

Les consommations du numérique en 2030 : électricité, eau et empreinte carbone

Rapport de l'Académie



Académie des technologies
Le Ponant — Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS

+33(0)1 53 85 44 44

secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

© Académie des technologies
ISBN : 979-10-97579-71-5

Couverture : Christoph Burgstedt – Adobe Stock

LES CONSOMMATIONS DU NUMÉRIQUE EN 2030 : ÉLECTRICITÉ, EAU ET EMPREINTE CARBONE

Rapport

Ce rapport a été rédigé sous la direction de Jean-Claude André et Yves Caseau.

Il est le produit d'un groupe de travail dont la composition complète est précisée en annexe. Il répond à un processus rigoureux au sein de l'Académie des technologies garantissant son indépendance et son objectivité ; il a été approuvé et voté lors de l'Assemblée générale des académiciens.

Mars 2026

SOMMAIRE

Avertissement	8
Résumé	10
Summary	12
Chapitre 1	
Introduction	14
Chapitre 2	
Les centres de données	19
2.1. La consommation électrique en 2020	19
2.2. La consommation électrique estimée pour 2023	23
2.3. La croissance de la consommation électrique à l'horizon 2030	31
2.4. Tableau récapitulatif 2015-2020-2023-2030	39
2.5. L'empreinte carbone	39
2.6. Les quantités d'eau utilisées	43
Chapitre 3	
Les réseaux	47
3.1. Le volume du trafic sur les réseaux mobiles	48
3.2. Le volume du trafic sur les réseaux fixes	49
3.3. La consommation énergétique selon les technologies	49
3.4. Les facteurs influençant l'évolution du trafic mondial de données	51
3.5. L'horizon 2030	53
Chapitre 4	
Les composants	59
4.1. La consommation et les émissions lors de la fabrication : périmètres 1, 2 et 3, amont et aval	59
4.2. Les évolutions des circuits intégrés, miniaturisation et efficacité énergétique	62
4.3. Les progrès futurs	63

4.4. Les consommations énergétiques et les émissions de GES lors de la fabrication de composants	66
4.5. Quelques éléments sur l'utilisation d'eau pour la fabrication de composants électroniques	70
Chapitre 5 Les terminaux et appareils	74
Chapitre 6 Synthèse sur la consommation électrique et l'empreinte carbone du secteur numérique	79
Chapitre 7 Avantages de la numérisation dans l'industrie et les services	82
7.1. Accélération de la R&D	84
7.2. Optimisation du fonctionnement de systèmes	85
7.3. La gestion de l'énergie	86
7.4. Les transports	88
7.5. La logistique	90
7.6. La production et l'industrie	91
7.7. Éléments pour une appréciation globale de l'impact positif de la numérisation	92
Chapitre 8 Le cas spécifique de la France	95
8.1. La situation en 2022	95
8.2. Éléments de prospective	97
Chapitre 9 Conclusion et points essentiels	99
Notes	105
Sigles et acronymes	110
Glossaire	112
Remerciements	115
Annexes	116

Avertissement

La question d'une explosion des besoins en électricité pour faire face au développement des activités numériques, et singulièrement de celles relatives à l'intelligence artificielle, avec les conséquences environnementales qui accompagnent une telle explosion (consommation d'eau, émissions de gaz à effet de serre), est un sujet très préoccupant et omniprésent dans beaucoup d'études prospectives. Si la plupart des services numériques permettent des économies énergétiques très supérieures à leurs propres consommations, il reste très important d'avancer de façon aussi argumentée que possible pour construire les perspectives de consommation.

2030, UN AVENIR PRÉVISIBLE

Le rapport qui suit s'attache à distinguer et documenter un avenir proche, limité à 2030, pour lequel la trajectoire est encore contrainte par d'assez nombreux facteurs. Parmi ceux-ci il faut compter les capacités de production industrielle des processeurs entrant dans la construction des centres de données. Les grands producteurs de composants pour les centres de données sont à pleine capacité, et la construction de nouvelles usines requiert plusieurs années. Il faut aussi prendre pleinement conscience que le modèle d'affaires de l'intelligence artificielle générative ou agentique n'est pas encore établi, et que les développements sont actuellement lancés sous forme d'investissements volontaristes. Certes les effets «rebond» d'utilisation des réseaux de communication sont connus et pris en compte ici, mais la part de croissance récente liée à la pénétration des réseaux mobiles a été compensée, y compris pour les effets «rebond», par la croissance de la performance des réseaux. L'utilisation de la 6G, la plus à même d'entraîner de nouveaux effets «rebond», n'interviendra justement que vers 2030. L'horizon 2030 paraît donc assez

bien cerné et les projections correspondantes, telles que présentées au tableau du chapitre 6, ne connaissent pas de croissance démesurée.

AU-DELÀ DE 2030, DES HYPOTHÈSES DIFFICILES

Que peut-il advenir au-delà de 2030 ? Les avènements possibles sont multiples et il ne paraît pas possible de les chiffrer aujourd'hui sans faire d'hypothèses difficiles à conforter. Si de véritables modèles d'affaires émergent avant la fin de la décennie, il y aura probablement un fort développement tant des centres de données que des échanges sur les réseaux. Quelles parties de ces développements de l'activité seront compensées par des progrès technologiques (parfois trop sous-estimés dans les analyses prospectives), concernant par exemple la performance énergétique accrue des processeurs, des algorithmes de l'IA, de l'IA décentralisée (« *edge computing* »), des méthodes d'apprentissage ? Y aura-t-il un fort accroissement des consommations au point de peser sur l'approvisionnement électrique mondial ? Comment cette nouvelle demande d'électricité sera-t-elle produite au plan international ? Via des sources décarbonées (nucléaire, ENR...) ou via des centrales fonctionnant aux combustibles fossiles ? Avec dans ce dernier cas un fort accroissement des émissions de gaz à effet de serre. La sobriété des utilisateurs, associée à des régulations qui ne manqueront pas d'apparaître, permettra-t-elle de rester sur une courbe de croissance maîtrisée ?

VERS UNE APPROCHE PROGRESSIVE

Les 5 dernières années de cette décennie devront être mises à profit pour restreindre progressivement le champ des possibles. Elles devront aussi permettre de mettre en place les régulations souhaitables. Les progrès technologiques ouvriront aussi très certainement la voie à des usages moins dépensiers. Suivre de près l'évolution des consommations du secteur numérique et son apport pour la transition énergétique pour extrapoler sereinement reste plus que jamais nécessaire.

Résumé

L'objet de ce rapport est de fournir une estimation de la consommation électrique mondiale du secteur des technologies et des usages du secteur numérique à l'horizon 2030. Il s'appuie pour ce faire sur une première estimation de cette consommation en 2023 basée sur une mise à jour des consommations de 2015 et 2020 disponibles dans la littérature scientifique. La projection à 2030 s'appuie, côté amont, sur une analyse de l'évolution des technologies micro-processeurs et des protocoles de télécommunications et, côté aval, sur le développement possible des applications et des utilisations des services proposés.

Le rapport projette un développement important entre 2023 et 2030, avec une augmentation de consommations de près de 30 %, soit près de 500 TWh distribués majoritairement entre centres données, réseaux de transmission et minage de crypto-monnaies. Les marges d'incertitude sont importantes, d'au moins 30 % mais pouvant monter à 100 % sur certains chiffres. Outre l'impact difficile à cerner des besoins de transmission, surtout pour les réseaux mobiles, et donc de leur consommation, le futur de l'IA générative est un point critique à considérer car déterminant pour orienter, soit vers une relative maîtrise, soit vers une explosion du développement des centres de données. L'analyse conduite dans le rapport s'appuie à la fois sur une appréciation raisonnable de la vitesse de développement possible des composantes techniques pour l'IA et de la capacité à parvenir à un modèle d'affaire stable pour celle-ci. Ces estimations restent en toute hypothèse moins élevées que celles de plusieurs autres organismes, les différences faisant l'objet d'une analyse spécifique.

Ce rapport donne aussi des indications sur les besoins en eau du secteur numérique, qu'il s'agisse de prélèvements, avec restitution ultérieure au milieu hydrologique, ou de consommations non restituées. Deux activités

sont examinées en particulier, le refroidissement des centres de données, pour lequel la consommation représente souvent les $\frac{3}{4}$ des prélèvements, et la fabrication des circuits intégrés où la plus grande partie de l'eau prélevée retourne au milieu sans consommation importante.

L'empreinte carbone du secteur numérique semble pouvoir rester stable jusqu'à l'horizon 2030, avec environ 3,5 % de l'ensemble des émissions du seul CO₂, correspondant à environ 2,5 % de l'ensemble des émissions de tous les gaz à effet de serre. Cette stabilité des émissions entre 2023 et 2030 résulte d'une compensation des besoins énergétiques qui augmentent par une décarbonation progressive de la production d'électricité.

Le cas de la France est assez spécifique, avec une énergie électrique fortement décarbonée et une consommation électrique prévue en diminution. L'empreinte carbone du pays reste toutefois obérée par l'importation de très nombreux équipements et matériels produits dans des pays à forte empreinte.

Le bilan entre les économies d'énergie et d'émissions réalisées grâce à la numérisation, et les coûts énergétiques et en émissions de ce même secteur numérique, bien que difficile à estimer quantitativement, reste toutefois très positif en termes qualitatifs. Le développement de l'IA s'inscrit actuellement dans cette même perspective.

Le rapport présente en conclusion quelques leviers d'action à horizon proche, allant d'actions citoyennes à des actions de régulation, toutes destinées à réduire les usages énergivores de très faible utilité, voire spéculatifs comme le minage de crypto-monnaies. À horizon plus distant, l'attention est attirée sur l'intérêt de normes d'efficacité pour les centres de données, et sur le développement et l'usage de technologies sobres. Le développement futur du secteur numérique dépendra de la capacité à (i) maîtriser la croissance de l'IA via des régulations et des innovations; (ii) décarboner les infrastructures (centres de données, réseaux); (iii) éviter les effets « rebond » en adoptant des pratiques sobres et responsables. Le numérique peut être un allié de la transition écologique, à condition d'être piloté avec rigueur.

Summary

This report is aimed at estimating the global electricity power consumption of the digital sector and numerical technologies and services at the 2030 time horizon. It starts from an estimate of the 2023 consumption which is itself based upon, and extrapolated from, consumptions measured for 2015 and 2020 which are easily available in the scientific literature. The projection from 2023 to 2030 makes use, on the one hand, of new and improved technologies for chips and telecommunication protocols and, on the other hand, of possible developments of applications and usage of available services.

The report estimates the increase of consumption between 2023 and 2030 close to 30%, *i.e.*, close to 500 MWh, due mainly to data centers, networks and bitcoin mining. Uncertainties are large, of the order of 30% but approaching 100% for some items. Besides the difficulty of estimating the impact of data transmission, especially through mobile networks, the future development of Generative AI is critical, as it may correspond for data centers to either a relatively controlled growth or a large multiplication of their numbers and capacities. The report analysis is accounting and balancing both for the speed of development of technological AI tools, and for the capacity of AI to reach a sustainable business model. Our estimations remain anyway lower than those proposed by other agencies and institutes, as specifically analyzed in the report.

The reports also addresses the issues of water needs for the digital sector, being either withdrawal, with water flowing back to rivers and other water reserves after use, or consumed by evaporation or pollution and not reusable. Two types of activities are looked at, firstly the cooling of data centers, for which almost $\frac{3}{4}$ of the water is consumed and not returned to rivers and water reserves, and secondly the fabrication of chips for which the largest part of water returns to the environment with only limited consumption.

The carbon footprint of numerical activities is likely to be stable over the next 5 years, with approximately 3.5% of CO₂ emissions, corresponding to 2.5% of all greenhouse gases. This stability of emissions between 2023 and 2030 results from a balance between increased electricity power consumption and progressive greening of the electricity production.

France appears rather specific, as the carbon content of its electricity is very low and, at the same time, the electricity power consumption is likely to decrease over the period. The French carbon footprint is nevertheless strongly affected by the import of a very large part of the devices used by the digital sector.

The balance between energy and emission savings and emissions and energy consumption due to digital activities, although difficult to quantify accurately, remains however qualitatively very positive. This also applies for the actual (*i.e.* up to 2030) development of AI.

The report concludes by introducing a few recommendations for the period, encouraging sobriety at the individual level and promoting regulation of low-interest usages, including speculative cryptocurrencies. On the longer term, it appears that data centers should be constrained to increase their energy efficiency, and low-energy technologies should be developed and largely used. The future development of the digital sector will strongly depend on its ability to (i) control AI growth through innovation and regulations; (ii) decarbonate infrastructures (data centers, networks); (iii) prevent rebound effects by adopting sober and sustainable practices. Further digitalization of the society is likely to serve ecological transition, at the condition it is managed rigorously.

Chapitre 1

INTRODUCTION

Le secteur numérique pèse aujourd'hui de l'ordre de 3% de la consommation mondiale d'énergie, mais cette part est environ 2 fois plus importante si l'on se réfère à la seule consommation d'électricité. Le développement des réseaux à haut débit ouvre la voie à une intensification des communications, tant professionnelles que de loisir; l'apparition de l'intelligence artificielle (IA), et plus particulièrement de l'IA générative (GenAI), nécessite l'utilisation de centres de données plus puissants et plus nombreux; l'électrification de nombreux usages nouveaux grâce au numérique requiert un accès supplémentaire à la puissance électrique (mais à l'inverse permet des économies d'énergie et d'émissions). Comment estimer le développement de ces nouveaux besoins et celui de la consommation du secteur numérique dans les prochaines années ?

Ces questions font l'objet du présent rapport, rapport ayant pour origine une demande du pôle « Énergie » au pôle « Numérique » de l'Académie des technologies datant de fin 2023: cette demande était relative à une prospective de la consommation électrique du secteur numérique à l'horizon de la fin de la décennie (2030). Un groupe de travail (GT) a donc été constitué au sein du pôle « Numérique », et ouvert à d'autres pôles (cf. Annexe 2). Un projet de mandat du GT a été proposé suite aux échanges avec l'ensemble des personnes s'étant déclarées intéressées (cf. Annexe 3). Au-delà de la seule prospective sur la consommation électrique du numérique à la fin de la décennie, la question initiale du pôle « Énergie » a ainsi été élargie au bilan carbone et à la consommation d'eau de ce secteur d'activités. Quelques éléments montrant le bilan coûts/bénéfices de la digitalisation de grands secteurs économiques ont aussi été rassemblés. Il a enfin été jugé indispensable de situer cette prospective dans le contexte de l'évolution des consommations depuis 2020, afin de

mettre en perspective d'éventuels biais souvent liés à des extrapolations très généreuses.

Il faut rappeler que l'Académie des technologies avait déjà travaillé sur un sujet très proche (Gelenbe et Caseau, *Impact des TIC sur la consommation d'énergie à travers le monde*, 2013). Il est aussi à noter que nombre d'organismes nationaux et internationaux ont publié des rapports sur tout ou partie de ces sujets (cf. Annexe 4), rapports dont le GT a pris connaissance et a croisé les conclusions et perspectives (cf. Annexe 1).

Lorsqu'il s'agira d'estimer l'empreinte carbone des différents secteurs de production, on se réfèrera au protocole international sur les gaz à effet de serre, qui définit trois périmètres d'émissions :

- les émissions du périmètre 1 (*scope 1*) : émissions directes provenant de l'activité d'entreprise ;
- les émissions du périmètre 2 (*scope 2*) : émissions indirectes provenant de l'énergie achetée pour l'activité. Une difficulté apparaît suivant que l'on considère l'endroit où l'énergie est produite, ou celle où elle est consommée. Par exemple, pour une même consommation d'énergie électrique, l'empreinte carbone sera différente pour de l'électricité produite en France ou en Allemagne, puis utilisée en France ou en Allemagne ;
- les émissions de périmètre 3 amont ou aval (*scope 3*) : émissions de la chaîne d'approvisionnement énergétique en amont et en aval. L'amont concerne les émissions dues au contenu énergétique des activités liées à la production : déplacements des personnels, contenu énergétique des achats et des investissements... L'aval concerne les émissions liées à l'utilisation des produits (d'où l'incitation à augmenter l'efficacité énergétique des produits, et à limiter la consommation due à la commercialisation, distribution, publicité...).

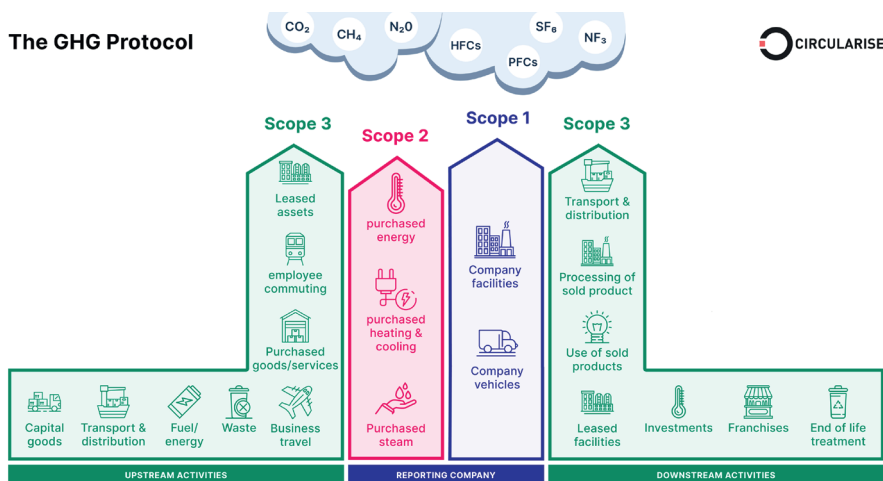


Figure 1.1: Les différents périmètres pour la comptabilisation des émissions de GES

Lorsqu'il s'agira d'estimer l'utilisation et la consommation d'eau du numérique, que ce soit pour le refroidissement des centres de données (chapitre 2) ou pour la fabrication des composants (chapitre 4), il faudra distinguer entre « prélèvement » et « consommation » :

- les prélèvements d'eau sont les quantités d'eau extraites directement ou indirectement des cours d'eau, des réserves de surface, naturelles ou non, et des nappes phréatiques, aux fins d'utilisation dans les centres de données et dans les usines de fabrication de composants ;
- après cette utilisation industrielle, la qualité de l'eau liquide récupérée est moins bonne qu'en entrée, en raison soit d'une élévation de température, soit de l'incorporation de polluants. Des traitements sur le site industriel permettent alors de redonner à une partie de cette eau une qualité adaptée à une nouvelle utilisation dans l'installation. Ces volumes d'eau sont alors « recyclés » en amont, ce qui permet de limiter les prélèvements dans le milieu naturel en utilisant bien davantage d'eau pour les processus industriels que la seule quantité prélevée ;
- l'autre partie de l'eau utilisée est rejetée sous forme liquide dans le milieu naturel, soit directement en cas d'élévation modeste de température et d'absence de pollution, soit indirectement après traitement de dépollution.

Les volumes rejetés sont alors réutilisés par le milieu naturel et disponibles pour d'autres activités humaines ;

- la différence entre les volumes prélevés et les volumes rejetés est la quantité d'eau consommée par les installations. Il s'agit des quantités d'eau évaporées dans les installations industrielles de refroidissement, c'est-à-dire rejetées sous forme gazeuse. L'eau incorporée dans les produits fabriqués est également de l'eau consommée, mais les quantités correspondantes sont minimales. L'eau utilisée et polluée dans les procédés de fabrication est, soit totalement consommée si elle n'est pas dépolluée, terminant alors comme déchet, soit dépolluée pour être réutilisée, avec seulement une fraction finalement rejetée dans l'environnement si sa qualité est suffisante, ou pour le reste terminant comme déchet. L'eau réellement consommée disparaît des flux liquides réutilisables par le milieu naturel et d'autres activités. Des consommations importantes impactent ainsi négativement le milieu naturel.

Évoquée pour une deuxième étape dans le mandat du GT (cf. Annexe 3), la question de la consommation des matériaux « rares » n'a pas pu être traitée ici. Elle ne pourrait l'être qu'après mise en place d'un nouveau GT, ouvert, au-delà du seul secteur du numérique, à d'autres secteurs fortement consommateurs de ces matériaux.

Une décomposition des consommations du secteur numérique conduit à distinguer les contributions liées aux centres de données, aux réseaux, aux composants utilisés, et aux terminaux, appareils et ordinateurs, « *on edge* » ou embarqués. Ces quatre éléments font l'objet des chapitres 2 à 5. Le chapitre 6 propose une synthèse de l'ensemble. En regard des coûts énergétiques et environnementaux, le chapitre 7 résume quelques études sur les avantages de la digitalisation et les économies qu'elle permet. Enfin le chapitre 8 met l'accent sur le cas spécifique de la France.

Ce rapport est structuré autour de 3 dates : (i) 2020, date à laquelle les chiffres rétrospectifs sont disponibles ; (ii) 2023, date à laquelle est proposée une évaluation la plus proche de la situation présente, bien que tous les chiffres ne soient pas encore disponibles ; (iii) 2030, date cible pour la prospective demandée au rapport. Le bilan carbone complet du secteur numérique s'est avéré plus difficile à établir que la consommation électrique de ce même secteur. Quant aux consommations

d'eau les chiffres qu'il a été possible de rassembler ne sont que partiels. Le développement rapide de l'IA a fait l'objet d'une attention particulière, en lien avec les consommations des centres de données.

Le GT a travaillé de façon assez classique, en conduisant de nombreuses auditions auprès de spécialistes représentant la fabrication des composants, les centres de données, les réseaux, et de plusieurs grands groupes industriels utilisateurs (cf. Annexe 5). Il a ensuite été proposé aux personnes auditionnées de participer aux séances suivantes.

Notons enfin que ce rapport n'a pas l'ambition d'être aussi développé et complet que ceux d'agences spécialisées, tant françaises qu'internationales. Il est bien sûr souvent fait références à leurs travaux sans trop entrer dans le détail de ceux-ci (cf. néanmoins l'annexe 1). Rappelons en effet que l'objectif du présent rapport est, « plus simplement », de produire une analyse de la situation présente (2023) ainsi qu'une estimation pour un avenir pas trop éloigné (2030).

Chapitre 2

LES CENTRES DE DONNÉES

2.1. LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN 2020

La consommation électrique des centres de données (*data centers*) est, en dehors du minage des *bitcoins*, pratiquement stable entre 2000 et 2020ⁱ. La source qui fait référence est l'article de Malmodin *et. al* (2024)¹, parce que cette équipe travaille sur ce sujet depuis plus de 15 ans et produit des compilations très détaillées et très référencées. Les chiffres pour 2020 sont de 223 TWh pour les centres de données (sans l'utilisation de la *blockchain* pour le minage des *bitcoins*, cf. 2.2.2). Pour comparaison, les consommations des autres secteurs étaient alors de 244 TWh pour les réseaux (*networks*) et de 421 TWh pour les appareils (*devices*).

Ces chiffres sont consistants avec les différentes autres sources que l'on peut trouver pour 2020. Les documents de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) donnent une valeur de 200 TWh pour 2015 et une fourchette 220-320 TWh pour 2021, mais un suivi sur 10 ans des estimations de l'IEA montre que c'est plutôt le bas de la fourchette qui s'est trouvé réalisé.

Le tableau 2.1 permet une mise en perspective de l'évolution depuis 2010, en s'appuyant sur la note de Gelenbe et Caseau (2013) et sur des chiffres 2015 obtenus par une synthèse bibliographique (regroupant les études de Malmodin *et. al*²). À noter qu'ici, sur la ligne « Appareils », n'apparaissent les consommations que des seuls équipements pour les TIC, à l'exemption des consommations des appareils dits E&M (Media et loisirs). Ces derniers seront toutefois bien pris en compte dans les analyses finales (cf. Chapitres 5 et 6).

1 [ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome–ScienceDirect](#)

2 [\(PDF\) The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015](#)

	2010	2015	2020
Centre de données	240	220	223
Réseaux	185	242	244
Appareils	300	347	421

Tableau 2.1 : Évolution de la consommation électrique (en TWh) des différents secteurs du numérique

Différents articles parus en 2020 confirment les chiffres de 2015 produits par Malmudin et son équipe et le fait que la consommation électrique des centres de données reste stable, alors qu'ils sont en pleine croissance du point de vue de la puissance de calcul (voir par exemple Masanet *et al.* (2020)³, très souvent cité, qui donne une explication détaillée des facteurs d'économie; cet article est semblable, mais va plus en profondeur, à l'analyse de Gelenbe et Caseau (2013), ou Cunliff (2020)⁴. Il faut noter que les chiffres de Cunliff (2020) sont plus bas, de l'ordre de 180 TWh, tout comme les chiffres de Statista⁵ (cf. Figure 2.1), voir Roundy et Kirvan (2025)⁶. L'intérêt de cet article et de l'étude de Statista est de montrer le déplacement de la charge des centres de données depuis les centres traditionnels privés vers les *hyperscalers*⁷. Entre 2015 et 2020, ces derniers sont passés de 30 TWh à 76-85 TWh, avec une croissance qui s'est poursuivie jusqu'en 2023. Cette augmentation spectaculaire des *hyperscalers* se retrouve bien sûr dans les chiffres de Amazon, Meta ou Alphabet et explique une partie de l'attention qu'ils ont reçu dans la presse en 2025 (cf. 2.3 *infra*). L'attention du lecteur est attirée sur ce transfert, déjà bien connu, depuis les centres de données privés vers ceux du *cloud*, car il explique une partie de la croissance de ces derniers. En recalibrant les répartitions de Statista sur la base d'un total de 220 TWh en 2020, on obtient approximativement 90 TWh pour les *hyperscalers*, 80 TWh pour les autres *clouds*, et 50 TWh pour les centres de données privés.

3 Science Magazine

4 Beyond the Energy Techlash: The Real Climate Impacts of Information Technology | ITIF

5 https://www.statista.com/statistics/186992/global-derived-electricity-consumption-in-data-centers-and-telecoms/?Offer=abt_toc_eoc_ctrl

6 <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/tip/How-much-energy-do-data-centers-consume>

7 Les *hyperscalers* sont les très grands centres de données, tels qu'opérés par les acteurs majeurs du *cloud* (AWS, Azure, GCP) qui on fait de leur taille massive et de l'hyper-automatisation un avantage compétitif majeur.

Energy demand in data centers worldwide from 2015 to 2021, by type
(in terawatt hours)

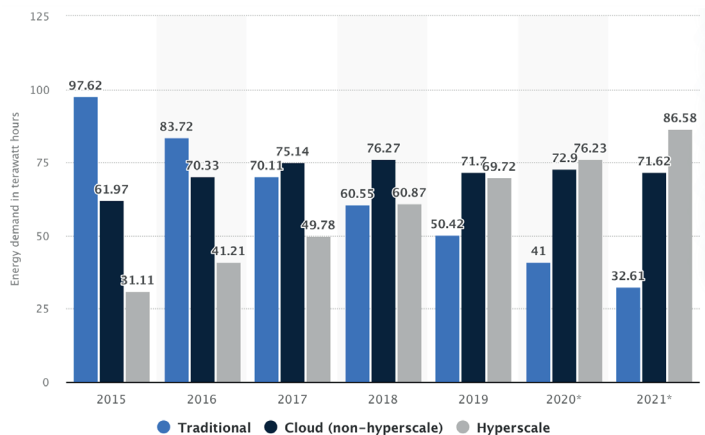


Figure 2.1: Répartition de la consommation électrique des centres de données entre hébergements classiques, cloud privés et hyperscalers (source: Statista)

Il est nécessaire d'apprécier le niveau de confiance et d'étalonner cette valeur de 220 TWh pour la consommation des centres de données en 2020, car l'incertitude s'amplifiera au-delà de cette date. La figure 2.2 (IEA, 2020⁸) montre la répartition par région pour un total de 200 TWh, à comparer avec l'intervalle mentionné précédemment. Cette répartition permet d'examiner chaque zone plus en détail, et de consolider ainsi le niveau de confiance.

Les chiffres de 70 à 80 TWh pour les États-Unis sont confirmés par de nombreuses sources, telles que « *Datacenter Dynamics* »⁹, qui indique une puissance installée totale de 17 GW en 2022, soit environ 85 à 90 TWh de consommation annuelle, ce qui correspond à la trajectoire décrite dans la suite. À noter au passage que la partie prévisionnelle de la figure 2.2 est erronée, la consommation des centres de données ayant commencé à croître dès 2020. L'ordre de grandeur de 40 TWh pour l'Europe est également confirmé par différentes sources, comme le rapport de 2024 de

8 <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-data-centre-energy-demand-by-region-2010-2022>

9 [News-DCD](#)

l'UE¹⁰ ou l'article scientifique de Masanet déjà cité (205 TWh en 2018), que l'on retrouve dans une étude plus approfondie.

