

L'intégration des équipements numériques dans les systèmes électriques : quelques enjeux de politique publique pour l'Europe

Par **Patrice GEOFFRON**

LEda, Université Paris-Dauphine, Université PSL, IRD, CNRS, Paris

Les principaux termes du débat sur l'empreinte environnementale des services numériques

Les technologies numériques sont appelées à jouer un rôle croissant dans la décarbonation de l'électricité, pour équilibrer les réseaux, permettre l'injection des énergies renouvelables intermittentes et décentralisées, accélérer les transferts d'usage comme de la mobilité thermique vers la mobilité électrique... (voir l'article de Jacques Percebois, « Le numérique au service de la modernisation des réseaux d'électricité », pp. 6-11).

Ces technologies constituent l'un des leviers de la lutte contre le changement climatique, avec un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre pouvant aller jusqu'à 20 % en 2030, selon certaines estimations, dans un large éventail d'usages (voir Figure 1 ci-après)⁽¹⁾.

Toutefois, dès lors que l'Accord de Paris sur le climat implique une diminution des émissions de CO₂ de 5 à 7 % par an d'ici à 2050, il est impératif d'analyser l'empreinte environnementale de tous les secteurs d'activité, tout au long du cycle de vie. Et le numérique n'échappe pas à cette obligation : l'extraction et la transformation des minerais en amont, les consommations électriques en fonctionnement des équipements, l'efficacité et la complétude du recyclage des matériaux en aval du cycle sont autant de sujets de vigilance. Car il est essentiel que les gains induits par le numérique ne soient pas annulés par ses impacts environnementaux.

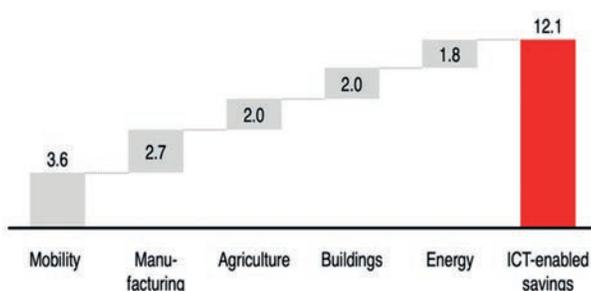


Figure 1. Potentiel de réduction du CO₂ des TIC par secteur (GTons, 2030) ; Source : WRI, IPCC, World Bank, GeSI, Accenture analysis & CO₂ models

Cette problématique fait l'objet d'un débat nourri et parfois vif : selon les estimations disponibles, les émissions de CO₂ liées aux TIC représentaient environ 4 % des volumes mondiaux en 2020 (Andrae et Edler, 2015 ; Andrae, 2020 ; GeSI, 2019 ; GreenIT, 2019 ; The Shift Project, 2019). Cet ordre de grandeur excède, pour prendre un point de comparaison, les 2 % habituellement attribués

(1) En 2019, la GSMA (association internationale représentant les intérêts d'acteurs de téléphonie mobiles) a publié un rapport expliquant que chaque tonne de CO₂ émise pour les activités de téléphonie mobile permettait d'éviter l'émission de 10 tonnes (par exemple en réduisant les activités de transport). En considérant également les technologies mobiles, Zheng et Wang (2021) établissent des relations positives entre les TIC mobiles et la génération d'énergie renouvelable, à la fois à court et à long terme. D'un point de vue plus macroéconomique, d'autres recherches tendent à démontrer que l'importation d'infrastructures TIC de pointe peut réduire la dégradation de l'environnement dans les pays du G20 (Nguyen *et al.*, 2020).

au transport aérien. Pour 2030, Andrae (2020) estime que les émissions devraient augmenter légèrement pour atteindre environ 5 %. Une telle perspective prolonge d'autres analyses, comme celles de Malmodin et Lunden (2018) qui mettent en avant les gains d'efficacité des TIC durant la décennie 2010 (schématisés par la « loi de Koomey »)⁽²⁾. D'autres travaux sont plus alarmistes, comme ceux du *think tank* The Shift Project (2019) qui envisagent une augmentation pouvant aller jusqu'à 6 % des émissions globales dès 2025, si les gains d'efficacité énergétique observés durant la décennie 2010 étaient épuisés (en se fondant sur les craintes que les gains de performance énergétique soient plafonnés une fois que toutes les « bonnes pratiques » auront été appliquées).

