musique sans avoir à télécharger de fichiers :

- *Vidéo* : chaque flux en définition standard utilise 1 Go (gigaoctet =  $10^9$  octets) de données par heure (24 Go par jour). En haute définition, cela représente 3 Go de données par heure (72 Go par jour) et, en ultra HD, 7 Go par heure (168 Go par jour).
- *Musique* : de l'ordre de 2 Mo (mégaoctet =  $10^6$  octets) par morceau de 3 minutes (soit 40 Mo par heure, 960 Mo par jour).
- Le stockage d'un livre numérique sans illustration correspond à quelques dizaines ou centaines de kilooctets, ce qui est très inférieur à une seule photographie numérique. Pourtant le temps d'élaboration n'est pas le même !
- *Photo* : quelques Mo suivant la qualité recherchée. Dans le domaine de la photographie, les appareils à pellicule argentique permettaient de saisir 24 ou 36 photographies, accessibles après un développement chimique en laboratoire. Les appareils se sont ensuite numérisés avec, au départ, une capacité de mémoire réduite, limitant ainsi la qualité et le nombre d'images stockées dans l'appareil. De nos jours, les professionnels recherchant une optique de qualité supérieure font figure d'exception de sorte que les appareils à photo numériques disparaissent dans la mesure où un smartphone est aussi un appareil photo permettant un nombre quasi illimité de photos qui peuvent être instantanément consultées, éditées puis stockées dans le cloud c'est-à-dire dans des *data centers*. Chaque photographie représente plusieurs mégaoctets de mémoire, et il est possible de réaliser de la même manière des vidéos de plusieurs gigaoctets multipliant ainsi l'espace mémoire nécessaire. La diffusion de ces photos et vidéos sur les réseaux sociaux amplifie encore ce phénomène de circulation de données et, en conséquence, son impact environnemental et énergétique (Figure 2).

Quant à savoir quelle est la quantité d'informations pertinentes dans une représentation photographique, le botaniste Francis Hallé, connu pour ses dessins

---

<sup>4</sup> GAFAM = leaders industriels mondiaux actuels du monde numérique et de ses nouveaux usages : Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft

scientifiques naturalistes à travers les forêts du monde entier, explique qu'un croquis peut contenir plus d'information qu'une photographie !

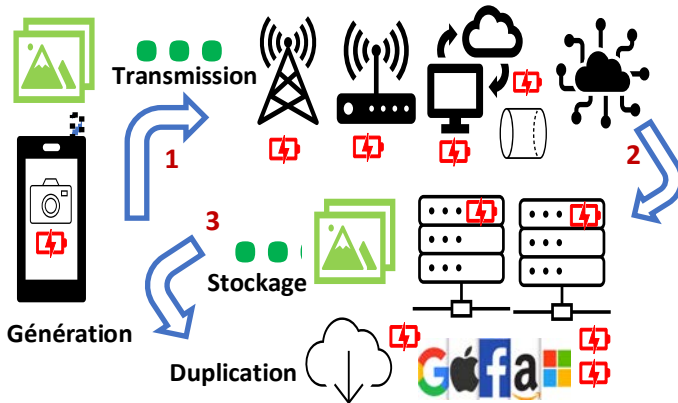


Figure 2 : circulation des données : l'exemple de la transmission d'images. Chaque photographie est stockée dans le smartphone en utilisant ses ressources (batterie, mémoire...) et va pouvoir circuler instantanément par un réseau wifi ou télécom - donc des antennes qui fleurissent partout sur nos toits - pour atterrir dans le *cloud*, c'est-à-dire un serveur hébergé dans un *data center*... et certainement sauvegardé dans un autre serveur en France ou à l'étranger. Elle pourrait ensuite circuler et être dupliquée à nouveau sur les réseaux sociaux et donc à nouveau avec une sollicitation d'infrastructures numériques. Chaque étape à un coût énergétique symbolisé par une batterie.

### 3. Les impacts du monde numérique

Bien avant l'émergence de la société du numérique et des rapports du GIEC, « la planète pillage », l'ouvrage de Fairfield Osborn publié en 1948, nous alertait sur les risques d'épuisement des ressources naturelles [3]. En 1972, le rapport Meadows [4] sur les limites à la croissance dans un monde fini nous a interpellés sur les conséquences écologiques de la croissance économique, compte tenu des ressources limitées et de l'évolution démographique. Le concept de développement durable a alors été évoqué pour concilier les aspects économiques, sociaux et environnementaux. Les constats actuels du GIEC confirment régulièrement la nécessité d'agir sur la cause du changement climatique en réduisant notamment les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES). Plus récemment, en 2022, le groupe de travail conduit par Jean Jouzel a élaboré un rapport intitulé « Sensibiliser et former aux enjeux de la transition écologique et du développement durable dans l'enseignement supérieur » [5], qui a conduit en 2023 au « plan d'action Climat-Biodiversité pour l'Enseignement supérieur et la Recherche au service de la transition écologique ».