Global data centre energy demand by region, 2010- 2022

Last updated 3 Jun 2020

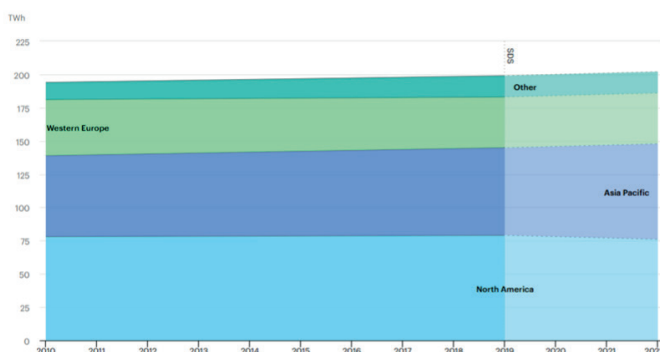


Figure 2.2: Évolution par grandes régions de la consommation électrique des centres de données sur la période 2010-2022 (de bas en haut: Amérique du Nord, Asie-Pacifique, Europe Occidentale, autres)

Un exemple intéressant de divergence est l'analyse du *Berkeley Lab*¹¹, utilisée plus tard dans ce rapport. Jusqu'en 2018, cette analyse coïncide en effet avec toutes les estimations précédemment citées pour les États-Unis, de Malmudin à Masanet. Cependant elle montre une inflexion marquée au-delà, avec plus de 100 TWh en 2020 (et 170 TWh en 2023, comme discuté plus bas). La valeur de 85 TWh en 2022, mentionné précédemment comme très probable, peut laisser sceptique sur la valeur de 170 TWh extrapolée par Berkeley pour 2023. Cette estimation de 170 TWh pour les centres de données aux États-Unis a pourtant été reprise dans de nombreuses autres étudesⁱⁱ.

10 [JRC Publications Repository-Energy Consumption in Data Centres and Broadband Communication Networks in the EU](#)

11 [lbnl-2024-united-states-data-center-energy-usage-report.pdf](#)

En avril 2025, l'IEA a publié «*Energy & AI*»¹², un rapport très complet et très riche devenu la référence sur son sujet. Comme discuté *infra*, les estimations contenues dans ce rapport, relatives aux consommations mondiales, sont plutôt du côté haut. On y trouve pour 2020 le chiffre approximatif de 260 TWh. La décomposition régionale qui accompagne les chiffres mondiaux reprend l'analyse du *Berkeley Lab* citée plus haut (100 TWh pour les États-Unis en 2020 et 170 TWh en 2023), à contraster avec la valeur de 80 TWh pour les États-Unis en 2020 que l'on trouve également à la figure 2.2 du nouveau rapport de la *National Academy of Engineering* (NAE)¹³ des États-Unis.

Il est donc prudent pour la suite des estimations de retenir un chiffre de 220 TWh comme valeur moyenne (cf. Tableau 2.1) et de 250 TWh comme hypothèse haute pour la consommation électrique des centres de données en 2020, hors minage de *bitcoin*.

2.2. LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE ESTIMÉE POUR 2023

Il n'est pas facile de produire une estimation pour 2023 et ce n'est pas un hasard s'il y a un délai de 2 à 3 ans pour les chiffres publiés dans des articles scientifiques. En particulier, les acteurs du *cloud* sont très discrets sur leurs consommations électriques¹⁴. En utilisant les profils de croissance publiés et les chiffres de la figure 2.1, il est possible d'estimer la part des *hyperscalers* à 130 TWh en 2023. Cette forte augmentation correspond à la poursuite du déplacement vers le *cloud* et correspondrait à une estimation globale de 250-280 TWh au niveau mondial pour 2023 (*blockchain* pour le minage des *bitcoins* toujours exclue). L'estimation de 280 TWh sera conservée pour la suite, une des raisons pour lesquelles

12 <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>

13 [Implications of Artificial Intelligence-Related Data Center Electricity Use and Emissions: Proceedings of a workshop | The National Academies Press](#)

14 Si on trouve dans les rapports annuels des informations sur la consommation d'électricité verte ou sur les améliorations d'efficacité, les chiffres bruts de la consommation sont quant à eux très bien cachés. Pour Google et Microsoft, la presse fait référence à 23 TWh en 2023 pour chacun. Pour Amazon, c'est un secret bien gardé: <https://www.forbes.com/sites/robertbryce/2021/02/03/amazon-is-reporting-record-smashing-revenue-and-profits-why-wont-it-disclose-how-much-energy-it-is-using/>

la fourchette est élargie vers le haut n'étant pas l'impact de GenAI, mais la difficulté à estimer l'augmentation de la consommation des centres de données chinois. Cette estimation est consistante avec l'estimation faite pour les États-Unis en partant de la puissance rapportée de 17 GW¹⁵, qui correspond à un ordre de grandeur de consommation de 90-100 TWh, et est cohérent avec les chiffres d'une consommation de 75 TWh en 2015¹⁶. Les estimations pour 2023 divergent, on trouve par exemple le chiffre de 170 TWh (*infra*), mais sans justification (probablement parce que ce chiffre inclut le minage de *bitcoins* ?).

La fourchette reportée par l'IEA pour 2022 est de 240-340 TWh¹⁷, mais la fourchette de valeurs donnée précédemment de 250-280 TWh pour 2023 est tout à fait compatible, étant donnée en particulier l'historique des estimations de l'IEA depuis 10 ans, toujours un peu hautes. On peut caractériser un peu mieux la croissance de Google Cloud et de Azure à partir de l'estimation de 24 TWh pour chacun¹⁸. Ces chiffres ne sont pas confirmés mais sont cohérents avec d'autres sources, telles Statista¹⁹, et des *Environmental Sustainability Reports*²⁰ de plusieurs entreprises (cf. aussi le chiffre total de 80 TWh donné *supra* en commentaire de la figure 2.1). Sont mentionnées dans ces rapports des croissances de 30 % entre 2020 et 2023 pour les émissions, en ligne avec une estimation de 30 % d'augmentation des consommations électriques sur la même période. On peut retrouver une estimation de 270 TWh en faisant l'extrapolation des chiffres de 2020 avec les tendances de la figure 2.1. On obtient ainsi :

15 [Newmark: US data center power consumption to double by 2030 -](#)

16 [United States Data Center Energy Usage Report](#)

17 <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks/> : La citation exacte est « *Estimated global data centre electricity consumption in 2022 was 240-340 TWh, or around 1-1.3% of global final electricity demand. This excludes energy used for cryptocurrency mining, which was estimated to be around 110 TWh in 2022, accounting for 0.4% of annual global electricity demand* ».

18 <https://www.techradar.com/pro/google-and-microsoft-now-each-consume-more-power-than-some-fairly-big-countries> – ce chiffre n'est pas confirmé mais il est cohérent avec d'autres sources, telles que Statista – <https://www.statista.com/statistics/788540/energy-consumption-of-google/>

19 <https://www.statista.com/statistics/788540/energy-consumption-of-google/>

20 L'abondance des chiffres cités ne permet toutefois pas de remonter aux consommations électriques !

120 TWh pour les *hyperscalers* (dont 20 TWh d'accélération liés à GenAI), 90 TWh pour les autres *clouds* et 60 TWh pour les centres de données privés. Ce chiffre correspondrait à des consommations hypothétiques de 65 TWh pour AWS, 25 TWh pour Google et Microsoft et 5 TWh pour les autres²¹.

2.2.1. LA CONTRIBUTION DE GENAI

L'intelligence artificielle (mot utilisé de fait pour désigner l'apprentissage profond) ne se réduit pas à l'intelligence artificielle générative (GenAI), très énergivore comme évoqué ci-dessous, mais inclut également des applications pour la R&D en multipliant les capacités de traitement et d'utilisation des données, et plus encore pour l'industrie. Dans ce dernier cas, et au-delà de possibles utilisations de GenAI à des fins générales, nombre de secteurs industriels peuvent bénéficier de l'ensemble des avantages compétitifs que procure l'IA en se limitant à un apprentissage à partir des bases de données très larges mais limitées à leurs propres secteurs d'activités et aux secteurs immédiatement connexes. Dans ce cas la consommation énergétique de cette « IA sectorielle » est inférieure de plusieurs ordres de grandeurs à celle de GenAI. L'IA sectorielle est non seulement beaucoup plus économe en énergie, mais aussi en coûts d'investissement et de fonctionnement. Le chapitre 7 donne quelques exemples de ces applications industrielles, assurant sa rentabilité économique. Par contraste le modèle économique de GenAI est toujours quelque peu incertain.

La contribution de GenAI à la croissance des *hyperscalers* de 2020 à 2023 a en effet été modérée, probablement de l'ordre de 20 TWh. Pour fixer des ordres de grandeur, la consommation électrique pour l'entraînement de *ChatGPT4* a été estimée à 50-60 GWh, tandis que la consommation

21 Cette estimation de 270TWh s'appuie sur une légère reprise de la croissance des centres de données privés après la période de baisse depuis 2018, comme indiqué dans le rapport de 2025 de l'IEA et correspond à une tendance observée chez les hébergeurs de DSI.

globale pour *ChatGPT* est rapportée à 180 GWh pour 2023²², avec une utilisation de 10.000 GPU NVIDIA. NVIDIA représentant plus de 80 % des GPU haute performance utilisés pour GenAI²³, il est possible de faire un calcul approximatif à partir du nombre de composants livrés en 2023, et en utilisant comme borne supérieure de consommation la consommation en pointe d'un H100 (700 W). Puisque NVIDIA en a vendu 500.000 en 2023, sur un total de 1,5 millions GPU, on obtient un accroissement de l'ordre de grandeur de 10 TWh.

Comment cet ordre de grandeur est-il produit?²⁴ La consommation annuelle d'un H100 est en général évaluée à 3,7 MWh²⁵, sur la base d'une charge de 60 %. Tout ceci n'est qu'un ordre de grandeur, il y a d'autres jeux de puces (*chipset*), moins gourmands, mais les H100 ne font pas uniquement de l'IA. On retient donc 700 W pour les H100 et 300 W pour les autres GPU, avec un taux d'usage annuel de 61%ⁱⁱⁱ. Compte tenu des volumes de 2023 cités plus haut, il est alors possible de considérer un parc de 1 million de « H100 équivalent » comme premier ordre de grandeur. Il faut aussi considérer les autres éléments du rack (les CPU et les cartes réseaux nécessaires autour du GPU, cf. la note de bas de page 22 et l'article²⁶). La consommation augmente alors d'environ 80 %, ce à quoi il faut rajouter l'énergie nécessaire au refroidissement^{iv}. Ce facteur supplémentaire se retrouve dans le PUE^v, dont une valeur moyenne dans le cas des GAFAM est de 1,2. Le résultat global est que le GPU H100 génère approximativement 10 MWh par année de consommation, conduisant à 10 TWh par an pour un équivalent de 1 million de H100 en 2023.

22 Voir l'article du New Yorker, dont le titre est trompeur : <https://www.newyorker.com/news/daily-comment/the-obscene-energy-demands-of-ai>. Un article de Forbes mentionne aussi le chiffre de 50 GWh pour GPT4T.

23 Chiffres de 2023, mais la tendance se confirme pour 2024 : <https://www.techpowerup.com/forums/threads/nvidias-gpu-market-share-hits-90-in-q4-2024-gets-closer-to-full-monopoly.329842/>

24 Deux excellents documents sont utilisés à cette fin : (1) « [AI Data Center Energy Dilemma](#) » de Semianalysis, qui donne la décomposition de la consommation d'un centre de données construit autour de clusters DGX de NVIDIA H100 (voir la section « *Data Center Maths* » ; et (2) [le document de NVIDIA qui explique le fonctionnement d'un rack DGX](#).

25 <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/h100/>. On trouve par exemple le chiffre de 3.7 MWh dans [cet article](#).

26 [AI Datacenter Energy Dilemma – Race for AI Datacenter Space – SemiAnalysis](#)

Compte-tenu de l'explosion de la taille des modèles LLM et des entraînements associés, cet ordre de grandeur permet de retenir 10 TWh comme accélération de la consommation de l'IA associé à GenAI entre 2020 et 2023. Il est important de noter que de nombreuses autres projections font état d'une très forte croissance (triplement des ventes en 2024, ce qui semble s'être réalisé si on regarde les résultats financiers de NVIDIA, et une croissance qui se poursuivrait encore jusque 2027). Ces prévisions sont la base des articles alarmants sur l'impact quasi-exponentiel de GenAI d'ici 2030²⁷ (cf. 2.3 *infra*).

Pour conclure ces considérations relatives à GenAI, notons que le rapport de l'IEA (2025) cite pour sa part une valeur de 350 TWh pour 2023 (et 415 TWh pour 2024). Comme l'estimation de 10 TWh annuel en 2022-2023 résultant de l'accélération due à GenAI a été confirmée indépendamment²⁸, on peut considérer comme assez fiable l'estimation de la croissance 2020-2023 proposée ici à 50 TWh. L'estimation de 270 TWh pour 2023 est alors la somme de la valeur connue pour 2020, soit 220 TWh, et de cette estimation de croissance de 50 TWh (bornée par le marché des GPU).

Ceci conduit à une fourchette de 270-320 TWh pour la consommation électrique des centres de données en 2023, hors *blockchain* pour le minage des *bitcoins*, moindre que les valeurs annoncées par l'IEA.

Au-delà de cette consommation annuelle, moyennée par nature, il faut noter que les phases d'apprentissage des LLM font appel de façon très rapidement variable à la puissance électrique. Par exemple des dizaines de milliers de GPU peuvent s'« allumer » ou s'« éteindre » en même temps (attente de *checkpointing*, ou fin des communications d'ensemble, ou début ou fin de l'entraînement...)²⁹. Ces sautes de consommation sont de l'ordre de la dizaine de MW, conduisant à de fortes contraintes sur les réseaux électriques alimentant les centres de données. Ceci ne concerne

27 Par exemple, l'article du Guardian, « [Google's emissions climb nearly 50% in five years due to AI energy demand](#) », qui annonce 1000 TWh en 2026 pour les centres de données.

28 [The growing energy footprint of artificial intelligence-ScienceDirect](#)

29 <https://semianalysis.com/2025/06/25/ai-training-load-fluctuations-at-gigawatt-scale-risk-of-power-grid-blackout>

pas les consommations relatives aux inférences, étalées dans le temps par nature, bien que des estimations récentes indiquent que les phases d'inférences peuvent représenter jusqu'à 80 % de la consommation actuelle des centres de données consacrés à l'IA.

2.2.2. LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DU MINAGE DES *BITCOINS*³⁰

La véritable nouveauté par rapport aux chiffres de 2015 n'est pas l'IA, mais la consommation électrique de la *blockchain* et du minage des *bitcoins* (*bitcoin mining*). La *blockchain* est une technologie numérique de stockage et de transmission d'informations sans autorité centrale, mise au point pour le système *bitcoin*, puis élargie à d'autres usages: gestion de contrats et de paiements, traçabilité de produits. Le minage de cryptomonnaies (*bitcoin*, Ethereum,...), destiné à vérifier la validité d'un ensemble de transactions, en est aujourd'hui l'application la plus courante.

Plusieurs études permettent de chiffrer ces consommations d'énergie et de nombreux sites web donnent des visualisations graphiques et des comparaisons pour cette consommation, par exemple le CCAF (*Cambridge Centre for Alternative Finance*), utilisé ici (Figure 2.3). Les différentes méthodes d'estimation de la consommation électrique du minage de *bitcoins* donnent des ordres de grandeur comparables: **le réseau *bitcoin* avait en 2023-24 une consommation électrique moyenne de 125±30 TWh par an.** La consommation peut fluctuer assez fortement, par exemple en réponse à une variation du cours du *bitcoin*.

30 Voir par exemple l'avis de l'Académie des technologies «*La Blockchain: une technologie disruptive avec des enjeux de sûreté, résilience et impact environnemental*» paru en février 2024.

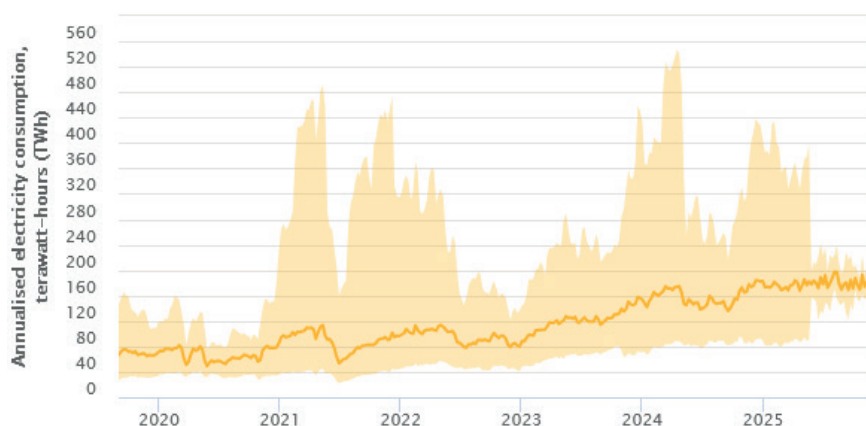


Figure 2.3: Rythme annualisé de la consommation énergétique consacrée au minage du *bitcoin*. La plage colorée indique l'incertitude entre estimations basse et haute, et la courbe continue représente la « meilleure estimation » (*best estimate*).

Au-delà de ces fluctuations, une tendance générale à une augmentation continue est claire, avec un rythme de consommation annuelle qui a été multiplié par près de 3 depuis 2019. L'exemple du *bitcoin* peut être considéré comme caractéristique des systèmes de *blockchain* fondés sur la Preuve de Travail (PoW, *Proof of Work*). Cet algorithme assure le consensus, et donc la sécurité du système, mais est responsable de la très forte consommation électrique. D'autres algorithmes de consensus, tels la Preuve d'Enjeu (PoS, *Proof of Stake*), permettent de réduire cet impact de plusieurs ordres de grandeur: une réduction d'au moins un facteur 1.000 est citée pour l'utilisation par Ethereum d'un algorithme PoS (algorithme toutefois non formellement validé à ce jour). Les *stable coins*, crypto-monnaies dont la valeur est indexée sur un autre actif, par exemple sur une monnaie³¹, fonctionnent aussi avec l'algorithme PoS. Les *blockchains* publiques n'utilisant pas la PoW consomment entre 4 et 6 ordres de grandeur de moins d'électricité que le réseau *bitcoin*, et le gain par transaction peut même atteindre 8 ordres de grandeur (rendant alors négligeable la consommation du minage). Comment les monnaies numériques vont-elles continuer à se développer? Les algorithmes PoS prendront-ils à terme le pas sur les algorithmes PoW? Ces questions, qui

31 Comme par exemple sur le dollar américain, ainsi que fortement soutenu actuellement par les États-Unis.

représentent un enjeu majeur pour le futur de la consommation électrique mondiale, ne semblent pas pouvoir recevoir aujourd'hui de réponses rationnelles !

Les *blockchains* privées sont quant à elles proches de ces faibles consommations, puisque basées sur une construction où le consensus distribué est remplacé par une autorité centralisée. À noter que la consommation de ces *blockchains* privées (de type *Hyperledger*) est incluse dans les chiffres présentés précédemment pour les centres de données.

Il est intéressant de souligner que la consommation électrique du minage de *bitcoin* équivaut donc *in fine* à environ la moitié de celle des centres de données ! Rappelons ici que, devant cette situation invraisemblable, la Chine a interdit le minage de *bitcoin* sur son territoire en 2021³². Ce type de décision ne peut être apprécié que positivement, étant donné le coût énergétique de cette activité porteuse d'aucune utilité économique ou sociétale³³. En conséquence, 38 % du minage est maintenant effectué aux États-Unis³⁴, ce qui contribue fortement à la crise de l'approvisionnement énergétique des centres de données américains³⁵.

Si l'on ajoute la consommation électrique des centres de données reportée plus haut et celle du minage de *bitcoins*, on obtient une estimation pour 2023 proche de 400 TWh (fourchette basse), en ligne avec les chiffres cités dans de nombreux articles.

32 Lire par exemple l'article de Forbes : <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2023/10/31/after-chinas-bitcoin-mining-ban-bitcoin-is-stronger-than-ever/>

33 Qui plus est, les cryptomonnaies apparaissent de plus en plus comme un moyen de blanchiment d'argent échappant aux habituels outils anti-blanchiment ; voir par exemple « Le Monde, Cryptomonnaies : un boulevard pour le blanchiment d'argent », 17 novembre 2025.

34 Cf. : <https://heatmap.news/sparks/bitcoin-crypto-electricity-consumption>

35 Voir l'analyse de l'IEA, sur l'impact du *mining* aux US : <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=61364>.

2.3. LA CROISSANCE DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE À L'HORIZON 2030

De nombreux articles parus en 2024 traitent de l'augmentation de deux types de demandes : (i) soit d'augmentation de la puissance informatique des centres de données ; (ii) soit d'ouverture de nouveaux centres. Les centres de données ne sont pas répartis de façon homogène comme le montre la figure 2.4³⁶ : aux États-Unis, la Virginie concentre une part importante des implantations, tandis qu'en Europe, c'est l'Irlande qui est un point singulier (en termes de part de l'électricité consommée par les centres de données). L'augmentation de ces demandes anticipées a provoqué un émoi aux États-Unis à cause de l'impact sur un réseau électrique assez vétuste, qui ne pourra pas absorber les augmentations attendues en l'état. Une étude récente³⁷ met l'accent sur la nécessité d'une planification stratégique et d'une modernisation des infrastructures pour éviter d'éventuelles crises énergétiques et assurer un développement durable de l'IA aux États-Unis. L'augmentation constante des puissances appelées par les nouveaux centres de données (cf. *infra* l'exemple de Meta) fait que ceux-ci cherchent à s'établir à proximité des lieux de production d'électricité, ou à construire des capacités propres de production. Si la consommation des modèles peut être facilement distribuée, et bénéficier ainsi d'équipements locaux et du « *edge computing* », l'entraînement des LLM de très grande taille reste pour l'instant l'apanage des très gros centres de données.

36 Cf. <https://www.visualcapitalist.com/cp/top-data-center-markets/>

37 <https://www.se.com/ww/en/insights/sustainability/sustainability-research-institute/powering-sustainable-ai-in-the-united-states/>

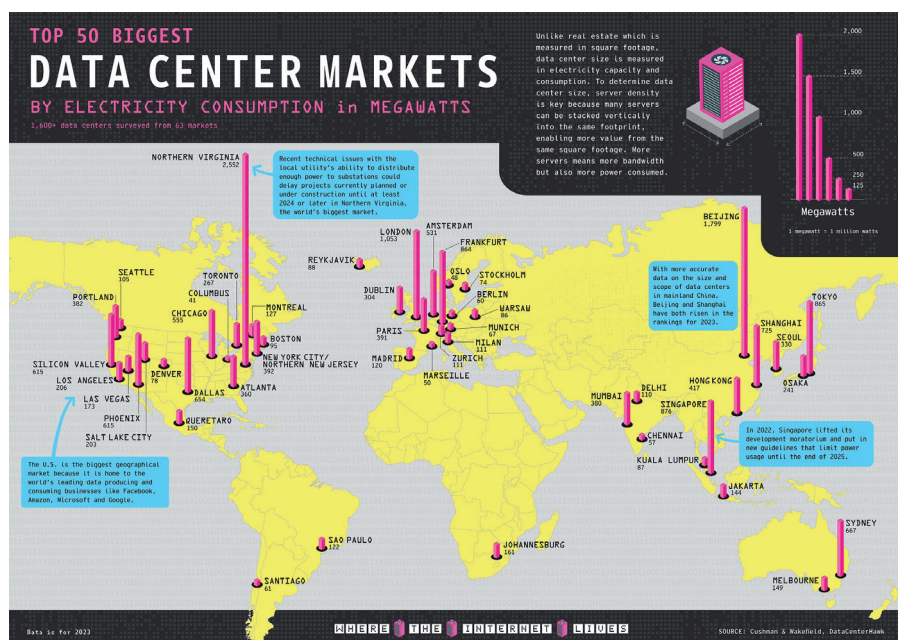


Figure 2.4: La distribution mondiale des centres de données

Une partie de cette augmentation de la demande anticipée est bien réelle, liée à la fois au développement de l'IA et au retour du minage de *bitcoins* aux États-Unis. Une autre partie s'explique par les attentes de très forte croissance de GenAI. Les États-Unis ont annoncé le plan *Stargate* d'investissement massif, tant public que privé, d'un montant de 500 milliards de dollars sur 2025-2029, pour soutenir l'installation de nouveaux centres de données et des systèmes électriques pour les alimenter. C'est là la source des estimations les plus hautes pour l'accroissement de la consommation électrique et de l'empreinte carbone des centres de données. C'est aussi la source des importantes incertitudes qui affectent les scénarios jusqu'à 2030 (et au-delà !): l'industrie des micro-processeurs pourra-t-elle suivre? Les investisseurs privés pourront-ils continuer à investir à ce rythme?

La figure 2.5 montre toutefois que cette croissance s'est arrêtée rapidement, même si la courbe de démarrage de *ChatGPT* est en tous points spectaculaire (le temps le plus court jamais vu pour qu'un service atteigne 100 millions d'utilisateurs!). Il serait pourtant faux de dire que « le soufflé de l'IA générative est retombé »: ces nouveaux usages ont trouvé leur

place et conduisent à une croissance résiduelle modérée. Il faut toutefois noter que cette croissance a repris en 2024 après le palier apparaissant à la figure 2.5. Il est néanmoins probable que les investissements massifs dans les GPU ne vont pas se poursuivre au rythme des années 2022-2024, étant donné que le modèle économique de GenAI n'est pas actuellement capable d'assurer des revenus aux niveaux attendus.

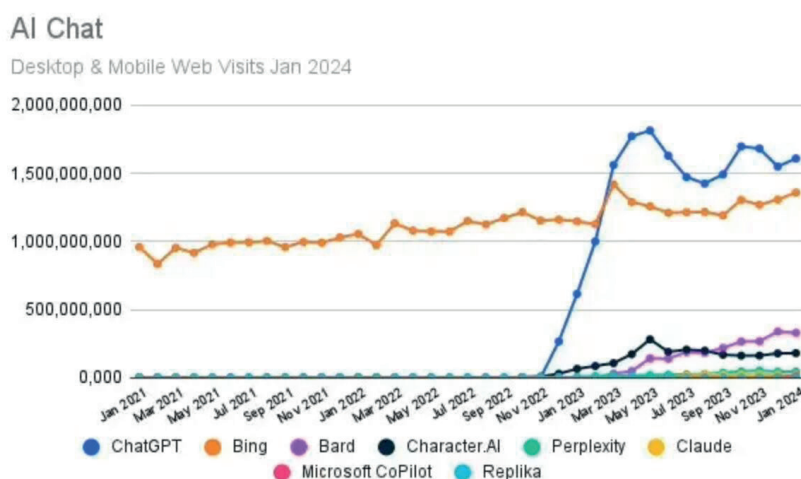


Figure 2.5: Le trafic de ChatGPT et quelques autres logiciels de GenAI jusqu'au début 2024 (source : Similarweb)

À l'opposé, un rapport de 2024 de l'IEA³⁸, qui prévoyait une consommation des centres de données pouvant atteindre 1.000 TWh en 2026, a donné lieu à de très nombreux articles de presse³⁹. L'analyse du *Center on Global Energy Policy* de *Columbia University* est plus mesurée⁴⁰, avec une

38 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6b2fd954-2017-408e-bf08-952fdd62118a/Electricity2024-Analysisandforecastto2026.pdf> avec un commentaire à <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/global-data-center-electricity-use-to-double-by-2026-report/>

39 À titre d'exemple : « [AI Boom Is Creating Opportunities for Renewables and Power Infrastructure](#) qui donne à la fois des prévisions peu fondées mais également des informations intéressantes sur des exemples de centres de données, en particulier en Virginie.

40 [Projecting the Electricity Demand Growth of Generative AI Large Language Models in the US- Center on Global Energy Policy at Columbia University SIPA | CGEP %](#)

croissance additionnelle de 14 GW d'ici 2030, soit, avec même ratio de charge de 60 % que précédemment, 70 TWh de plus chaque année. Il est à noter que NVIDIA prévoit une production d'environ 6 millions de H100 en 2025, avec toutefois un rythme qui s'accélère puisqu'environ 2 millions ont été produits au 3^e trimestre 2025⁴¹. Le fabricant TSMC prévient toutefois de ses importantes difficultés à produire plus avec son parc actuel d'usines, sachant que la construction d'une nouvelle usine coûte près de 20 milliards de dollars et nécessite 3 à 4 ans pour être opérationnelle⁴².

