



Intelligence artificielle, données, calculs : quelles infrastructures dans un monde décarboné ?

RAPPORT FINAL - OCTOBRE 2025



DANS LE CADRE DE NOTRE
PROGRAMME D'ACTION POUR 2027



Table des matières

A propos du Shift Project.....	4
Comité de rédaction	5
Nos partenaires	5
Introduction 6	
I. Le numérique, à la fois outil et défi pour la décarbonation de l'économie.....	6
II. Une trajectoire insoutenable qu'il s'agit d'infléchir	7
III. Pourquoi travailler sur l'intelligence artificielle et les centres de données au Shift Project ?	8
Chapitre 1 Trajectoires climatiques et énergétiques mondiales des centres de données	11
IV. La filière centres de données : une trajectoire de plus en plus incompatible avec les objectifs énergie-carbone	12
A. Les choix actuels induisent une hausse sans précédent des émissions de gaz à effet de serre	12
B. Une trajectoire climatique soutenable implique une consommation électrique plafond pour la filière centres de données	15
V. Les tendances énergétiques dans la filière des centres de données : une dynamique de croissance structurelle	17
A. L'historique des estimations permet d'apprendre des leçons du passé	17
B. La dynamique des centres de données oriente la consommation électrique en phase d'usage sur une trajectoire sans plafond.....	21
C. La filière centres de données justifie les infrastructures fossiles	26
D. L'empreinte carbone de la fabrication tout au long de la chaîne de valeur n'est plus à négliger	28
VI. Les serveurs accélérés et l'IA générative : les moteurs de la filière centres de données	33
A. Estimation des tendances énergie-carbone à partir des dynamiques en capacité de calcul et serveurs accélérés	35
B. Scénarios prospectifs à partir des usages de l'intelligence artificielle	36
C. La dynamique dans la filière centres de données est désormais largement tirée par l'IA générative	38
VII. Au-delà des centres de données : premiers signaux sur les terminaux et les réseaux ?	39
A. Quels effets induits par l'IA sur les terminaux ?	40
B. Quels effets induits par l'IA sur les réseaux ?	41
Chapitre 2 Trajectoires énergétiques des centres de données en France et en Europe : piloter ou subir ? 43	
VIII. Les centres de données en Europe : des situations actuelles différenciées mais une dynamique commune	44
A. Le cas irlandais illustre la pression qu'exercent les centres de données sur les systèmes électriques et la transition énergétique.....	44
B. L'analyse des tendances énergétiques en Europe révèlent des situations différenciées mais une dynamique commune dans la filière des centres de données.....	46
C. De premiers scénarios permettent d'identifier que les dynamiques dans la filière centres de données européennes ne sont pas soutenables.....	48
IX. Les centres de données en France : éviter le conflit d'usage	52
A. Climat : état des lieux sur les émissions de gaz à effet de serre de la filière centres de données ...	52

B. Energie : lever les incertitudes sur l'état des lieux en consommation électrique de la filière centres de données sur le territoire français	52
C. Conflit d'usage : anticiper pour réduire les risques de tensions entre centres de données et transition énergétique.....	55
X. Les centres de données en France : des tendances actuelles aux scénarios de décarbonation ..	60
A. Scénarios étudiés	60
B. Soutenabilité climat-énergie : identifier les conditions de compatibilité	61
XI. L'intégration des centres de données, un enjeu local : gestion de l'eau, débat public, évolutions réglementaires	65
A. La gestion de l'eau par les centres de données et l'intensification des événements climatiques extrêmes.....	65
B. Le débat public doit tenir compte de la double contrainte carbone	67
C. Un état des lieux des évolutions réglementaires en cours.....	67
Chapitre 3 IA & climat : Réorienter nos choix et stratégies technologiques jusqu'à la compatibilité carbone	70
XII. L'intelligence artificielle : un système d'usages numériques comme les autres	71
A. L'insoutenable usage de l'intelligence artificielle.....	71
B. Les multiples usages de l'intelligence artificielle.....	72
XIII. Évaluer les impacts carbone-énergie : complexité et diversité technique de l'IA.....	74
A. Évaluer les impacts carbone-énergie de la phase d'inférence	74
B. Évaluer les impacts carbone-énergie de la phase d'entraînement	75
C. Évaluer les impacts carbone-énergie d'une solution d'IA : le cahier des charges.....	75
XIV. Évaluer les bénéfices énergie-carbone liés à une solution d'IA ?	76
XV. Energie, carbone - Orienter ses choix technologiques pour construire une IA soutenable : objectifs et méthode.....	78
A. Les objectifs à remplir : un cap pour une IA compatible avec la contrainte énergie-carbone.....	78
B. La méthode à adopter : une boussole pour évaluer et adapter les services d'IA aux contraintes énergie-climat	78
XVI. Energie, carbone - Orienter ses choix technologiques pour construire une IA soutenable : les étapes à suivre	80
A. Avoir un repère quantitatif de référence : budgets et trajectoires énergie-carbone.....	80
B. Objectiver le besoin et les choix technologiques : l'analyse fonctionnelle	81
C. Passer de l'analyse fonctionnelle aux coûts énergie-carbone directs.....	81
D. Eco-concevoir et éco-déployer : rendre le service d'IA compatible avec les budgets énergie-carbone de l'organisation	83
E. Rendre le service d'IA compatible avec la trajectoire, l'abandonner sinon	85
XVII. Energie, carbone - Orienter ses choix technologiques pour construire une IA soutenable : une étude de cas : l'assistant personnel de compte-rendu	85
Recommandations.....	88
Conclusion	93
Bibliographie.....	95

A propos du Shift Project

Le Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission est d'éclairer et d'influencer le débat sur la transition énergétique et climatique en Europe. Il est soutenu depuis 2010 par des grandes entreprises françaises et européennes ainsi que par des organismes publics, des associations d'entreprises et des PME. Il est épaulé par un réseau de dizaines de milliers de bénévoles regroupés au sein d'une association loi 1901 : The Shifters, créée en 2014 pour apporter un soutien bénévole au Shift Project.

Il ambitionne de mobiliser les entreprises, les pouvoirs publics et les corps intermédiaires sur les risques, mais aussi et surtout sur les opportunités engendrées par la « double contrainte carbone » que représentent ensemble les tensions sur l'approvisionnement énergétique et le changement climatique. Sa démarche est ainsi marquée par un prisme d'analyse particulier, fondé sur la conviction que l'énergie est un facteur de développement de premier ordre : dès lors, les risques induits par le changement climatique, intimement liés à l'usage de l'énergie, relèvent d'une complexité systémique et transdisciplinaire particulière. Les enjeux climat-énergie conditionnent l'avenir de l'humanité ; il est donc nécessaire d'intégrer cette dimension le plus rapidement possible à notre modèle de société.

