

Introduction

Par Olivier APPERT

Académie des technologies, Centre Énergie de l'IFRI

Et Richard LAVERGNE

Conseil général de l'Économie

Le présent numéro des *Annales des Mines* a été conçu de façon à actualiser et prolonger un précédent numéro, paru dans la série *Responsabilité & Environnement*, le n°87 (de juillet 2017) intitulé « Transition numérique et transition écologique ». Mais il trouve aussi des complémentarités avec plusieurs autres numéros récents et anciens portant sur l'énergie et le numérique, dont le n°15 (de septembre 2021) paru dans la série *Enjeux numériques* et intitulé « Le numérique et la refondation du système électrique ».

Ce numéro tire également profit des réflexions d'un groupe de travail co-présidé par Olivier Appert et Gérard Roucairol, qui a été créé au sein de l'ANRT (Association nationale Recherche Technologie) dans le cadre de la préparation de la Stratégie nationale de recherche énergétique. Ce groupe a rendu son rapport¹ en mai 2022, avec pour intitulé « Énergie et Numérique : des défis réciproques », un rapport que les coordonnateurs ont amplement utilisé pour organiser le présent numéro.

Le lecteur pourra aussi se reporter à un rapport² publié en 2019 par le Conseil général de l'Économie (CGE) sur le thème « Réduire la consommation énergétique du numérique », ainsi qu'à un numéro récemment publié par les *Annales des Mines* dans la série *Responsabilité & Environnement* et titré « L'électricité dans la transition énergétique » (n°109, janvier 2023), en particulier l'article « Les enjeux de la numérisation pour les gestionnaires du réseau de distribution » (coécrit par Sébastien Jumel et Pierre Mallet, d'Enedis).

La « double transition », comme elle est souvent appelée, vise à décarboner l'économie et à introduire le numérique dans toutes les activités où il peut apporter une amélioration en termes de compétitivité, d'efficacité, de transition écologique et de cohésion sociale. Ces deux transitions sont en fait très imbriquées, puisque le numérique est indispensable pour réduire les émissions de CO₂ de beaucoup d'activités, alors que le numérique est lui-même doté d'une empreinte carbone très variable selon les technologies *hardware* et *software* propres au secteur, l'origine des composants, terminaux et équipements lui permettant d'être mis en œuvre et selon le mix de production d'électricité qui alimente ces mêmes composants, terminaux et équipements.

En France, pour chacune de ces transitions, l'État a mis en place des instances de concertation et de sensibilisation, notamment le Conseil national pour la transition écologique et le Haut Comité pour un numérique écoresponsable. Une feuille de route « Numérique et environnement », que le gouvernement a publiée le 23 février 2021, définit trois axes d'action :

- connaître pour mieux agir : il est nécessaire de disposer de données fiables et objectives sur les impacts du numérique sur l'environnement ;
- réduire l'empreinte environnementale du numérique, depuis les terminaux jusqu'aux usages et aux services ;
- innover pour faire du numérique un véritable outil de la transition écologique en optimisant la consommation d'énergie, en réduisant les trajets, en évitant ou en gérant mieux nos déchets, etc.

Diverses lois ont été publiées pour accompagner la mise en œuvre de cette feuille de route, comme la loi AGEC n°2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, la loi REEN n°2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France ou la loi Climat et résilience n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. Mais, en France, l'État et les citoyens par leur comportement n'ont qu'une influence limitée sur des transitions qui concernent le monde entier et qui dépendent d'usages qui se transforment ou qui se créent, ainsi que de progrès techniques itératifs ou en rupture.

Dans cette brève introduction, les coordonnateurs ont choisi de ne mettre en exergue que quelques-uns des articles figurant dans le présent numéro, faute de place pour les présenter tous. Mais tous les articles présentent chacun leur richesse.

¹ Rapport téléchargeable à l'adresse suivante : <https://www.anrt.asso.fr/fr/snre-32334>

² <https://www.economie.gouv.fr/cge/consommation-energie-numerique>

Le présent numéro des *Annales des Mines* met tout d'abord l'accent sur le besoin de données permettant de mesurer l'impact réel du numérique en termes de consommation d'énergie et de matériaux critiques, ainsi que d'empreinte carbone. L'incertitude actuelle sur les données conduit ainsi à de vives controverses entre les experts quant au véritable impact du numérique sur les émissions de CO₂.

Le Dr Fatih Birol souligne dans son article en quoi les « data » jouent un rôle primordial dans la mise en œuvre de scénarios désirables, notamment ceux issus du World Energy Outlook dont la parution est annuelle. Selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie), au niveau mondial, le numérique serait aujourd'hui responsable d'environ 700 MtCO₂e par an, soit 2 % des émissions de gaz à effet de serre, y compris les émissions indirectes. Michel Schmitt précise dans son article que l'empreinte liée à la fabrication des équipements représente 45 % de l'empreinte carbone totale, au niveau mondial, et beaucoup plus dans des pays à électricité décarbonée, comme la France.

Valérie Drezet-Humez va dans le même sens que le Dr Birol en mettant en exergue les bénéfices de la double transition numérique et énergétique, tout en soulignant un écueil à éviter : celui du coût social sur les plus vulnérables.

Les usages du numérique vont continuer à se développer très rapidement au cours des prochaines décennies, notamment sous l'effet conjugué de :

- l'usage généralisé d'Internet et du haut débit (dont la 5G) ;
- la multiplication des objets connectés (montres, domotique, transport...) ;
- le remplacement nécessaire des énergies fossiles par l'électricité, notamment dans l'industrie ;
- le développement des systèmes de flexibilité, des réseaux et micro-réseaux, ainsi que des compteurs intelligents entraînés par la mise en œuvre de la transition énergétique ;
- la recherche accrue d'efficacité, de compétitivité, de sûreté et de fiabilité, par exemple dans les centrales nucléaires.