Il paraît donc nécessaire d'examiner encore plus en détail les différentes évolutions possibles d'ici 2030, afin d'essayer de resserrer la fourchette des estimations de consommation électrique. S'il est clair que la consommation globale des centres de données en 2023 est souvent surestimée et que la contribution de l'IA est souvent exagérée, il reste à conduire une prospective point par point sur les différentes évolutions possibles. Comme développé par la suite, l'évolution de la consommation électrique d'ici 2030 est directement liée à l'usage de l'IA, lui-même lié à la réalisation, partielle ou non, des annonces actuelles autour de l'AGI, version « généralisé de l'IA ». Il est donc évident que l'incertitude est très forte, et qu'il est préférable de raisonner à la fois en ordres de grandeur et en intervalles. Par ailleurs, l'usage de l'AGI se différencie entre usage des entreprises et usage du grand-public. Dans le premier cas, il y a beaucoup de valeur réalisable si les annonces sont suivies d'effet, mais également de contraintes (sur la localisation et la confidentialité des données) et d'opportunités de localiser les calculs (dans les terminaux ou à proximité de l'usage, via le *edge computing*). Pour les entreprises donc, même si la valeur se réalise, toute l'activité ne se retrouve pas dans les centres de données. Pour le grand public, la question principale est celle du modèle d'affaire (*business model*) pour justifier les investissements discutés plus bas. Le modèle d'affaire basé sur la publicité n'est pas très « élastique », les revenus publicitaires sont à partager avec d'autres secteurs, et n'augmentent pas selon les rythmes très élevés annoncés pour l'IA.

41 <https://www.nytimes.com/2025/11/19/technology/nvidia-earnings.html#:~:text=Nvidia's%20eye%2Dpopping%20profit%20could,Silicon%20Valley's%20engineers%20are%20building.>

42 <https://www.economist.com/business/2025/11/13/tsmcs-cautious-expansion-is-frustrating-the-ai-industry>

Les chiffres présentés plus bas sont donc à la fois incertains mais aussi plus prudents que ceux d'autres organismes (cf. Annexe 1), essentiellement du fait de la question de la capacité à réaliser les plans d'investissements en milliers de milliards de dollars annoncés en 2025.

La course à l'augmentation de la taille des modèles va probablement continuer, même s'il semble qu'il ne s'agisse plus simplement d'une question de nombre de milliards de paramètres pour les LLM, mais d'architectures composites utilisant des LLM multiples^{vi}. De plus les progrès algorithmiques sur les méthodes d'apprentissage sont constants et on ne peut pas simplement extrapoler linéairement la puissance électrique nécessaire⁴³.

Les GPU font des progrès continus en termes d'efficacité énergétique. Pour un même calcul, la génération *Blackwell* de NVIDIA, qui va remplacer les H100, propose à la fois un saut en performances et une réduction de consommation à performances constantes d'un facteur 25⁴⁴. En revanche, les nouvelles puces seront encore plus gourmandes, passant de 700 W à 1.000 W et peut-être même 1.500 W, sans toutefois remettre en cause l'amélioration du rapport performance/consommation.

La question, qui se posait début 2023, de la course à la taille et à la puissance pour construire des positions de monopole autour de quelques leaders du GenAI semble avoir trouvé une réponse différente. Il existe un consensus autour d'une approche plus distribuée : il n'y a pas de solution parfaite et la meilleure réponse est une variété de LLM utilisés pour des tâches différentes^{vii}. Apple a pris son temps pour mettre sur ses mobiles la technologie GenAI au cœur de ses prochains OS (cf. par exemple le retard pris par *Siri* par rapport à *ChatGPT*) ; cette révolution va néanmoins se produire et il semble qu'elle utilisera le réseau mondial du milliard de puces neuromorphiques déjà présents dans les smartphones⁴⁵.

43 <https://situational-awareness.ai/wp-content/uploads/2024/06/situationalawareness.pdf>, <https://medium.com/@lmpo/the-evolution-of-scaling-laws-for-llms-aeb6ae64f6f1>

44 <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-blackwell-platform-arrives-to-power-a-new-era-of-computing>

45 [Report: Apple's LLM Runs Entirely "On Device" Bypassing the Cloud](#)

La capacité d'analyse, de décision et d'action est en effet de plus en plus souvent déportée en périphérie (*edge*), au plus près des capteurs et actionneurs. Peuvent être ainsi déportés des moyens de calcul et de traitement pour l'exécution d'algorithmes (analyse de données, IA...), moyens historiquement disponibles seulement de façon centralisée. Amazon, par exemple, permet un déploiement facile sur son réseau périphérique de sa plateforme de traitement⁴⁶, tout en maintenant la synchronisation et la gestion centralisée depuis AWS. Diverses applications opérationnelles sont ainsi déjà déployées (maintenance prédictive, détection de maladies ou de parasites agricoles, optimisation d'irrigation, analyse de vision par lidar pour les véhicules autonomes...). D'autres acteurs du numérique suivent aussi cette voie : Google, NVIDIA, Intel, Microsoft... avec une grande diversité d'applications. Ces solutions logicielles s'appuient sur la disponibilité de solutions matérielles (*edge computing*) qui permettent de répliquer à la périphérie des infrastructures de calcul légères mais assez puissantes pour les opérer (solutions NVIDIA ou HPE par exemple). Le bilan de cette tendance à la migration d'applications de calcul et de traitement vers le *edge* est plutôt positif sous l'angle de la soutenabilité et de la consommation. Les applications *edge* au plus près des données réduisent souvent le trafic réseau, cette réduction pouvant monter jusqu'à 70 %⁴⁷ en fonction des applications^{viii48}. Enfin, côté avantages potentiels, les composants *edge* sont proportionnellement deux à trois fois moins gourmands en énergie pour la puissance fournie, et devraient être plus fiables que leurs homologues des centres de données : ils ont moins de composants, moins de stress thermique, peu ou pas de pièces mobiles... Il reste néanmoins que le PUE d'un dispositif *edge* peut être moins bon que celui d'un gros équipement spécialisé qui gagne en efficacité en mutualisant le refroidissement et les infrastructures.

46 [Amazon SageMaker](#)

47 [Quantifying Energy and Cost Benefits of Hybrid Edge Cloud: Analysis of Traditional and Agentic workload](#)

48 Une étude ACM ([EdgeCut, 2023](#)) mentionne par exemple des « réductions de trafic *cloud* jusqu'à 50 % » dans des conditions expérimentales contrôlées pour un cas d'usage d'accès à des contenus utilisateur.

Une autre étude [ACM Computing Surveys](#) mentionne une « réduction de 44 % de la consommation énergétique au coût d'une perte de précision de 4 % » pour de l'optimisation vidéo, mais ne parle pas directement de trafic réseau. Enfin un [article de presse](#) mentionne des réductions de trafic réseau pouvant aller jusque 60-90 %.

Les technologies autour des LLM évoluent très rapidement, il est donc difficile de faire une prévision à la fois sur l'efficacité énergétique et encore plus sur l'intensité des investissements à venir. Les grands acteurs de l'IA (Open AI, Microsoft, Google, Meta) ont fait des investissements très significatifs en dizaines de milliards de dollars depuis 2022-23 et annoncent encore plus de 600 milliards de dollars pour 2026^{49,50}. Le projet *Stargate* des États-Unis (cf. *supra*) a effectivement changé d'échelle avec l'annonce d'un investissement de 500 milliards de dollars dans l'intelligence artificielle généralisée (AGI), prochaine étape de l'IA dotée de modèles multimodaux autonomes avec des capacités de raisonnement très évoluées. Il y a un débat sur le montant réel qui sera *in fine* effectivement dépensé, il est donc intéressant d'évaluer deux scénarios : (i) un investissement de 100 milliards de dollars, qui est également du même ordre de grandeur que l'investissement annoncé par Microsoft ; (ii) et un investissement de 500 milliards de dollars. On peut utiliser la règle empirique issue de l'analyse de 2023 : 50 milliards de dollars permettent d'obtenir 1 million de H100 et génèrent 10 TWh supplémentaires. À cette aune, 1 milliard de dollars permettra d'obtenir à peu près la même quantité de GPU dans les années à venir, beaucoup plus de puissance de calcul et approximativement la même dépense énergétique au cours de cette décennie. Ainsi, appliquer le ratio de 2023 n'est pas absurde et conduit à considérer qu'un projet comme *Stargate* représenterait 100 TWh supplémentaires, tandis qu'un projet à 100 milliards de dollars représenterait 20 TWh^{ix}.

Tous les éléments abordés ci-dessus ne permettent pas d'anticiper plus facilement la consommation des centres de données en 2030. Si l'ensemble des acteurs investissent l'équivalent d'un programme *Stargate*, l'estimation de la consommation électrique mondiale serait de 400 TWh. Si la compétition qui se dessine depuis 2025 pour la course à GenAI persiste quelques années, on doit envisager un ensemble de projets mondiaux équivalant à deux projets de type *Stargate*, et donc

49 Les 4 clients les plus importants de NVIDIA sont Microsoft (15 %), Meta (13 %), Amazon (6 %) et Alphabet (6 %, mais une partie importante de l'IA de Google tourne sur des TPUs conçus par Google), voir <https://www.fool.com/investing/2024/03/14/the-scariest-nvidia-statistic-no-one-talking-about/>

50 Voir par exemple « Le Monde » n° 25228 daté des 8 et 9 février 2026

un total (toujours hors *bitcoin* et *blockchain*) à 500 TWh. Un rapport de 2025 du MIT⁵¹ souligne toutefois que, encore actuellement, le modèle économique autour de GenAI reste largement non-bénéficiaire, malgré les très importants investissements déjà réalisés. **L'hypothèse de travail pour poursuivre cette prospective sera ainsi relativement modérée, à 500 TWh. Il faut encore souligner la très grande incertitude sur cette prévision, de l'ordre d'environ 200 TWh, ce qui semble raisonnable étant données les inconnues sur le développement de GenAI à l'horizon 2030.**

À titre de comparaison, le rapport de l'IEA (2025) ne prévoit pas moins de 950 TWh de consommation électrique en 2030 pour son hypothèse de base⁵². Même si ce chiffre est en baisse en comparaison de celui présenté dans le rapport de 2024, il reste très élevé. On peut certes considérer que les estimations de l'IEA supportent une incertitude croissante, de 30 TWh en 2020, de 50 TWh en 2023 et de 100 TWh en 2030. Même dans l'hypothèse d'un « double *Stargate* », la fourchette des estimations devient 500-700 TWh, inférieure au chiffre de 950 TWh, ce dernier étant clairement en dehors de cette fourchette. Trois points sont intéressants à considérer par rapport à ce chiffre de 950 TWh :

- 400 TWh de plus à cause de l'IA représentent, avec la même règle de trois, 2.000 milliards de dollars d'investissement dans les nouveaux centres de données ;
- tous les GPU de GenAI, ceux de NVIDIA, AMD, comme ceux de Google (hormis la Chine) sont fabriqués par TSMC et une telle augmentation de capacité paraît très difficile, voir *supra*⁵³ ;

51 [v0.1 State of AI in Business 2025 Report.pdf](#)

52 L'IEA propose en fait 4 scénarios d'évolution à partir de la situation de 2024, le scénario de base référencé ici étant plus élevé que deux autres scénarios, « vents contraires » et « forte efficience », et plus modéré que le scénario « décollage ». L'hypothèse retenue ici pour 2030 se situe au niveau des scénarios « vents contraires » et « forte efficience ».

53 De plus, l'investissement de NVIDIA dans Intel est très probablement destiné à faire monter en gamme, à diversifier au-delà de TSMC, et à assurer une solution souveraine en cas de problème à Taiwan.

- les progrès rapides en efficacité logicielle, par exemple l'introduction des réseaux parcimonieux⁵⁴, et les récentes annonces successives concernant les performances énergétiques de *DeepSeek*, font douter de la « courbe haute » des besoins *hardware* associés à la croissance de l'usage de l'IA.

L'annexe 1 présente une justification des niveaux de consommations prévus ici pour l'IA par rapport à ceux de l'IEA.

2.4. TABLEAU RÉCAPITULATIF 2015-2020-2023-2030

Il est utile de récapituler ici les différents chiffres discutés ci-dessus

	2015 Malmodin	2020 Base	2023 Estimations	2030 Projections
	TWh	TWh	TWh	TWh
Centres de données	220	220 [250]	270 [320]	500 [700]
<i>Blockchain</i>	10	70	[95] 125 [155]	[?] 200 [?]

Tableau 2.2 : Consommation des centres de données (les chiffres entre crochets représentent les bornes inférieure et supérieure de la fourchette)

2.5. L'EMPREINTE CARBONE

Les travaux de Malmodin *et al.* montrent que l'impact carbone des centres de données baisse entre 2015 et 2020 alors que la consommation électrique est stable (Tableau 2.2). Ceci résulte d'une baisse de la « densité carbone », qui passe de 614 gCO₂/kWh en 2015 à 426 gCO₂/kWh en 2020. Cette baisse traduit l'arrivée progressive de l'énergie décarbonée (électricité verte ou bas carbone) dans l'alimentation des centres de données, à commencer par les *hyperscalers*.

Le sujet mérite quelques considérations complémentaires. Les premiers arguments avancés par les opérateurs des *hyperscalers* étaient fondés

54 [Ouvrons la boîte noire: reconstruction de réseaux de neurones parcimonieux par échantillonnage-Archive ouverte HAL](#)

sur leur achat et leur utilisation de certificats d'énergie verte, mais ceci est discutable d'un point de vue systémique. En effet de tels certificats permettent à ces opérateurs, qui sont riches, d'acheter la capacité de production d'énergie verte de leur région, tandis que l'électricité carbonée est laissée à d'autres, dont l'empreinte carbone est alors susceptible d'augmenter. Depuis, les responsables d'*hyperscalers*, ainsi que d'autres géants du numérique, tels que Meta, se sont attachés à développer une stratégie d'électricité verte (*green electricity roadmap*), en construisant des capacités propres ou en passant des accords de développement de nouvelles capacités affectées avec des opérateurs énergétiques. La lecture des rapports de développement durable d'entreprise (*Corporate Sustainability Reports*) des trois grands *hyperscalers* permet très difficilement de savoir de façon précise ce qui est déjà opérationnel ou ce qui va l'être à échéance rapprochée. À titre d'exemples : le plan d'Amazon est de disposer de près de 77 TWh d'électricité verte, à comparer aux 52 TWh décarbonés utilisés en 2023 ; Google indique que 64 % de son électricité est verte, et 100 % annoncés pour 2030 ; Microsoft semble avoir pratiquement atteint son objectif de « centres de données verts », avec 19 GW de contrats produisant 23 TWh d'électricité verte, pour couvrir des besoins sensiblement identiques. Il faut encore souligner ici la nécessité de bien faire la différence entre « correspondance verte » (*green matching*) et « production verte » (*green assigned production*). Dans le premier cas, on s'appuie sur la fourniture de certificats présentés par les fournisseurs d'électricité auxquels il est fait appel ; l'introduction d'un acteur intermédiaire peut alors compliquer la vérification de la véracité des dits certificats. Amazon explique par exemple : *[we] match 100% of the electricity consumed by our global operations with renewable energy by 2025—five years ahead of our original target of 2030*⁵⁵. Dans le second cas il s'agit de production décarbonée en propre, ou avec un partenariat assurant des infrastructures dédiées. Il faut mentionner ici que la plupart des prochaines *Gigafactories* (de puissance supérieure à 1 GW) ont pour projet de faire appel à de l'électricité nucléaire fournie en propre pour leur besoins d'énergie, beaucoup de GAFAM annonçant par exemple qu'ils se

55 Cf. page 24 du [Corporate Sustainability Report](#). Page 25, il est dit que 52 TWh d'énergie verte sont utilisés, chiffre qui passera à 77 TWh une fois réalisés les projets présentés pour 2024 (on retrouve cet ordre de grandeur de 70 TWh).

lancent eux-mêmes dans la construction de SMR (*Small Modular Reactors*) ; ceci n'aura toutefois pas d'influence sur les émissions avant 2035-40.

Pour la suite des calculs, il faut formuler des hypothèses de décarbonation de l'électricité des *hyperscalers*, qui sont représentées à la figure 2.6 : 80 gCO₂/kWh en 2023 et 40 gCO₂/kWh en 2030 (cf. courbe violette). Ces chiffres sont un compromis, plutôt conservateur, entre ce qui est affiché dans les rapports. Même si les *hyperscalers* sont particulièrement actifs, le reste de l'industrie est également à la recherche d'électricité décarbonée, ce qui est représenté par la (légère) baisse de la courbe gCO₂/kWh des autres centres de données (cf. courbe vert clair).

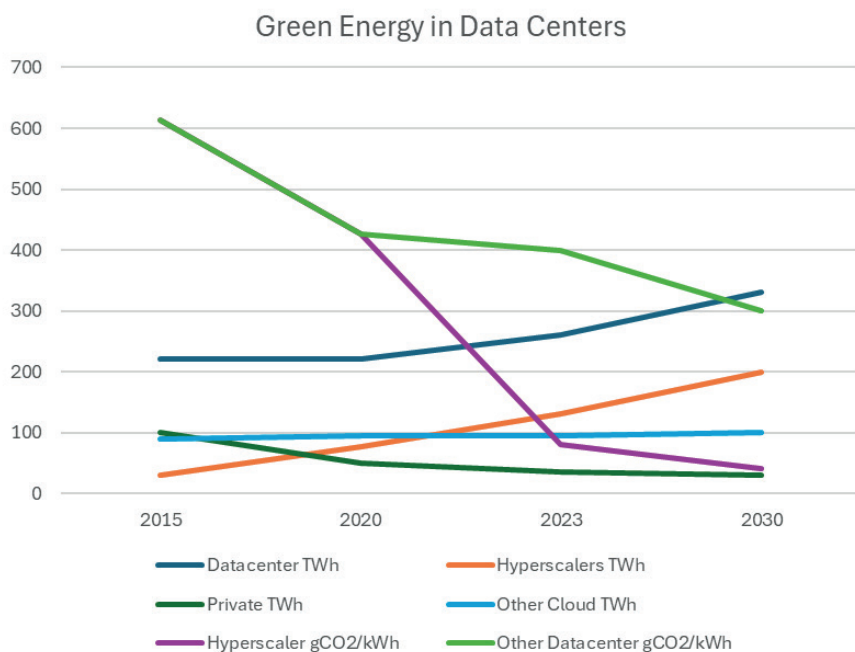


Figure 2.6: Vision prospective du contenu en CO₂ de l'électricité utilisée pour les centres de données (échelle des ordonnées en gCO₂/kWh)

Le tableau 2.3, version complétée du tableau 2.2, inclut les émissions de CO₂ ainsi estimées pour les centres de données, en supposant également l'amorce du même mouvement pour les *blockchains* et le minage des *bitcoins*, dans l'hypothèse où les engagements des *hyperscalers* pour une

« électricité verte » seront tenus. Dans l'hypothèse où cette décarbonation repose en tout ou partie sur le recours à des certificats produits par les fournisseurs d'énergie, il peut subsister une incertitude sur la véracité de tels certificats. De plus, et dans l'hypothèse d'une très forte croissance des centres de données liée au développement de l'IA, les projets de « giga centres de données » (tel le projet *Colossus 2*⁵⁶) avec appel spectaculaire de puissance électrique, ne se feront pas sur la croissance de l'électricité renouvelable. Le tableau 2.3 propose donc une valeur basse de 140 g de CO₂/kWh et une valeur haute qui est plus réaliste si c'est le scénario haut de la croissance des centres de données qui se réalise. La lecture des prochains CSR (*Corporate Sustainability Reports*) pourrait permettre de voir si l'accélération de GenAI s'accompagnera d'un ralentissement de la décarbonation de leur électricité.

	2015 Malmodin		2020 Base		2023 Estimations		2030 Projections	
	TWh	g/kWh	TWh	g/kWh	TWh	g/kWh	TWh	g/kWh
Centres de données	220	614	220[250]	426	270 [320]	240	500 [700]	140 [240]
Blockchain	10	610	70	426	[95]120[155]	420	[?]200[?]	400

Tableau 2.3 : Consommation électrique et empreinte carbone des centres de données
(les chiffres entre crochets représentent les bornes supérieures de la fourchette)

56 [xAI's Colossus 2 – First Gigawatt Datacenter In The World, Unique RL Methodology, Capital Raise – SemiAnalysis](#). Ce projet de xAI, de plus de 400 MW de puissance, appelée à passer à plus de 1 GW, sera alimenté par des turbines à gaz.

2.6. LES QUANTITÉS D'EAU UTILISÉES

2.6.1. L'EAU UTILISÉE DANS LES CENTRES DE DONNÉES

Le refroidissement des centres de données (comme des supercalculateurs en général) est réalisé en 2 étages :

- un circuit primaire évacue la chaleur des cœurs de calcul et armoires vers l'extérieur de la salle. Ce refroidissement est toujours liquide et en circuit fermé, donc sans consommation ;
- un système secondaire constitué d'échangeurs qui est soit par air, soit par eau, pour refroidir globalement le centre. Le refroidissement par eau des centres de calcul peut quant à lui prendre plusieurs formes. Dans le refroidissement par eau courante, l'eau est prélevée en grande quantité en amont du centre de données puis rejetée en aval, plus chaude mais en totalité ; il n'y a alors aucune consommation d'eau, l'eau rejetée pouvant par exemple être utilisée pour le chauffage de bâtiments voisins, voire d'éco-quartiers complets. Au contraire, le refroidissement adiabatique dans lequel l'eau est pulvérisée dans un flux d'air puis évaporée, conduit à une consommation d'eau.

Prélèvements et consommations sont soumis à des contraintes de natures différentes. Des prélèvements en grande quantité nécessitent des cours d'eau de fort débits en toutes saisons car l'eau rejetée ne doit être que faiblement réchauffée pour ne pas mettre en danger la vie dans le cours d'eau⁵⁷. Mais, dans cette situation favorable, il n'y a que peu de concurrence avec les autres usages dans la mesure où l'eau rejetée peut être réutilisée, par exemple en agriculture. À l'opposé, les consommations sont en concurrence directe avec d'autres usages, comme l'eau pour l'irrigation, car les quantités d'eau que l'on peut soustraire au milieu naturel sont forcément limitées. La figure 2.7 montre qu'en pratique, Google et

57 À noter que cette condition rend plus contraignante l'implantation de centres de données et de centrales trop proches sur le même cours d'eau.

Meta utilisent très majoritairement des refroidissements par évaporation, consommant les $\frac{3}{4}$ de l'eau qu'ils prélèvent.

Selon l'ARCEP⁵⁸, pour 19 opérateurs responsables de plus de 100 centres de données français, le volume d'eau prélevé était de 482.000 m³ en 2022.

À l'international, Meta indique une consommation d'eau en 2022 d'environ 2.500.000 m³, tandis que pour Google le chiffre était pour cette même année de 20.000.000 m³. Microsoft annonce de son côté avoir consommé 6.400.000 m³. Trois des GAFAM totalisent donc à eux seuls une consommation de 30 millions de m³ en 2022.

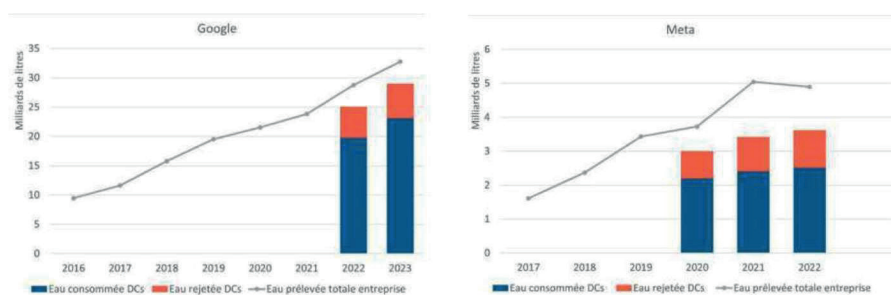


Figure 2.7: Historique des prélèvements et de la consommation d'eau pour les centres de données opérés par Google (à gauche) et Meta (à droite). La courbe noire est relative aux quantités prélevées, tandis que les barres bleues et orange désignent respectivement les quantités consommées et rejetées.

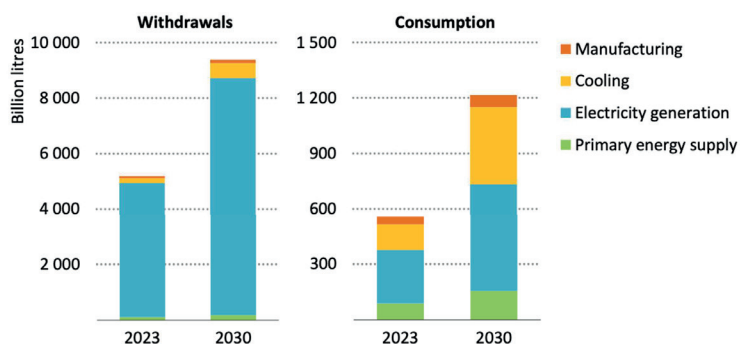
Comme apparent sur la figure 2.7, les prélèvements et consommations d'eau des centres de données augmentent régulièrement. Cette croissance est principalement due à la croissance des centres. Les gestionnaires de centres de données s'efforcent néanmoins d'améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau dans leurs installations. Ils suivent un indicateur, le WUE (*Water Usage Efficiency*), qui est le ratio en l/kWh entre la quantité d'eau consommée et l'énergie totale utilisée par le centre de données. L'abandon progressif des centres de données où l'eau réchauffée est évaporée, contribue à cette réduction du WUE.

58 Voir par exemple Bouveret *et al.* : De l'eau dans les nuages. Annales des Mines, 27, 40-47.

2.6.2. L'EAU UTILISÉE INDIRECTEMENT POUR LES CENTRES DE DONNÉES

Aux quantités d'eau utilisées pour le refroidissement des centres de données s'ajoutent les quantités d'eau utilisées indirectement par ceux-ci pour la production de l'électricité qu'ils utilisent, pour leur propre construction et pour la production de leurs composants microélectroniques.

C'est ainsi que, compte tenu de l'ensemble de ces besoins, la consommation mondiale d'eau liée à l'ensemble des centres de données s'élevait en 2023 à environ 560 millions m³ par an⁵⁹, dont un quart environ, soit 140 millions m³, pour leur refroidissement proprement dit. La part principale, deux tiers, relève du périmètre 2 pour l'approvisionnement en énergie primaire et la production d'électricité (nécessitée pour le refroidissement), et le reste concernait l'eau utilisée dans la fabrication des semi-conducteurs (périmètre 3 amont). Ce chiffre de 140 millions m³ pour le refroidissement des serveurs est en augmentation : cette consommation mondiale totale pourrait atteindre environ 1.200 millions m³ par an en 2030 dans le scénario de référence (Figure 2.8), dont une proportion supérieure à celle de 2023 pour le refroidissement, soit environ un tiers à 420 millions m³ correspondant à un triplement en 7 ans.



IEA. CC BY 4.0.

Water consumption more than doubles between 2023 and 2030

Figure 2.8: Évolution estimée entre 2023 et 2030 des prélèvements (à gauche) et des consommations (à droite). (source: IEA - 2025)

59 Rapport Energy and AI, IEA (2025), p. 24

Au-delà du seul refroidissement des centres de données dont l'efficacité en eau ne peut venir que de modes différents de refroidissement, et concernant le périmètre 2 (approvisionnement énergétique), il faut noter que la décarbonation progressive de la production d'énergie permettra de ralentir en proportion les prélèvements d'eau, le solaire photovoltaïque et l'éolien utilisant un centième ou moins de l'eau utilisée par les sources fossiles (IEA, 2016). À l'inverse, concernant le périmètre 3 amont de la fabrication des puces, la consommation d'eau est presque uniquement liée à la production d'eau ultra-pure, nécessaire à cette fabrication (voir 4.5 *infra*). Dans le scénario de référence de l'IEA, la consommation d'eau du périmètre 3 pour les centres de données augmente de plus de 50 % entre 2023 et 2030, pour atteindre environ 70 millions m³ en 2030 (en raison du nombre croissant de serveurs comportant généralement plus de puces que les serveurs conventionnels) mais cela ne représente que 6 % de l'eau consommée dans les serveurs.

La question des prélèvements d'eau est d'une grande importance sociétale. Si dans certains pays la disponibilité de l'eau reste non critique, dans la plupart des pays ces prélèvements sont en concurrence avec les besoins des milieux naturels, de l'agriculture, de l'industrie, de la production d'énergie et de la société. C'est le cas en France où la baisse des ressources hydriques implique des baisses d'utilisation ou des recyclages. À Taiwan les fabricants de semi-conducteurs ont été soumis à des restrictions d'eau lors d'une sécheresse en 2021, ce qui a nécessité la mise en œuvre de stratégies de réduction de la consommation d'eau (la figure 4.6 *infra* montre l'augmentation très significative de la part d'eau recyclée chez TSMC).

Chapitre 3

LES RÉSEAUX

Le vocable « réseau » inclut ici l'ensemble des dispositifs permettant l'accès et le transport de la voix et des données, depuis les terminaux fixes ou mobiles et jusqu'aux services.

La consommation électrique des réseaux en 2020 a été estimée par différents organismes. Ces estimations convergent vers la fourchette 240-280 TWh (Malmodin *et al.* 2024 donnent par exemple le chiffre de 244 TWh (cf. Tableau 2.1 *supra*). Cette consommation équivalait à un peu plus de 1 % de la demande mondiale en électricité et représentait entre 20 et 25 % de la consommation totale du secteur du numérique.