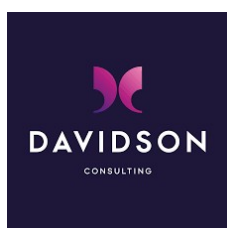
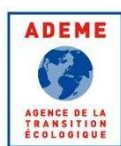
Comité de rédaction

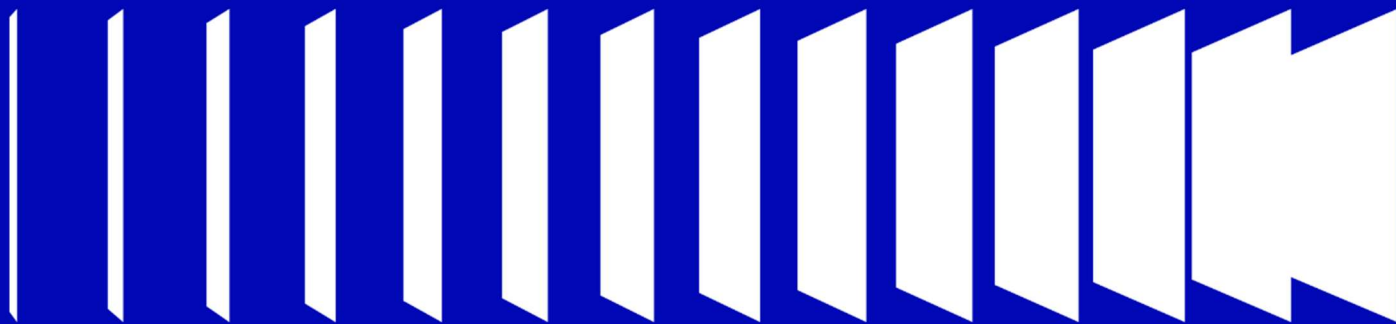
Sylvain Baudoin (Membre du Groupe expert, The Shift Project)
Aurélie Bugeau (Professeuse des universités, Université de Bordeaux, LaBRI, IUF)
Marlène de Bank (Ingénieure de recherche « Numérique », The Shift Project)
Pauline Denis (Ingénieure de recherche « Numérique », The Shift Project, Université Grenoble Alpes)
Maxime Efoui-Hess (Coordinateur du programme « Numérique », The Shift Project)
Thomas Feltin (Ingénieur de recherche, Cisco Systems France)
Hugues Ferreboeuf (Chef de projet « Numérique », The Shift Project)
Arnaud Gueguen (Consultant Climat, indépendant)
Siba Haidar (Enseignante-chercheuse, ESIEA)
Alexis Leautier (Ingénieur et membre de l'association The Shifters)
Anne-Laure Ligozat (Professeuse des universités, ensIE, LISN)
Ludovic Moulard (Directeur Développement Durable, fifty-five - The Brandtech Group)
Denis Perilhou (Expert associé, The Shift Project)
Alexandre Theve (Directeur R&D, Davidson consulting)
Aurore Vaudatin (Product Environmental Manager, OVHcloud)
Tristan Vuillier (Responsable Sustainability France, Devoteam)
Martin Willame (Doctorant, Université Catholique de Louvain)

Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées ni aux contributeurs, ni aux relecteurs, ni aux membres du groupe de travail cités ci-dessus. Le contenu de ce rapport n'engage que The Shift Project.

Nos partenaires

Un grand merci aux mécènes engagés à nos côtés en faveur de la sobriété numérique, qui rendent possible la publication de ce travail :





I. Le numérique, à la fois outil et défi pour la décarbonation de l'économie

Les technologies de l'information, aujourd'hui centrales dans des activités essentielles de nos sociétés, pourraient jouer un rôle crucial dans la transformation de notre économie. Si les équipements numériques – et les systèmes qui les composent - et les usages qu'ils permettent – et promettent – semblent être conçus pour relever des défis toujours plus grands, cela ne doit pas les affranchir d'une réflexion sur leur pertinence environnementale. En effet, dans un monde où les ressources sont finies, il est important de se souvenir que chaque action réclame de l'énergie et de la matière, y compris transformer, créer, stocker ou échanger des informations. Les technologies numériques n'y font donc pas exception : ce ne sont pas des outils virtuels, mais bien des systèmes et supports physiques, bien que nous n'en percevions pas toujours directement la matérialité.

Les technologies numériques forment un système d'envergure mondiale : les terminaux (smartphones, ordinateurs, tablettes, etc.) se connectent entre eux via des infrastructures réseaux (câbles terrestres et sous-marins, antennes de réseaux mobiles, fibres optiques, satellites, etc.) afin d'échanger des informations stockées et traitées dans les centres de données, cœurs battants de ce système. Or, chacun de ces éléments nécessite de l'énergie non seulement pour fonctionner (phase d'utilisation) mais également, avant cela, pour être construit (phase de production) : extraction minière, transport et raffinage des matières premières, processus industriels de transformation, et de fabrication puis livraison aux consommateurs et consommatrices, fin de vie (recyclage, mise en décharge, incinération, etc.) : tout le cycle de vie de ces éléments nécessite des ressources biotiques et abiotiques.

Chaque service numérique rendu aux utilisateurs s'appuie sur des infrastructures physiques dont la résilience et la pertinence vis-à-vis de la **double contrainte carbone (réduire les émissions carbonées de nos activités ; s'affranchir de notre dépendance aux énergies fossiles)** doivent être interrogées. Le numérique est un catalyseur : là où il est déployé, il permet d'optimiser, accélérer, fluidifier, paralléliser... L'intelligence artificielle est l'un de ces outils, et l'IA générative vient encore y ajouter de nouvelles couches d'usages.

Déployer tous ces systèmes sans stratégie de long terme intégrant la double contrainte carbone mène à l'accélération de toutes les dynamiques actuelles, y compris les plus éloignées de nos objectifs de résilience. Faire du numérique un véritable outil de réinvention de nos activités pour les rendre compatibles avec les limites planétaires réclame une prise en compte systémique des impacts du numérique.

II. Une trajectoire insoutenable qu'il s'agit d'infléchir

Le numérique représentait déjà près de 4 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 2020 (The Shift Project, 2021), soit du même ordre que l'intégralité des véhicules utilitaires lourds dans le monde (IEA, 2021a). À l'échelle française, il représentait 4,4 % de l'empreinte carbone du pays en 2022 (ADEME, 2025).

La particularité du secteur numérique tient à la rapidité d'augmentation de ses émissions, qui croissent selon une tendance particulièrement incompatible avec sa décarbonation : + 6 %/an en moyenne au niveau mondial (The Shift Project, 2021) et + 2 à 4 %/an en France (ADEME & Arcep, 2023; HCC, 2020; Sénat, 2020). Les optimisations techniques et opérationnelles ne parviennent pas à compenser le déploiement soutenu de ses infrastructures, parcs et flux¹. Ce constat continue de se vérifier et s'est illustré au cours des cinq dernières années, qui devaient pourtant selon certaines études marquer un plafonnement de ces impacts grâce au progrès technologique et l'efficacité énergétique². Les déploiements à large échelle de l'IA et de sa composante générative aggravent ces dynamiques déjà insoutenables. Ce rapport aspire à les éclairer.

À l'échelle de la France comme à l'échelle mondiale, le numérique représentait en 2022 de l'ordre de 10 % de la consommation électrique totale (ADEME, 2025; The Shift Project, 2021, 2023), une part significative qui devrait lui valoir le même niveau d'attention que d'autres secteurs. Dans un contexte d'électrification intense des usages (mobilité, bâtiment, industrie etc.), on comprend qu'il se trouve lui aussi au cœur des enjeux de planification de la transformation de nos systèmes et de priorisation d'accès aux ressources, dont l'électricité fait partie.

Rendre le numérique compatible avec la double contrainte carbone ne consiste donc pas seulement à renforcer des leviers d'optimisation déjà déployés, mais à le placer sur une trajectoire fondamentalement différente de celle qu'il suit actuellement. Au même titre que les autres secteurs de l'économie, il doit atteindre son objectif de décarbonation, que les acteurs industriels (GSMA, GeSI³) se sont eux-mêmes fixés par le biais de l'initiative SBTi et sur la base d'une recommandation de l'ITU (SBTi et al., 2020)(p. 9) à - 45 % en 2030 par rapport à 2020 au niveau mondial⁴.