Le sujet de l'impact social et écologique des technologies n'est pas nouveau, et la complexité du monde numérique que l'humain a construit pose donc aujourd'hui de nouveaux défis. Parmi ces enjeux, l'évolution des pollutions liées au secteur du numérique devient préoccupante : sa réalité physique, de la fabrication à l'utilisation et à la fin de vie, a un impact environnemental, sociétal et énergétique croissant au vu de nos usages articulés autour des milliards d'objets numériques qui ont été construits :

- Émissions de gaz à effet de serre contribuant au dérèglement climatique et impactant la biodiversité.
- Consommations d'eau et de ressources non renouvelables.

- *Augmentation de l’empreinte énergétique.*
- *Impacts sur la biodiversité de par la pollution des sols, de l’eau et de l’air.*

Dans les quarante dernières années, le défaut de prise en compte des enjeux de développement durable et de responsabilité sociétale, dans un contexte de mondialisation qui a vu le transfert des usines de semi-conducteurs initialement aux États-Unis et en Europe vers l’Asie (Japon, Corée du Sud, Taïwan...), a conduit à négliger les impacts environnementaux et sociétaux sur l’ensemble du cycle de vie des composants électroniques. En particulier, l’obsolescence trop rapide des objets numériques a contribué à créer des quantités de déchets, en l’absence de possibilités ou de moyens efficaces de recyclage. Les objets numériques impactent ainsi l’environnement tout au long de leurs cycles de vie : production, utilisation, fin de vie. Ainsi, le circuit de fabrication d’un smartphone (conception, extraction et transformation de matières premières, fabrication des composants, assemblage, distribution) représente-t-il une distance de l’ordre de quatre fois le tour du monde !

Les transitions numériques et énergétiques sont par ailleurs indissociables et s’inscrivent dans des dimensions locales et globales : des objets connectés aux centres de données, l’énergie et l’utilisation des ressources sont des points essentiels à un déploiement raisonné du numérique. La construction en France des futurs *data centers* sera forcément couplée avec les ressources énergétiques disponibles dans un territoire donné. La Commission européenne a publié en 2020 un rapport sur les « *technologies et politiques efficaces sur le plan énergétique d’informatique en cloud* ». Ainsi, la consommation énergétique annuelle des *data centers* est passée entre 2010 et 2018 de 54 TWh à 77 TWh. D’ici 2025, la moyenne des estimations considère que la consommation en énergie augmentera encore de 25 % pour atteindre 93 TWh. Donc, malgré l’efficacité énergétique croissante des processeurs, l’effet rebond<sup>5</sup> est quasi instantané, compte tenu de la demande croissante en calcul et stockage, ce qui se traduit par une demande énergétique croissante.

L’impact environnemental du numérique est principalement lié à la multiplication des objets connectés distribués et à la création de services énergivores (jeux, vidéos...). Selon l’Union internationale des télécommunications, plus de 8,58 milliards d’abonnements mobiles étaient utilisés dans le monde en 2022, alors que la population mondiale était estimée à 7,95 milliards d’habitants au milieu de l’année [6]. En 2020, l’univers numérique français était constitué d’environ 631 millions d’équipements utilisés par 58 millions de personnes [7], soit une moyenne de 11 équipements par utilisateur<sup>6</sup>. Cet ordre de grandeur souligne que les impacts croissants du monde

---

<sup>5</sup> L’effet rebond caractérise l’augmentation des consommations due à des sauts technologiques amenant à améliorer la performance des équipements, et qui conduisent à de nouveaux objets, de nouvelles applications et de nouveaux usages ayant pour conséquence non pas de diminuer, mais d’augmenter les impacts environnementaux du numérique à l’échelle de la planète. Cela se traduit par une augmentation préoccupante du volume de données échangées et donc par une augmentation de la consommation électrique globale du numérique. Il est par ailleurs indispensable de développer une distance suffisante et une robustesse à l’obsolescence psychologique, laquelle conduit à changer trop souvent les équipements numériques.

<sup>6</sup> Quelques chiffres à l’échelle de la planète ADEME (2021, [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)) :

- Équipements numériques : 34 milliards ; smartphones : 3,5 milliards ; ordinateurs : 1,4 milliard ; 19 milliards d’objets connectés (48 en 2025)
- 1.1 milliard d’équipements réseaux ; 10 millions d’antennes relais (2G à 5G) ; *data centers* 67 millions de serveurs
- 80 % des flux de données internet sont des vidéos ; en 1 h : 10 milliards de mails, 180 millions de recherches.

numérique sont principalement liés, depuis une quarantaine d'années, à la progression de la production du nombre d'objets. Un smartphone permet de mutualiser aujourd'hui plusieurs services : téléphone, musique, vidéos, photos, GPS, jeux, navigation internet... La multiplication des objets numériques et leurs changements trop fréquents ont par ailleurs pour effet de créer des redondances entre les services offerts mais aussi de conduire à la désaffection de dizaines de millions d'objets qui dorment dans des tiroirs... Les objets connectés se multiplient à une vitesse vertigineuse (plusieurs dizaines de milliards au niveau mondial) : caméras, détecteurs de présence, assistants vocaux, écouteurs connectés, montres, drones, compteurs communicants, capteurs de données...