En outre, de nouveaux usages ne cesseront d'apparaître dans tous les secteurs d'activité (industrie, bâtiment, transports, jeux et consommation courante...) qui pourront améliorer l'empreinte environnementale de ces secteurs ou, au contraire, être source, au moins dans un premier temps, d'un accroissement important des consommations d'énergie et de matériaux critiques, comme dans le cas du *streaming*, des *blockchains*, des *crypto-assets* (actifs numériques basés sur la cryptographie, comme le Bitcoin et autres cryptomonnaies), des NFT ou encore du méta-vers. Il en est du numérique comme du cholestérol : il faut distinguer le bon du mauvais. Le numérique est au centre de nombreuses technologies contribuant à la transition énergétique. Mais quelle est la valeur ajoutée de la *blockchain* ou du *streaming video* en comparaison de leur impact énergétique et climatique ?

Alain Burtin nous indique, dans son article, que le développement des énergies renouvelables intermittentes nécessite d'adapter l'exploitation des systèmes électriques et de développer de nouveaux leviers de flexibilité grâce au numérique (réglage rapide de fréquence, systèmes de prévision, marchés infra-journaliers, *smart grid*, *virtual power plants*, *smart charging*...). Le numérique devient ainsi un outil incontournable pour assurer le bon fonctionnement des mix électriques décarbonés.

Nul ne sait ce que l'avenir nous réserve, mais il convient d'anticiper ces nouveaux usages en prévoyant et en planifiant en conséquence l'offre d'électricité et de matériaux, et en engageant des travaux de R&D pour limiter autant que possible les consommations.

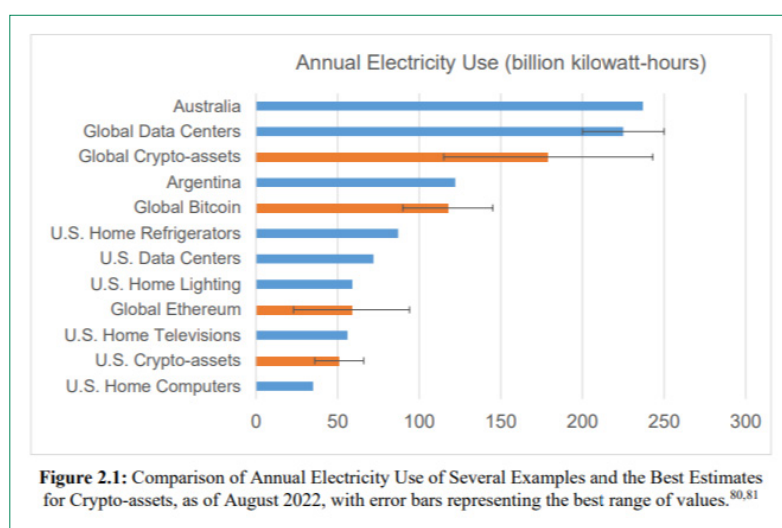
Des progrès considérables ont d'ores et déjà été obtenus comme l'observe l'AIE : par exemple, au niveau des *data centers* dont la consommation globale a stagné depuis dix ans, alors que dans le même temps le trafic des données a explosé. De plus, la multiplication des usages du numérique entraîne des menaces en termes de cybersécurité, que l'État doit veiller à juguler.

Par ailleurs, comme l'indiquent Vincent Mazauric et ses co-auteurs dans leur article, le numérique devra faire face au défi technologique que représente le ralentissement observé en matière de miniaturisation des composants électroniques, voire même la fin de la pertinence de la « loi de Moore ».

Le graphique situé en page suivante compare les consommations d'électricité aux États-Unis liées à certains usages spécifiques, comme celles des *data centers*, des téléviseurs ou des crypto-actifs (ou *crypto-assets*), par rapport à la consommation d'électricité au niveau mondial ou à celle de pays entiers, comme l'Australie ou l'Argentine.

Dans son article, Paul Jolie précise ainsi que les États-Unis accueillent environ un tiers des opérations mondiales de crypto-actifs, qui consomment actuellement entre 0,9 % et 1,7 % de la consommation totale d'électricité du pays, soit l'équivalent d'environ 50 TWh. Cette fourchette d'utilisation de l'électricité est similaire à celle de tous les ordinateurs domestiques ou de tout l'éclairage résidentiel aux États-Unis.

Aurélien Picart souligne que la réduction de l'empreinte carbone du numérique doit s'appuyer, au niveau mondial, sur trois leviers principaux : le progrès technique, l'évolution des comportements et la décarbonation de la production d'électricité.



Source: Climate and Energy Implications of Crypto-Assets in the United States. White House Office of Science and Technology Policy. Washington D.C., September 8, 2022.

Les coordonnateurs de ce numéro remercient chaleureusement les différents auteurs qui ont bien voulu nous consacrer un peu de leur temps pour contribuer à ce numéro. Ils remercient tout particulièrement Gérard Roucairol pour avoir accepté de le préfacer.

Ils espèrent que, dans la période actuelle de crise multiforme de l'énergie et d'urgence climatique, la riche analyse proposée ici permettra de mieux comprendre les enjeux et d'éclairer les décideurs, notamment politiques et économiques, sur les bons choix à faire.