La construction de notre système numérique se fait au travers d'interactions multiples entre le système technique et les usages qu'il sous-tend. L'analyse des enjeux énergétiques et climatiques selon une approche systémique met en évidence que la maîtrise des impacts des technologies numériques nécessite une réflexion approfondie sur le déploiement des offres, l'adoption des usages que nous favorisons ou non, ainsi que la place de la sobriété. L'inflexion des volumes de terminaux, de données et de calculs est même l'une des conditions sine qua non à la maîtrise de la consommation énergétique grâce aux gains d'efficacité énergétique (The Shift Project, 2023).

¹ (ADEME & Arcep, 2023; Bol et al., 2020; European Commission, 2020; GreenIT.fr, 2019; IEA, 2022, 2024a; LBNL et al., 2024; The Shift Project, 2023, 2025b)

² (IEA, 2019; ITU-T, 2020; Masanet E. et al., 2020)

³ GSMA : GSM Association, association rassemblant les acteurs internationaux de la connectivité mobile (constructeurs, opérateurs etc.). | GeSI : Global enabling Sustainability Initiative, groupement d'acteurs internationaux du numérique et des télécommunications, dont la mission est d'œuvrer sur le numérique durable.

⁴ Un cadre d'engagements non quantitatif existe au niveau national, pris par les industriels français dans le cadre des feuilles de routes de décarbonation du secteur du numérique.

III. Pourquoi travailler sur l'intelligence artificielle et les centres de données au Shift Project ?

L'**intelligence artificielle générative** a fait une entrée fracassante dans le débat public en novembre 2022 avec la sortie de l'agent conversationnel ChatGPT. L'adoption de cet outil gratuit a été fulgurante : 1 million d'utilisateurs en 5 jours, 100 millions en 2 mois et aujourd'hui⁵ vraisemblablement 180 millions de visiteurs pour 1 milliard de requêtes quotidiennes⁶. En France, 39 % des français utilisent l'intelligence artificielle dans leur quotidien, principalement dans un cadre personnel mais aussi professionnel, et cela monte à 74 % chez les 18 – 24 ans⁷.

Cette percée résulte d'une convergence de facteurs : plusieurs décennies de recherche en traitement automatique des langues, l'intégration dans des interfaces de dialogue dites « naturelles », des stratégies technologiques d'accroissement de puissance des processeurs (notamment graphiques), la délégation du stockage et du calcul vers le cloud computing, et l'accès à de vastes corpus textuels, permis par la collecte massive de données et leur enrichissement avec des annotations linguistiques.

Le terme **intelligence artificielle** est dynamique et toujours situé dans un contexte technologique et temporel, plutôt que normatif. En France *a minima*, l'intelligence artificielle désigne les applications d'automatisation les plus avancées, à un moment donné, en matière de traitement de l'information, de complexité des tâches, de précision et de fiabilité : le terme désigne un horizon technologique qui se déplace.

L'**intelligence artificielle générative** en constitue aujourd'hui l'expression la plus visible. Sa spécificité réside dans sa capacité à produire de l'information, avec des propriétés inédites : de façon réaliste (difficile à distinguer de contenus humains), rapide, polyvalente (texte, image, audio) et accessible via des interfaces intuitives (chatbots, commandes vocales)⁸.

Ce modèle évolue actuellement vers une approche dite agentique, où les systèmes ne se limitent plus à de simples chatbots conversationnels, mais deviennent de véritables agents autonomes, capables de planifier et résoudre des tâches complexes en interagissant avec des outils extérieurs.

L'utilisation à grande échelle de façon indifférenciée de l'intelligence artificielle générative entraîne aujourd'hui le développement du système numérique, et notamment de la filière centres de données, dont l'empreinte énergie carbone augmente d'ores et déjà à un rythme soutenu.

Cette évolution de l'intelligence artificielle s'inscrit dans une logique d'interactions entre les infrastructures et les usages qui impacte l'ensemble du système numérique (cf. Figure 1) :

- La volonté de développer les nouveaux usages promis par le « moment IA générative » justifie le déploiement de nouvelles capacités techniques (amélioration des capacités des processeurs, augmentation des capacités des baies de serveurs, déploiement des centres de données etc.) : c'est l'effet d'usage ;

⁵ A date de juin 2025

⁶ (Digital Information World, s. d.; Sagot B., 2023)

⁷ Sondage (Ipsos, 2025) de février 2025 relayé par (Arcep, 2025)

⁸ (Commission de l'intelligence artificielle & Gouvernement français, 2024)

- Le déploiement de nouvelles capacités techniques entraîne le développement de nouveaux usages (possibilité d’avoir accès rapidement et simplement à une réponse ou une image produite grâce des capacités de calculs très importantes etc.) : c’est l’effet d’offre.

Usages et infrastructures restent les deux faces d’une même pièce. Ce qui est peut-être particulier dans ce « moment IA générative », c’est la rapidité et l’intensité avec lesquelles la boucle est activée : les investissements financiers, humains et techniques nécessaires à la technologie sont mobilisés de manière considérable, à la fois pour alimenter le déploiement massif de centres de données et pour catalyser l’adoption des usages alors rendus possibles, justifiant ainsi la poursuite des dynamiques.

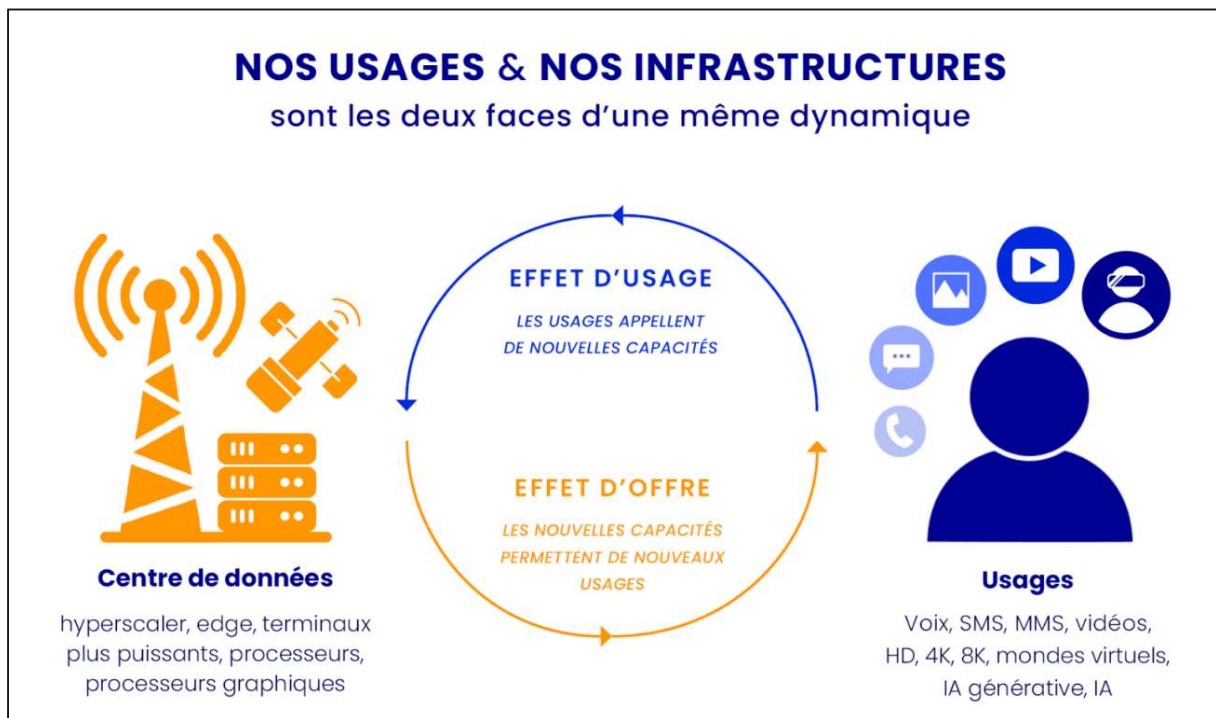


Figure 1 - Nos usages et nos infrastructures numériques sont les deux faces d’une même dynamique. Source : (The Shift Project, 2025b)

Destiné à éclairer le débat public, ce rapport s’organise en trois chapitres :

- Chapitre 1 : Quelles trajectoires énergétiques et climatiques suivent les centres de données mondiaux, et en quoi le « moment IA générative » accélère cette dynamique ?
- Chapitre 2 : Quel impact cette dynamique a-t-elle sur la planification électrique à l’échelle française et européenne ?
- Chapitre 3 : Au regard de ces constats, comment inscrire le développement de l’intelligence artificielle dans une trajectoire compatible avec les contraintes physiques ?