Les impacts négatifs sur les humains se situent de l'amont (extraction des matériaux) à l'aval (gestion des déchets) avec pour conséquence des enjeux liés à la santé, à des conflits géopolitiques liés aux pénuries de ressources, ou encore l'exploitation d'êtres humains (travail forcé, recours à une main-d'œuvre enfantine, absence de dispositifs de protection dans des environnements nocifs pour la santé). Par ailleurs, un usage trop intensif d'objets et d'usages numériques peut conduire à des problèmes de santé mentale, affectant notamment les enfants et les adolescents immergés dans des espaces virtuels.

### 3.1 Impacts de la fabrication des objets numériques

Il faut extraire d'énormes quantités de minerais<sup>7</sup> [8] pour fabriquer un équipement, ce qui ne va pas sans causer des impacts environnementaux et sociaux majeurs alors, au surplus, que les ressources en métaux et en énergies fossiles se raréfient comme le souligne la Société européenne de chimie en revisitant le tableau périodique des éléments pour mettre en évidence les éléments critiques (Figure 3) [9]. Par exemple le cobalt, que l'on retrouve dans les objets numériques connectés ou les batteries, est un composé toxique dont l'exploitation, non ou mal contrôlée dans des mines à ciel ouvert, est à l'origine de risques sanitaires importants pour les populations riveraines des zones concernées.

Notons par ailleurs, pour illustrer l'appétit des objets numériques, qu'un téléphone utilisait 10 types d'éléments en 1960 alors que la fabrication d'un smartphone en nécessite aujourd'hui une soixantaine, dont beaucoup de métaux rares complexes à recycler<sup>8</sup>.

Notons aussi que les ressources minières, de même que les usines d'assemblage, sont dispersées géographiquement ; que les provenances des composants sont multiples ; que la conception se fait d'une manière complètement distribuée à l'échelle de la planète. Il est pourtant essentiel de disposer d'une analyse de cycle de vie d'un produit du berceau à la tombe, en passant par sa fabrication, sa distribution et ses usages.

---

- Consommation énergétique mondiale des appareils électroniques (2020) : 3626 TWh.  
Production d'électricité en France (2020) : 510 TWh

<sup>7</sup> La fabrication d'un smartphone nécessite 70 à 80 kg de minerais – soit plus de 600 fois son poids –, auxquels il faut ajouter les ressources en eau et en énergies fossiles mobilisées ! [7]

<sup>8</sup> 1960 : aluminium, azote, carbone, chrome, cuivre, hydrogène, nickel, oxygène, plomb, zinc.  
2021 : aluminium, américium, antimoine, argent, azote, baryum, béryllium, bismuth, brome, calcium, chrome, carbone, chlore, cobalt, cuivre, erbium, fer, fluor, gadolinium, gallium, germanium, hafnium, hydrogène, indium, iode, iridium, lithium, magnésium, manganèse, néodyme, néon, nickel, or, oxygène, palladium, phosphore, platine, plomb, potassium, rubidium, scandium, silicium, sodium, soufre, strontium, tellure, thallium, thulium, titane, tungstène, vanadium, yttrium, zinc, zirconium. (Pr. M. Ashby, *Cambridge Univ.*, Pr. J.P. Raskin, *Univ. Catho. de Louvain*).

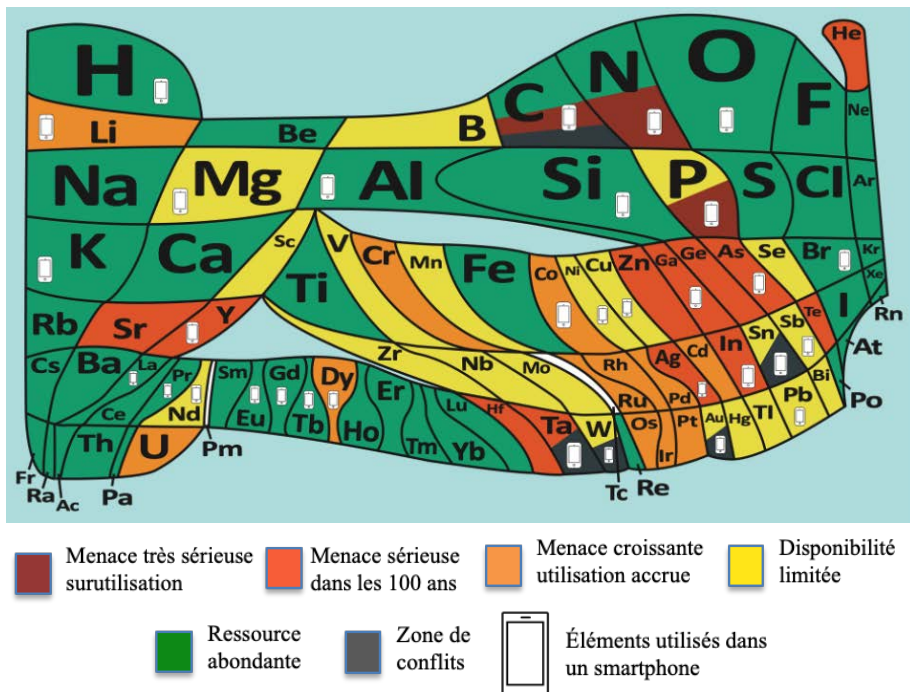


Figure 3 : ressources et réserves (source : European Chemical Society 2023) [9]