L'une des limites de ces analyses est la capacité à prendre pleinement en compte la trajectoire des nouveaux usages déjà en cours (*streaming* vidéo, jeux en ligne...) ou des nouvelles technologies (IA, Blockchain, IoT, 5G...), et, plus encore, des modifications structurelles induites par la crise sanitaire (travail à distance en particulier).

Quel sera l'effet du déploiement des réseaux 5G sur la consommation d'électricité ?

Le cas de la 5G met en évidence la tension entre la consommation énergétique des TIC et leurs effets de levier en termes de gains d'efficacité dans les activités socio-économiques. Schématiquement, avec la 5G, la charge de trafic sur les réseaux sera considérablement plus élevée (en raison de la nature des usages supplémentaires), mais plus efficace que la 4G en termes de quantité de bits délivrés pour une unité donnée de consommation d'énergie. Une avancée apportée par la 5G concerne le déploiement d'antennes dites "Massive Multiple-Input Multiple-Output" (MIMO) qui transmettent le signal uniquement en direction du mobile communicant, et non plus sur une large zone comme le font les antennes 4G. En outre, la 5G généralise les modes de veille avancée permettant l'extinction des équipements de façon sélective en l'absence de trafic. Cependant, la croissance du volume total de données – très incertaine à ce stade – pourrait entraîner une augmentation de la consommation d'énergie malgré cette efficacité. En outre, le déclassement anticipé de certains équipements 4G – notamment les terminaux mobiles – est également un facteur à prendre en compte dans l'évaluation de la transition de la 4G à la 5G.

La montée en charge de l'industrie des *data centers* est-elle soutenable ?

Dans le débat sur l'empreinte énergétique et environnementale des TIC, l'expansion massive des *data centers* (DC) requiert une attention particulière. Compte tenu de leur nature électro-intensive (liée à la fois à l'alimentation électrique et au besoin de refroidissement), l'activité de ces centres de données est essentielle pour comprendre la dynamique globale de la consommation énergétique des TIC. Une importante littérature a émergé dans les années 2010 pour analyser leur demande en électricité et, en particulier, la dynamique de leurs gains d'efficacité énergétique (Oró *et al.*, 2015 ; Rong *et al.*, 2016 ; Ni et Bai, 2016).

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime en 2020 que la consommation d'électricité des centres de données est restée stable au cours des années 2010 (après une période de forte croissance dans les années 2000) à environ 200 TWh, soit environ 1 % de l'électricité consommée dans le monde, alors même que la charge des DC aura été multipliée par huit sur la même période (alors que le trafic Internet a été multiplié par 12). Exprimée en consommation d'énergie par instance de calcul, l'intensité énergétique a diminué de 20 % par an depuis 2010.

(2) La « loi de Koomey » décrit une tendance à long terme dans l'histoire du matériel informatique. Le nombre de calculs par joule d'énergie dissipée a doublé tous les un an et demi, une tendance remarquablement stable depuis les années 1950.

Andrae (2020) (prolongeant Andrae et Edler, 2015) considère, d'une part, que le niveau évalué à 200 TWh par l'AIE (2020) correspond probablement à une sous-estimation (300 TWh semblant un niveau plus plausible), et, d'autre part, que les gains d'efficacité ne seront plus suffisants pour compenser la demande dynamique de services en courant continu, dont la consommation pourrait atteindre 800 TWh en 2030 (avec une marge d'erreur de ± 200 TWh).

Afin d'apprécier les marges de progrès, il convient de distinguer trois catégories, qui sont en pratique interdépendantes.

Les équipements informatiques

Le nombre de calculs pouvant être effectués par kWh a tendanciellement doublé tous les un an et demi du fait de la diminution continue de la taille des transistors. La perspective de poursuivre ces améliorations soulève des questions à l'approche des limites physiques et techniques associées aux puces à base de silicium. De nouveaux paradigmes pour surmonter les barrières physiques des puces à base de silicium sont envisagés, par exemple les commutateurs quantiques ou les « millivolts ».

Les équipements auxiliaires

Le potentiel d'amélioration réside principalement dans la conception d'un système de refroidissement hautement efficace, car ce besoin a jusqu'à présent surdéterminé l'efficacité énergétique globale des centres de données. Les pertes électriques dans les onduleurs sont également un facteur à prendre en compte (attribuées au double mécanisme de conversion de courant alternatif en courant continu et de retour en courant alternatif).