Il permet donc de situer les enjeux énergétiques et climatiques autour de l’intelligence artificielle à différentes échelles : monde (chapitre 1), Europe et France (chapitre 2) ; et à la fois en partant de son versant matériel en considérant la filière centres de données (chapitre 1 et 2) mais aussi en partant de l’offre et des usages d’intelligence artificielle (chapitre 3).

La polysémie du mot « IA » et son traitement dans ce rapport

IA & numérique : continuité et extension :

- Le terme « IA » prolonge celui de « numérique », comme en témoignent les changements de nom⁹ des ministères, secrétariats d'État et conseils nationaux¹⁰.
- Le passage de « numérique » à « IA » reflète toutefois un intérêt pour la montée en puissance des capacités de calcul et de traitement.
- Nous utiliserons l'expression « **numérique / IA** » pour désigner l'ensemble de cette filière, ses technologies, ses produits et ses services.

IA & IA générative : confusion et « moment IA générative » :

- Comme décrit en introduction, l'IA ne se réduit pas à l'IA générative : l'IA renvoie à cette frontière technologique en déplacement constant, dont l'IA générative déployée de façon massive et indifférenciée en représente l'usage le plus visible aujourd'hui.
- L'IA est mobilisée comme argument, à la fois pour valider le maintien de trajectoires énergétiques intensives (Google, 2024; Microsoft, 2024) et pour encourager le déploiement de centres de données (Elysée, 2025), car elle bénéficie d'une aura médiatique (en partie liée à des enjeux économiques ou géopolitiques jugés majeurs) qui l'exonère largement pour l'heure du besoin de s'en justifier.
- Nous emploierons l'expression « **moment IA générative** » ou « **phénomène IA générative** » pour désigner cette période durant laquelle les investissements lourds en infrastructures sont motivés par ce type d'IA.

IA & centres de données : la poule et l'œuf :

- Pour préciser le développement fait plus haut autour de la Figure 1 il faut entre 6 mois et 5 ans pour construire un centre de données¹¹. Ces projets reposent donc sur des anticipations pour réaliser des investissements qui devront ensuite être rentabilisés.
- Avant le « moment IA générative », la croissance des centres de données était déjà soutenue, sans lien direct avec l'IA (ex : usages anticipés liés à la numérisation accélérée pendant le COVID). Depuis, ils sont souvent justifiés « par l'IA », ou par le risque perçu de sous-investir plutôt que surinvestir.
- **Nous utiliserons les expressions « capacités informatiques » ou « de calcul », « puissance IT » ou « de calcul » pour parler du contenu IT de ces infrastructures, et nous parlerons de la filière centres de données pour en caractériser l'ensemble des acteurs¹².**

L'objet d'étude des chapitres I et II est la filière centres de données¹³¹⁴ :

- Tout en étudiant comment « le moment IA générative » amplifie la dynamique : à la fois physiquement, en analysant les ressources mobilisées par l'IA générative et à la fois symboliquement, en identifiant les investissements présentés comme faits « pour » l'IA.
- Et en gardant à l'esprit que les centres de données accueillent d'autres usages : services web, cloud, crypto-actifs etc.

Les objets d'étude du chapitre III sont :

- Le « **numérique / IA** » dans son ensemble, pour identifier les leviers d'action au sein de la filière, notamment dans la conception des biens et services et de leurs modèles d'affaires.
- **Des cas d'usage de l'IA contextualisés**, car seule cette granularité permet d'évaluer de façon différenciée les apports et les impacts environnementaux associés à un service ou un produit donné.

⁹ Cette évolution s'inscrit dans une chronologie de termes, en France et en Europe qui, lorsqu'ils ne recouvrent pas exactement le même périmètre, indiquent une tendance : informatique, plan calcul, technologies de l'information, télécommunications, information & medias, digital, tech, transition numérique, économie numérique...

¹⁰ En septembre 2024, le secrétariat d'État au Numérique devient secrétariat d'État à l'Intelligence artificielle et au Numérique. En juin 2025, le CNNum devient CIAN.

¹¹ Cela dépend de sa taille, complexité, localisation, contraintes réglementaires...

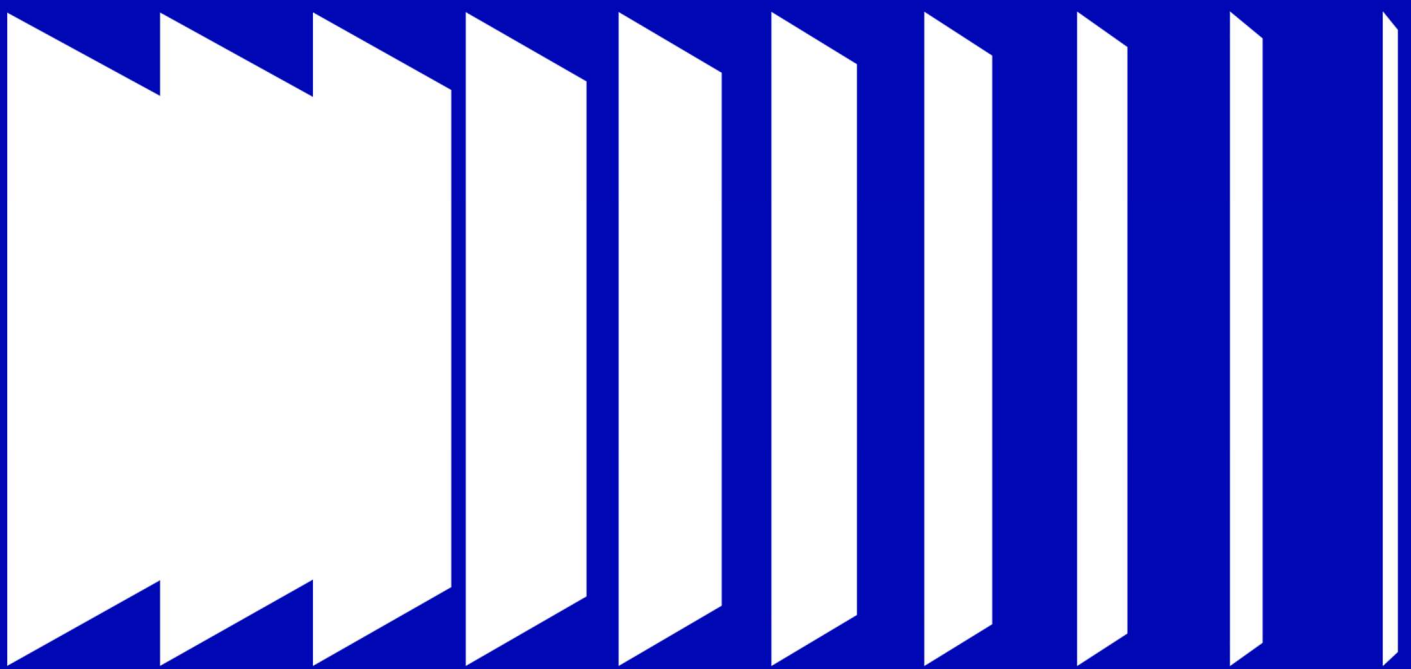
¹² Même si il ne s'agit plus seulement de « données » mais aussi de « calcul ».