Pour 2022, l'IEA⁶⁰ mentionne une fourchette de consommations comprise entre 260 et 360 TWh, soit une augmentation comprise entre 5 et 15 % par an. De son côté, l'association GSMA⁶¹ estime que les réseaux mobiles consommaient environ 170 TWh en 2023 et les réseaux fixes (fibre, ADSL, etc.) environ 130 TWh supplémentaires⁶², soit une consommation totale des réseaux de télécommunications en 2023 dans la même fourchette que celle de l'IEA. **La fourchette de consommation retenue ici sera donc de 280 TWh à 380 TWh (cf. tableau 3.1), ce qui représente une augmentation de consommation entre 2020 et 2023 proche de 30 %.**

60 <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>

61 GSMA : *Global System for Mobile Communications Association*

62 [GSMA-True-North-Green-Network](#)

	2015 IAE	2020	2023 Estimations
	TWh	TWh	TWh
Réseaux fixes et mobiles	220	240 [280]	280 [380]

Tableau 3.1 : Consommation électrique des réseaux de télécommunications fixes et mobiles (le chiffre entre crochets représente la borne supérieure de la fourchette)

3.1. LE VOLUME DU TRAFIC SUR LES RÉSEAUX MOBILES

La consommation mensuelle mondiale de données sur les réseaux « mobile » continue de croître à un rythme qui se ralentit mais reste soutenu (Figure 3.1). Entre les 3^e et 4^e trimestres 2024, l'augmentation a encore été de 4 % pour atteindre une consommation mensuelle de 164 exaoctet (EB)⁶³. On observe en France un début de tassement de la consommation : 74 % du trafic est lié aux flux vidéos, mais la consommation moyenne individuelle de *Youtube*, *Instagram*, *Tik Tok* ou *Netflix* a tendance à stagner, voire à décroître légèrement.

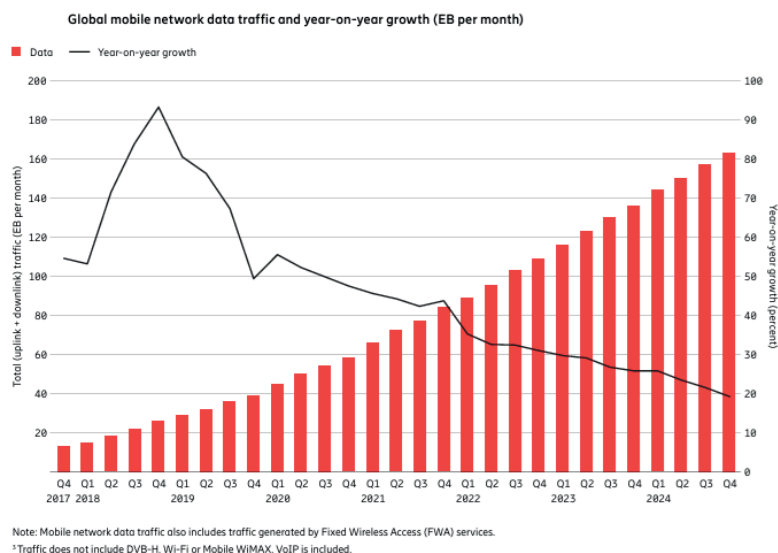


Figure 3.1: Évolution annuelle du trafic mondial sur les réseaux « mobile » (la courbe en trait plein représente le taux d'accroissements annuel)

63 [Ericsson Mobility Report June 2024](#)

3.2. LE VOLUME DU TRAFIC SUR LES RÉSEAUX FIXES

Depuis 2017, le trafic Internet fixe mondial a également connu une croissance soutenue, avec un taux annuel moyen estimé entre 15 % et 20 %, tiré par la généralisation de la fibre optique, la montée en qualité du *streaming* (4K/8K), le télétravail et les services *cloud*. Selon les estimations de Cisco et les analyses de l'UIT, le volume de données échangées sur les réseaux fixes est passé d'environ 1.000 EB en 2017 à plus de 4.000 EB en 2022.

3.3. LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE SELON LES TECHNOLOGIES

3.3.1. POUR LES RÉSEAUX MOBILES

La consommation énergétique des données transitant sur les réseaux mobiles varie considérablement en fonction des technologies utilisées. Pour la 4G, la fourchette haute des estimations se situe à environ 0,24 kWh/GB, la fourchette basse étant plutôt à 0,12 kWh/GB. La 5G est, de façon unitaire, moins consommatrice en énergie que la 4G. On peut estimer la diminution entre 80 et 90 % par rapport à la 4G pour un même volume de données grâce à la mise en œuvre de technologies comme le MIMO massif. La consommation estimée est de l'ordre de 0,02 à 0,04 kWh/GB. Le chiffre pour 2023, moment où les deux technologies coexistent encore, est intermédiaire entre ces valeurs.

La 6G, attendue à l'horizon 2030, se distingue des générations précédentes non seulement par ses performances attendues (débits multi-gigabits, latence inférieure à la milliseconde, connectivité ubiquitaire), mais également par ses ambitions de durabilité énergétique sans précédent. Selon *Nokia Bell Labs*, la 6G vise une amélioration de l'efficacité énergétique par bit d'un facteur 10 à 100 par rapport à la 5G, en combinant des avancées physiques, architecturales et logicielles⁶⁴. Un des leviers essentiels pour atteindre cette efficacité repose sur l'usage de systèmes d'antennes intelligentes, notamment les architectures MIMO massives

64 *Nokia Bell Labs, 6G Sustainability KPIs, 2023*

adaptatives, et le filtrage spatial (*beamforming*) dynamique, qui permettent de concentrer précisément l'énergie radio sur les terminaux actifs, tout en mettant au repos les modules inutiles.

	2023 ⁶⁵	2030 ⁶⁶ Estimations
	Wh/Go	Wh/Go
Réseaux mobiles	95 [190]	40 [80]

Tableau 3.2 : Intensité énergétique des réseaux mobiles
(le chiffre entre crochets représente la borne supérieure de la fourchette)

3.3.2. POUR LES RÉSEAUX FIXES

En matière de consommation énergétique, l'efficacité énergétique des transmissions a progressé en fonction des technologies utilisées⁶⁷. L'IEA a estimé que cette efficacité énergétique s'était améliorée de façon significative dans les pays développés⁶⁸. La poursuite du déploiement de la fibre optique, 4 fois moins consommatrice que le cuivre des câbles, devrait prolonger la tendance à la baisse⁶⁹.

	2023 ⁷⁰	2030 Estimations
	Wh/Go	Wh/Go
Réseaux fixes	30	6 [15]

Tableau 3.3 : Intensité énergétique des réseaux fixes
(le chiffre entre crochets représente la borne supérieure de la fourchette)

65 Répartition 4G/5G selon Ericsson

66 Répartition 4G/5G selon Ericsson

67 [WBBA-WG3.Fixed-Networks-Energy-Efficiency-Toolkit.2024-1.pdf](#)

68 [Data centres & networks-IEA](#)

69 [The growing imperative of energy optimization for telco networks | McKinsey](#)

70 En utilisant le volume de données par l'ITU et la fourchette de consommation de l'AIE.

3.4. LES FACTEURS INFLUENÇANT L'ÉVOLUTION DU TRAFIC MONDIAL DE DONNÉES

Malgré les ambitions de sobriété énergétique affichées par la 5G puis la 6G, plusieurs caractéristiques techniques et usages émergents soulèvent des risques de hausse significative de la consommation énergétique totale des réseaux. Trois leviers principaux sont identifiés.

3.4.1. HAUSSE MASSIVE DU TRAFIC ET DES USAGES INTENSIFS

La 5G offre des débits bien supérieurs (jusqu'à 10 à 20 fois plus rapides que la 4G) et des latences très faibles. Cela ouvre la voie à de nouveaux usages très gourmands en données, comme la vidéo 4K/8K, le *cloud gaming*, le *streaming VR/AR*, les objets connectés en temps réel... Le volume total de données transportées augmente rapidement, souvent plus vite que ne s'améliore l'efficacité énergétique unitaire.

De la même façon la 6G, qui prendra le relais à partir de 2030 et n'influe donc pas sur la prospective à 2030, est conçue pour prendre en charge des applications à forte intensité de données, telles que la réalité étendue, les jumeaux numériques, l'holoportation (transmission d'images 3D), l'IA distribuée en temps réel, et une connectivité ultra-massive pour des milliards d'objets (*IoT* industriel, capteurs ubiquitaires, flottes de véhicules autonomes, villes intelligentes (*smart cities*)...). Ces cas d'usage génèrent une explosion du volume de données à transporter. Même si la 6G améliorera significativement l'efficacité énergétique par bit (bit/W), cette amélioration pourra être contrebalancée, voire dépassée, par l'extrême croissance du trafic, conduisant à un effet « rebond » énergétique⁷¹.

3.4.2. UTILISATION DE TRÈS HAUTES FRÉQUENCES (THz, MILLIMÉTRIQUES)

La 5G repose sur différentes bandes de fréquence. La bande 3,5 GHz est la plus utilisée aujourd'hui car elle offre un équilibre intéressant entre

71 [FG NET-2030-Focus Group on Technologies for Network 2030](#)

portée et capacité. Elle impose toutefois une densification plus importante du réseau pour maintenir une bonne couverture. Les ondes millimétriques (au-delà de 26 GHz) permettent quant à elles d'atteindre des débits très élevés, mais leur portée est beaucoup plus limitée et elles traversent mal les obstacles. Ceci oblige les opérateurs à recourir à une densification massive, en déployant de nombreuses *small cells* dans les zones urbaines denses. Ces nouvelles stations intègrent des technologies avancées comme le MIMO massif et le *beamforming*, qui optimisent l'utilisation du spectre mais rendent aussi l'infrastructure plus complexe, avec des besoins accrus en refroidissement et en synchronisation GPS.

Il en sera de même pour la 6G qui exploitera plus tard des bandes de fréquence très élevées (de 30 à 300 GHz, voire jusqu'à 1 THz), qui offrent de larges bandes passantes mais présentent des caractéristiques physiques contraignantes (faible portée, mauvaise pénétration des obstacles, sensibilité élevée à l'environnement-pluie, mouvements, matériaux).

Chaque site supplémentaire implique une consommation énergétique propre (alimentation, refroidissement, synchronisation, réseaux intermédiaires dits *backhaul*), ainsi qu'une consommation en matériaux pour la construction de ces multiples sites (aggravant significativement l'empreinte carbone de la solution); ceci peut faire augmenter considérablement la consommation au km⁷².

3.4.3. INFRASTRUCTURE DISTRIBUÉE : *EDGE*, *CLOUD*, *IA* NATIVE

L'architecture 5G ou 6G repose sur une distribution intelligente des fonctions réseau entre terminaux, antennes, *edge* et centres de données. Les fonctions critiques (décisions temps réel, orchestration réseau, prédiction IA) seront déportées dans le *edge* ou dans le *cloud*. Cela n'élimine pas la consommation, mais la déplace vers d'autres segments de l'infrastructure. L'orchestration intelligente du réseau (segmentation (*slicing*), activation dynamique des faisceaux, mobilité prédictive) nécessite des traitements IA complexes, gourmands en cycles CPU/GPU.

72 [Green Future Networks: Network Energy Efficiency-NGMN](#)

Ces processus, bien que visant une efficacité globale du système, introduisent une charge computationnelle significative, difficile à contenir sans solutions matérielles sobres ou systèmes IA frugaux⁷³.

Donc, même si la 5G ou la 6G promettent une amélioration énergétique par unité de donnée, leur généralisation pourrait faire croître la consommation énergétique absolue des réseaux. La 5G ou la 6G ne sont donc pas intrinsèquement sobres : elles peuvent l'être, mais seulement si leur déploiement est maîtrisé (normes d'efficacité, sobriété des usages, IA optimisée, énergies renouvelables...).

3.5. L'HORIZON 2030

Plusieurs facteurs vont influencer sur les perspectives 2030 en matière de consommation de données :

- prolifération des appareils de type *IoT*, qui engendrera un accroissement notable du volume des données transitant sur les réseaux, dont une partie sur les réseaux mobiles. Cette croissance est notamment stimulée par le déploiement de la 5G (Figure 3.2) ;

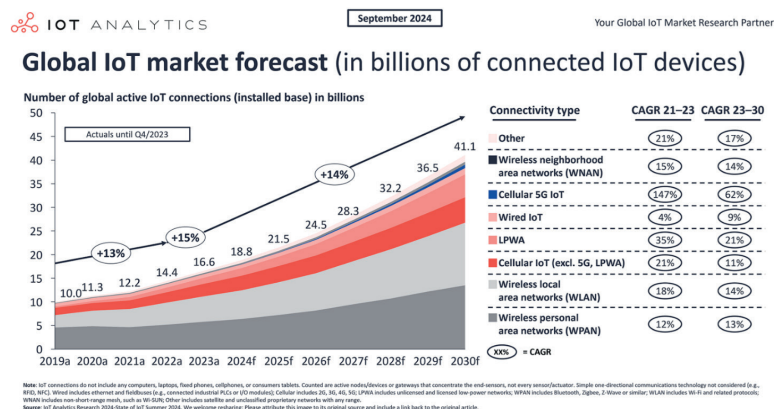


Figure 3.2: Croissance du trafic lié à l'internet des objets (IoT)

- développement des services de réalité étendue, à l'aide notamment de dispositifs portables comme des lunettes intelligentes ou des casques ;
- utilisation des appareils mobiles pour y exécuter les calculs d'IA. Les tendances actuelles, confirmées lors du Congrès Mondial de Barcelone de 2024⁷⁴, confirment un fort développement de GenAI sur les terminaux mobiles. La promesse est de disposer d'un assistant personnel embarqué capable d'adresser la communication avec les différentes applications et services. L'arrivée de GenAI sur les terminaux mobiles peut être un facteur d'accroissement notable du trafic sur les réseaux, avec un développement encore plus important des flux vidéos ;
- mise en place de dispositifs d'optimisation du trafic ou de la consommation énergétique. En France, le règlement d'écoconception numérique cherche à promouvoir certaines pratiques allant en ce sens (mise en place d'un mode économie d'énergie pour la fourniture de contenu et sur les terminaux ; résolution par défaut ajustée au terminal ; inaccessibilité aux plus hautes résolutions (4K et 8K) en réseau mobile sur les tablettes et smartphones, pour les limiter aux usages techniquement pertinents ; interdiction de l'autoplay ou des designs de défilement continu sans interaction minimale de l'utilisateur). Avec ce type de fonctionnalités, la consommation de données vidéo peut être divisée par 6, mais l'efficacité est dépendante du terminal et de l'application concernée ;
- répartition du trafic entre fixes et mobiles. La répartition des usages entre fixes et mobiles peut également jouer un rôle sur la consommation énergétique globale, le réseau fixe étant beaucoup plus sobre que les réseaux mobiles ;
- déploiement de la 5G, moins gourmande que la 4G, à volume identique. La 5G qui ne représente que 34 % des flux aujourd'hui devrait atteindre 80 % en 2030 ;
- la 6G ne devrait pas avoir d'impact significatif sur les prévisions 2030, les premiers déploiements commerciaux n'étant attendus qu'à cette date.

74 [MWC : quelles tendances à venir pour les télécoms mobiles ? -HubOne](#)

En revanche, l'impact devrait être plus marqué dans les années suivantes, avec à la fois une architecture plus sobre en énergie mais des usages à très forte croissance potentielle (par exemple la mise en place de jumeaux numériques à plus grande échelle).

3.5.1. TRAFIC MOBILE

Concernant les réseaux mobiles, Ericsson estime le trafic global à environ 1.600 EB/an en 2023 avec une projection à 5.150 EB/an en 2030 (soit 5 10^{12} GB/an)⁷⁵. Le trafic mobile pourrait donc tripler d'ici 2030, à un rythme moyen de 20 % par an, sous l'effet conjugué des usages intensifs (jeux vidéo sur le *cloud*, réalité étendue, vidéo en mobilité) et de la densification des réseaux (Figure 3.3).

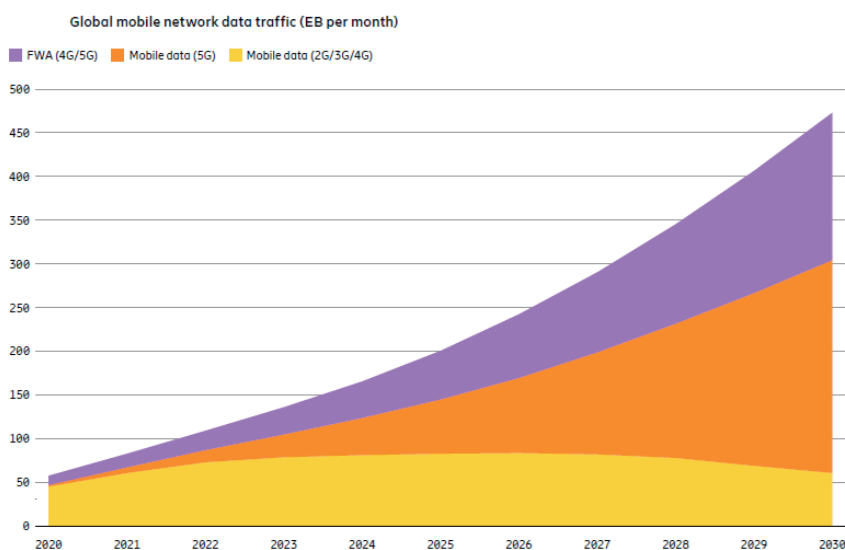


Figure 3.3: Croissance du trafic sur les réseaux mobiles (en EB/mois)

75 <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>

3.5.2. TRAFIC FIXE

D'après les dernières estimations de l'UIT, le trafic Internet fixe mondial atteignait environ 4.378 EB/an en 2022, avec une croissance moyenne annuelle estimée entre 15 % et 20 % depuis 2019⁷⁶. Cette tendance est corroborée par Sofrecom, qui prévoit un doublement du volume de données échangées sur les réseaux fixes d'ici à 2030, en lien avec la généralisation de la fibre optique, l'essor du *streaming* 4K/8K, la montée en puissance du *cloud computing* et du télétravail⁷⁷ (la question du télétravail est toutefois assez complexe, cf. 7.7. *infra*).

Dans ce contexte, le présent rapport retient une hypothèse centrale d'augmentation de 5.000 EB en 2023 à 10.000 EB en 2030, soit une augmentation annuelle d'environ 10 %, de l'ordre de 10^{13} GB/an. Ce volume sert de base pour évaluer la consommation énergétique des réseaux fixes à horizon 2030.

Le tableau 3.4 récapitule l'évolution du trafic sur les différents réseaux selon les scénarios précédents.

Volume de données	2023	2030 Estimations
	EB	EB
Réseaux fixes	5.000	10.000
Réseaux mobiles	1.600	5.200 [5.500]

Tableau 3.4 : Croissance du trafic sur les réseaux fixes et mobiles
(le chiffre entre crochets représente la borne supérieure de la fourchette)

76 [https://www.itu.int/Facts and Figures 2023](https://www.itu.int/Facts%20and%20Figures%202023)

77 <https://www.sofrecom.com> Internet Traffic Growth: Trends and Forecasts–Sofrecom

3.5.3. SCÉNARIOS ET PROJECTION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

En prenant en compte les hypothèses hautes et basses d'intensité énergétique de la 4G et de la 5G, de l'amélioration des intensités sur les réseaux fixes, de l'augmentation des volumes de données et du basculement vers la 5G, on parvient aux estimations de consommation électrique données au tableau 3.5.

	2030		
	Volume EB	Wh/GB	TWh
Réseaux fixes	10.000	6 [15]	60 [150]
Réseaux mobiles	5.200 [5.500]	40 [80]	210 [440]
Total des réseaux fixes et mobiles	15.200 [15.500]		270 [590]

Tableau 3.5 : Consommation électrique des réseaux de télécommunications fixes et mobiles (le chiffre entre crochets représente la borne supérieure de la fourchette)

Un scénario médian, avec la prolongation des tendances actuelles, qui de fait est un scénario réaliste à modéré basé sur :

- une bascule vers la 5G et une absence de rupture technologique majeure ($[5,2 \times 10^{12} \text{ GB}] \times [50 \text{ Wh/GB}] = 260 \text{ TWh}$) pour les réseaux mobiles ;
- une efficacité énergétique ne progressant que de 15 % par an, en partant d'une moyenne aux alentours de 30 ($[1 \times 10^{13} \text{ GB}] \times [10 \text{ Wh/GB}] = 100 \text{ TWh}$), pour les réseaux fixes,

conduit à un total 360 TWh/an en 2030, avec une fourchette allant de 270 à 590 TWh.

Le tableau 2.3, relatif aux centres de données et à la *blockchain*, peut ainsi être complété pour inclure les consommations liées aux réseaux, soit le tableau 3.6

	2015 (Malmodin)		2020 (Base)		2023 (Estimation)		2030 (Prévision)	
	TWh	g/kWh	TWh	g/kWh	TWh	g/kWh	TWh	g/kWh
Centres de données	220	614	220 [250]	426	270 [320]	240	500 [700]	140
<i>Blockchain</i>	10	610	70	426	[95] 125 [155]	420	[?] 200 [?]	400
Réseaux fixes et mobiles	242	595	250	628	260	600	[270] 360 [590]	

Tableau 3.6 : Tableau récapitulatif sur l'évolution des consommations électriques
(les chiffres entre crochets représentent les bornes inférieure et supérieure
des fourchettes)

Chapitre 4

LES COMPOSANTS

Sont discutées ici les diverses contributions des composants électroniques à la consommation énergétique (essentiellement électrique), aux émissions de gaz à effet de serre (essentiellement le CO₂, mais aussi les gaz perfluorés (PFC, *Perfluorinated compounds*)), et à la consommation d'eau. On rappelle ici que la consommation de matériaux rares n'est pas traitée dans ce rapport (cf. Chapitre 1). Les évolutions prévisibles à 10 ans sont aussi abordées.

Il existe plusieurs familles de composants électroniques. Pour simplifier, ne seront traités ici que les circuits intégrés (CI), au cœur des ordinateurs et des terminaux (téléphones, écrans...). Les composants de puissance, souvent des composants unitaires (comme les transistors de puissance) qui interviennent dans les alimentations électriques de tous les matériels, en particulier les centres de données, seront simplement mentionnés. Les composants pour les télécommunications (transmission, portables) ne seront pas traités car leur consommation est moins sujette à de fortes augmentations.

4.1. LA CONSOMMATION ET LES ÉMISSIONS LORS DE LA FABRICATION : PÉRIMÈTRES 1, 2 ET 3, AMONT ET AVAL

Ces notions ont déjà été présentées rapidement (cf. Chapitre 2.1). On peut au-delà faire 3 remarques générales en ce qui concerne les composants :

- la consommation d'électricité pour la production globale des composants électroniques est de l'ordre de 100 TWh (source : *World Semiconductor Council*⁷⁸). Cette consommation ne constitue qu'une partie du total à

78 [World Semiconductor Council](#)

considérer, qui comprend de plus la fabrication des objets (pour un smartphone cette fabrication consomme environ autant que les circuits qui y sont inclus) et surtout leur consommation lors du fonctionnement (périmètre 3 aval), qui recouvre une très grande variabilité suivant le composant, en particulier sa surface, et son utilisation, comme illustré par la figure 4.1.

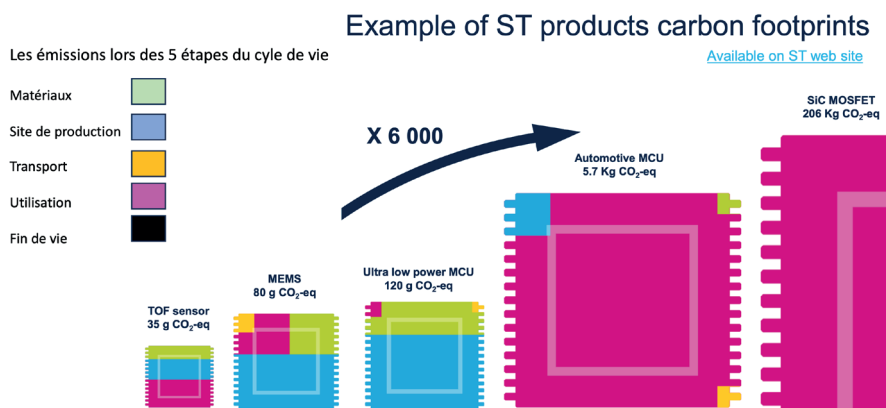


Figure 4.1: Consommations de différents produits semi-conducteurs durant leur cycle de vie (source : ST microelectronics)

Pour certains de ces composants on n'utilise un circuit que très rarement et pour des durées très courtes, ne consommant que quelques MWh/an ; pour d'autres, manipulant de grandes puissances électriques, la consommation lors de la fabrication est tout à fait négligeable par rapport à la consommation lors de l'utilisation. Un seul transistor, ayant consommé très peu lors de sa fabrication, peut commander des kW, et même s'il permet un rendement énergétique de 96 %, il dissipe quand même une puissance de quelques centaines de W lors de l'utilisation dans l'alimentation électrique des centres de données, ce qui peut mener à une consommation annuelle de quelques milliers de kWh. Mentionnons ici à la fois l'importance des progrès à venir dans ce domaine des composants de puissance et leur impact limité pour ce rapport : si on remplace le silicium des transistors par de nouveaux matériaux comme le carbure de silicium, SiC, ou le nitrure de Gallium, GaN, permettant des rendements supérieurs à 99 %, on économise à chaque fois des milliers de kWh, gain appréciable. Mais cela ne

représente qu'une très faible fraction de la consommation du centre de données...;

- les émissions de CO₂ lors de la production ne se déduisent pas simplement de la consommation électrique des industriels, même en tenant compte du mix électrique local (périmètre 2). Les fabricants de semi-conducteurs achètent en effet des produits ou de l'énergie décarbonée chez leurs fournisseurs, qui promettent pratiquement tous zéro émission nette en, ou avant, 2035. Cela correspond aussi à des augmentations d'efficacité énergétique des procédés de fabrication, compensant au moins l'augmentation de la complexité de circuits intégrés, en particulier l'augmentation du nombre de niveaux de masquage;
- la consommation énergétique lors de la fabrication des composants est grosso modo identique quelle que soit leur destination, sensiblement proportionnelle à leur surface, entre 1 et 1.000 mm² pour les plus gros circuits destinés à l'IA, soit entre 1 et 2 kWh par cm² de circuit^x. Mais lors des diverses utilisations (périmètre 3 aval), les consommations pourront devenir très différentes. À titre d'exemple, un circuit imprimé tel qu'un microcontrôleur pour l'automobile ou l'électroménager, de surface 25 mm² et fonctionnant 5 % du temps, nécessite 0,5 kWh pour sa production et ne consomme que 0,1 W au pic; il consomme donc 0,045 kWh par an, dix fois moins que son énergie de fabrication. À l'inverse, les puces les plus utilisées dans les centres de données pour l'IA (comme dans beaucoup de machines d'IA décentralisée), dissipent une puissance de 400 W (parfois jusqu'à 2.300 W) et consomment donc 2.000 kWh par an pour un facteur d'utilisation de 60 %; cette consommation annuelle est 20 à 100 fois plus élevée que l'énergie utilisée pour leur fabrication. Comme l'essentiel de la croissance imputable à l'IA se fera avec de tels circuits, la part de consommation énergétique lors de la fabrication des semi-conducteurs va diminuer par rapport à la consommation lors de l'utilisation. Les efforts des fabricants de ces circuits doivent surtout porter sur l'amélioration de la performance énergétique lors de l'utilisation. Ceci conduit à se préoccuper du nombre d'opérations effectuées par unité d'énergie consommée, par exemple exprimée en TFLOPS/kWh.

4.2. LES ÉVOLUTIONS DES CIRCUITS INTÉGRÉS, MINIATURISATION ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

La compréhension des évolutions des composants, principalement les circuits intégrés, est essentielle pour essayer de prévoir l'évolution des performances pour les années à venir, dont celle de la consommation. La consommation du numérique, son augmentation ou sa diminution, est directement liée au progrès des performances des circuits intégrés (CI), qui compense ou non l'augmentation des usages, avec l'amélioration concomitante des logiciels d'utilisation.

Les CI vont continuer de progresser comme dans le passé, suivant trois axes: les technologies matérielles, les architectures, et les logiciels⁷⁹. Du côté logiciels, une nouvelle donne est apparue récemment avec les progrès fulgurants, quoique de nature différente, portant sur l'utilisation de l'IA. Leur progrès matériel sera plus lent que suivant la loi de Moore initiale (doublement tous les ans environ du nombre de transistors jusqu'en 1975, puis doublement tous les 18-24 mois), car la croissance ne se fait plus grâce à une lithographie planaire de plus en plus fine, les limites de cette technologie ayant en effet été atteintes. On est en effet passé de largeurs de traits lithographiques de quelques microns à des générations lithographiques dites « 7, 3, 2, 1 » nm^{xi} aujourd'hui.

L'augmentation continue des performances des CI est résumée sur la figure 4.2. La partie gauche met en évidence l'ère de la loi d'échelle de Dennard jusqu'à 2002, tandis que la partie droite, post 2002, celle de la loi d'échelle « équivalente ». La figure met en évidence les saturations, à partir de 2002, tant de la puissance dissipée que de la fréquence d'horloge, toutes deux pour des contraintes thermiques (cf. note xi). La puissance de calcul continue cependant à augmenter grâce à l'intégration de plusieurs processeurs (« cœurs logiques ») sur une même puce, chaque cœur ayant une performance qui croît lentement. La performance continue à croître y compris aujourd'hui, grâce aux architectures multi-cœurs des circuits spécialisés en calculs graphiques (GPU) et aux réseaux de neurones.