La gestion efficace de l'informatique

Bien que les serveurs et les supports de stockage soient devenus de plus en plus efficaces sur le plan énergétique lorsqu'ils sont actifs, la sous-utilisation et les pertes en mode veille peuvent constituer une source de déperdition. Un levier important pour améliorer l'efficacité est la consolidation de la charge de travail, qui consiste à augmenter le taux d'utilisation d'un petit nombre de serveurs actifs, plutôt que de faire fonctionner un grand nombre de serveurs sous-utilisés.

Une part de la stabilisation des consommations durant la décennie 2010 tient à une évolution structurelle du secteur, avec le déploiement de centres géants, dits "*hyperscale*", occupant des milliers de m² et d'une puissance de dizaines de MW. Ces *data centers* offrent des gains d'efficacité en permettant la transition vers des services basés sur le *cloud*, réduisant le recours aux équipements « sur site », généralement moins efficaces : les *data centers* les plus performants affichent une PUE de 1,1, contre 1,5 à 2,0 pour des centres plus petits et/ou plus anciens⁽³⁾. Ce qui conduit à s'interroger sur les conditions d'intégration de ces *data centers* massifs dans les systèmes énergétiques : en mobilisant une capacité de *demand response* et d'intégration dans des réseaux de chaleur (pour récupérer la chaleur « fatale »), l'industrie des centres de données dispose également d'un potentiel pour contribuer à l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans le système électrique, plutôt que d'être une simple charge additionnelle (Koronen *et al.*, 2020)⁽⁴⁾.

Néanmoins, la concentration des *datas centers* met en forte tension certains systèmes électriques en induisant des investissements supplémentaires en infrastructures (tant dans le domaine

(3) <https://journal.uptimeinstitute.com/data-center-pues-flat-since-2013/>

(4) L'évaluation de l'efficacité des centres de données est nécessairement multidimensionnelle et ne peut être réduite à un seul indicateur. Ces mesures peuvent être utilisées pour évaluer les différents piliers (refroidissement, informatique, alimentation) ou le centre de données dans son ensemble. Elles peuvent couvrir la consommation totale d'énergie, la consommation d'eau ou les émissions de carbone. L'indicateur le plus utilisé est le Power Usage Effectiveness (PUE) : rapport entre l'électricité totale consommée par l'installation d'un centre de données et l'électricité totale consommée par les équipements informatiques.

de l'énergie que des télécommunications, notamment en ce qui concerne les réseaux de fibres optiques). Diverses projections témoignent de ce phénomène en Europe : en 2030, les *data centers* pourraient représenter de l'ordre de 20 à 30 % de l'électricité consommée au Danemark et en Irlande (selon les opérateurs de réseau électrique nationaux), qui ont développé des stratégies très agressives pour attirer ces investissements.

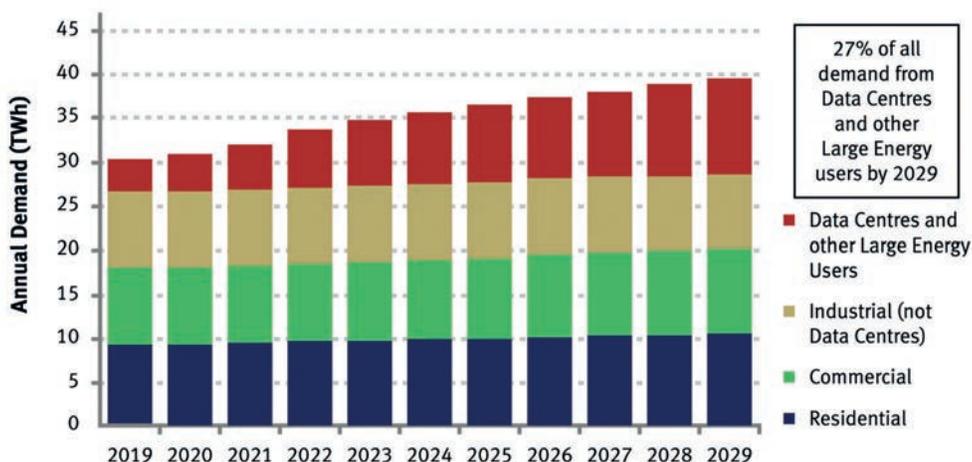


Figure 2. Prévisions des besoins totaux en électricité pour l'Irlande (2020-2029), Source : EIRGRID, SONI.