¹³ Le rapport « AI & Energy » (IEA, 2025a) étudie également l'industrie des centres de données dans son ensemble, et non uniquement les usages liés à l'IA générative.

¹⁴ À l'exception d'une brève analyse qualitative sur les effets potentiels de l'IA sur les réseaux et les terminaux.

Chapitre 1

**Trajectoires
climatiques et
énergétiques
mondiales des
centres de données**



IV. La filière centres de données : une trajectoire de plus en plus incompatible avec les objectifs énergie-carbone

A. Les choix actuels induisent une hausse sans précédent des émissions de gaz à effet de serre

À l'horizon 2030, les choix actuels (issus des stratégies industrielles des Big Tech américaines et en voie de répliation par beaucoup d'acteurs du numérique) de conception et de déploiement dans la filière centres de données à l'échelle mondiale **placeraient la filière dans une position insoutenable au regard de la contrainte climatique : ses émissions directes de gaz à effet de serre atteindraient entre 630 MtCO₂e et 920 MtCO₂e, soit jusqu'à 2 fois les émissions de la France¹⁵.**

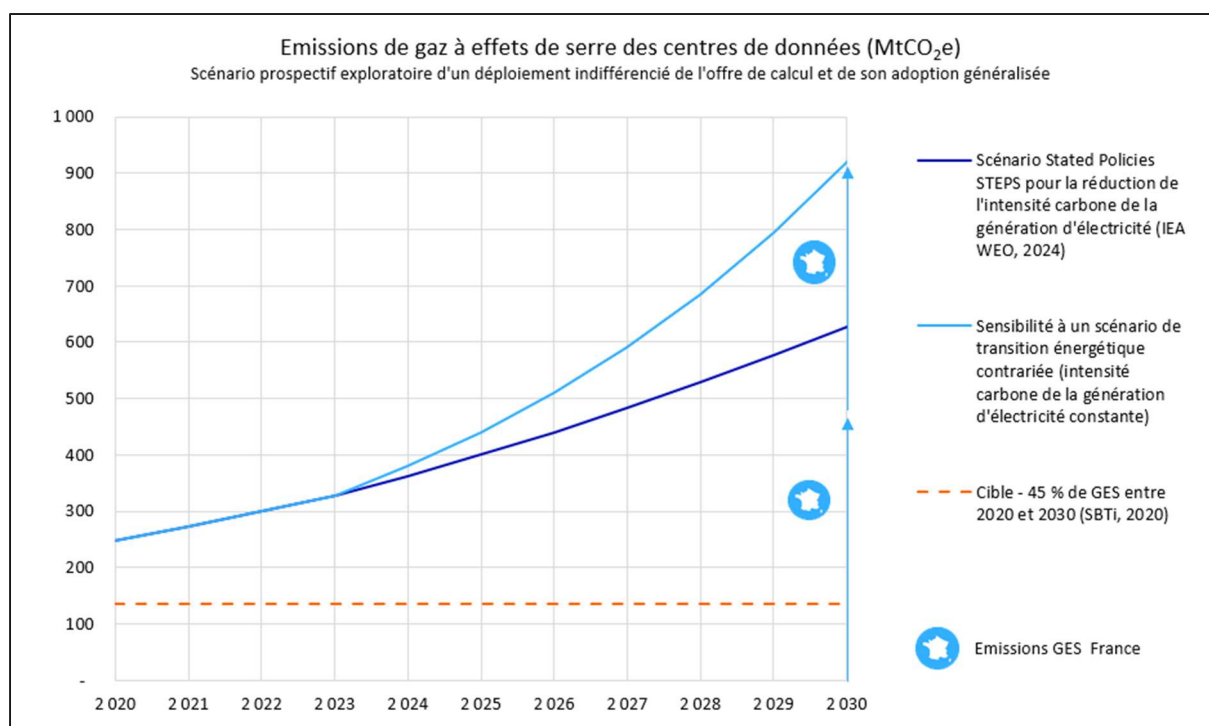


Figure 2 - Traduction en émissions de gaz à effet de serre (MtCO₂e) de notre scénario prospectif exploratoire d'un déploiement indifférencié de l'offre de calcul et de son adoption généralisée pour différentes intensités carbone de l'électricité et comparaison au scénario cible. Source : (The Shift Project, 2025b)

Cette empreinte carbone inclut à la fois les émissions directes liées à la consommation d'électricité et celles générées par la construction des centres de données et la production du matériel qu'ils abritent (serveurs, équipements informatiques, infrastructures de refroidissement, bâtiment etc.).

¹⁵ Valeur moyenne approximative entre les émissions nationales et l'empreinte carbone : 373 MtCO₂e en 2023 en émissions nationales, 623 MtCO₂e en empreinte en 2022 (Haut Conseil pour le Climat, 2024)

Cette estimation se base sur les dynamiques initiées par le secteur des centres de données que ce rapport décrit et caractérise¹⁶ :

- La consommation électrique pourrait évoluer de 530 TWh en 2023 à 1490 TWh en 2030 (et 3000 TWh en 2035) dans le cas d'un déploiement massif de l'offre de calcul et de l'adoption généralisée de l'offre de services pour l'ensemble des usages : hébergement de sites web, services cloud, vidéo à la demande, jeux en ligne, réseaux sociaux, stockage, traitement de données d'entreprise, intelligence artificielle dont générative, cryptomonnaies.
- Le contenu carbone de l'électricité consommée pourrait suivre différents scénarios :
 - Celui d'ambitions politiques climatiques actuelles des états, en évoluant de 458 gCO₂e/kWh en 2023 à 312 gCO₂e/kWh en 2030 (IEA, 2024b) (Scénario Stated Policies STEPS, p301, octobre 2024) ;
 - Celui d'une dégradation des ambitions politiques et climatiques actuelles des états, modélisé ici comme constant à 458 gCO₂e/kWh entre 2023 et 2030 afin d'illustrer ce que serait une stagnation du facteur d'émission¹⁷.

Pour comparaison, 600 MtCO₂e d'émissions de GES (scénario des ambitions climatiques Stated Policies) pour la filière centres de données dans le monde en 2030, ce serait :

- x2,5 par rapport aux 250 MtCO₂e de 2020,
- 76 % des émissions du secteur de transport maritime¹⁸ ou 57 % des émissions CO₂ seules du secteur de l'aviation commerciale civile¹⁹,
- 1,2 % à 1,4 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales en 2030, tous secteurs confondus^{20,21}.

À ce niveau d'émissions de GES, la prise en compte de cette filière dans les scénarios de développement et objectifs climatiques devient incontournable : il s'agit d'une véritable filière industrielle qui, en l'attente de scénarios de développement compatibles, risque de surprendre par ses émissions directes, alimentant la dérive climatique plus qu'anticipé.

¹⁶ Les dynamiques en consommation électrique sont décrites en partie V.B. Les dynamiques en intensité carbone de l'électricité sont décrites en partie V.C. L'ensemble des calculs est décrit en annexe C (The Shift Project, 2025a).

¹⁷ Cette stagnation est représentative à la fois du fait que si les capacités bas-carbone sont utilisées par les centres de données, cela retarde la transition énergétique dans d'autres secteurs, d'où la modélisation constante. Et à la fois de la réponse à l'appel en puissance supplémentaire imprévu et inédit de l'IA réalisée par des centrales à gaz déployées au sein du mix électrique mondial (voir partie sur les choix énergétiques actuels V.C). Dans ce cas, la modélisation à 458 gCO₂e/kWh est dans la fourchette haute des centrales à gaz 350/370/490 gCO₂e/kWh (IPCC, 2018).