79 [\(80\) A new golden age for computer architecture](#)

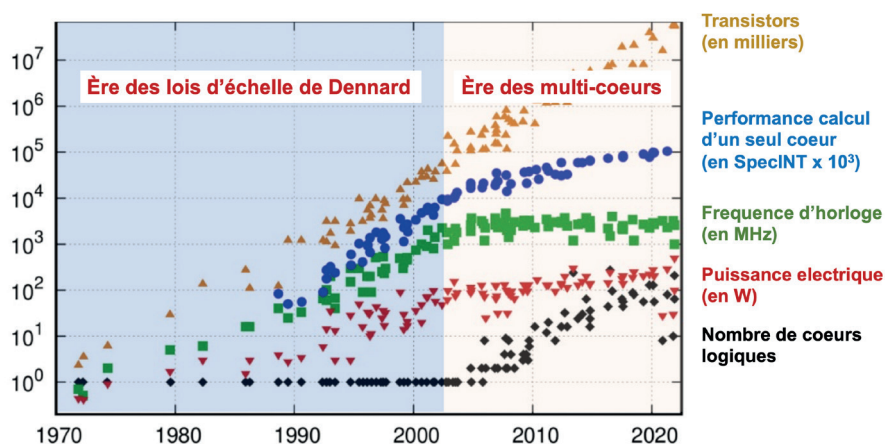


Figure 4.2: Évolutions des microprocesseurs pour ordinateurs fixes
De bas en haut: nombre de transistors, puissance électrique, fréquence d'horloge, performance d'un cœur exprimée en SPECint⁸⁰, nombre de cœurs. D'après Rupp⁸¹.

Pour tirer le meilleur parti des contraintes, liées à cette tension d'alimentation qui stagne (cf. note xi), et de la puissance maximale dissipée par unité de surface d'un CI (environ 10 W/cm^2) tout en maintenant les performances, le nombre de composants par puce continue à augmenter, composants qui alors ne fonctionnent pas tous en même temps, avec comme résultat une augmentation nette de la mémoire sur puce, et une diminution de la consommation, due pour sa part à la diminution des distances de propagation des signaux sur les puces. Il faut alors multiplier alors les conducteurs d'interconnexion entre composants en les disposant en couches séparées par des couches de matériaux isolants. Le nombre de niveaux de conducteurs atteint ainsi aujourd'hui jusqu'à 20 chez TSMC pour les puces de NVIDIA utilisées pour l'IA.

4.3. LES PROGRÈS FUTURS

Malgré les limitations apparues vers 2002 (cf. 4.2), la performance des CI va continuer de progresser. Il y a certes une stagnation de la vitesse

80 Le SPECint est un standard permettant de comparer des machines de calcul. Il est ici normalisé par rapport au microprocesseur 80386 DX de 1985.

81 <https://netfuture.ch/2024/10/50-years-of-microprocessor-trend-data/>

d'horloge vers 3 GHz, tout gain en vitesse par augmentation de la tension appliquée (donc du champ électrique accélérateur des électrons) se traduisant par une augmentation de la puissance consommée qui n'est pas compensée par une augmentation au moins égale de la puissance de calcul. Il est ainsi devenu plus efficace d'augmenter le nombre de circuits logiques et de mémoire travaillant en parallèle sur des puces plus grandes. Le nombre de composants par circuit continue donc à augmenter, même si le nombre de commutations n'augmente que proportionnellement à la surface des puces. On est alors passé à une autre métrique, celle de la loi de Koomey, qui donne l'évolution de la puissance de calcul doublant historiquement tous les 1,5 ans jusqu'en 2008, puis seulement tous les 2,3 ans jusqu'en 2023, prenant le relais des lois de Moore et de Dennard⁸².

Il faut rappeler que le progrès en puissance de calcul, et sa composante énergétique, ne reposent pas uniquement sur la technologie de fabrication. Les autres composantes des systèmes de calcul, architecture, algorithmie et logiciels progressent de concert. L'essor à partir de 2020 des usages de l'IA génère une forte accélération de l'augmentation des échanges et du traitement de données. L'architecture des GPU dont l'efficacité est de l'ordre de 20 à 100 fois supérieure à celle des CPU pour des produits de matrices⁸³, mais de 5 à 10 fois pour les calculs 32 ou 64 bits, se prête très bien aux réseaux de neurones utilisés pour l'AI. C'est un exemple d'application réagissant sur l'architecture et la technologie des circuits. Des gains d'efficacité très importants sont encore à venir. Les performances des CI spécialisés à base de GPU croissent beaucoup plus vite que celles des CPU, avec aujourd'hui un doublement tous les 6 mois de la puissance de calcul utilisée pour l'AI⁸⁴.

Le progrès technologique à venir est donné par le consensus des industriels, via les rapports de l'*International Roadmap on Devices and Systems* (IRDS), qui prévoient que l'augmentation des performances des puces silicium continuera au même rythme pendant au moins, sinon plus,

82 [Evolution of computing energy efficiency: Koomey's law revisited | Cluster Computing](#)

83 Dans ce cas un processeur spécialisé, effectuant des opérations locales, est en effet bien plus efficace qu'un processeur universel effectuant des opérations souvent à grande distance sur la puce.

84 [\[2104.14517\] Brain-inspired computing: we need a master plan](#)

une douzaine d'années, passant de puces à 100 milliards de transistors à des puces à plus de 1.000 milliards, et des gains énergétiques en puissance de calcul de plus de 200 d'ici 2037⁸⁵. Le nombre de composants élémentaires par CI silicium continue à augmenter grâce à de nouveaux développements: (i) des architectures 3D des composants (transistors verticaux); (ii) une plus grande compacité des portes logiques grâce à un meilleur contrôle dimensionnel des composants pour une même largeur de trait; (iii) l'utilisation de nouveaux concepts de composants logiques et de mémoire plus compacts; (iv) la multiplication de circuits spécialisés de grande efficacité pour une tâche précise sur une même puce diminuant leur consommation; et (v) l'empilement de plaquettes de circuits permettant d'éviter la dissipation d'énergie nécessitée par les interconnexions à longue distance dans un plan. Les progrès deviennent cependant plus difficiles à atteindre alors que l'on approche des limites physiques de la technologie silicium. La recherche académique et industrielle explore donc depuis de nombreuses années des approches alternatives décrites dans le document « *Beyond CMOS* » de l'IRDS⁸⁶. On y trouve pêle-mêle les nouveaux matériaux, composants et architectures pour les fonctions de mémoire, et les nouveaux matériaux, composants et architectures pour les fonctions de calculs logiques...^{xii}

Pour donner des perspectives pour les horizons au-delà de 2030 :

- la continuation de la technologie silicium apportera encore beaucoup de progrès, surtout si on considère les progrès simultanés des architectures de puces, des algorithmes et des logiciels;
- à l'échéance immédiatement postérieure à 2030, peu des technologies alternatives auront un impact significatif. Leurs domaines d'application éventuels seraient des niches, comme le remplacement des mémoires SRAM, très gourmandes en énergie, dans les applications autonomes comme les téléphones portables;

85 <https://irds.ieee.org/editions>; pour la continuation des progrès en technologie silicium suivant « *More Moore* », voir <https://irds.ieee.org/editions/2024/more-moore>

86 Pour « *Beyond CMOS* » voir: https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2023/2023IRDS_BC.pdf

- l'histoire de la microélectronique montre en effet que les solutions alternatives au silicium, tout attrayantes qu'elles paraissent à prime abord, sont rarement mises en œuvre. Une bonne partie des technologies « *Beyond CMOS* » mentionnées dans la note xii étaient déjà identifiées dans les roadmaps il y a vingt ans, et n'ont pas percé. C'est que la pertinence de leur mise en œuvre à grande échelle est le résultat de la compétition entre leur performance, à confirmer, et le progrès continu de la technologie silicium déjà mature ;
- si certaines technologies peuvent déboucher pour certaines applications, leur utilisation dans le domaine de l'IA et des centres de données n'est pas dans leur champ : les centres de données nécessitent des mémoires à faible temps de latence, donc à lecture et écriture rapides, hors d'atteinte pour les mémoires à ADN, applicables par contre pour la mémorisation « froide ». De même, l'ordinateur quantique, s'il s'avère faisable, ne pourra traiter que des nombres de données faibles, ce qui n'est pas le besoin pour l'IA.

4.4. LES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES ET LES ÉMISSIONS DE GES LORS DE LA FABRICATION DE COMPOSANTS

En 2022, la consommation électrique pour la fabrication industrielle des semi-conducteurs est de l'ordre de 100 TWh/an (cf. 4.1), en augmentation continue depuis les 30 TWh de 2001. Ceci contraste avec la quasi-stagnation de la consommation moyenne pour fabriquer 1 cm² de circuit, passant de 1,6 kWh/cm² en 2001 à 1,4 kWh/cm² en 2022, avec un minimum vers 1,05 kWh/cm² entre 2006 et 2017. Plusieurs phénomènes expliquent ces tendances :

- la quasi-stagnation de l'énergie par unité de surface est due à la conjonction de deux phénomènes agissant en sens inverses : les technologies de fabrication sont de plus en plus efficaces, mais la complexité grandissante des circuits intégrés multiplie les étapes de fabrication (Figure 4.3). À un instant donné et pour une technologie donnée, la consommation est proportionnelle au nombre d'opérations de masquage. Le cas ultime est TSMC, qui utilise les technologies les plus avancées et les plus complexes (jusqu'à vingt niveaux d'interconnexion dans les circuits pour l'IA), qui nécessitent 2,5 kWh/cm², pour une performance énergétique en kWh/TFLOPS bien améliorée par rapport aux technologies moins avancées ;

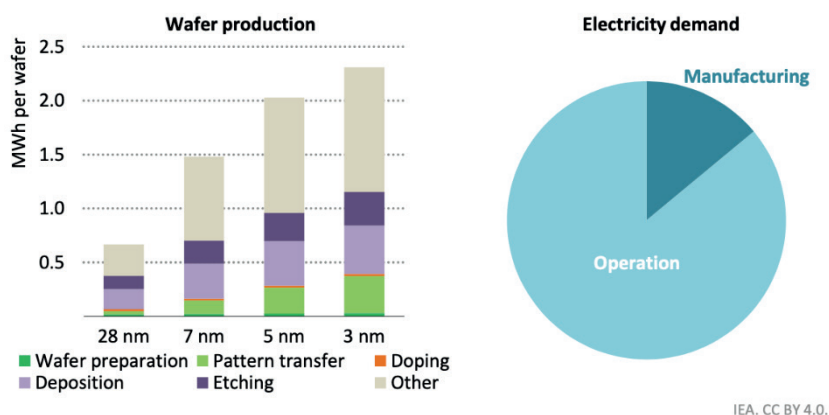


Figure 4.3: Consommation électrique pour la production de plaquettes dans les différentes étapes de fabrication et pour les différents nœuds lithographiques. La catégorie « other » représente pour l'essentiel la fabrication de l'eau pure et le contrôle de l'environnement dans l'usine.

À droite, la consommation des puces dans un serveur pendant 5 ans (source: IEA, 2025, *analysis based on Garcia Bardon, Boavizta, and Dell*)

- l'augmentation du besoin énergétique global correspond alors à l'augmentation des quantités produites, par exemple pour les marchés de l'automobile et des téléphones portables. Les demandes de plus de fonctionnalités pour une même application augmentant, le besoin énergétique augmente aussi malgré le progrès des circuits. Le nombre de CI produits est ainsi passé mensuellement de 6 milliards en 2001 à 32 milliards en 2022;
- cette croissance est possiblement liée à un effet « rebond », dû à la décroissance du prix des circuits, même si un « véritable » effet « rebond » correspondrait plus à une consommation augmentée dans un marché existant. Il s'agit beaucoup plus ici de l'extension des marchés et de l'apparition de nouveaux marchés.

Ces tendances vont certainement continuer mais cela ne se traduira pas nécessairement par une augmentation des émissions de GES: tous les fabricants se sont engagés dans une démarche vers leurs propres ZEN, entre 2030 à 2040 suivant les cas. Cela doit être atteint par les techniques habituelles: efficacité énergétique des procédés, production interne d'énergie renouvelable, achats externes d'énergie décarbonée, achats de

certificats de compensation carbone... La figure 4.4 montre par exemple la trajectoire de décarbonation de *ST microelectronics*, où une partie importante provient de la dénaturation des gaz perfluorés (cf. *infra*), mais l'essentiel venant d'achats d'énergie renouvelable et de certificats de compensation carbone.

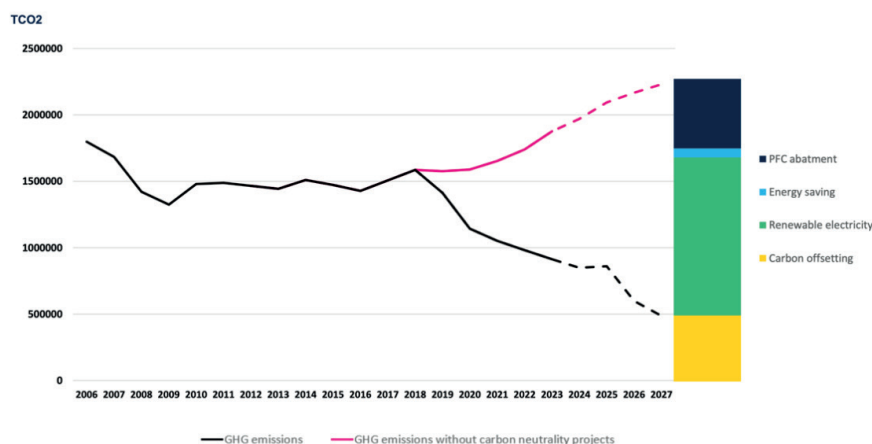


Figure 4.4: Trajectoire de décarbonation de *ST microelectronics*
(source: *ST microelectronics*)

Des efforts similaires sont faits par toutes les sociétés mondiales, comme en attestant leurs «rapports de développement durable». Ces efforts s'inscrivent dans les objectifs de passage au ZEN en 2050 exprimés par les pays producteurs, mais certains pays auront du mal, comme Taiwan⁸⁷.

87 [\[2209.12523\] From Silicon Shield to Carbon Lock-in? The Environmental Footprint of Electronic Components Manufacturing in Taiwan \(2015-2020\)](#)

Une spécificité de l'industrie des semi-conducteurs : la consommation de gaz perfluorés (*Perfluorinated compounds, PFC*), grands contributeurs à l'effet de serre

Les gaz perfluorés, les PFC (à ne pas confondre avec les PFAS, et qui n'en sont pas) sont d'utilisation incontournable aujourd'hui en lithographie : par leurs propriétés chimiques, ils permettent de graver extrêmement finement les motifs définissant les éléments des circuits, de plus en plus petits. Bien évidemment, au fur et à mesure de la miniaturisation des circuits on utilise de plus en plus de PFC car il y a plus d'étapes de lithographie à graver. Or les PFC sont de redoutables gaz à effet de serre, avec un pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans, 25.000 supérieur à celui du CO₂.

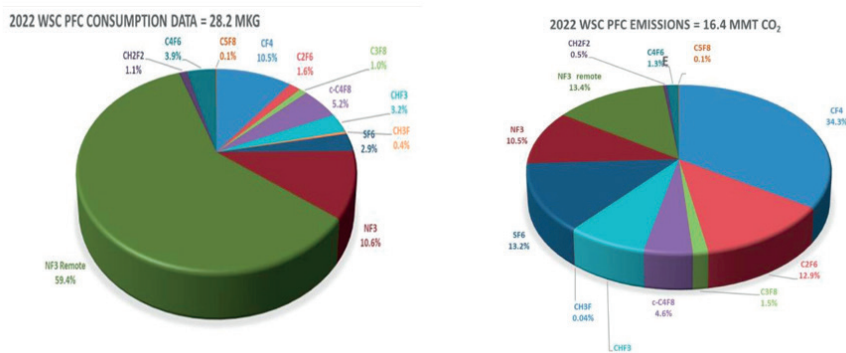


Figure 4.5: Consommations mondiales des différents PFC et émissions correspondantes exprimées en équivalent CO₂

L'industrie s'efforce de réduire ces émissions : substitutions là où c'est possible, optimisation des procédés... En bout de chaîne, les molécules de PFC sont détruites à haute température ou dans un plasma. De tels systèmes permettent la destruction de 96 % des molécules. Il s'agit de multiplier ces systèmes dans toutes les usines. Cela pose un problème quand il s'agit d'usines existantes à cause de la taille des machines concernées. L'objectif volontaire des entreprises du Conseil Mondial des Semi-Conducteurs (WSC) est d'arriver à une réduction de 85 % des émissions de PFC.

Aujourd'hui, malgré un tonnage utilisé relativement faible (28 kT), l'impact environnemental est très important, soit 16,4 MTCO₂eq après destruction d'une grande partie des PFC (à comparer aux émissions mondiales du périmètre 2 de l'industrie des semi-conducteurs, soit 50 MTCO₂eq (sources *ST microelectronics* et *WSC*).

4.5. QUELQUES ÉLÉMENTS SUR L'UTILISATION D'EAU POUR LA FABRICATION DE COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

4.5.1. ASPECTS QUANTITATIFS

L'utilisation d'eau dans l'industrie microélectronique est à plus de 80 % sous forme d'eau ultra-pure, pour rincer les plaquettes à chaque étape de fabrication. Le reste sert pour l'essentiel aux opérations de dépollution des appareils et effluents gazeux, et aux tours de refroidissement. L'eau ultra-pure est obtenue par l'enchaînement de plusieurs opérations physico-chimiques dans des unités spécialisées des usines. Il faut environ 1,6l d'eau pour obtenir 1l d'eau ultra-pure. L'eau, en quantité importante, est prélevée dans des cours d'eau, par forages, par récupération d'eau de pluie, et via les circuits d'eau potable. Il est nécessaire que l'eau soit prélevée dans des ressources de très bonne qualité afin de minimiser le coût de sa transformation en eau ultra-pure. L'accès aux ressources d'eau peut être crucial, dans des régions où l'eau de bonne qualité est rare, avec des difficultés accrues en cas de sécheresse. Par exemple l'industrie taiwanaise a prélevé 140 millions m³ en 2020, mais dans un pays à forte pluviométrie, où l'agriculture prélève d'ailleurs 80 fois plus d'eau pour l'irrigation. Le problème est beaucoup plus prégnant aux États-Unis dans les états à faible pluviométrie comme la Californie ou l'Arizona.

Les quantités d'eau utilisées pour fabriquer un composant sont l'addition de volumes d'eau prélevés dans les ressources extérieures et de volumes d'eau recyclés à l'intérieur des usines. Les consommations d'eau, c'est-à-dire les quantités évaporées ou incorporées dans les produits, étant faibles, les quantités d'eau rejetées sont à peu près égales aux quantités prélevées.

La figure 4.6 montre (à surface de circuit équivalente de 1 cm^2) les évolutions des émissions de CO_2 et les utilisations d'eau pour trois fabricants. On note la forte augmentation des émissions du périmètre 3 à partir de 2012-14 pour UMC et TSMC, dues à l'utilisation de leur production dans les centres de données. L'émission lors de la production augmente chez TSMC (périmètres 1 + 2), où la complexité croissante augmente le nombre d'étapes de fabrication et n'est pas complètement compensée par une meilleure efficacité des procédés. De même, la quantité d'eau utilisée par cm^2 de puce augmente chez TSMC, mais cette augmentation est atténuée par une augmentation du pourcentage de recyclage.

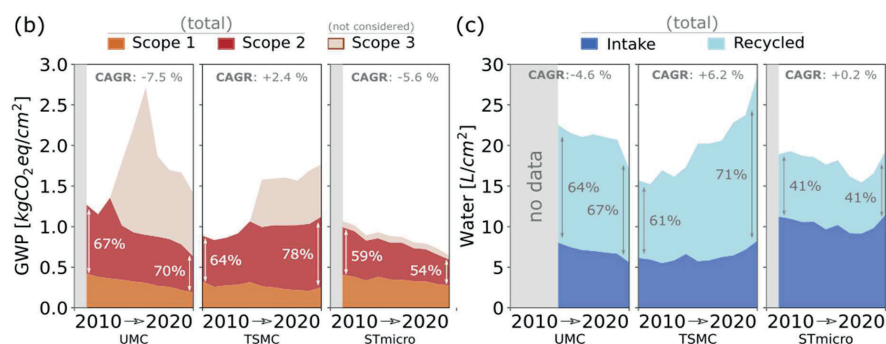


Figure 4.6: Évolutions des émissions de CO_2 (à gauche) et des quantités d'eau utilisées (à droite) pour fabriquer 1 cm^2 de puce pour UMC, TSMC et ST microelectronics. [Intake = Prélèvements, Recycled = quantité recyclée]⁸⁸

La figure 4.7 met en regard les quantités d'eau utilisées et les émissions de GES pour un grand nombre d'entreprises : les deux quantités sont liées proportionnellement par la quantité de circuits produits et les valeurs assez standard de l'énergie et de la quantité d'eau nécessaires à la fabrication d'un cm^2 de circuit. Au total l'industrie micro-électronique consomme de l'ordre de 1 milliard m^3 d'eau par an (source : *Semiconductor digest 2022* et données de la figure 4.7), sans qu'il soit très facile de comparer les différentes estimations qui ne sont pas toujours faites à périmètre constant.

88 T. Pirson et al., The Environmental Footprint of IC Production: Review, Analysis, and Lessons From Historical Trends, IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, 36, 56 (2023).

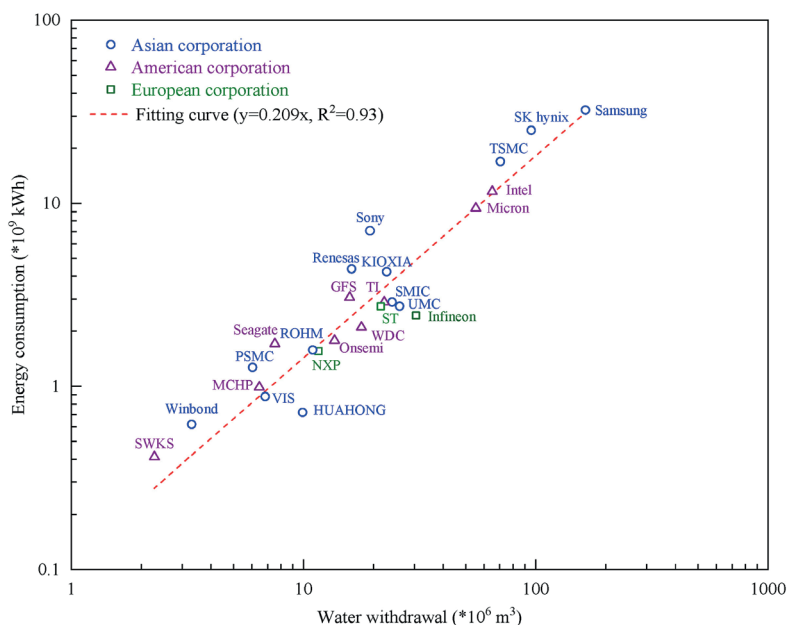


Figure 4.7: Consommation d'énergie et consommation d'eau des principales entreprises de semi-conducteurs en 2021⁸⁹

4.5.2. ASPECTS QUALITATIFS

L'eau prélevée à l'extérieur est d'abord purifiée pour servir au lavage des effluents gazeux ou dans les tours de refroidissement. Les autres prélèvements d'eau sont utilisés pour fabriquer l'eau ultra-pure, ce qui nécessite des ressources extérieures de très bonne qualité. Après ses différentes utilisations, l'eau doit être filtrée, purifiée à nouveau, en extrayant les différents produits chimiques qui y ont été incorporés. Une partie de l'eau récupérée peut être réutilisée. Elle est recyclée dans le circuit d'alimentation en eau de l'usine, ce qu'illustre la figure 4.6. Les rejets doivent être dépollués avant retour dans le milieu naturel. Suivant les cas, cela peut se faire dans le circuit local de traitement des eaux usées.

⁸⁹ Qi Wang, Nan Huang, Zhuo Chena, Xiaowen Chen, Hanying Cai, Yunpeng Wu, Environmental data and facts in the semiconductor manufacturing industry: An unexpected high water and energy consumption situation, Water Cycle 4 (2023) 47-54

Dans les autres cas, la partie non recyclée doit être épurée dans une installation propre à l'usine avant de repartir dans l'environnement en respectant les normes applicables. Enfin, il reste une (faible) partie sous forme de déchets chimiques aqueux dont tous les polluants n'ont pas été extraits. Une forte activité de recherche et d'industrialisation porte sur l'extraction des différents éléments chimiques de ces liquides pour en diminuer le volume et en récupérer les éléments chimiques pour les recycler.

Ainsi, contrairement aux centres de données, ce sont les contraintes qualitatives plus que quantitatives qui déterminent les implantations d'usines de composants microélectroniques. Les quantités d'eau prélevées sont plus importantes que celles qui sont prélevées par les centres de données, mais 5 fois plus faibles que les prélèvements directs et indirects de ceux-ci. Ceci étant, la contrainte pratique est un mélange des deux aspects, qualitatif et quantitatif, à savoir la disponibilité locale en quantité suffisante d'eau de très bonne qualité. Et si les quantités totales sont modestes, elles sont localement très importantes en raison de la taille des usines.

Si l'usine applique un traitement interne de dépollution performant, cela ne crée pas de concurrence avec l'agriculture qui peut réutiliser cette même eau en aval. Il peut évidemment y avoir compétition avec d'autres usages industriels mais, là encore, les rejets peuvent y être réutilisés. En revanche, cela peut générer des risques de concurrence avec les autres utilisateurs d'eau de très bonne qualité comme les services publics d'eau potable. De plus, l'évolution climatique peut raréfier la ressource dans certaines régions. L'industrie, dont la croissance et la complexification des produits va conduire à une augmentation de son utilisation d'eau, se doit donc de continuer ses actions pour augmenter encore la fraction d'eau recyclée et bien contrôler ses rejets.

Chapitre 5

LES TERMINAUX ET APPAREILS

Pour évaluer l'impact global du numérique, il faut de plus s'intéresser aux appareils des utilisateurs (*devices*), nécessaires non seulement pour l'ensemble des TIC comme cela était fait dans le tableau 2.1, mais aussi pour les médias et les divertissements (*Entertainment & Media*, E&M). La première étape consiste à s'appuyer, en la simplifiant, sur l'analyse de Malmodin *et al.* pour 2015 en définissant les catégories suivantes :

(i) pour les TIC :

- les PC, en regroupant les fixes et les portables ;
- les moniteurs ;
- les équipements locaux des clients (CPE, *Customer Premises Equipment*), qui regroupent les boîtiers d'accès à internet des opérateurs (dont le nombre augmente avec le déploiement du haut débit) et les routeurs Wifi ;
- les smartphones, dont l'impact en consommation est assez faible mais l'impact en fabrication est important ;
- tous les autres catégories identifiées dans le document de Malmodin *et al.*, regroupées ici comme « *other ICT* » (soit « autres équipements TIC »).

(ii) pour le secteur E&M (en ne gardant que la partie numérique) :

- les télévisions ;
- les STB (*set top boxes*, ou boîtier-décodeur) ;
- les consoles de jeux ;
- les autres objets (tels que les équipements Hifi ou de *home cinema*) sont regroupés sous « *other E&M* ».

Comprendre l'impact d'un appareil nécessite de répondre à deux questions: quelle est l'empreinte de la fabrication (et de la livraison) et quelle est celle de l'usage? La clef pour la première question est le nombre d'unités fabriquées, tandis que celle pour la seconde est la base installée. Le tableau 5.1 reproduit le document de Malmodin *et al.* (2018) pour 2015 (très complet, fournissant l'ensemble des chiffres de la partie de gauche), tandis que la partie de droite reflète les chiffres de l'article de Malmodin (2023) pour 2020. L'article de 2023 donnant bien les chiffres de base installée mais pas ceux des livraisons, c'est par règle de trois qu'est estimée l'empreinte carbone de la fabrication en 2020.