L’ADEME a publié en 2020 des données sur l’impact de la fabrication exprimée avec la métrique carbone (principal composé des GES). Le tableau 1 résume cet impact au regard de la production mondiale [10]. L’impact kg CO<sub>2</sub>eq est de l’ordre de 450 millions de tonnes en 2020, dont une part prépondérante provient des écrans et de l’objet le plus commun qui est le smartphone. Cet impact est à relativiser par rapport à l’impact du gaz à effet de serre global mondial, puisque celui-ci représente moins de 5 %). Cependant, l’évolution actuelle du nombre d’objets connectés et ou de systèmes numériques ne cesse de croître !

Année 2020	Production	Impact CO <sub>2</sub> eq (kg) unitaire	Impact CO <sub>2</sub> eq (kg) global
SmartPhones	1,5 10 <sup>9</sup>	35	52,5 10 <sup>9</sup>
PC	220 10 <sup>6</sup>	220	48,4 10 <sup>9</sup>
Tablettes	70 10 <sup>6</sup>	70	4,9 10 <sup>9</sup>
TV	400 10 <sup>6</sup>	400	160 10 <sup>9</sup>
Écrans (hors TV)	250 10 <sup>6</sup>	250	62,5 10 <sup>9</sup>
Montres connectées	10 10 <sup>6</sup>	10	0,1 10 <sup>9</sup>
Imprimantes	100 10 <sup>6</sup>	110	110 10 <sup>9</sup>
Consoles	70 10 <sup>6</sup>	70	4,9 10 <sup>9</sup>

Tableau 1 : Impact CO<sub>2</sub> eq des objets numériques (Source ADEME 2020)



Il faut ensuite ajouter les impacts liés aux usages des objets numériques avec, notamment, l'importance des besoins énergétiques que nécessite leur fonctionnement.

%	Énergie	GES	Eau	Ressources
Fabrication	41 %	83 %	88 %	100 %
Utilisation	59 %	17 %	12 %	0 %

**Fabrication** : extraction des matériaux, fabrication et assemblage des composants et des équipements, gestion des ressources nécessaires (eau, énergie...), transport...

**Utilisation** : infrastructures 24h/24, énergie, ...

**Fin de vie** : recyclage, ressourceries, décharges ...

Tableau 2 : Répartition des impacts du numérique en France en 2020 (source Green IT).

Le recyclage n'est pas efficace à ce jour. C'est une solution très partielle : seulement 20 % des déchets électroniques sont correctement collectés et recyclés au niveau mondial (de l'ordre de 40 % en Europe). Par ailleurs, pour des questions de dégradation des propriétés, il n'est pas possible de recycler indéfiniment certains matériaux. Dans l'attente de progrès significatifs sur le recyclage industriel, il faut donc maintenir nos équipements le plus longtemps possible et se soucier, lors d'un achat, de l'indice de réparabilité.

Il est par ailleurs indispensable de repenser les modes de conception et de fabrication des objets numériques. Ainsi, l'éco-conception consiste à ajouter à des cahiers des charges techniques et fonctionnels un cahier des charges environnemental, c'est-à-dire – à performance équivalente – à minimiser les impacts environnementaux. La méthodologie de quantification des impacts est connue sous le nom d'analyse de cycle de vie (ACV). La limitation de l'utilisation des ressources et des déchets conduit ainsi au passage d'une économie linéaire (extraire, fabriquer, consommer, jeter) à une économie circulaire (réduire, réutiliser, reconcevoir, recycler) pour produire des objets et des services de manière durable.

### 3.2 Impacts énergétiques comparés à l'éclairage électrique

Pour visualiser les impacts énergétiques ramenons nos usages à un équivalent ampoule, en considérant qu'avec la technologie LED cela correspond à une puissance de 4W.

Si on considère le cas des *box internet* fournies par les opérateurs de télécommunications, les consommations énergétiques varient en mode marche de 7 à 20 Wh et, en mode veille, de 5 W à 14 Wh. Si l'on considère qu'il y a environ 30 millions de *box internet*<sup>9</sup> en service en France et si l'on prend une moyenne de 8 Wh pour la consommation en mode veille, c'est-à-dire sans activité, cela se traduit par une énergie perdue correspondant à 60 millions d'ampoules.

À l'échelle mondiale, la consommation annuelle de l'ensemble des objets électroniques estimée à 4 000 TWh est ainsi équivalente à l'éclairage de 1 million de milliards d'ampoules (10<sup>15</sup>), la part des *data centers*, de l'ordre de 100 TWh représentant environ 25 000 milliards d'ampoules.