¹⁸ 0,825 GtCO₂ en 2020 selon l'estimation de l'IEA (IEA, 2021a)

¹⁹ Synthèse Pouvoir Voler en 2050, p2, 1.1 GtCO₂e en 2018 (The Shift Project & Supaero Decarbo, 2021)

²⁰ Ces 1,2 % à 1,4 % concernent seulement la filière centres de données et non l'ensemble du secteur numérique : les réseaux (fixes, mobiles, satellites, grandes artères mondiales) et terminaux (TV, ordinateurs, smartphones, objets connectés, etc.) ne sont pas comptés.

²¹ Par comparaison à 54 GtCO₂eq en 2030 en limitant le réchauffement à 3°C (>50%), Table SPM.2 (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023), on obtient 1,7 %. Si on compare à 44 GtCO₂eq en 2030 (en limitant le réchauffement à 2°C (>67%), Table SPM. 2 (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023), on obtient 1,4%. La compatibilité entre ce scénario et une trajectoire 2°C (>67%) à l'échelle mondiale étant plus que discutable, puisque cette "hausse surprise" de 350 MtCO₂e entre 2020 et 2030 n'est pas compensée par une prise en compte dans le scénario d'un autre secteur.

Dans ce scénario Stated Policies, il faut remarquer que :

- L'élévation de l'offre de calcul est telle qu'elle écrase 30 % des bénéfices issus de l'amélioration du mix électrique²², en continuant à accroître les émissions de GES selon un rythme de croissance annuelle composé de 9 %.
- Ce rythme contraste par rapport à l'ordre de grandeur d'une trajectoire de réduction linéaire d'environ 5 % par an, pour atteindre l'objectif de zéro émission nette.

Ainsi poursuivre cette trajectoire - et donc les décisions actuelles - reviendrait à s'éloigner drastiquement de l'objectif cible SBTi, qui fixe une réduction des émissions de 45 % entre 2020 et 2030 (Figure 2).

En 2035, dans ce même scénario²³, ce serait cette fois 920 MtCO_{2e}, creusant encore l'écart par rapport à l'objectif de réduction de 90 % des émissions en 2050 par rapport à 2020 (Figure 3).

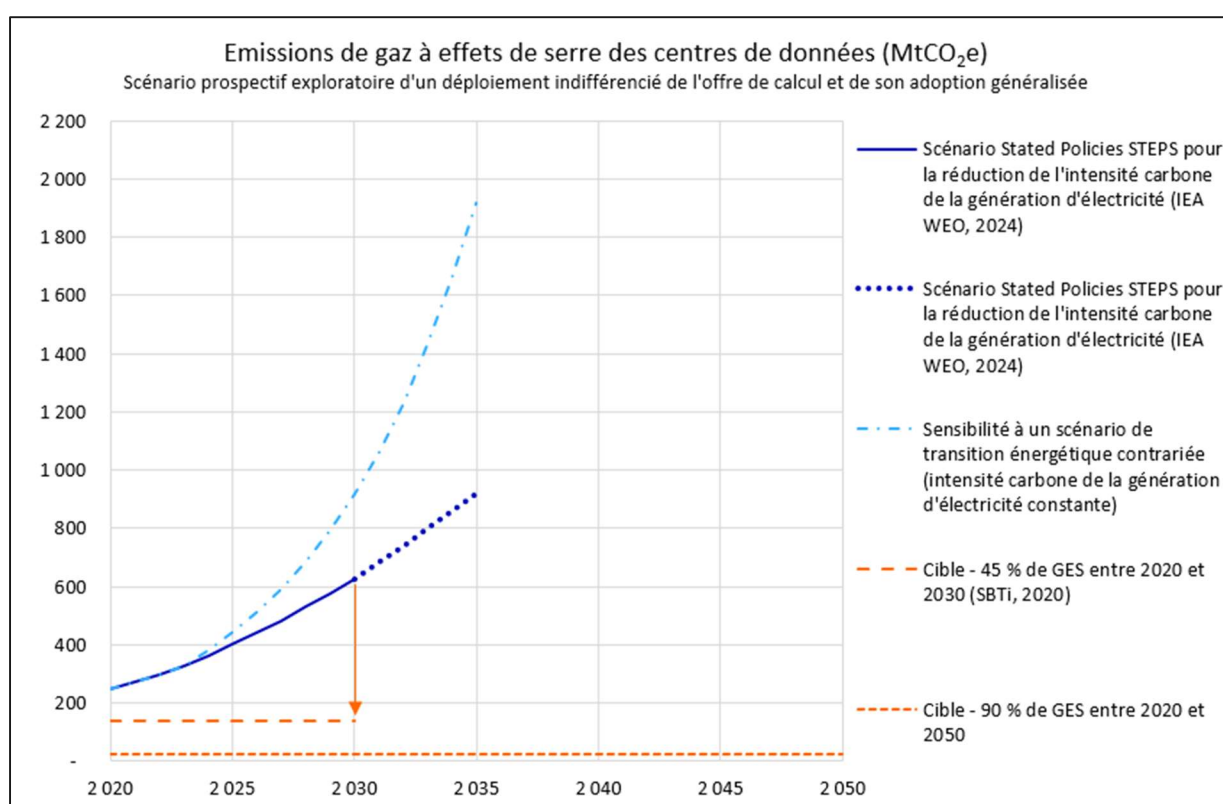


Figure 3 - Traduction en émissions de gaz à effet de serre (MtCO_{2e}) notre scénario prospectif d'un déploiement indifférencié de l'offre de calcul et de son adoption généralisée pour différentes intensités carbone de l'électricité et comparaison aux scénarios cible. Source : (The Shift Project, 2025b)

Fixer des objectifs explicites pour cette filière, accompagnés de mécanismes carbone, est indispensable. Plus le retard s'accumule, plus l'inertie s'installe : installer un centre de données se fait avec un horizon d'utilisation de 20 à 25 ans, et retarder d'une année la mise en place de tels mécanismes carbone revient à accepter 50 MtCO_{2e} annuelles.

²² Soit les progrès permis par une réduction de l'intensité carbone de la génération d'électricité de 458 gCO_{2e}/kWh en 2023 à 312 gCO_{2e}/kWh. Sans ces progrès (le second scénario), les émissions seraient de 900 MtCO_{2e} et non 600 MtCO_{2e}.

²³ Celui d'ambitions politiques climatiques actuelles des états : 458 gCO_{2e}/kWh en 2023, 312 gCO_{2e}/kWh en 2030 et 219 gCO_{2e}/kWh en 2035 (IEA, 2024b) (Scénario Stated Policies STEPS, p301, octobre 2024).

Choix de modélisation

Nous proposons ici une modélisation prospective transparente²⁴ de l'évolution de la consommation électrique des centres de données dans le cas d'un déploiement généralisé de l'offre de calcul IA.

Le caractère prospectif de ce scénario se lit notamment en comparaison de la diversité des scénarios actuellement disponibles : par exemple, 4 scénarios pour l'IEA (Lift-off, Base, High Efficiency, Headwinds) (IEA, 2025a), 4 scénarios pour Schneider Electric (Abundance, Sustainable AI, Energy Crunch, Limits to Growth) (Schneider Electric, 2024), une enveloppe pour LBNL entre 6,7 % et 12 % (LBNL et al., 2024), 2 scénarios pour Deloitte (Baseline, High Adoption) (Deloitte, 2024). Ce scénario poursuit l'exploration de ceux parmi ces derniers dédiés au déploiement généralisé.