Et ces tensions ne procèdent pas uniquement que du moyen terme : on observe qu'Amsterdam a établi un moratoire d'un an (en 2019) sur les nouveaux projets de centres de données. Au vu de la forte croissance observée (10 à 15 % par an sur les sept dernières années), les autorités publiques locales ont souhaité organiser une pause afin d'évaluer et d'améliorer les principes en termes d'accès au foncier et à l'énergie. Cette situation observée aux Pays-Bas mérite que l'on s'y attarde, car elle est susceptible de préfigurer d'autres phénomènes de « congestion » en Europe du Nord, qui concentrait jusqu'à présent une part prépondérante des investissements (notamment en raison d'un climat plus propice à la gestion de la dissipation de la chaleur), mais également en France (notamment en Île-de-France).

Quels seront les effets du *edge computing* ?

L'*edge computing* est une architecture informatique distribuée : plutôt que d'être transmises à un DC distant, les données sont traitées à proximité du dispositif qui les génère (objet connecté, *smartphone*...). Plus précisément, l'*edge computing* peut être considéré comme un réseau maillé de micro-centres qui traitent ou stockent localement les données critiques. L'*edge computing* réduit la latence du traitement de l'information, car les données n'ont pas besoin de traverser un grand réseau pour atteindre un serveur *cloud* distant. En limitant la quantité de données traversant le réseau, la consommation d'énergie associée est réduite, mais avec une consommation additionnelle pour les composants TIC à la périphérie. L'*edge computing* joue un rôle essentiel dans la prise en charge des applications de *smart grids*, telles que la gestion de la demande. Au-delà, l'*edge computing* peut prendre en charge la gestion durable des ressources d'énergie renouvelable en permettant d'évaluer en temps réel l'offre et la demande, ainsi que pour optimiser la charge des véhicules électriques. L'ensemble de ces facteurs peuvent concourir à l'organisation de communautés énergétiques, combinant des moyens de production locaux et des systèmes d'échange.

Vers une neutralité carbone des DC en Europe en 2030 ?

En cohérence avec le “Green Deal”, la Commission européenne a fixé en 2020 l’objectif : “*To achieve climate-neutral, highly energy-efficient and sustainable data centres by no later than 2030*”⁽⁵⁾. Cette ambition fait également écho aux préoccupations de l’UE concernant la transformation des industries à forte intensité énergétique, sachant que le secteur des centres de données est celui qui se distinguera par la plus forte croissance au cours de la décennie. Jusqu’à présent, l’Union européenne s’est principalement appuyée sur des efforts volontaires pour gérer les besoins énergétiques du secteur des TIC, par le biais du code de conduite⁽⁶⁾, mais cette démarche sera insuffisante pour aboutir à une neutralité en 2030. L’UE et les États-membres devront sans doute travailler dans une optique de co-régulation avec l’industrie, notamment celle qui a pris l’initiative du “Climate Neutral Data Centre Pact” lancé début 2021, reprenant l’objectif d’une neutralité en 2030.

Un tel objectif est très ambitieux, impliquant des efforts de “*sector coupling*” spécifique entre réseaux électrique, de chaleur et de fibre pour déterminer l’allocation optimale dans l’espace des *data centers* (ce qui implique une coopération entre régulateurs et opérateurs de réseau de l’énergie et des télécommunications). Ce chantier n’est pas le seul, puisqu’il importe également de fluidifier l’accès des opérateurs de *data centers* à un « sourcing » décarboné, notamment *via* des *corporate purchasing power agreements*. Et de se préoccuper du rétrofit ou d’un déclassement des centres de données les plus anciens, dont la performance énergétique est incompatible avec cet objectif.

De même, cette transition ne pourra être mise en œuvre sans une meilleure compréhension des effets de la croissance des *data centers* en Europe, sachant que ces infrastructures serviront tout aussi bien à alimenter des flux de *streaming* vidéo (dont l’utilité peut être mise en question) qu’à organiser des activités « à distance » ou à transformer nos métropoles en *smart cities*, contribuant alors aux objectifs de décarbonation.

Bibliographie

ANDRAE A. S. G. & EDLER T. (2015), “On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030”, *Challenges*, 6(1), pp. 117-157.

ANDRAE A. S. G. (2020), “Hypotheses for primary energy use, electricity use and CO₂ emissions of global computing and its shares of the total between 2020 and 2030”, *WSEAS Transaction on Power Systems*.

BERTOLDI P., AVGERINO M. & CASTELLAZZI L. (2017), “Trends in data centre energy consumption under the European Code of Conduct for data centre energy efficiency”, *JRC Technical Report*.

CIOARA T. *et al.* (2019), “Exploiting data centres energy flexibility in smart cities: Business scenarios”, *Information Sciences*.

Danish Energy Agency (2020), “Denmark’s energy and climate outlook 2020”.