## 4. Agir pour un monde numérique responsable

Le numérique a contribué à des progrès remarquables dans nos modes de vies. Il a accru l'efficacité et la productivité au travail, favorisé l'accès aux connaissances, amélioré

<sup>9</sup> Boîtier servant d'interface entre l'abonné et un fournisseur d'accès à Internet, réunissant plusieurs fonctions : Modem. Routeur. Switch. Accès Wi-Fi

la communication, assuré une plus grande sécurité, notamment dans les transports. Dans le domaine de la santé, du diagnostic au suivi médical à distance, les progrès technologiques et scientifiques sont considérables. Malheureusement, le développement rapide des technologies du numérique et le passage à l'échelle de la planète dans les usages quotidiens a multiplié les objets connectés alors que l'on ne disposait pas d'un encadrement juridique (lois, directives...) susceptibles d'anticiper ou de réduire les problèmes de ressources, de pollutions et de recyclage dont ils étaient porteurs.

Les nouvelles applications et services développés sans réglementation propre à limiter les dérives ont conduit à des approches futiles : par exemple, éclairer une pièce en s'adressant à une enceinte connectée plutôt que d'appuyer sur un interrupteur<sup>10</sup>, visionner un film en streaming dans un TGV, pratiquer des jeux vidéo en réseaux dans des environnements en plusieurs dimensions (métavers), utiliser des *blockchains* énergivores pour les transactions en cryptomonnaies... Ces applications interrogent sur les volumes de données échangées en temps réel et les consommations électriques associées. Le cas de la voiture électrique autonome – peu vertueuse en termes de volume de données échangées en temps réel – peut aller du futile si cet objet numérique mobile est personnel, à l'utile si celui-ci est tout simplement mutualisé. Comme pour la gestion de l'énergie ou de l'eau, les flux de données doivent être régulés. Cela va d'un contrôle plus strict des implantations des *data centers* énergivores à la limitation des usages du futur. La mutualisation a été (exemple des cabines téléphoniques), et sera nécessaire (par exemple les cinémas ou les véhicules automobiles).

Paradoxalement, le numérique apporte des solutions pertinentes pour accompagner la transition écologique : observation, capteurs et analyses en temps réel, gestion, modélisation, optimisation..., notamment pour les territoires, le secteur économique et industriel et des domaines d'application comme la santé ou l'agriculture. Sans le numérique, l'observation de notre environnement n'aurait pas atteint le niveau actuel. Sans lui, est-ce que l'on comprendrait les phénomènes physiques qui nous entourent, comme les enjeux autour du vivant et de la santé ?

L'écosystème numérique, remède et poison, est à la fois source de menaces et d'opportunités. Il faut donc trouver le bon dosage entre les applications utiles et futiles. À cet égard, on peut citer Jacques Ellul en 1988 [11] : « Le développement de la technique n'est ni bon, ni mauvais, ni neutre, mais il est fait d'un mélange complexe d'éléments positifs et négatifs, "bons" et "mauvais" si on veut adopter un vocabulaire moral. »

Le domaine numérique, comme toute autre technologie avant lui, ne va pas créer un nouveau monde parfait. Compte tenu de ses impacts, il nous revient d'identifier les régulations nécessaires pour le rendre soutenable et durable. Devant cette prise de conscience, la législation a récemment évolué de façon significative. Ainsi, au titre des innovations normatives, peut-on citer :

- Le Règlement Général de Protection des Données (RGPD), texte réglementaire qui encadre le traitement des données de manière égalitaire sur tout le territoire de l'Union européenne (UE). Entré en application en 2018, il s'inscrit dans la continuité de la loi française informatique et libertés de 1978, modifiée par la loi du 20 juin 2018 relative à la protection des données personnelles, établissant des règles sur la collecte et l'utilisation des données sur le territoire français. Il a été conçu pour renforcer les droits des personnes et responsabiliser les acteurs traitant des données.

---

<sup>10</sup> Bien évidemment, un usage futile de ce type peut devenir très utile dans des situations de handicap.

- La loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à l'Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire (AGEC) visant à accélérer le changement de modèle de production et de consommation afin de limiter les déchets et préserver les ressources naturelles, la biodiversité et le climat, de lutter contre toutes les différentes formes de gaspillage et de transformer notre économie linéaire (produire, consommer, jeter) en une économie circulaire. Ses objectifs sont de mieux informer les consommateurs (exemple : compatibilité logicielle), de lutter contre le gaspillage et d'agir contre l'obsolescence programmée. Un exemple concret concerne l'indice de réparabilité.
- La loi n ° 2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France :
  - Faire prendre conscience aux utilisateurs de l'impact environnemental du numérique (articles 1 à 4)
  - Limiter le renouvellement des terminaux (articles 5 à 23)
  - Faire émerger et développer des usages du numérique écologiquement vertueux (articles 24 à 27)
  - Promouvoir des centres de données et des réseaux moins énergivores (articles 28 à 33)
  - Promouvoir une stratégie numérique responsable dans les territoires (articles 34 à 36).
- Le paysage juridique du monde numérique est donc en constante évolution, marqué par l'entrée en vigueur de nouvelles lois et réglementations en réponse aux développements technologiques et aux défis émergents au premier rang desquels figure celui posé par de l'intelligence artificielle : la loi européenne sur l'intelligence artificielle (2024), premier cadre juridique en la matière, traite des risques liés à l'IA et positionne l'Europe pour qu'elle joue un rôle de premier plan à l'échelle mondiale. Par exemple, la question de la réglementation des algorithmes utilisés dans les systèmes numériques, l'éthique, la transparence de leur fonctionnement et l'atténuation des biais potentiellement préjudiciables deviennent incontournable.
- Les lois sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle s'appliquent également au monde numérique. Il en est de même pour les transactions commerciales en ligne et la protection des consommateurs. De plus en plus de pays envisagent ou ont adopté des lois visant à réglementer la responsabilité des plateformes en ligne pour les contenus publiés par les utilisateurs, (lutte contre la désinformation, discours de haine, contenus illicites...).