Notre approche a aussi vocation à mettre en évidence les variables et facteurs qui structurent l'évolution de l'impact climatique, à savoir la consommation électrique (utilisation), l'empreinte carbone embarquée (fabrication principalement) et l'intensité carbone du mix électrique.

La sensibilité à l'empreinte carbone embarquée dans cette estimation a été évaluée : 37 MtCO₂e (sur 620) à 2030 en passant d'une répartition utilisation / fabrication 75/25 à une répartition 80/20.

Entre 2025 et 2030, cette répartition est modélisée constante malgré une baisse de l'intensité carbone de l'énergie ce qui supposerait alors conjointement une réduction de l'intensité carbone du matériel (cf. « V.D.L'empreinte carbone de la fabrication tout au long de la chaîne de valeur n'est plus à négliger »).

B. Une trajectoire climatique soutenable implique une consommation électrique plafond pour la filière centres de données

Viser un objectif de réduction de 90 % des émissions de gaz à effet de serre entre 2020 et 2050 pour la filière des centres de données constitue un scénario cible qu'il est pertinent d'explorer pour élaborer une stratégie long-terme de neutralité climatique à horizon 2050 (Commission européenne, 2019). Ce que nous apprend un tel scénario, c'est qu'il existe un plafond de consommation électrique, fonction du poids de l'empreinte carbone embarquée (serveurs, équipements informatiques, infrastructures de refroidissement, bâtiment etc.) et du succès de la transition énergétique (Figure 4). Par exemple :

- Dans le scénario Stated Policies à 2050²⁵, avec une distribution inhabituelle de 90/10 pour le ratio utilisation/fabrication²⁶, la borne haute est à 200 TWh/an.
- Même dans une configuration massivement décarbonée, tant dans l'énergie (électricité à 25 gCO₂/kWh en 2050) que dans la filière de production du matériel (distribution utilisation/fabrication à 95/5²⁷), il existe une borne haute, et elle est à 950 TWh/an.

Déjà 200 TWh, mais plus encore 1000 TWh représente donc un maximum absolu à ne pas franchir.

²⁴ Les dynamiques en consommation électrique sont décrites en partie V.B. Les dynamiques en intensité carbone de l'électricité sont décrites en partie V.C. L'estimation pour l'empreinte carbone de la fabrication est décrite en partie V.D. L'ensemble des calculs est décrit en annexe 1, 2, 3, 4, 5, 6 (The Shift Project, 2025a).

²⁵ Celui d'ambitions politiques climatiques actuelles des états : 458 gCO₂e/kWh en 2023, 312 gCO₂e/kWh en 2030, 219 gCO₂e/kWh en 2035 et 111 gCO₂e/kWh en 2050 (IEA, 2024b) (Scénario Stated Policies STEPS, p301, octobre 2024).

²⁶ Distribution inhabituelle et audacieuse puisque aujourd'hui avec une décarbonation de l'électricité, ce ratio autour de 75 / 25 a tendance à s'équilibrer autour d'un 55 / 45. Dit autrement, à iso-matériel le ratio fabrication / utilisation croît avec la décarbonation de l'électricité. Ce cas-ci signifierait que non seulement l'électricité se décarbonne, mais que l'empreinte carbone embarquée baisse encore plus vite. Cf. « V.D - L'empreinte carbone de la fabrication tout au long de la chaîne de valeur n'est plus à négliger ».

²⁷ Ce qui suppose encore une fois une décarbonation du matériel à un rythme bien plus accru que celui de l'énergie.

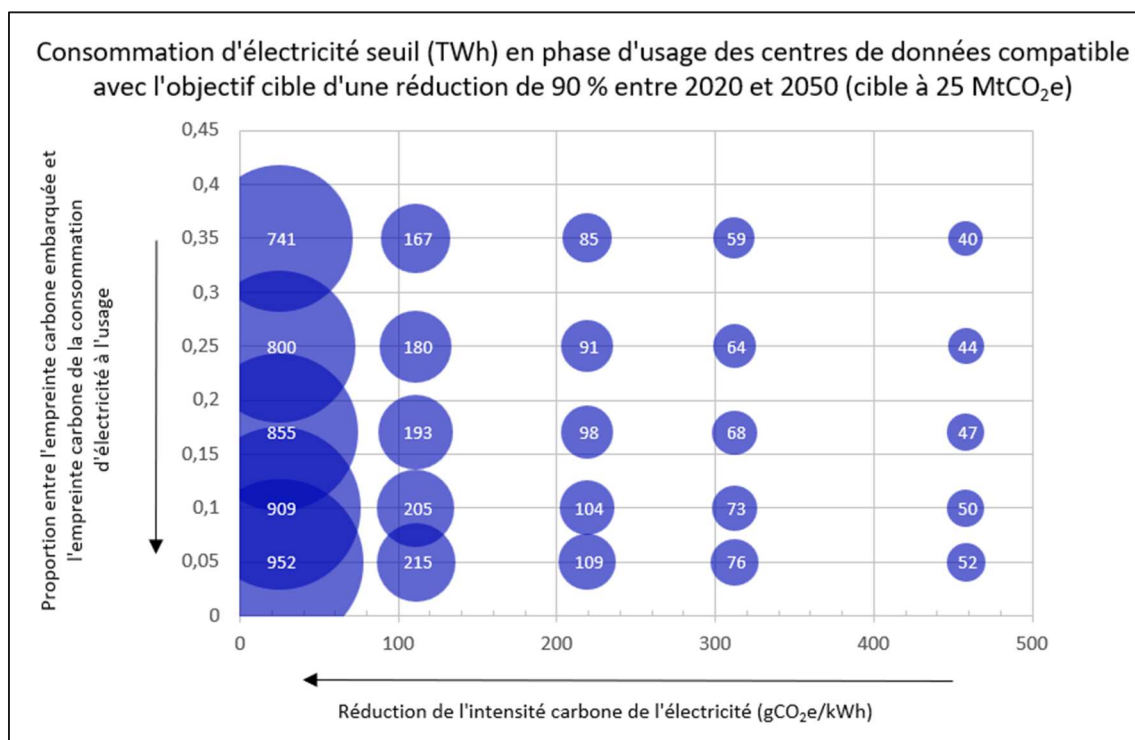
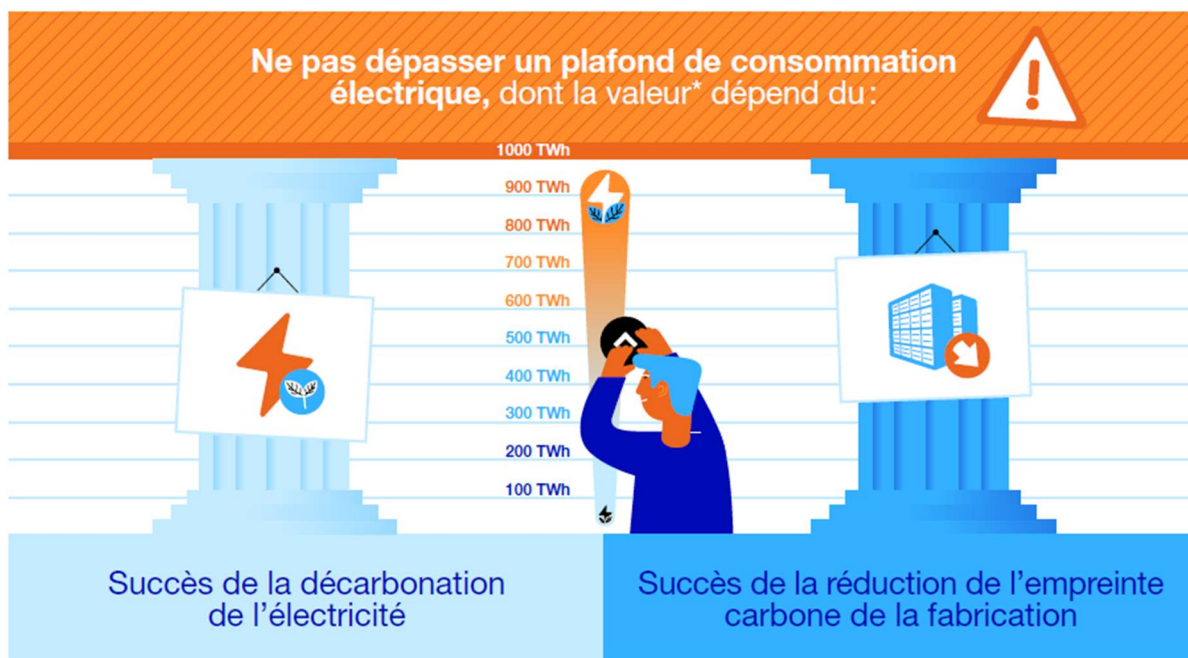