(5) European Commission (2020), “Shaping Europe’s digital future”: “*A circular electronics initiative, mobilising existing and new instruments in line with the policy framework for sustainable products of the forthcoming circular economy action plan, to ensure that devices are designed for durability, maintenance, dismantling, reuse and recycling and including a right to repair or upgrade to extend the lifecycle of electronic devices and to avoid premature obsolescence*”.

(6) BERTOLDI P., AVGERINO M. & CASTELLAZZI L. (2017), “Trends in data centre energy consumption under the European Code of Conduct for data centre energy efficiency”, JRC, technical report.

EIRGRID & SONI (2020), “All-island generation capacity statement”.

European Commission (2020), “Green and digital: Study shows technical and policy options to limit surge in energy consumption for cloud and data centres”, 9 novembre.

FU Y., XU H., KYRI B. & WANGDA Z. (2020), “Assessments of data centers for provision of frequency regulation”, *Applied Energy*, 277.

GeSI (2019), “Digital with a Purpose – delivering a smarter 2030”.

GONG X., ZHONGBIN Z., SIXUAN G., BAOLIAN N., LIU Y., HAIJIN X. & MANFANG G. (2020), “A review on evaluation metrics of thermal performance in data centers”, *Building and Environment*, 177.

GreenIT (2019), “The environmental footprint for the digital world”.

HE H. & SHEN H. (2021), “Minimizing the operation cost of distributed green data centers with energy storage under carbon capping”, *Journal of Computer and System Sciences*, 118.

HUANG T. P., COPERTARO B., ZHANG X., SHEN J., LÖFGREN I., RÖNNELID M., FAHLEN J., ANDERSSON D. & SVANFELDT M. (2020), “A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating”, *Applied Energy*, 258.

International Energy Agency (2020), “Data centres and data transmission networks”.

JIN C., XUELIAN B., CHAO Y., WANGXIN M. & XIN X. (2020), “A review of power consumption models of servers in data centers”, *Applied Energy*, 265.

KAMIYA G. & KVARNSTRÖM O. (2019), “Data centres and energy – from global headlines to local headaches?”, *IEA*.

KAMIYA G. (2020), “The carbon footprint of streaming video: Fact-checking the headlines”, *IEA*, commentary.

KORONEN C., AHMAN M. & NILSSON L. J. (2020), “Data centres in future European energy systems energy efficiency, integration and policy”, *Energy Efficiency*, 13.

KORONEN C. (2018), *Demand-response potential of large-scale data centers in Europe 2030*, thèse de master, Lund University.

LI J. & ZHENGWEI L. (2020), “Model-based optimization of free cooling switchover temperature and cooling tower approach temperature for data center cooling system with water-side economizer”, *Energy and Buildings*, 227.

LIU L., ZHANG Q., ZHAI Z., YUE C. & MA X. (2020), “State-of-the-art on thermal energy storage technologies in data center”, *Energy and Buildings*, 226.

MALMODIN J. & LUNDÉN D. (2018), “The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M Sectors 2010–2015”, *Sustainability*.

MASANET *et al.* (2020), “Recalibrating global data centre energy-use estimates”, *Science*.

MONTEVECCHI, F., STICKLER, T., HINTEMANN, R. & HINTERHOLZER, S. (2020), “Energy-efficient cloud computing technologies and policies for an eco-friendly cloud market”, European Commission, final study report, Vienna, report commissioned by the Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology.

NGUYEN T. T., PHAM T. A. T. & TRAM H. T. X. (2020), “Role of information and communication technologies and innovation in driving carbon emissions and economic growth in selected G-20 countries”, *Journal of Environmental Management*, 261.

NIU T., BO H., KAIGUI X., CONGCONG P., HONGYANG J. & CHUNYAN L. (2021), “Spatial coordination between data centers and power system considering uncertainties of both source and load sides”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 124.

ORÓ E., DEPOORTER V., GARCIA A. & SALOM J. (2015), “Energy efficiency and renewable energy integration in data centres. Strategies and modelling review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*

RONG H., ZHANG H., XIAO S., LI C. & HU C. (2016), “Optimizing energy consumption for data centers”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*

The Shift Project (2019), “Climate crisis: The unsustainable use of online video”.

The Shift Project (2019), “Lean ICT: Towards digital sobriety”.

ZHENG J. & WANG X. (2021), “Can mobile information communication technologies (ICTs) promote the development of renewables? Evidence from seven countries”, *Energy Policy*, 149.