C'est dans ce cadre que le monde numérique va évoluer, avec une nécessité accrue d'information et de responsabilisation des consommateurs.

## 5. Limiter la frénésie numérique et mesurer nos impacts

Nos comportements personnels et professionnels doivent s'adapter en considérant dorénavant la compréhension et la mesure des phénomènes que nous avons décrits. Si la mesure des consommations d'énergie ou d'eau est précise, il est plus difficile d'apprécier les impacts GES de nos activités. Néanmoins, un certain nombre d'applications existent et vont se développer pour pouvoir mesurer ces impacts. La sobriété dans les usages numériques passe par une limitation de la quantité de données stockées, échangées et par leur nettoyage régulier (boîtes mail, données inutiles ou redondantes...).

Quelques pistes :

- *Comprendre, modéliser, mesurer, décider, éviter, réduire...*
- *Sensibiliser et former.*
- *Agir en tant qu'utilisateur dans son cadre personnel et professionnel.*

- *Agir au niveau collectif.*

## 5.1 De l'abondance et de l'insouciance aux sobriétés

Le terme « sobriété » est actuellement très utilisé dans divers contextes. Toutes les formes de sobriété dans nos modes de vie (ressources, énergies, mobilités, usages numériques...) s'inscrivent dans une démarche de responsabilité sociétale et environnementale, qui intègre en particulier l'écoconception.

Ces principes, s'ils sont partagés et passent à l'échelle dans l'éducation, dans la société, dans l'industrie, posent la question du rôle de l'université, de la formation à la recherche. Il ne s'agit plus uniquement de répondre à des défis par des ruptures ou de nouvelles solutions technologiques mais aussi d'aider à la compréhension des phénomènes par des débats et par toute initiative rapprochant sciences et société.

Il est indispensable de raisonner nos usages de l'utile à l'inutile : limiter nos achats à des besoins réels et renoncer à des envies conditionnées par le marketing des produits. L'information des citoyens doit par ailleurs être plus claire et plus transparente, avec de nouvelles grilles de lecture et de comparaison des équipements. L'étiquetage de tout produit industriel devrait informer les consommateurs sur les matériaux critiques constitutifs et leurs origines, la fabrication et son impact carbone, l'indice de réparabilité, tout en proposant une maintenance efficace et des périodes de garantie plus longues, sans oublier la nécessaire adéquation pérenne entre le matériel et le logiciel.

Les initiatives citoyennes (mutualisations, circuits courts, ressourceries, déchèteries...) doivent être encouragées et avoir un impact sur les évolutions à venir. Dans une économie circulaire nous éloignant des dérives actuelles liées à la mondialisation, la gestion du cycle de vie doit constituer dorénavant un élément de valorisation et doit permettre des échanges fructueux entre le monde scientifique (sciences, technologies, SHS) et la société pour aborder ces défis : modèles, méthodes d'analyses et de calcul d'impacts, éthique, connaissances partagées, usages et expressions des besoins réels des populations à diverses échelles (local, régional, national).

Les actions élémentaires recommandées pour une sobriété des équipements, des infrastructures et réseaux, des centres de données de calculs (*data centers*) doivent porter sur :

### ***La production d'équipements***

- Faire évoluer les normes d'éco-conception et de fabrication.
- Éviter l'obsolescence logicielle.
- Privilégier les circuits les plus courts possibles, la circularité des ressources.
- Permettre une maintenance efficace en cas de panne et allonger la durée de garantie.
- Informer plus précisément les consommateurs.

### ***Les services et développements informatiques***

- Parfaire l'écoconception des services numériques : anticiper les impacts, mesurer la signature environnementale, l'efficacité énergétique, limiter les fonctionnalités inutiles, optimiser, simplifier...
- Repenser les modèles de consommation (éviter les forfaits à usage illimité).
- Imaginer de nouveaux outils permettant de mesurer simplement les impacts des usages (compteur carbone, énergie nécessaire du local au global).
- Développer le *low tech* : par exemple pour des téléphones mobiles avec des usages plus limités, un écran simplifié à encre électronique, une autonomie plus grande et un indice de réparabilité élevé.

**Les utilisateurs : matériels**

- Réduire le nombre d'objets numériques achetés et les conserver le plus longtemps possible. Par exemple, la réduction du nombre et de la taille de nos écrans aura un impact sur la signature environnementale du numérique.
- Exploiter les objets non utilisés : revente, reconditionnement, recyclage.