2015						
	# ship. (M)	Base (M)	TWh	CO ₂ Ops	CO ₂ Manuf	CO ₂ Total
PC	277	1700	143,5	87,9	61,1	149
Moniteurs	130	1000	30	18	13	31
CPE	184	925	83,5	50,1	7,7	57,8
Smartphone	1433	3700	11,1	6,7	64,5	71,2
Other ICT	1189	6675	73,9	42,3	49,7	92
Total TIC			342	205	196	401
TVs	235	1900	266	160	70,5	230,5
STB	265	890	89	53,4	8	61,4
Other E&M	731	3005	112	66,6	30,5	97,1
Total E&M			467	280	109	389
Total Général			809	485	305	790
2020 (Malmodin + Interpolation)						
PC	309	1700	112	100	68,2	168,2
Moniteurs	140	1100	55	30	14	44
CPE	200	1185	119	64	8,4	72,4
Smartphone	1351	5800	17	9	60,8	69,8
Other ICT	1300	7200	79,71	45,63	54,34	100
Total TIC			382,71	248,63	205,74	454,4
TVs	230	2100	294	176,64	69	245,8
STB	220	1150	115	69	6,64	75,6
Other E&M	750	3200	119,27	70,92	31,29	102,2
Total E&M			528,27	316,56	106,93	423,6
Total Général			911	565	313	878

Tableau 5.1 : Impact énergétique et empreinte carbone des appareils (CO₂ Ops et CO₂ Manuf désignent les émissions respectives dues au fonctionnement et à la fabrication)

Pour passer à 2023, puis à 2030, il faut examiner séparément chacune des deux parties, TIC et E&M. Les informations suivantes sont utilisées :

(i) pour les appareils TIC :

- la vente des smartphones a atteint un pic vers 2018 (environ 1.550 millions de ventes annuelles) et a ralenti depuis (1.340 millions de ventes en 2023). La base installée continue de croître, mais le rythme ralentit (7,2 milliards en 2025, en tenant compte du multi-équipement) ;
- la vente des PC a connu une accélération au moment de la pandémie COVID mais est revenue en 2023 au niveau de 2015, avec une tendance globale légèrement baissière sur 10 ans (selon les analyses du Gartner Group) ;
- les informations sur les moniteurs sont disparates mais la tendance est à la stabilité ;
- les nombres d'équipement CPE suivent la pénétration du haut débit, avec un rythme d'augmentation qui ralentit, se traduisant par une baisse progressive des livraisons.

(ii) pour les équipements E&M :

- le nombre de télévisions installées continue d'augmenter à cause du multi-équipement, tandis que le nombre de foyers équipés augmente faiblement. Ceci se traduit par une légère diminution des livraisons (source : Statista) ;
- de façon similaire les livraisons de boîtiers annexes (STB) sont maintenant de l'ordre de 200 millions par an, en recul par rapport à 2015, ce qui traduit le ralentissement de l'augmentation de la base installée (liée au plafonnement du déploiement du haut débit).

Ceci permet de construire le tableau 5.2, qui propose une estimation pour 2023 et une prévision pour 2030. Ce tableau est élaboré à partir des seuls volumes d'équipements, sous l'approximation de non-remise en cause des valeurs unitaires (fabrication et livraison) fournies par Malmodin, soit 413 kgCO₂ en moyenne pour les PC (fixes et portables), 44 kgCO₂ pour un smartphone, 340 kgCO₂ pour une STB et 330 kgCO₂ pour un téléviseur. Une analyse rapide des chiffres disponibles sur le web^{xiii} montre une légère évolution, mais qui ne remet pas en cause l'estimation globale (qui reste approximative). Par contre les volumes ont bien été mis à jour avec les nouvelles estimations *supra*.

On constate, pour chaque catégorie, à la fois des progrès importants sur la fabrication et la consommation électrique, qui sont ensuite annulés par un effet «rebond» (de taille, de puissance de calcul, d'augmentation des options) qui font que les coûts unitaires sont assez stables sur les 10 dernières années. La démarche utilisée pour construire le tableau 5.2 semble donc acceptable du point de vue des ordres de grandeur.

2023 (Estimation)						
	# ship. (M)	Base (M)	TWh	CO ₂ Ops	CO ₂ Manuf	CO ₂ Total
PC	242	1700	112	100	53	153
Moniteurs	140	1100	56	30	14	44
CPE	200	1250	126	68	8	76
Smartphone	1339	6800	20	11	60	71
Other ICT	1350	7300	81	46	56	103
Total TIC			395	255	191	447
TVs	210	2200	308	195	63	248
STB	210	1200	120	72	6	78
Other E&M	770	3300	123	73	32	105
Total E&M			551	340	101	431
Total Général			946	595	292	878
2030 (Prévision)						
PC	250	1700	112	100	56	155
Moniteurs	150	1200	60	33	15	48
CPE	220	1400	141	76	9	85
Smartphone	1300	7500	22	12	59	70
Other ICT	1500	7600	84	48	63	111
Total TIC			419	269	202	469
TVs	200	2300	322	194	60	254
STB	200	1300	130	78	6	84
Other E&M	800	3500	130	78	33	111
Total E&M	1200	7100	582	350	99	449
Total Général			1001	619	301	918

Tableau 5.2 : Estimation de l'impact énergétique et de l'empreinte carbone des appareils (CO₂ Ops et CO₂ Manuf désignent les émissions respectives dues au fonctionnement et à la fabrication)

Ce tableau montre que, globalement, la consommation électrique totale des terminaux et appareils passe en valeurs approchées, entre 2023 et 2030, de 950 à 1.000 TWh, une augmentation à peine perceptible étant données les marges d'incertitude sur ces chiffres. De la même façon l'empreinte carbone totale (fabrication et opérations) passe de 880 à 920 MTCO₂, une augmentation de 4,5%.

Chapitre 6

**SYNTHÈSE SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE
ET L'EMPREINTE CARBONE DU SECTEUR NUMÉRIQUE**

Il est possible de rassembler tous les chiffres discutés dans les chapitres précédents pour produire les tableaux 6.1a et 6.1b, synthèses de l'impact énergétique et de l'empreinte carbone du secteur numérique. Rappelons qu'il ne s'agit que d'une estimation pour 2023 (avec une incertitude de l'ordre de 10 %), car il faudra attendre 2026 pour que des analyses scientifiques complètes soient publiées. Les chiffres de 2030 sont prévisionnels, donc prospectifs et non exacts par définition, mais ils permettent de cadrer les ordres de grandeur. Ils doivent être mis en regard de nombre de publications « alarmistes » parues abondamment en 2024 et 2025 (voir aussi Annexe 1). Il faut toutefois garder en mémoire les incertitudes liées à un développement de GenAI plus rapide, bien que de moindre probabilité (cf. 2.3), et à une augmentation du volume de données transitant sur les réseaux avec une efficacité moindre de la 5G (cf. 3.5.3).

2015 (Malmodyn)				
	TWh	CO ₂ Op.	CO ₂ Man	CO ₂ Total
Centres de données	220	135	25	160
Blockchains	10	6	1	7
Réseaux	240	144	25	169
Appareils (TIC+E&M)	810	485	305	790
Total	1280	770	356	1126
2020 (Base)				
Centres de données	220 [250]	95	30	125
Blockchains	70	30	9	39
Réseaux	250	155	31	186
Appareils (TIC+E&M)	910	565	313	878
Total	1450	845	383	1228

Tableau 6.1a : L'impact énergétique et empreinte carbone du numérique, 2015-2020

Le tableau 6.2 fournit, au niveau mondial, les principaux indicateurs correspondant aux analyses et estimations fournies plus haut. Notons que les chiffres de 2030 sont affectés de beaucoup d'incertitude sur les dénominateurs. Plusieurs articles annonçant une part très importante du numérique en 2030 font l'hypothèse que les autres secteurs ont beaucoup progressé, et que les émissions y ont déjà baissé de façon significative. On constate également que la part du numérique dans les émissions de CO₂ n'est pas le seul critère environnemental à considérer, cette part se réduisant en effet si on la rapporte à la totalité des GES (le chiffre souvent présenté de 4 % des émissions dues en 2020 au numérique est près de 2 fois trop élevé).

2023 (Estimation)				
	TWh	CO ₂ Op.	CO ₂ Man	CO ₂ Total
Centres de données	270 [320]	65	40	105
<i>Blockchains</i>	[95] 125 [155]	50	18	69
Réseaux	260	156	33	189
Appareils (TIC+E&M)	945	595	292	878
Total	1600	866	383	1241
2030 (Prévision)				
Centres de données	500 [700]	70	40	110
<i>Blockchains</i>	[?] 200 [?]	80	16	96
Réseaux	[270] 360 [590]	120	40	160
Appareils (TIC+E&M)	1000	619	301	918
Total	2060	889	397	1284

Tableau 6.1b : L'impact énergétique et empreinte carbone du numérique, 2023-2030

	2015	2020	2023	2030
Électricité (TWh)	18.700	2.000	27.000	33.000
CO ₂ (Gt)	33,4	33,7	37,4	38,0
GHG (Gt)	52,4	50,8	53,8	52,0
Part « Numérique » de l'électricité	6,85 %	6,3 %	5,9 %	5,9 %
Part « Numérique » des émissions de CO ₂	3,4 %	3,6 %	3,3 %	3,4 %
Part « Numérique » des émissions de tous les GES	2,1 %	2,4 %	2,3 %	2,5 %

Tableau 6.2 : Les divers indicateurs au niveau mondial pour l'évaluation de l'emprunte environnementale du numérique. Les 3 lignes supérieures sont relatives à l'ensemble des activités humaines, tous secteurs confondus.

Chapitre 7

AVANTAGES DE LA NUMÉRISATION DANS L'INDUSTRIE ET LES SERVICES

L'apparition de l'électronique d'abord, puis celle de la numérisation (ou digitalisation) ensuite, ont très profondément modifié la société et l'économie. La numérisation, à la base de l'ensemble des TIC, voire d'une grande partie de l'électronique, permet de percevoir le monde physique, de créer et interpréter des informations et de piloter de façon optimisée des machines et des systèmes. La digitalisation est de plus en plus présente dans la société, et participe de façon clef à beaucoup d'activités. On a vu qu'elle s'accompagne de consommations d'énergie mais, en retour, elle génère le plus souvent d'importantes économies d'énergie et de moyens, en optimisant de nombreux secteurs de l'énergie et en évitant des gaspillages permettant en conséquence de réduire les émissions de CO₂. La numérisation a permis de diminuer les coûts de fabrication de nombreux produits et les coûts de fonctionnement de nombreuses activités, en contribuant parallèlement à leur décarbonation progressive. La facilité de mise en œuvre du numérique, universel, moins cher, plus rapide, plus adaptable, contribue aussi à la tendance forte et de long terme d'une pénétration croissante. Plusieurs rapports documentent ces apports, dont celui de l'ANRT (2022) qui brosse un panorama général et celui de l'IEA (2025) qui porte quant à lui sur le point spécifique de l'IA. On peut ajouter à ces deux rapports celui du GeS/^{xiv} 90, dont est extraite la figure 7.1 montrant les réductions potentielles des émissions pour 5 grands secteurs d'activité, à comparer aux chiffres des émissions globales donnés au tableau 6.2. *supra*.

90 ICT solutions for 21st century challenges ([SMARTer2030_Full report Status 2015-06-07 v04](#))

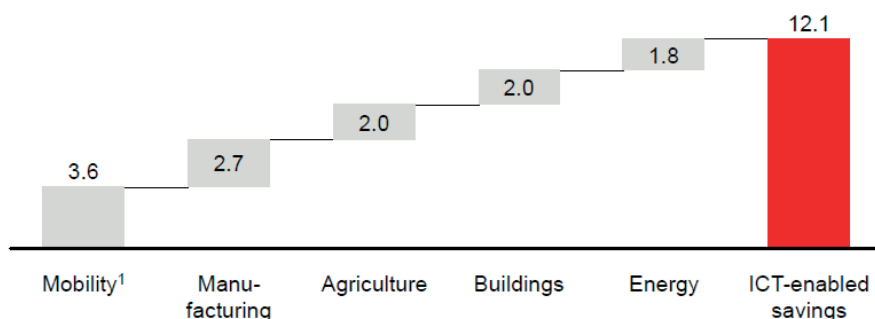


Figure 7.1: Réductions potentielles des émissions de GES (en GtCO₂eq) dans 5 domaines⁹¹

Il serait toutefois difficile de mettre en regard, pour chaque secteur de l'industrie ou des services, les consommations électriques et les émissions induites par la digitalisation des processus face aux gains réalisés par rapport à une situation « pré-digitalisation ». Les études détaillées et les chiffres manqueraient pour une analyse aussi fine. Ce chapitre présente plutôt, en appui des considérations générales *supra*, des exemples significatifs des gains de consommation électrique, et plus largement d'énergie et d'émissions de GES, réalisés grâce à l'apport du numérique. On peut tout d'abord citer la production d'énergie, en particulier de l'électricité, avec la production d'électricité intermittente, la gestion des réseaux électriques et l'intégration des énergies intermittentes, le suivi et le pilotage des consommations, les usages optimisés de l'électricité... On peut aussi citer la fabrication, la logistique, les suivis de production et de la qualité de produits, toutes activités s'appuyant de plus en plus sur l'utilisation de jumeaux numériques. Parmi toutes les fonctions qui interviennent dans ces applications, que ce soit lors de la production ou de l'utilisation, le numérique assure la conception assistée par ordinateur (CAO), la capture d'information, la capture et l'émission d'énergie, le contrôle de l'énergie électrique et des machines, le contrôle et la diffusion de l'information, l'optimisation, la planification,... sans oublier bien entendu les activités de R&D, et la liste n'est pas exhaustive.

⁹¹ GeSI, op. cité. La figure est ainsi commentée dans le rapport par « *This report has analyzed the overall abatement potential of ICT by examining its impact across twelve ICT use cases which can be summarized into eight sectors. Figure 6 shows the abatement potential for each of these twelve use cases.* »

7.1. ACCÉLÉRATION DE LA R&D

Le numérique est devenu un formidable accélérateur de la recherche scientifique. La R&D utilise massivement, et de plus en plus, le numérique pour la recherche d'informations pertinentes (moteurs de recherche), pour traiter de façon rapide et efficace les masses de données qui ne pourraient l'être autrement, pour résoudre par le calcul les modèles complexes décrivant de plus en plus finement les systèmes complexes et plus généralement le monde réel (outils de simulation et HPC), pour stocker et archiver les résultats de recherche (sites spécialisés type *ArXiv*,...), pour diffuser les résultats plus largement et efficacement, et plus généralement pour accélérer l'ensemble des étapes des tâches de R&D.

L'ensemble de ces outils permet de concevoir des objets plus ambitieux, plus performants, d'économiser des étapes de prototypes physiques, et même de sauter ainsi des générations qui auraient nécessité, sans ces moyens numériques, d'avoir une véritable vie opérationnelle des prototypes successifs. Enfin le numérique permet d'aborder des domaines dont la complexité est totalement inabordable sans ordinateurs : recherches sur l'ADN, recherches de nouveaux matériaux, de nouveaux médicaments, prévision météorologique, simulation climatique, développement de nouvelles énergies...

L'IA ouvre aujourd'hui de nouvelles pistes, synonymes de gains de productivité et performance grâce à des nouveaux procédés de calcul physique très rapides (hybridation de la simulation numérique et de l'IA⁹²), ainsi que par des mécanismes d'inférence et d'exploration combinatoire originaux, par exemple sur le repliement des protéines...

Il est maintenant impossible d'imaginer une R&D sans numérique dans les laboratoires⁹³, les start-ups, les départements de recherche industrielle...

92 Cf. par exemple [Calcul et données: nouvelles perspectives pour la simulation à haute performance \(Rapport\) -Académie des technologies](#)

93 Les laboratoires de recherche n'en font pas moins de nombreux efforts pour réduire leurs émissions, pourtant très minimes par rapport aux autres grands secteurs d'activité (cf. par exemple l'initiative nationale Labos1point5, voir [1point5 | Transformer la recherche collectivement](#))

7.2. OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT DE SYSTÈMES

Une des fonctions les plus communément assurées par le numérique, tant dans l'industrie que dans les services, est relative à l'optimisation, à la fois pour la conception et le fonctionnement des systèmes :

- dans le premier cas il peut s'agir de simulations numériques, de préparation d'expériences et de l'analyse des données produites, d'élaboration des plans de fabrication et des moyens de pilotage,... toutes opérations permettant une réduction de la consommation d'énergie et de matières premières tout en améliorant l'efficacité ;
- dans le second cas de détecter l'état du système, de transmettre ces informations à un système décisionnel, de convertir ces décisions en actions⁹⁴..., là encore en permettant une baisse des besoins en termes de consommation d'énergie et de de stockage de l'information.

La rénovation de l'éclairage public avec des LEDs « intelligentes »⁹⁵ est un exemple « visible » et quantifié de telles diminutions de consommation, cet éclairage public représentant 41% de la consommation électrique des collectivités locales en France. Constitué le plus souvent de lampes anciennes (à mercure, pourtant interdites, ou à sodium), le parc est rénové au rythme de 3 % par an. Le remplacement de ces systèmes par des réseaux intelligents de lampes à LED pilotables suivant l'éclairement ambiant, l'heure et la présence ou non de piétons ou véhicules (ce que ne permettent pas les autres types de lampes d'éclairage public) permet d'économiser jusqu'à 80 % de la consommation électrique, tout en améliorant certains effets indésirables de l'éclairage public : nuisances lumineuses grâce à la bien meilleure directionnalité des lampes à LED vers les zones à éclairer, et donc diminution d'autant de la pollution lumineuse, diminution de la durée d'utilisation à plein régime, vers le milieu de la nuit ou quand il n'y a personne... L'exemple de l'éclairage intelligent par LED

94 Une chaudière bien régulée, avec pilotage par un capteur de température et application d'une consigne de température, permet des gains de 30 à 40 % sans perte de confort.

95 Rapport de l'ADEME 2021, Rénover l'éclairage extérieur, disponible à <https://librairie.ademe.fr/energies/4983-renover-l-eclairage-exterieur-9791029716584.html>

souligne l'apport des nouveaux services permis par la numérisation, et représente une contribution à l'émergence de la ville intelligente (*smart city*) pour l'amélioration de la qualité de vie et de l'environnement et pour les économies d'énergie dans les transports, l'habitat, les services publics...

7.3. LA GESTION DE L'ÉNERGIE

La figure 7.2 montre schématiquement les contributions essentielles d'un usage de l'IA pour les étapes amont de la production et du transport de l'électricité: contrôle des centrales thermiques et nucléaires; prévision météorologique pour estimer la production, excédentaire ou déficitaire par rapport aux besoins, des énergies intermittentes, photovoltaïque et éolienne; adaptation du réseau de distribution en temps réel et gestion prévisionnelle des besoins de stockage (batteries, barrages de retenue et au fil de l'eau, STEPs pour optimiser entre le turbinage et la fourniture d'eau vers l'aval). D'autres contributions, non indiquées sur la figure 7.2, concernent la mise en forme, en tension et phase, des productions photovoltaïques et éoliennes pour les injecter sur le réseau. La multiplication des sources d'électricité, intermittentes ou contrôlables, et des utilisateurs avec des facteurs de charge à forte variabilité, nécessite un contrôle rapide du réseau de distribution et le recours à des solutions intelligentes pour équilibrer production, transmission et consommation.

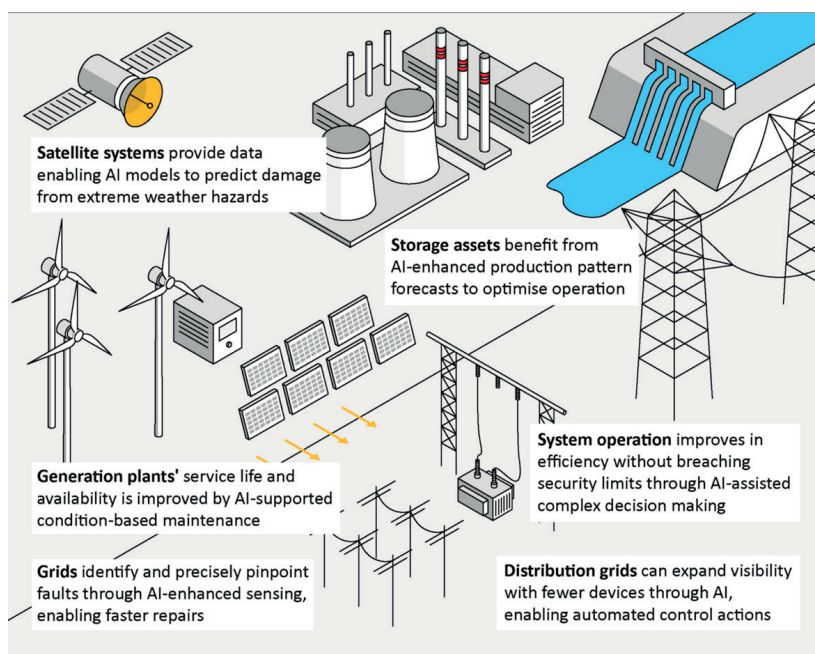


Figure 7.2: Usages de l'IA dans la gestion de la production et du transport de l'électricité (source : IEA 2025)

L'optimisation des moyens de production d'énergie est un élément clef de la minimisation des émissions de CO₂. Pour nombre de ces composants du système de fourniture électrique, des capteurs distribués, dont les données sont de plus en plus souvent traitées avec les méthodes de l'IA, permettent en temps réel une maintenance prédictive optimale. C'est entre autres le cas pour l'énergie éolienne⁹⁶.

À cela il faut encore ajouter les gains de consommation procurés en aval par le développement de solutions plus performantes. Par exemple la mise en œuvre de solutions digitales permet de mieux gérer chauffage, ventilation et air conditionné dans des bâtiments : une étude récente concernant les effets directs et indirects de l'adoption d'une solution d'IA dans 87 établissements d'enseignement en Suède fait apparaître des bénéfices

96 <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energie-eolienne/energie-eolienne-potentiel-ia-optimisation-production/>

dépassant largement les coûts environnementaux de mise en œuvre, avec un retour sur investissement carbone atteint en 2 mois et un impact net de 250 TCO₂eq sur 4 ans⁹⁷. Une étude similaire sur 46 micro-grilles électriques typiques, rentables financièrement, a abouti à une réduction moyenne des émissions de 102 TCO₂eq par micro-grille et par an, pour un investissement matériel (panneaux solaires, batteries, compteurs de puissance) d'environ 10 TCO₂eq et un coût digital de 0,114 TCO₂eq, soit un bilan global de 92 TCO₂eq par micro-grille et par an⁹⁸.

7.4. LES TRANSPORTS

Le secteur automobile a été profondément transformé par l'électronique et l'informatique. À titre d'exemples :

- la conception de nouveaux véhicules par la simulation numérique permet des gains énormes : temps de cycle passé de 4 à 6 ans en 1980 à 18 mois à 2 ans aujourd'hui, malgré des véhicules beaucoup plus complexes. Au-delà des économies d'énergie permises par ces gains de productivité, ces simulations permettent aussi une amélioration générale des essais et *in fine* de la qualité énergétique lors de l'utilisation ;
- les moteurs thermiques, grâce à l'allumage électronique et la cartographie de performances gagnent de 10 à 40 % sur la consommation ;
- la simple fonction GPS dans un smartphone, qui a un coût CO₂ d'environ 1 kg, permet d'éviter des temps d'attente dans les embouteillages ou les accidents, soit des gains se mesurant, sur la durée de vie d'un véhicule, en centaines de kg de CO₂ ;
- le véhicule électrique est quant à lui totalement numérisé (gestion de batteries, calcul d'autonomie, détection et réservation des bornes de recharge en temps réel,...).

97 <https://www.se.com/ww/en/insights/sustainability/sustainability-research-institute/ai-powered-hvac-in-educational-buildings/>

98 <https://www.se.com/ww/en/insights/sustainability/sustainability-research-institute/digital-with-impact.jsp>

Le secteur aérien a connu entre 1990 et 2019⁹⁹ une baisse des émissions par passager-kilomètre de plus de 50 % (5 MJ/pax-km en 1960, 2 MJ/pax-km en 1990, 0.8 MJ/pax-km en 2020), grâce à des avions mieux conçus, plus sobres, des motorisations plus efficaces, des vols mieux remplis et des opérations aériennes plus efficaces ;

- la conception des avions, qui mobilise de nombreuses ressources en R&D (aérodynamique, acoustique, contrôles de vol et attitude, capteurs, simulations de structures, gestion de l'énergie à bord, compatibilité électromagnétique...) et en ingénierie (conception mécanique des pièces notamment) est très largement numérisée. Selon Airbus¹⁰⁰, le jumeau numérique lui a permis d'économiser un prototype complet pour l'A350, ainsi que les nombreux essais associés ;
- une régression simple sur les consommations montre un gain lent mais régulier d'environ 2 % par an pour la consommation par passager-km. Cette consommation est liée aux progrès technologiques : amélioration de l'aérodynamique, amélioration de la motorisation principalement, eux même très largement dépendants des progrès technologiques (poids, matériaux), mais aussi en modélisation des phénomènes physiques (aérodynamique, moteurs...);
- le meilleur remplissage des avions permet d'optimiser la consommation de carburant, par exemple un gain de 7 % de remplissage se traduit par environ 3 % de gain de carburant. Les gains sont obtenus des programmes d'optimisation du prix des places en fonction de la demande (*yield management*) ;
- l'optimisation de trajectoires permet d'économiser des quantités considérables de carburant. La descente continue¹⁰¹ permet d'économiser, sur une seule descente, jusqu'à 600 l de carburant pour un B747, soit 1.800 kgCO₂, alors que le calcul de trajectoire a un coût pratiquement nul. La meilleure utilisation des jet-streams en haute altitude (grâce aux satellites

99 Date à laquelle il a été intégré aux objectifs climatiques européens

100 Communication orale

101 <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/navigation-aerienne-environnement>

météo) permet de gagner plus d'une heure de vol sur la traversée de l'Atlantique. La suppression d'un tour d'attente au-dessus d'un aéroport (de l'ordre de 10 mn de vol), par une meilleure gestion du trafic, permet d'économiser des tonnes de carburant et de CO₂. L'optimisation des routes aériennes en Europe, obtenue par simulation numérique, permet un gain annuel estimé à 100 millions de km¹⁰².

Cet exemple de l'aviation montre que les gains apportés par les TIC ne sont pas une baguette magique, mais la somme d'un ensemble de gains dans toutes les étapes.

7.5. LA LOGISTIQUE

Le secteur de la logistique est impacté de la même façon par l'utilisation intense du numérique, Amazon est ainsi devenu un champion mondial de la logistique et de l'optimisation des stocks.

Un autre exemple concerne le port de Singapour, qui s'est spécialisé dans une opération d'optimisation des porte-containers tout à fait surprenante. Une fois chargé en plusieurs ports de sa cargaison, le bateau doit ensuite aller la décharger dans plusieurs ports successifs. Or si un container se trouve mal placé, en dessous de la pile par exemple, il faut alors de longues opérations pour y accéder. Mais le chargement n'est pas juste empilé : il faut répartir la masse des containers sur la longueur du bateau à tout moment, qu'il soit chargé complètement ou partiellement. Le port de Singapour dispose de logiciels d'optimisation des bateaux et de systèmes totalement automatisés permettant en une seule journée de bateau à quai d'optimiser complètement la charge (c'est-à-dire sortir la cargaison et la remettre dans un ordre différent) pour le trajet qui suit, ce qui permet en retour de gagner des journées entières de transbordement par la simplification de la manutention. Les moyens informatiques et techniques mobilisés sont d'une grande sophistication.

102 <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/navigation-aerienne-environnement>

7.6. LA PRODUCTION ET L'INDUSTRIE

Les processus industriels progressent de plusieurs façons : meilleure connaissance des matériaux et machines ; Introduction de capteurs dans les processus (une usine de semi-conducteurs relève les données de près de 10.000 capteurs toutes les secondes) ; optimisation des flux dans les processus industriels et la logistique associée.

Ceci se traduit par une production optimisée grâce à l'informatique, phénomène encore amplifié par l'IA : conception du produit, optimisant les matériaux et leur intégration ; mise en place de chaînes de fabrication flexibles, avec une capacité à fabriquer une variété de produits permettant d'optimiser l'amortissement du coût de la chaîne ; conception de la durabilité (et donc des allongements des durées de garantie des automobiles), de la réparabilité ainsi que de la fin de vie des produits¹⁰³.

Un cas extrême de révolution apportée par les TICs est celui de la fabrication additive. Il est aujourd'hui possible de fabriquer à la demande, et rapidement, toute forme de pièce, même très complexe et souvent sans nécessiter d'assemblage, dans un grand nombre de matériaux, grâce à des machines de coût très abordable pour des microentreprises. Cela a changé du tout au tout la fabrication de prototypes et de pièces en petite série. Il est ainsi possible de fabriquer à nouveau des pièces détachées qui ne sont plus disponibles, ce qui se révèle un atout pour la réparation et la prolongation d'utilisation de produits qui seraient sinon livrés à la casse. C'est un autre outil de l'obligation de sobriété.

Si la grande industrie procède souvent par grands pas d'investissements et de changements technologiques successifs, ceux-ci se font parfois sur des rythmes plus lents que ceux des innovations du secteur du numérique. Il n'en reste pas moins que l'industrie améliore continûment ses goulots d'étranglement, en s'appuyant pour une large part sur les progrès des traitements numériques.

103 Malgré la persistance de certains recours à l'obsolescence programmée, domaine où l'action publique pourrait avoir un levier très important vers la sobriété.