**Les utilisateurs : usages**

- Identifier tous les équipements numériques, mesurer et cartographier l'impact du numérique depuis la création des données à leur circulation et aux stockages internes et externes (data centers).
- Raisonner nos usages de l'utile à l'inutile : procéder à des achats liés à des besoins réels plutôt qu'à des envies superflues dictées par la publicité et le marketing.
- Faire preuve de sobriété dans les usages numériques en réduisant les quantités de données stockées et échangées ainsi que la qualité des vidéos, en privilégiant le réseau wifi aux communications 4G/5G, en nettoyant régulièrement les boîtes mail par la suppression des données inutiles ou redondantes, en gérant ses messages (créer des listes de diffusion, éviter des documents attachés volumineux. Privilégier l'audio à la visioconférence.
- Contrôler avec précision la mesure des besoins énergétiques et des flux de données ; mettre en veille ou éteindre les équipements inutilisés.

**5.2 L'exemple du véhicule automobile électrique et numérique**

L'exemple du véhicule automobile résume bien la notion d'usages utiles et futiles. Il a accompagné nos modes de vie depuis un siècle, offrant des libertés dans nos mobilités avec des moteurs thermiques polluants et des progrès technologiques pour réduire la consommation de carburant. Son usage a été majoritairement individualisé. Son développement massif a conduit dans les métropoles à des phénomènes de saturation du trafic. Par ailleurs, un des premiers paramètres liés à la consommation énergétique est tout simplement le poids qui a largement dépassé une tonne pour une voiture familiale. Au-delà des effets de mode pour un modèle particulier, il devient indispensable de bien informer les consommateurs avec des critères de comparaison normalisés et pédagogiques.

L'heure est aujourd'hui pour l'industrie automobile aux transitions électriques et numériques. Il faut donc distinguer dans l'analyse de cycle de vie, la fabrication, l'utilisation et la fin de vie. Une voiture électrique pourra consommer par exemple plus de matériaux critiques qu'un véhicule thermique (quatre fois plus de cuivre à ce jour !) [12]. Pour sensibiliser les consommateurs, depuis l'année 2024 le score environnemental d'un véhicule électrique est indispensable pour bénéficier d'une subvention : il est calculé par l'ADEME, l'Agence de la transition écologique du gouvernement, à partir d'un dossier fourni par le constructeur. La formule de calcul de l'éco-score automobile [13] se fait en tenant compte de l'empreinte carbone (EC) exprimée en kilogrammes équivalent CO<sub>2</sub> (kg-eq CO<sub>2</sub>) des éléments suivants :

- EC ferreux pour l'empreinte carbone de production des métaux ferreux consommés pour la fabrication, hors batterie.
- EC aluminium pour l'empreinte carbone de production de l'aluminium (pur et allié) consommé pour la fabrication, hors batterie.
- EC assemblage (AM) pour l'empreinte carbone des matériaux, autres que ferreux et l'aluminium, employés pour la fabrication, hors batterie.
- EC batterie tenant compte de la chimie, des matériaux et de la masse de la batterie, ainsi que de la réparabilité de la batterie et de ses cellules.

- EC consommation énergétique (ATI) pour l’empreinte carbone liée à l’énergie nécessaire aux transformations intermédiaires et à l’assemblage.
- EC transport, pour l’empreinte carbone liée à l’acheminement depuis le site d’assemblage jusqu’au site de distribution en France.

L’industrie automobile entre pleinement dans l’ère de la transition numérique. Désormais, un véhicule n’est plus seulement un moyen de déplacement, mais bien un objet connecté, truffé de capteurs et de processeurs de calcul. La navigation assistée par GPS en est un exemple emblématique. Les recherches actuelles se concentrent sur le développement de la conduite autonome, ouvrant ainsi la voie à une mutation majeure dans le domaine. Ces évolutions technologiques entraînent également de nouvelles répercussions environnementales qu’il convient de prendre en considération : en effet, la mise en place d’infrastructures adéquates pour la communication et le calcul devient essentielle. Cela implique notamment de penser à l’approvisionnement en énergie électrique nécessaire au chargement des batteries, agissant comme une véritable « pompe à mobilité » de chaque véhicule. De même, il est crucial de prendre en compte les besoins énergétiques liés à l’écosystème de calcul des trajectoires autonomes et de régulation de vitesse, constituant également une forme de « pompe électrique à données » pour un véhicule donné. Le bilan énergétique devra donc considérer l’ensemble des ressources nécessaires. Face à ces avancées technologiques sophistiquées, il devient ainsi impératif de repenser l’utilisation des véhicules électriques autonomes. Une approche prometteuse consiste à envisager leur mutualisation, les intégrant dans un système de transport en commun, à l’instar d’autres objets de mobilité partagée.

## 6. Conclusion

Le monde numérique interroge sur les capacités comparées en calcul et en mémoire de l’humain et de la machine. Il contribue à des gains dans nos modes de vie en termes de communication, d’innovation, de créativité, et de progrès dans de nombreux domaines comme la santé. Son développement massif aussi rapide nous interpelle néanmoins sur ses impacts environnementaux et sociétaux.