7.7. ÉLÉMENTS POUR UNE APPRÉCIATION GLOBALE DE L'IMPACT POSITIF DE LA NUMÉRISATION

Au-delà des divers exemples présentés précédemment, il est très généralement admis qu'il existe environ un, voire deux dans certains cas extrêmes, ordres de grandeur de différence entre les consommations électriques du développement numérique d'une application et les gains de consommation réalisés grâce à cette digitalisation. TSMC indique ainsi que chaque kWh consommé dans sa production de circuits intégrés peut permettre d'économiser environ 4,28 kWh pour les autres industries et les ménages du monde entier d'ici 2030¹⁰⁴. L'ISTI a également évalué la contribution des plateformes techniques de TSMC aux économies mondiales d'énergie électrique : ce sont 57 % pour le HPC, 27 % pour les téléphones portables, 15 % pour l'IoT et 1 % pour l'électronique automobile. Certains domaines, telle la logistique, peuvent avoir des gains beaucoup plus élevés, de plusieurs ordres de grandeur.

Le rythme annuel d'amélioration de l'efficacité énergétique de l'ensemble de la production économique est d'environ 2 %. Sur 20 ans, un gain de 50 % a ainsi été réalisé, à comparer à un simple doublement, sur ces mêmes 20 années, de la consommation globale du seul secteur des TIC. Cette accélération induite par le numérique va continuer à se renforcer. L'IEA estime ainsi que plus de 10 millions de personnes travaillent à améliorer l'efficacité énergétique¹⁰⁵ dans de très nombreux domaines : optimisation du design (par exemple via l'utilisation de jumeaux numériques), amélioration des procédés, meilleure maîtrise de la chaîne logistique, gestion des énergies renouvelables... La question du télétravail est plus complexe, car il induit un déplacement géographique de la consommation électrique et des émissions. Une étude de 2023¹⁰⁶ rapporte que la consommation énergétique d'un télétravailleur est augmentée en moyenne de 1,4 kWh à son domicile, en partie contrebalancée par l'économie d'énergie liée

104 [2024-TSMC-Sustainability-Report-e.pdf](#)

105 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/f304f2ba-e9a2-4e6d-b529-fb67cd13f646/EnergyEfficiency2024.pdf>

106 <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/etude-teletravail-bilan-energetique-positif#:~:text=Au%20regard%20des%20premiers%20r%C3%A9sultats,de%20t%C3%A9l%C3%A9travail%20pass%C3%A9%20chez%20soi>

au non-déplacement. L'étude précise que si une fermeture complète de site pendant au moins une journée est possible, les économies d'énergie du site peuvent globalement atteindre 20 à 30 % (tous types d'énergie confondues). Il n'en reste pas moins que, pour la France, l'évolution actuelle est à la réduction progressive du télétravail: une étude de l'ADEME indique alors que cette réduction conduit à une augmentation des émissions, variant selon la taille du bassin d'attraction, entre 2,4 et 3,8 kgCO₂eq/habitant-an¹⁰⁷.

Au-delà, l'utilisation de l'IA dans l'industrie et les services va, selon l'IEA (2025), permettre d'économiser entre 2 et 4 fois ses propres émissions et sa propre consommation d'énergie en compensant celles des centres de données¹⁰⁸. L'incertitude relative à de possibles effets « rebond » apporte néanmoins une incertitude importante (Figure 7.3).

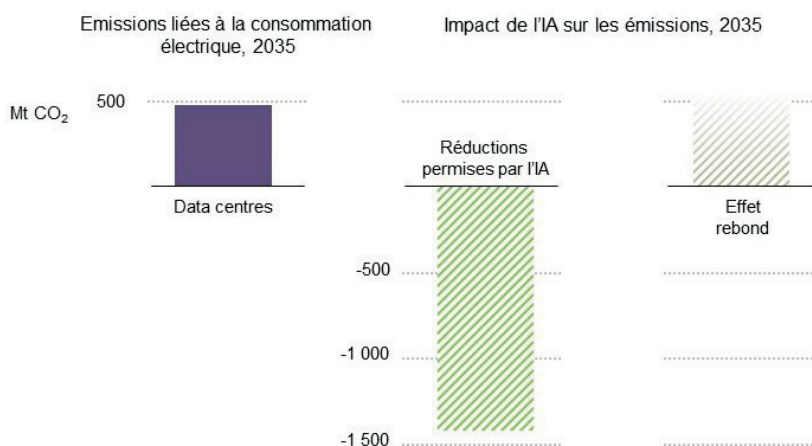


Figure 7.3: Estimation du bilan de l'utilisation de l'IA dans les secteurs productifs

107 ADEME (2024) : Évaluation environnementale des effets directs et indirects du numérique pour des cas d'usage

108 Il faudrait en toute rigueur ne pas comparer avec la seule consommation énergétique des centres de données mais en ajoutant à celle-ci les autres consommations concernées, entre autres celles des réseaux de transmission des données.

Ces bilans très positifs au plan global ne doivent toutefois pas faire passer sous silence qu'il est des domaines où l'utilisation du numérique pose problèmes :

- le minage des *bitcoins* n'est profitable qu'à un petit nombre de personnes, de l'ordre de 1 million au niveau mondial, entraînant une dépense énergétique au-delà de 100 TWh, et ce pour des raisons au mieux idéologiques, au pire, et plus prosaïquement, spéculatives. Il n'y a pas de rationalité à ce que 0,01 % de la population mondiale consomme individuellement et en pure perte quelques milliers de fois plus d'énergie électrique qu'un autre habitant de la planète. Il faut ajouter à ces remarques l'inclusion des dommages à la société dus à l'utilisation des *bitcoins* pour le blanchiment d'argent et autres opérations financières illicites ;
- l'utilisation massive des réseaux, et donc des infrastructures de communication et des équipements individuels nécessaires, à des fins non directement productives mais remplissant des fonctions de communication interpersonnelles (réseaux sociaux), de divertissement (films et vidéos)... Ce serait à l'aune d'une approche plus sociologique que celle adoptée dans ce rapport que d'estimer les services rendus en regard des coûts ;
- si l'IA « économe », telle que de nombreux secteurs industriels la mettent en œuvre, continuera très certainement à apporter des gains d'efficacité à coûts maîtrisés, l'usage immodéré, généralisé et sans contrôle, de GenAI est une source très importante de consommation énergétique, sur la nécessité et l'intérêt desquels on peut s'interroger. La difficulté d'identifier les débouchés marchands pour GenAI doit toutefois être considérée, comme étant de nature à en modérer le développement¹⁰⁹.

109 L'exemple du *Metavers* doit être gardé en mémoire, qui après des investissements massifs s'est révélé très peu diffusé et non rentable.

Chapitre 8

LE CAS SPÉCIFIQUE DE LA FRANCE

Ce chapitre s'appuie très largement sur deux importants rapports de l'ADEME (2025) et de l'ADEME-Arcep (2023).

8.1. LA SITUATION EN 2022¹¹⁰

La consommation électrique par les équipements et infrastructures numériques en France était en 2022 de 51,5 TWh, soit 11,3% de la production totale d'électricité nationale égale alors à 452,8 TWh. Dans ce chiffre la part de consommation des centres de données français est de 11,9 TWh. Si l'on inclut la consommation des centres de données situés à l'étranger pour la satisfaction de besoins nationaux, estimée à 13,3 TWh, on obtiendrait une consommation électrique annuelle totale du numérique de 64,9 TWh. Il faut toutefois noter que le SDES donne un chiffre significativement inférieur pour la consommation des centres de données nationaux avec, pour 2023, une fourchette entre 4 et 6 TWh¹¹¹.

L'empreinte carbone générée pour un an de consommation de biens et services numériques en France en 2022 (tous périmètres inclus) est de 29,5 MTCO₂eq (*i.e.* tous GES compris). Ceci représente 4,4 % de l'empreinte carbone nationale de 671 MTCO₂eq pour cette même année 2022. À titre de comparaison, cette empreinte du numérique représente un peu moins que les émissions totales du secteur des poids lourds. Cette empreinte carbone provient :

110 Il semble que 2022 soit la dernière année disponible pour ces évaluations.

111 SDES (Statistiques publiques de l'énergie, des transports, du logement et de l'environnement), 2025 : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-consommation-delectricite-des-centres-de-donnees-entre-2018-et-2023?list-actu=true>

- à 50 % de la fabrication et du fonctionnement des appareils. Dans cette part la fabrication représente 60 %, tandis que le fonctionnement pour les différents usages en représente 40 %;
- à 46 % des centres de données (dont une moitié environ pour les centres de données étrangers);
- et à 4 % des réseaux.

Tant les équipements E&M de toutes sortes que les centres de données incluent, pour significativement plus de la moitié de leurs consommations, celles correspondant à des importations de GES à l'occasion de l'achat de matériels construits hors de France. Il faut aussi noter qu'en 2022 il n'y avait en France aucun impact identifiable de l'IA.

On doit souligner ici que, si l'intensité en émissions de la production d'électricité en France (21,7 gCO₂eq/kWh¹¹²) est significativement plus faible que dans un très grand nombre d'autres pays mondiaux¹¹³, cette faible valeur ne se reflète malheureusement pas dans le ratio global du numérique en France (29,5 MTCO₂eq pour une consommation de 64,9 TWh, soit 450 gCO₂eq/kWh), traduisant ainsi la forte proportion de composants importés en France, et fabriqués dans des pays moins économes en émissions. Cette situation n'est pas inéluctable: un doublement, au minimum, du temps de vie des équipements est une cible facilement atteignable. Beaucoup deviennent en effet inutilisables parce que leurs fabricants n'entretiennent plus leurs logiciels (téléphones, ordinateurs) ou ne fournissent plus de pièces détachées. La puissance informatique des équipements permettrait le plus souvent, par logiciels, une mise au niveau des systèmes plus récents. Cet effort de sobriété est à portée: l'Europe a réussi à imposer à tous les téléphones portables la prise usb-c, mesure en train d'être étendue aux chargeurs. Ces mesures de sobriété, qui vont dans le même sens que l'action de l'État avec par exemple avec le « bonus

112 <https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-2024/synthese>

113 L'électricité produite par la seule EDF et utilisée nationalement en 2022 l'était avec un taux de l'ordre de la dizaine de gCO₂/kWh, un taux inférieur d'un ordre de grandeur au moins par rapport au plus grand nombre des autres nations productrices.

réparation» et les indices de réparabilité, devraient aller beaucoup plus loin pour les équipements et leurs logiciels.

8.2. ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

Ici encore il faut faire la distinction entre les consommations liées au fonctionnement des systèmes, alimentés en électricité nationale à faible coût d'émissions, et celles liées à la production des équipements.

La figure 8.1 montre ainsi que les 51,5 TWh consommés en 2022¹¹⁴ devraient augmenter de 4 % d'ici 2030, cette augmentation laissant la place à une baisse si des mesures d'éco-conception et/ou de sobriété peuvent être mises en place de façon effective. La baisse de 20 % de la consommation électrique entre 2020 et 2030, telle que scénarisée dans la PPE, ne pourrait être effective qu'avec une mise en œuvre effective de ces mesures. Les données présentées n'incluent pas les consommations nationales sur les centres de données étrangers.

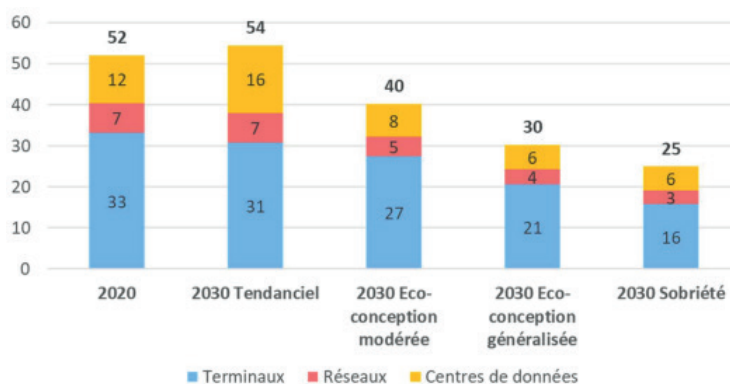


Figure 8.1: Comparaison des consommations électriques en phase d'usage (en TWh) suivant les scénarios prospectifs (source : ADEME-Arcep, 2023)

¹¹⁴ Le chiffre de 51,5 TWh se réfère à l'année 2022 et non pas à l'année 2020 comme indiqué sur la figure.8.1, cf. 8.1.

La figure 8.2 présente la prospective pour les empreintes carbone sous les mêmes scénarios. Le chiffre de 17,2MT en 2020 ne prend pas en compte les émissions liées aux consommations nationales sur les centres de données étrangers. Même sous cette hypothèse restrictive, l'empreinte augmente de 45 % de 2020 à 2030, l'essentiel (plus de la moitié) étant lié de façon permanente aux équipements, importés pour une large part. Les mesures d'éco-conception et/ou de sobriété ne permettent guère qu'une stabilisation ou une faible diminution entre 2020 et 2030, en compensant l'augmentation du nombre d'équipements nouveaux.

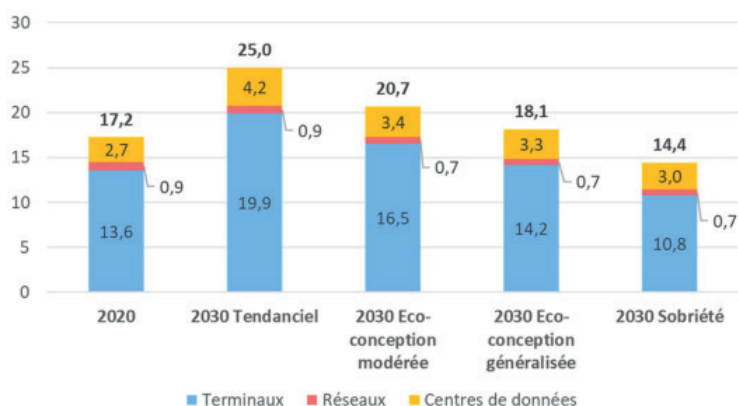


Figure 8.2: Comparaison des empreintes carbone suivant les scénarios prospectifs (en MTCO₂ équivalent)

Chapitre 9

CONCLUSION ET POINTS ESSENTIELS

Il faut tout d'abord rappeler que les chiffres de consommation électrique ne correspondent à des études complètes que pour la seule année 2020. Pour 2023 il s'agit encore d'extrapolations partielles car la consolidation scientifique complète n'est pas terminée, ou du moins publiée. Ceci conduit à attacher une incertitude entre 10 et 20 % aux chiffres donnés pour 2023. Il n'en reste pas moins que cette année particulière, considérée comme année pivot à partir de laquelle les projections sont faites, est raisonnablement connue. Les incertitudes ne font qu'augmenter lorsque l'on tente de chiffrer les scénarios pour 2030. La plus grande de ces incertitudes concerne le déploiement, massif ou non, de GenAI à cette échéance. La consommation électrique du numérique pourrait ainsi passer, dans les scénarios médians, d'environ 1.600 TWh en 2023 à près de 2.100 TWh en 2030 (Chapitre 6), soit une augmentation de près de 25 %, mais avec une incertitude bien supérieure à celle qui affecte encore aujourd'hui la consommation de 2023. Il n'en reste pas moins que les chiffres issus de l'analyse conduite ici restent plus modérés que certaines projections beaucoup plus alarmistes sur les niveaux de consommation électrique, et par conséquent d'émissions de GES, à l'échelle mondiale (cf. Annexe 1). L'évolution dans les deux prochaines années permettra probablement de conforter ou non les analyses.

Face aux facteurs d'accroissement des consommations du numérique, des progrès continueront à être faits tendant à réduire l'empreinte carbone à *utilisation constante*. Du côté des outils physiques, il y aura très certainement des progrès dans le hardware, bien que les limites de la miniaturisation lithographique soient pratiquement atteintes, tandis que d'autres mises en œuvre permettront de continuer à améliorer l'efficacité énergétique, comme les architectures tridimensionnelles des circuits intégrés (Chapitre 4). De même, les estimations actuelles de l'évolution de la consommation sont souvent réalisées en négligeant le potentiel

d'optimisation permettant aux algorithmes d'être moins gourmands en ressources de calcul; par exemple pour ce qui concerne l'IA: mises en œuvre ne recourant qu'à des bases de données limitées, traitements localisés permis par des utilisations particulières et par l'*edge computing*, sans recours aux centres de données. Les progrès algorithmiques peuvent souvent conduire à des facteurs d'amélioration d'efficacité et de réduction de consommation supérieurs à ceux, moins rapides, des technologies matérielles. Enfin, et sans être exhaustif, si le stockage des données ne représente aujourd'hui qu'une part très minime des coûts énergétiques des centres de données, il existe néanmoins à l'horizon 2035-40 la piste du stockage sur ADN pour améliorer les performances énergétiques du stockage à froid^{xv}.

La traduction de la puissance et de la consommation électrique en émissions de GES dépend de l'évolution du mix énergétique tout au long du cycle de vie des systèmes numériques, notamment dans un contexte de transition. Deux facteurs vont jouer: d'une part, à mesure de la progression des énergies décarbonées, le niveau des émissions de CO₂ associées à une consommation énergétique donnée évoluera pour réduire l'empreinte carbone des solutions numériques; d'autre part, disposant de très grandes ressources financières, les acteurs majeurs des TIC se sont engagés à décarboner leurs activités, entre 2028 et 2035 suivant les cas. Ceci doit se faire par une pluralité d'actions, génération propre d'électricité décarbonée, achat d'électricité décarbonée, achats de crédits carbone (auquel cas, qui constitue une fraction très importante des actions promises, il faut souligner la difficulté de parfois garantir la réalité de la capture du carbone correspondant à un crédit donné).

Les scénarios pour 2030 ne semblent pas conditionnés par les options technologiques qui sont à la base de la production des composants hardware du numérique. Ceux-ci ont des temps caractéristiques d'évolution industrielle relativement longs, qui ne permettent pas d'envisager de changements drastiques de leurs consommations d'ici 2030. Ces scénarios dépendront par contre des progrès des algorithmes et aussi, dans une très large mesure, du développement des usages de l'IA. Se pose à ce sujet la capacité des opérateurs à financer les énormes investissements proposés aujourd'hui (3.000 milliards de dollars). Le modèle d'exploitation (*business model*) permettant ces investissements

n'est pas établi. D'autres facteurs seront déterminants : quel sera l'impact de la mise en pleine opérations de la 6G, avec ou non un effet « rebond » contrebalançant l'efficacité unitaire ? Y aura-t-il une augmentation de l'usage des *blockchains* PoS pour le minage des crypto-monnaies ? Les engagements des entreprises hors TIC qui promettent de s'alimenter en électricité décarbonée et d'atteindre rapidement leur ZEN seront-ils tenus, et vérifiables, dans les calendriers annoncés, et ne concurrenceront-ils pas les actions de décarbonation prévues par les TIC ? Certains de ces points sont repris à l'Annexe 1, pour permettre une meilleure comparaison avec les scénarios proposés dans d'autres rapports.

POINTS ESSENTIELS

CONSOMMATION ÉLECTRIQUE : UNE CROISSANCE MODÉRÉE MAIS CONTRASTÉE

- La part du numérique dans la consommation électrique mondiale devrait rester stable à un peu moins de 6 %, ce qui représente néanmoins une augmentation du nombre de TWh consommés ;
- La croissance de la consommation électrique du secteur numérique entre 2023 et 2030 est estimée à environ 30 %, de 1.600 TWh à près de 2.100 TWh.

EMPREINTE CARBONE : UNE RELATIVE STABILITÉ MALGRÉ LA MENACE DE PUISSANTS EFFETS « REBOND »

- Le recours annoncé à une électricité décarbonée (réduction de plus de 50 % de l'intensité carbone de l'électricité consommée) devrait masquer l'augmentation de la consommation des centres de données ;
- Les progrès dans la fabrication des composants (réduction des gaz perfluorés, électricité plus décarbonée) devraient permettre une stabilisation des émissions ;
- Le minage des cryptomonnaies par des techniques énergivores représente une menace difficile à cerner quantitativement, de même que la possibilité d'effets « rebond » ;

- L'évolution de l'empreinte carbone sera très fortement influencée par celle du mix électrique mondial, actuellement en voie de décarbonation progressive (39,4 % décarboné en 2023, 40,9 % en 2024)¹¹⁵. Le mix pourra-t-il continuer sur cette trajectoire, voire accélérer sa décarbonation, dans le contexte actuel d'un recours accentué aux énergies fossiles aux États-Unis ?

CONSOMMATION D'EAU : UN ENJEU TOUJOURS PRÉSENT

- Même si le refroidissement des centres de données et la fabrication des composants électroniques maîtrisent correctement leurs consommations, l'évolution générale de la ressource en eau (liée à l'évolution climatique) pourra conduire à des tensions dans plusieurs régions.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UNE RÉVOLUTION ÉNERGIVORE

- L'évolution et le développement de l'IA générative (GenAI) sont de nature à infléchir significativement, et à échéance plus rapprochée, la trajectoire et les impacts du numérique. Cette trajectoire et ces impacts seront à la hausse ou revus à la baisse selon que les grands modèles de GenAI trouveront rapidement ou non leurs modèles économiques, avec une exploitation rentable pour de grands opérateurs industriels au-delà des phases actuelles d'investissements étatiques massifs ;
- En toute hypothèse les progrès algorithmiques sont nécessaires, et certains d'entre eux sont déjà très prometteurs.

RÉSEAUX : GAINS D'EFFICACITÉ VS. ACCROISSEMENT DU TRAFIC

- La 5G est, pour une tâche donnée, plus efficace et moins énergivore ;
- De nouvelles activités, dont beaucoup sont liées aux loisirs et aux médias, conduiront néanmoins à une augmentation notable de la consommation ;

115 [Mix électrique mondial : plus de 40 % de production bas carbone en 2024 | Connaissances des énergies](#)

- Des mesures de régulation sur certains usages pourraient permettre de réduire l'augmentation de la consommation.

TERMINAUX : UNE STABILISATION RELATIVE

- La consommation électrique des terminaux (smartphones, PC, téléviseurs) devrait rester stable, mais avec une fabrication à forte empreinte carbone ;
- Avec 7,5 milliards de smartphones en circulation en 2030, l'impact environnemental reste significatif, dû en bonne partie au renouvellement rapide des appareils. Des objectifs de sobriété pourraient diminuer l'impact de la fabrication ;
- Les bénéfices énergétiques du numérique : une très grande majorité de secteurs concernés ;
- Dans l'industrie les jumeaux numériques et la maintenance prédictive réduisent les émissions de 20 à 30 % ;
- Dans les transports l'optimisation des trajectoires aériennes et routières permet des économies d'énergie considérables ;
- Pour l'habitat et les locaux industriels et commerciaux la gestion de l'énergie permet jusqu'à 50 % d'économies ;
- Pour l'énergie : les *smart grids* et les systèmes de gestion intelligente réduisent la consommation de 10 à 25 %, et permettent l'injection de fortes fractions d'énergie renouvelables intermittentes dans des réseaux stables ;
- Le numérique a pris une place irremplaçable dans la vie économique et sociale, suivant une pente ascendante continue. Cette place ne peut qu'être confortée.

LE CAS DE LA FRANCE : UNE SITUATION SINGULIÈRE ET CONTRASTÉE

- Une électricité très fortement décarbonée mais un bilan carbone alourdi par l'importation de composants et d'appareils et par l'utilisation de centres de données internationaux ;

- Une stagnation, voire une décroissance, prévue des besoins d'électricité à l'horizon 2030, dues tant au retard pris pour l'électrification des usages qu'à la poursuite de la désindustrialisation des secteurs carbonés.

QUELQUES LEVIERS D'ACTION

- À échéance rapprochée et avec des effets possibles avant 2030, il faut citer pour la France des actions citoyennes (limitation du *streaming* haute définition, désencombrement du *cloud* au bénéfice d'usages locaux –*edge*–, utilisation prolongée des terminaux et des équipements personnels,...) et des actions de régulation par les acteurs publics (régulation du minage de *bitcoins*, et d'autres activités énergivores);
- Pour des bénéfices sensibles plus tard, aux échéances 2030+, imposer des normes d'efficacité pour les centres de données, soutenir l'*edge computing* et les réseaux sobres (6G) et pour les entreprises développer l'IA frugale et la décarbonation de leurs centres de données.

Le numérique représente 6 % de la consommation mondiale d'électricité, et entre 2,3 % (aujourd'hui) et 2,5 % (en 2030) des émissions mondiales de gaz à effet de serre, mais son impact net est positif grâce aux gains d'efficacité qu'il permet dans d'autres secteurs. Son développement futur dépendra de la capacité à :

- Maîtriser la croissance de l'IA via des régulations et des innovations;
- Décarboner les infrastructures (centres de données, réseaux);
- Éviter les effets « rebond » en adoptant des pratiques sobres et responsables;
- Le numérique peut être un allié de la transition écologique, à condition d'être piloté avec rigueur.

Notes

- i. Cette quasi-stabilité de la consommation électrique des centres de données entre 2000 et 2020 n'était synonyme ni d'un plateau dans la demande de puissance en calcul à haute performance (HPC) ni d'une stagnation de la puissance délivrée par les centres de données. En effet, le classement semestriel du TOP500 ([Home - | TOP500](#)) montrait bien une augmentation régulière et importante de la puissance de calcul délivrée. Cette augmentation s'est faite par augmentation du nombre de cœurs de calcul, par augmentation de leur puissance individuelle, et enfin par accroissement du nombre de centres de données. Si ceci a pu néanmoins se faire jusqu'à 2020 à consommation électrique sensiblement constante, 2023, et plus encore 2030, devraient voir la consommation électrique des centres de données partir à la hausse, suite à des demandes plus importantes, dont celles de l'IA.
- ii. Cette étude contraste fortement, pour l'année 2020, avec un autre document de Berkeley, *United States Data Center Energy Usage Report* (dont Malmodin est co-auteur, ce qui explique qu'il corresponde à sa propre estimation). Une partie de la différence pourrait possiblement s'expliquer par l'inclusion du domaine *blockchain*.
- iii. Le chiffre de 61 % est le plus utilisé pour ce type de calcul, mais on trouve également le chiffre de 80 %, qui est le taux de charge obtenu pendant la phase d'entraînement, cf. le rapport de *Berkeley Lab* « [2024 United States Data Center Energy Usage Report](#) », en particulier la figure 3.6 qui donne les taux de charge des différents types de centres de données en fonction de leur activité. 60 % est un arbitrage entre apprentissages et inférences (sachant que les inférences jouent un rôle plus important dans les approches hybrides « progressives » du type *Chain of Thoughts* (écouter par exemple l'interview de D. Amodei, le CEO de *Anthropic* (<https://www.youtube.com/watch?v=ugvHCXC0mm4>))

- iv. Les nouvelles générations de GPU exigent [un refroidissement par eau](#), qui est plus efficace que le refroidissement par air tout en permettant de meilleures performances. Il est intéressant de noter que le refroidissement par eau chaude peut permettre une récupération de la chaleur fatale pour le chauffage de locaux ou d'habitations assez proches quand des réseaux de chauffage sont disponibles. En revanche, cette tendance couplée à une forte densification des architectures de calcul (racks de calcul passant de 40 kW à près de 1 MW) exige de revoir complètement l'architecture des centres de données, et explique le besoin de construire des nouveaux centres, quitte à raser ceux qui viennent juste d'être construits ([exemple célèbre de Meta](#)).
- v. Le PUE (*Power Usage Effectiveness*) est *grosso modo* le ratio entre l'énergie consommée par le centre de données et celle transmise aux puces des serveurs, voir par exemple « [AWS global data centers achieved PUE of 1.15 in 2023](#) », dont extrait ci-après : « *Google claims its facilities average a PUE of around 1.1, with its best site offering 1.06. Meta's facilities, on average, offer a PUE of around 1.08. Microsoft's newest facilities achieve a PUE of around 1.12, with a global facility average of 1.18 across the portfolio. Oracle has said its data centers offer a PUE "as low as" 1.15* ». Le progrès sur les PUE depuis 2010 est la première raison qui explique une consommation stable avec des puissances de calcul en augmentation. De fait l'explication détaillée est plus complexe : gagner 30 % en PUE est négligeable par rapport aux progrès des circuits, mais comme beaucoup plus de circuits sont utilisés, ces 30 % globaux sont importants.
- vi. Dans les architectures MoE (*Mixture of Experts*), popularisée par Mistral AI et utilisée dans *ChatGPT4*, les LLM les plus performants aujourd'hui sont des fédérations de LLM. La discussion récente autour de *DeepSeek* montre que des progrès constants sont faits, partagés grâce à l'open-source, en termes d'efficacité énergétique d'apprentissage pour des systèmes (hybrides).
- vii. L'usage principal que l'on prévoit aujourd'hui dans les entreprises est la gestion de connaissances en utilisant une approche RAG (*Retrieval Augmented Generation*). Ces usages vont s'appuyer sur une variété de LLM pour des raisons de protection des données, de distribution de la charge et de coûts.

- viii. Une étude ([EdgeCut, 2023](#)) mentionne par exemple des « réductions de trafic cloud jusqu'à 50 % » dans des conditions expérimentales contrôlées pour un cas d'usage d'accès à des contenus utilisateur. Une autre étude [ACM Computing Surveys](#) mentionne une « réduction de 44 % de la consommation énergétique au coût d'une perte de précision de 4 % » pour de l'optimisation vidéo, mais ne parle pas directement de trafic réseau. Enfin un [article de presse](#) mentionne des réduction de trafic réseau pouvant aller jusque 60-90 %.
- ix. On peut également appliquer ce raisonnement à la déclaration de Mark Zuckerberg, partagée sur Facebook en Février 2025 : *« En 2025, je m'attends à ce que Meta AI devienne l'assistant leader, servant plus d'un milliard de personnes. Llama 4 deviendra le modèle de pointe de référence, et nous allons construire un ingénieur en IA qui commencera à contribuer de plus en plus au code de nos efforts de R&D. Pour soutenir cela, Meta construit un centre de données de plus de 2 GW, si vaste qu'il couvrirait une partie significative de Manhattan. Nous mettrons en ligne environ 1GW de capacité de calcul en 2025 et nous terminerons l'année avec plus de 1,3 million de GPU. Nous prévoyons d'investir entre 60 et 65 milliards de dollars en dépenses d'investissement cette année, tout en augmentant significativement nos équipes IA, et nous avons le capital nécessaire pour continuer à investir dans les années à venir »*. 1GW de puissance correspond approximativement à 5 TWh par an (avec une charge de 60 %), et 65 milliards de dollars permettent effectivement d'obtenir 1,3 million de GPU, soit selon notre ratio 13 TWh (2 GW à 70 %). Ainsi, le ratio utilisé ici n'est pas si grossier pour obtenir une estimation approximative.
- x. Prenant TSMC comme exemple de circuits intégrés de très haute performance, on peut calculer leur consommation moyenne par cm^2 : en 2023, TSMC a consommé 25 TWh d'électricité pour produire 12 millions de plaquettes de silicium de 300 mm de diamètre. La surface utile étant de 800 cm^2 par plaquette, on trouve $2,5 \text{ kWh/cm}^2$, un peu plus que la moyenne mondiale, ce qui n'est pas surprenant vu la technologie de pointe de TSMC, avec un plus grand nombre de niveaux de masques que la moyenne mondiale. Un circuit NVIDIA H100 de 8 cm^2 a donc eu besoin de 20 kWh lors de sa fabrication. Aujourd'hui, les générations les plus récentes de circuits intégrés de calcul sont à près de 5 kWh/cm^2 , du fait de la complexité accrue des étapes de fabrication.

- xi. En fait, la diminution de largeur de trait lithographique, et donc la densité planaire des circuits, ne varient plus que très lentement : la progression n'a été que d'un facteur 3 depuis 2005, à cause des difficultés de fabrication. Il y a pourtant toujours plus d'intégration grâce à des nouvelles structures de transistors et architectures de circuits dans la dimension verticale, avec des dimensions qui ne sont plus liées à la lithographie. Ont ainsi été introduites des générations « lithographiques » (7 nm, 5 nm, 3 nm, 2 nm, 1 nm) qui n'ont aucun lien avec la vraie largeur de trait (aujourd'hui de l'ordre de 12 nm), mais qui décrivent de nouvelles générations technologiques ayant des fonctionnalités équivalentes à celle de technologies planaires de 7 nm, 5 nm, 3 nm, 2 nm, 1 nm. Le gain en performance par unité de surface, qui croissait comme le cube du facteur de diminution de taille, supposait que les transistors fonctionnaient à champ électrique constant, et donc que la tension diminuait avec la dimension. Or la tension servant aussi à commander les transistors à effet de champ, une limite physique est alors atteinte, imposée par la tension minimale de commande. Ceci a mené à un très net ralentissement de la diminution de la tension d'alimentation prévue, passant de 5 V jusqu'en 1985 à 0,6 V aujourd'hui, alors que les seules lois d'échelle auraient mené à une diminution d'un facteur 60.
- xii. Exemples de nouveaux composants pour la mémoire, les cellules mémoire à matériaux à changement de phase (PCM, *Phase Change Materials*), les mémoires à transfert de couple de spin (STT, *Spin-Transfer Torque*), les mémoires ferroélectriques... Pour les mémoires de masse, on explore le stockage sous forme de brins d'ADN, les mémoires à transition de phase métal-isolant... Pour la logique sont explorés les transistors de surface à effet tunnel (STT, *Surface Tunneling Transistors*) pour lesquels la tension de commande pourrait être réduite à cause de leur plus grand gain en courant pour une tension appliquée, les transistors à nanotubes qui ont bien évidemment un volume très réduit, les matériaux bidimensionnels, les transistors basés sur la commande du spin des électrons au lieu de leur charge (la spintronique)... Du côté des architectures un certain nombre d'opportunités apparaissent liées à l'évolution technologique comme les circuits neuronaux, imitant le fonctionnement analogique à seuil des neurones du cerveau, qui seraient plus efficaces que les GPU, les architectures probabilistes, les architectures réversibles, l'ordinateur quantique...

xiii. Sans rentrer dans le détail de calculs, non pertinent ici, les résultats approximatifs obtenus pour une mise à jour des coûts unitaire carbone sont les suivants :

- pour les PC, 240 millions de livraisons, 170 millions de portables à 330 kgCO₂, 67 millions de fixes à 600 kgCO₂, soit une moyenne (inchangée) de 410 kgCO₂;
- pour les smartphones, 65 kgCO₂ semble une valeur plus juste, le coût augmentant naturellement avec la complexification
- pour les téléviseurs (environ 200 millions d'unités vendues annuellement au niveau mondial), la taille moyenne augmente en 2023, de l'ordre de 43 pouces en moyenne mondiale (55 pouces aux USA), ce qui donne environ 800 kgCO₂. A noter que depuis 20 ans les téléviseurs augmentent en taille mais deviennent plus efficaces ;
- pour les STB il y a des progrès, qui conduisent à un chiffre de 200 kgCO₂, voire moins.

xiv. Le GeSI (*Global e-sustainability initiative*, www.gesi.org) regroupe environ 30 entreprises mondiales actives dans le secteur numérique et collabore avec des organisations internationales comme l'UNEP, l'UNFCCC, l'UIT et WBCSD. La figure présentée ici est ainsi commentée dans le rapport du GeSI : « *This report has analyzed the overall abatement potential of ICT by examining its impact across 12 ICT use cases* ».

xv. L'archivage des données numériques sur l'ADN ou sur d'autres polymères est un candidat intéressant pour remplacer les solutions actuelles de stockage « froid », typiquement les bandes magnétiques. Les gains attendus sont d'un facteur 10⁷ en densité de l'information et 10⁴ en durée de vie. Cette technologie est toutefois frappée d'une latence de 1 à 2 minutes, qui devra bien sûr être réduite. Sur 50 ans, l'archivage sur ADN devrait être environ 240 fois plus économique énergétiquement que sur bande magnétique, avec des perspectives de progrès, jusqu'à un facteur 1000.

Sigles et acronymes

- AGI** : *Artificial General Intelligence*
(ou IAG pour Intelligence Artificielle Généralisée)
- AWS** : *Amazon Web Services*
- CAO** : Conception Assistée par Ordinateur
- CI** : Circuit intégré
- CO₂eq** : Equivalent CO₂ (*i.e.* tous GES pris en compte selon leur PRG)
- CPE** : *Customer Premises Equipment*
- CSR** : *Corporate Sustainability Reports*
- E&M** : *Entertainment & Media* (Media et Divertissement)
- GCP** : *Google Cloud Platform*
- GenAI** : Intelligence Artificielle Générative
- GES** : Gaz à Effet de Serre
- GeSI** : *Global enabling Sustainability Initiative*
- GSMA** : *Global System for Mobile communications Association*
- GT** : Groupe de Travail
- HPC** : *High-Performance Computing*
- IA** : Intelligence Artificielle
- ICT** : Voir TIC (*infra*)
- IEA** : *International Energy Agency*
- IoT** : *Internet of Things*

ISTI : *Institute of Information Science and Technologies*

IUT : Union Internationale des Télécommunications

LLM : *Large Language Model*

MIMO : *Multiple Input Multiple Output*

MPPT : *Maximum Power Point Tracking*

NAE : *National Academy of Engineering* (USA)

OS : Système d'Exploitation (*Operating System*)

PFAS : *Per- and polyFluoroAlkyl Substances*

PoS : *Proof of Stake* (ou Preuve d'Enjeu)

PoW : *Proof of Work* (ou Preuve de Travail)

PPE : Programmation Pluriannuelle de l'Énergie

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

PUE : *Power Usage Effectiveness* (Indicateur d'efficacité énergétique)

SMR : *Small Modular Reactor*

SRAM : *Static Random Access Memory* (Mémoire vive statique)

STB : *Set-Top Box* (Boîtier décodeur ou, plus simplement, Box)

STEP : Station de Transfert d'Énergie par Pompage

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

UNEP : Programme des Nations-Unies pour le Développement

UNFCCC : Convention-cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques

WBCSD : *World Business Council for Sustainable Development*

WSC : Conseil Mondial des Semi-conducteurs

WUE : *Water Usage Efficiency*
(Efficacité de l'utilisation de l'eau, se mesure en l/kWh)

ZEN : Zéro Émission Nette

Glossaire

ADSL : (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) :

Transmission de données sur ligne téléphonique cuivre

AGI : (*Artificial General Intelligence*, ou Intelligence artificielle générale) :

Intelligence artificielle capable d'accomplir n'importe quelle tâche cognitive qu'un humain est capable de réaliser

Autoplay : Application se déclenchant automatiquement sans intervention de l'utilisateur

Beamforming : Génération ou réception de rayonnement directionnel diminuant la puissance nécessaire

Bitcoin : Première cryptomonnaie décentralisée

Bitcoin mining : (ou minage de *bitcoin*) : Méthode de validation et d'enregistrement de la *blockchain* permettant les transactions dans le réseau *bitcoin*

Blockchain : Base de données décentralisée permettant la sauvegarde de données dans un réseau d'ordinateurs de manière transparente, immuable, résistante aux intrusions

ChatGPT : Système d'IA générative développé par OpenAI

Cloud, cloud gaming : Déport de moyens de calcul et de mémorisation dans des systèmes délocalisés, utilisé entre autres pour les jeux vidéo

CPU : (*Central Processing Unit*) : Processeur des informations d'un ordinateur effectuant les calculs à partir d'un programme et d'éléments d'entrée/sortie

Deepseek : Société chinoise d'IA générative utilisant beaucoup moins de ressources de calcul

EB (Exabyte, ou Exaoctet) : 10^{18} octets, ou 10^3 petaoctet, ou 10^6 teraoctet

Edge, on edge, edge computing : Architecture de calcul distribuée amenant les ressources nécessaires au plus près des sources de données et de l'utilisateur

FTTH : (*Fiber To The Home*, ou Fibre optique jusqu'au domicile)
Fibre optique individualisée grand public

GenAI : (*Generative Artificial Intelligence*, ou Intelligence artificielle générative) : Système d'IA générant du texte, des images à partir de requêtes

GPU : (*Graphics Processing Unit*, ou Unité de traitement graphique) : Circuit électronique spécialisé pour le traitement d'images

Hyperscaler : Centre de données à grande échelle pour accéder à une puissance de calcul et à un stockage de données très importants

Hyperledger : Environnement informatique pour créer des *blockchains*

Inférence : Action d'interroger un système d'intelligence artificielle

IoT : (*Internet Of Things*, ou Internet des objets) : Réseau global où chaque objet a une adresse internet et peut être utilisé ou piloté à distance

IRDS : (*International Roadmap on Devices and Systems*) : Document de consensus annualisé entre chercheurs académiques et industriels sur les objectifs de l'industrie des semiconducteurs

LLM : (*Large Language Model*) : Modèle de langage développé en apprentissage profond auto-supervisé sur une extrêmement grande base de textes

Lois de Moore, de Dennard, de Koomey : Respectivement :
loi de doublement du nombre de composants par circuit intégré (1965);
loi d'échelle du fonctionnement miniaturisé des circuits intégrés (1974);
loi de doublement de la capacité de calcul des circuits intégrés (2010).

MIMO : (*Multiple Input Multiple Output*) : Technologie sans fil utilisant de multiples émetteurs et antennes de réception pour augmenter la capacité de transmission d'un canal donné

Neuromorphique (dans Puce neuromorphique) : Architecture de circuits intégrés mimant l'architecture neuronale du cerveau

PFC : (*Perfluorinated compounds*, ou Composé perfluoré) : Molécules chimiques utilisées pour graver finement les circuits intégrés

PoS : (*Proof of Stake*, ou Preuve d'enjeu) : Protocole de vérification des *blockchains* par consensus

PoW : (*Proof of Work*, ou Preuve de travail) :
Protocole de validation des *blockchains* par le travail de mineurs

SRAM : (Mémoire Statique à Accès Aléatoire) : Circuit mémoire électronique rapide utilisé pour les données transitoires dans les calculs d'ordinateur

Stargate project : Projet public-privé américain pour le développement de puissantes infrastructures pour l'IA aux États-Unis, annoncé à 500 milliards de dollars

STB : (*Set Top Box*) : Boîtier de conversion de signaux digitaux en signaux audio ou vidéo

Streaming VR/AR : (*VR: Virtual Reality, AR: Augmented Reality*) :
Signaux de réalité virtuelle ou augmentée en ligne

Vidéo 4K/8K : Images vidéo en résolution à 4.000 ou 8.000 pixels

ZEN : (Zéro Énergie Nette) : Émissions des GES anthropiques suffisamment réduites pour qu'elles soient compensées par réabsorption dans l'environnement

Remerciements

Les relectures de Gérard Creuzet, Philippe Gillet et Daniel Iracane, ainsi que la synthèse de Pierre Toulhoat, référent sur ce rapport, ont permis des améliorations significatives du texte. Il en est de même des commentaires de Bruno Stoufflet, au nom du Comité de la qualité, et de ceux de Gérard Payen mandaté par le Comité éthique, société et technologies. Qu'ils en soient tous très sincèrement remerciés.

Annexes

A. Comparaison des conclusions à celles de rapports prédisant une plus grande consommation du numérique

Il est important ici de mettre en perspective les estimations de la consommation électrique du numérique à l'horizon 2030 du présent rapport avec celles d'autres analyses récentes, significativement plus élevées. Deux analyses sont retenues, celle de l'IAE au plan international, et celle du *Shift project* (SP) en France. On doit indiquer que ces analyses, tout comme le présent rapport, s'appuient sur des éléments provenant d'études antérieures.

Les deux documents très récents de l'IAE sont « *Energy and AI* » (avril 2025) et « *World energy outlook 2025* » (novembre 2025) :

- dans le premier, la consommation prévue pour les centres de données en 2030 est de 945 TWh, à comparer aux 500 TWh (fourchette supérieure à 700 TWh) du présent rapport. Il s'avère que le chiffre de l'IEA est relatif à un scénario où, en 2030, de très nombreux nouveaux centres de données, correspondant à un investissement de 3.500 G\$ (L. Cozzi, communication privée), équivalent à « 5 *Stargate* », auraient effectivement été mis en service. Cette hypothèse ne semble pas réaliste, comme discuté en fin de partie 2.3 ;
- dans le second, pour une augmentation de la consommation électrique mondiale de 2023 à 2030 estimée à 6.760 TWh, les centres de données ont une part « de moins de 10 % », soit de l'ordre de 500 TWh, avec 100 à 150 TWh d'incertitude. La discussion qualitative de cette partie du rapport de l'IEA mentionne toutefois les nombreuses incertitudes qui pèsent sur cette estimation, et qui peuvent conduire à la revoir à la baisse. Cette estimation d'une augmentation de 500 TWh est à comparer aux 230 TWh d'augmentation retenue dans le présent rapport, avec des incertitudes du même ordre (cf. partie 2.3) ;
- de plus, si l'on regarde *a posteriori* les fourchettes de consommation de l'IEA produites quelques années à l'avance pour une année *n*, c'est le plus souvent la borne basse qui a correspond à la consommation mesurée postérieurement pour l'année *n*.

Le document du *Shift project* (SP) « *Intelligence artificielle, données, calcul : quelles infrastructures dans un monde décarboné* » (octobre 2025) retrace une évolution de la consommation mondiale des centres de données (hors minage de *bitcoin*) passée de 165 TWh en 2014 à 420 TWh en 2024, et jusqu'à une fourchette de 1.250 TWh à 1.500 TWh pour 2030. Plusieurs remarques peuvent être faites :

- reprenant en partie les chiffres de l'IEA, le chiffre pour 2014 cité par le SP est significativement plus faible que celui de Malmudin *et al.* pour 2015, soit 220 TWh (cf. 2.1) ; le chiffre de 2024 est par contre significativement plus élevé que le chiffre de 223 TWh estimé pour 2023 à partir des chiffres de 2020 solidement étayés par Malmudin (cf. 2.2.1). Ceci a entre autres pour conséquence de conduire à une estimation élevée de la croissance passée de la consommation mondiale de 7% par an entre 2014 et 2019, puis de 13% par an entre 2019 et 2024 ;
- le chiffre de 1.500 TWh cité comme possible en 2030 inclut pour environ 350 TWh la consommation liée au minage des *bitcoins* (soit près du double de celle faite dans le présent rapport, cf. 2.4). Il correspond donc à un peu plus de 1.100 TWh pour les centres de données « hors *bitcoin* », à comparer aux 945 TWh prévus par l'IAE et aux 500 TWh (fourchette supérieure à 700 TWh) du présent rapport. Cette estimation élevée est dite correspondre à « *un scénario prospectif exploratoire d'un déploiement indifférencié de l'offre de calcul et de son adoption généralisée* », soit donc avec des hypothèses assez proches, bien qu'un peu plus larges encore, de celles retenues par l'IAE et déjà discutées *supra*.

L'essentiel des différences entre ces analyses et le présent rapport porte donc sur l'augmentation des consommations de l'IA générative et du minage de *bitcoins*. Pour la première, et au-delà des évolutions technologiques (*edge computing*, algorithmes...) qui vont augmenter l'efficacité énergétique, il semble bien que les modèles de financement pérenne (*business model*) permettant les investissements menant aux 945-1.100 TWh de consommation prévue par ces autres analyses ne sont toujours pas là. Pour le second, la méthode de minage actuelle (PoW), très énergivore, peut être remplacée par une autre (PoS), beaucoup plus économe, tandis qu'une régulation du minage reste possible (à l'instar de la décision chinoise). Ces éléments confortent les niveaux de consommation moindre du présent rapport.

B. Composition du Groupe de travail

CO-PRÉSIDENTS

- Jean-Claude ANDRÉ, Académie des technologies
- Yves CASEAU, Académie des technologies - Groupe Michelin, Directeur des Systèmes d'Information

MEMBRES

- Olivier APPERT, Académie des technologies - Ancien Directeur de l'Institut Français du Pétrole
- Yves BAMBERGER, Académie des technologies
- Thierry CHEVALIER, Académie des technologies - Capgemini, VP Chief Engineer Manufacturing & Process
- Nicolas DEMASSIEUX, Académie des technologies
- Erol GELENBE, Académie des technologies
- Marie-Luce GODINOT, Académie des technologies - Groupe Bouygues, DGA Innovation, développement durable et systèmes d'information
- Laurent GOUZENES, Knowledge, Management and Mapping (KM2)
- Joël HARTMANN, Académie des technologies - DELAUREAN CONSULTING, Président
- François KEPES, Académie des technologies
- Patrick LEDERMANN, Académie des technologies

- Claude LEPAPE-GARDEUX, Académie des technologies -
Schneider Electric, Data and artificial intelligence Leader
- Jean-Luc MOLINER, Académie des technologies -
Ancien Directeur de la sécurité du Groupe Orange
- Grégoire POSTEL-VINAY, Académie des technologies -
Conseil Général de l'Économie
- Stéphane REQUENA, Grand Équipement National pour le Calcul Intensif
(GENCI), Directeur technique
- Claude WEISBUCH, Académie des technologies - Professeur,
Département Matériaux de l'Université de Californie à Santa Barbara

N.B. : La déontologie académique exige que tout contributeur à l'élaboration d'un rapport n'apporte au collectif que sa seule expertise, en se gardant de promouvoir tout intérêt personnel ou corporatif. En vue d'une parfaite transparence, les membres du groupe se sont tout particulièrement pliés à cette discipline, notamment celle et ceux concernés par leur position professionnelle actuelle ou récente.

C. Mandat du Groupe de travail « Consommations du numérique »

CADRAGE/OBJECTIF

Ce Groupe de travail est créé, entre autres, à la demande du pôle « Énergie », qui souhaite avoir une vue globale de la part du numérique dans la consommation énergétique (électrique). Cette demande du pôle « Énergie » s'accompagne aussi de la même demande mais relative à la consommation d'autres matériaux, notamment pour la fabrication des équipements, que ce groupe de travail s'efforcera d'aborder dans une deuxième étape. En facteur commun de ces questions le groupe de travail essaiera de comparer les consommations nationales et mondiales, et donc les consommations importées, malgré la probable difficulté à rassembler des estimations de mêmes nature et qualité sur ces deux domaines.

Les questions clés auxquelles le groupe de travail souhaite répondre sont les suivantes :

1. Donner les chiffres à jour (2020 ou 2022) de la consommation d'énergie, notamment la consommation électrique, et au-delà de l'emprunte CO₂, de l'ensemble du secteur numérique :
 - Par catégorie
 - En séparant les *blockchains* des centres de données
 - En chiffrant séparément la fabrication des équipements puis de leurs usages, avec les mêmes remarques que pour les deux points *supra*
2. Faire une tentative de prospective à 2030 :
 - Du point de vue de la consommation électrique puis, bien que ceci soit plus difficile et incertain à cet horizon, du point de vue de l'empreinte carbone
 - En analysant les chiffres parfois contradictoires qui peuvent circuler
 - En incluant autant que possible une prospective technologique

3. Donner un avis sur la question inverse, de l'utilité d'une numérisation des diverses activités pour réduire leur empreinte carbone, en segmentant autant que possible entre les différents secteurs d'activité (professionnels, individuels):

- Via une tentative de synthèse d'études bibliographiques
- Via une proposition méthodologique pour évaluer la contribution positive de la numérisation des activités (100 % des gains d'une optimisation, 50 % ? proportionnellement au coût, etc.). Il s'agit d'une question difficile que se posent actuellement beaucoup d'entreprises

PLANNING

Une durée d'un an minimum semble nécessaire pour aborder toutes ces questions.

SÉQUENCEMENT

Un point d'étape sera proposé au bout d'un semestre de travail (bibliographies, auditions, premiers éléments de synthèse,...).

Après un premier bloc de 6 mois, le groupe de travail essaiera de construire un document de façon itérative, pour éviter l'effet tunnel, en proposant une version de travail (incomplète) qui pourra s'enrichir des premiers retours des membres du pôle numérique.

BIBLIOGRAPHIE

Un certain nombre de rapports existants seront analysés du point de vue des objectifs du groupe de travail. Parmi ceux-ci : études déjà réalisées par Y. Caseau, numéro spécial des Annales des Mines, rapports de l'ADEME, rapports du *Shift Project*, rapport commun de l'ANRT et de l'Académie, rapports d'EuroCASE,... Une tâche initiale du groupe de travail sera de compéter cette bibliographie.

MEMBRES

Le groupe de travail sera co-piloté par Y. Caseau et J.C. André. Il devrait comporter probablement une dizaine d'autres membres, dont certains ont déjà fait part de leur souhait de participation : M.L. Godinot, Y. Bamberger, L. Gouzenes, N. Demassieux. Le GT accueillera d'autres membres de l'Académie, à leur demande.

PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Le groupe de travail se propose de consulter un petit nombre de personnalités extérieures :

- un représentant du *Shift Project* et/ou de l'ADEME pour les études globales ;
- un expert des *chipsets* (demander à Laurent Gouzène) pour l'évolution de la lithogravure (plus de 50 % de l'empreinte carbone vient de la fabrication des équipements, et plus de 70 % de cette fabrication concerne le *chipset*) ;
- un ou des représentant des *hyperscalers* (le *cloud* « vert » est une des promesses clés du moment) ;

ainsi que des représentants d'autres Académies, en premier lieu l'Académie des sciences qui possède actuellement un « Groupe d'Initiative » sur le thème de la consommation du numérique.

D. Bibliographie générale

Ne sont ici cités que les articles et textes généraux sur le sujet du rapport. Les références sur les points spécifiques sont données au fil du texte, le plus souvent sous la forme d'un lien hypertexte. Ces références sont très nombreuses, pour permettre de remonter aux sources des chiffres.

ADEME (2025) : « Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France » (Janvier 2025). Auteurs : *Th. Brilland, E. Fangeat, J. Meyer et M. Wellhoff*. Disponible à <https://librairie.ademe.fr/>

ADEME-Arcep (2023) : « Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective à 2030 et 2050 » (Janvier 2023). Auteurs : *E. Perasso, C. Vateau, F. Domon*, avec les contributions de *Y. Aiouch, A. Chanoine, L. Corbet, P. Drapeau, L. Ollion, V. Vigneron, D. Prunel, G. Ouffoué, R. Mahasenga, J. Orgelet, F. Bordage et P. Esquerre* (IDATE). Disponible à <https://librairie.ademe.fr/>

ANRT (2022) : « Énergie et numérique : des défis réciproques ». Les Cahiers Futuris (Mai 2022). Disponible à https://www.anrt.asso.fr/sites/default/files/2024-start/anrt_energie_et_numerique_rapport_snre_2022.pdf

Gelenbe, E., et Caseau, Y. (2013) : « Impact des TIC sur la consommation d'énergie à travers le monde ». Académie des technologies
Disponible à [Impact des TIC sur la consommation d'énergie à travers le monde](#), Académie des technologies

Gelenbe, E. (2023) : « *Electricity consumption by ICT: facts, trends and measurements* ». Ubiquity (ACM), 2023, 15pp.
Disponible à <https://doi.org/10.1145/3613207>

IEA (2025a) : « *Energy & IA* »
Disponible à [Energy and AI – Analysis-IEA](#)

IEA (2025b) : « *World Energy Outlook 2025* »

Disponible à [https://www.iea.org/report/World Energy Outlook 2025](https://www.iea.org/report/World%20Energy%20Outlook%202025)

Malmodin, J., Lövehagen, N., Bergmark, P. et Lundén, D. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions–2020 outcome. *Telecommunications Policy*, 48 (3), 102701.

Disponible sur <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308596123002124>

Malmodin, J., et Lundén, D. (2018) : The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010–2015. *Sustainability*, 10

Disponible à <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/9/3027>

Shift project (2025) : Intelligence artificielle, données, calcul : quelles infrastructures dans un monde décarboné ?

Disponible à <https://theshiftproject.org/publications/intelligence-artificielle-centres-de-donnees-rapport-final/>

E. Liste des auditions

J.-P. Arzel	Bouygues	15/04/2024	Réseaux et usages
J.-B. Besset	Orange	13/05/2024	Énergie et carbone chez Orange
M. Schmitt	CGE	17/06/2024	Le baromètre du numérique
E. Boyer	GENCI	24/07/2024	GENCI, Centre de calcul
L. Cozzi	IEA	16/09/2024	<i>Digital economy consumption footprint</i>
J. Hartmann	Delaurean	13/12/2024	Évolution de la consommation électrique des circuits intégrés
C. Lepape	Schneider Electric	16/12/2024	<i>On the environmental impact of energy management Electric solutions in Schneider Electric</i>
R. Jahan	Saint Gobain	16/12/2024	<i>Digital & manufacturing 4.0 – Impacts et externalités carbone</i>
Y. Caseau	Michelin	16/12/2024	<i>IT 4 green and green 4 IT – Balancing responsible digital strategy at Michelin</i>
P. Roquet	ST microelectronics	27/01/2025	<i>GHG emissions within ICT</i>
H. Ferreboeuf	Shift Project	17/02/2025	<i>Digital sustainability – Past, present and future</i>
L. Servais	Airbus	28/03/2025	<i>Is IT generating waste or value ?</i>

Le numérique s'est imposé comme un pilier de nos sociétés, transformant nos modes de vie, nos industries et nos services. Il consomme environ 6 % de l'électricité mondiale et représente entre 2,3 % des émissions de gaz à effet de serre aujourd'hui et 2,5 % en 2030. Pourtant, son impact net reste positif à cet horizon, grâce aux gains d'efficacité qu'il permet dans d'autres secteurs. Son développement futur dépendra de notre capacité à encadrer la croissance de l'IA par des régulations et des innovations, à décarboner les infrastructures (centres de données, réseaux) et à limiter les effets rebonds grâce à des usages plus sobres et responsables.

Ce rapport stratégique offre une analyse claire et documentée des impacts énergétiques du numérique à l'horizon 2030 à l'échelle mondiale. Au-delà du constat, il propose des leviers d'action pour maîtriser cette trajectoire. Un document essentiel pour les décideurs publics et privés, les industriels, les chercheurs et les citoyens engagés, afin de concilier transition numérique et transition écologique.

Académie des technologies
Le Ponant – Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)1 53 85 44 44
secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

ISBN : 979-10-97579-71-5