Les défis scientifiques, technologiques et sociétaux pour une régulation éthique du numérique accompagnant la mutation d’une économie carbonée vers une économie décarbonée sont nombreux. Nous prenons enfin conscience, avec deux siècles de retard, de la fin de la période d’abondance et d’insouciance dans un contexte de tensions et de conflits géopolitiques ayant pour conséquence un accès difficile aux ressources (énergies primaires, matières premières...), mais aussi de l’anticipation des enjeux liés à la décarbonation de nos modes de vie.

L’impact environnemental du numérique est principalement lié à la multiplication des objets connectés distribués et la création de services énergivores [14]. Les sobriétés numériques et énergétiques sont liées à nos usages, lesquels doivent être absolument revisités en prenant soin de nos biens communs fondamentaux que sont l’accès à l’eau, à l’énergie, et au monde numérique. Ainsi, pourrait-on imaginer par exemple des quotas pour nos consommations individuelles électriques et numériques, le dépassement d’un quota pouvant se traduire par une réduction du débit ou par un prix plus élevé.

De l’individu au collectif nous pouvons agir rapidement et transformer des menaces en opportunités en nous appuyant sur la créativité et la quête de sens pour repenser un monde numérique plus vertueux : reconsidérer la relation sciences, technologies et

société, avec une révolution de la pensée pour une renaissance d'un monde numérique responsable et soutenable, du local au global<sup>11</sup>.

Le numérique doit accompagner la société dans ce qu'elle peut avoir de plus vertueux. Ce n'est pas au numérique de s'imposer à la société comme une évidence. En mesurant, analysant, modélisant, nous devons être capables de conserver un esprit critique afin de déterminer les meilleures solutions éco-responsables.

## RÉFÉRENCES

- [1] ROBERT Michel, « La réalité physique du monde numérique », *The conversation*, 21 avril 2021, <https://theconversation.com/la-realite-physique-du-monde-numerique-158884>
- [2] <https://explodingtopics.com/blog/data-generated-per-day>
- [3] OSBORN Fairfield, *La Planète au pillage*, 1948, Éditions Actes Sud (ISBN 978-2-7427-7447-0)
- [4] MEADOWS Dennis, MEADOWS Donella, RANDERS Jorgen, *Les Limites à la croissance (dans un monde fini)*, Rue échiquier, ISBN : 978-2-37425-332-9
- [5] <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/2022-02/r-sum-ex-cutif-16811.pdf>
- [6] <https://fr.statista.com/infographie/29769/evolution-nombre-abonnements-telephonie-mobile-et-population-mondiale/>
- [7] « Impacts environnementaux du numérique en France » collectif d'experts, 17 janvier 2021 » <https://www.greenit.fr>, <https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2021/02/2021-01-iNum-etude-impacts-numerique-France-rapport-0.8.pdf>
- [8] PITRON Guillaume, « La Guerre des métaux rares : la face cachée de la transition énergétique et numérique », *Les Liens qui libèrent*, 2018, 296 p. [ISBN 979-10-209-0574-1] <https://www.rtb.be/article/le-smartphone-ce-seigneur-des-metaux-dou-proviennent-les-minerais-de-sang-qui-composent-votre-gsm-11131811>
- [9] <https://www.euchems.eu/euchems-periodic-table/>  
VILLALBA Bruno, « Sobriété : interroger cette course à la ressource qui guide le monde », *The conversation*, 11 mai 2023 <https://theconversation.com/sobriete-interroger-cette-course-a-la-ressource-qui-guide-le-monde-205316>
- [10] ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, <https://www.ademe.fr>, <https://infos.ademe.fr/magazine-avril-2022/faits-et-chiffres/numerique-quel-impact-environnemental/>

---

<sup>11</sup> Évaluer les impacts du local (région, nation) au global (planète) n'est pas simple car le monde numérique n'a pas de frontières. Nos données par exemple circulent dans des *data centers* situés à l'étranger. Il faut considérer les calculs sur les impacts du monde numérique comme des ordres de grandeur avec un esprit critique et des incertitudes, comme dans les rapports récents de l'ADEME.

<https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/5226-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france-et-analyse-prospective.html>

- [11] ELLUL Jacques (1988), *Le bluff technologique*, Paris, Hachette.
- [12] HACHE Emmanuel, LOUVET Benjamin, « Métaux le nouvel or noir. Demain la pénurie ? » <https://www.editionsdurocher.fr/product/129257/metaux-le-nouvel-or-noir-demain-la-penurie/>
- [13] <https://www.economie.gouv.fr/daj/lettre-de-la-daj-les-conditions-deligibilite-au-bonus-ecologique-comment-calculer-le-score>
- [14] Quelques sites pertinents à consulter :  
<https://time-planet.com/fr>  
<https://institutnr.org>  
<https://theshiftproject.org>  
<https://www.bnf.fr/fr/le-numerique-responsable-bibliographie-mars-2022>