Figure 4 - Consommation d'électricité seuil pour que la filière soit compatible d'un objectif cible de réduction de 90 % entre 2020 et 2050. Source : (The Shift Project, 2025b)

Réussir la décarbonation de la filière mondiale centres de données c'est :



*Pour illustration, décarboner la filière à - 90 % impliquerait d'être capable d'atteindre :

- 111 gCO₂e/kWh_{élec} et une distribution 90 % usage - 10 % fabrication pour permettre une consommation de 200 TWh ;
- 25 gCO₂e/kWh_{élec} et une distribution 95 % usage - 5 % fabrication pour permettre une consommation de 1000 TWh.

V. Les tendances énergétiques dans la filière des centres de données : une dynamique de croissance structurelle

A. L'historique des estimations permet d'apprendre des leçons du passé

Depuis 2005, les ressources électriques mobilisées par les centres de données sont en augmentation continue, à la fois en volume et en rythme, ainsi qu'en puissance électrique installée (GW) et en consommation électrique (TWh).

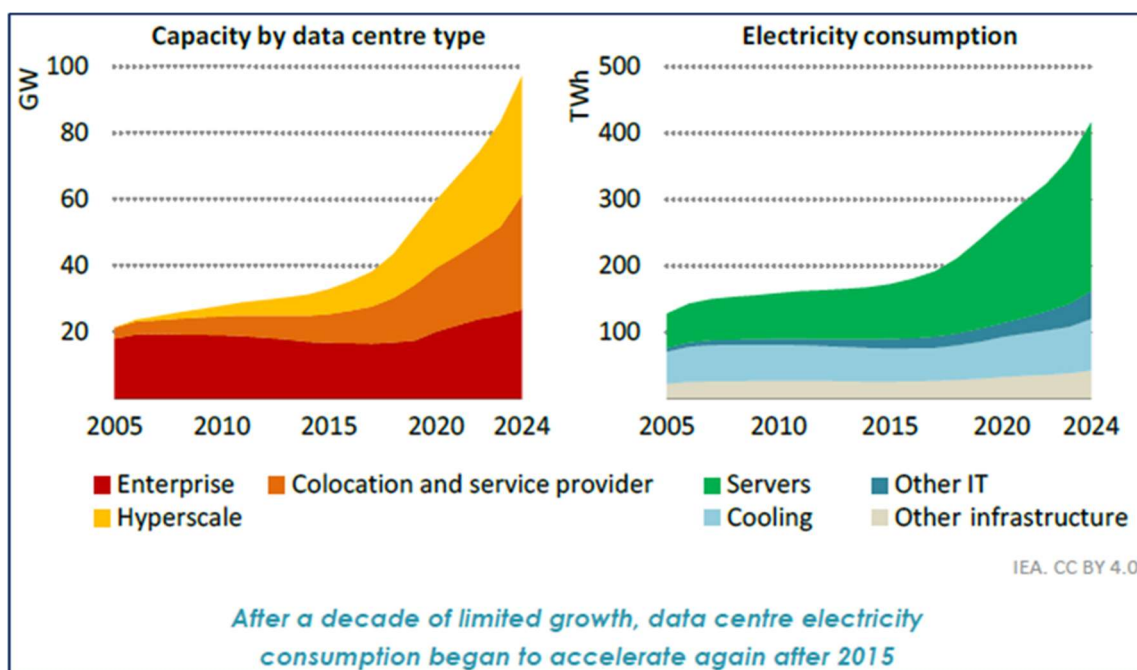


Figure 5 – Capacité électrique totale installée (GW) et consommation électrique totale (TWh) pour l'utilisation des centres de données²⁸. Source : (IEA, 2025a)

Selon l'IEA (IEA, 2025a), entre 2005 et 2024, la consommation électrique annuelle liée à l'utilisation des centres de données est passée de 120 TWh à 420 TWh, soit plus du double du plafond de 200 TWh espéré dans les années 2018-2022²⁹ (hors cryptomonnaies). En 2024, la puissance électrique totale installée atteint quasiment 100 GW, dont 30 GW ajoutés sur cette même période 2018-2022.

L'augmentation du rythme est donc continue depuis deux décennies, même si l'analyse des tendances permet d'identifier trois phases distinctes (Figure 5 et Annexe 1 (The Shift Project, 2025a)) :

- Une première période de croissance modérée jusqu'en 2015,
- Une accélération soutenue entre 2015 et 2020 avec le déploiement du cloud : jusqu'à 9 % de CAGR³⁰ sur cette période,
- Une intensification depuis lors : jusqu'à 13 % de CAGR sur ces 5 dernières années.

²⁸ Sans cryptomonnaies

²⁹ Voir paragraphes suivants pour l'analyse de cette ancienne controverse

³⁰ Le CAGR est le taux de croissance annuelle composé. Il s'agit d'un taux d'évolution moyen sur une période donnée.

GW et TWh : Puissance et consommation :

Un gigawatt (GW) mesure une puissance instantanée installée.

Un térawattheure (TWh) mesure une quantité d'énergie consommée sur une période donnée (ici, une année) avec un certain profil³¹.

Ordre de grandeur et comparaison :

100 GW ? En 2024, 100 GW de capacité électrique c'est l'équivalent de 10 fois l'intégralité de l'industrie française (**RTE, 2025c**). Pour illustration, les trois réacteurs nucléaires de Flamanville ont des puissances respectives de 1,3, 1,3 et 1,6 GW (Wikipédia, s. d.).

420 TWh ? La consommation électrique française en 2024 est de 450 TWh (RTE, 2025a).

Deux variables pour décrire l'évolution énergétique de la filière des centres de données :

Les TWh permettent de mesurer la consommation *récurrente* d'électricité, par exemple chaque année.

Les GW renseignent eux sur les *infrastructures* : à la fois en termes de taille des sites de centres de données en décrivant la puissance informatique (IT) installée (en GW), mais aussi en termes de capacités de production électrique à allouer ou à construire pour alimenter (en GW).

Cette dynamique est principalement alimentée par les États-Unis depuis 2015 (Figure 6), qui mobilisent déjà 4,5 % de leur consommation électrique nationale pour leurs centres de données. Cette trajectoire était déjà bien engagée avant l'essor de l'intelligence artificielle générative auprès du grand public, avec un doublement des capacités entre 2014 et fin 2021. La part des acteurs hyperscale, services de colocation et fournisseurs d'infrastructures - catégories à laquelle appartiennent les plus grandes firmes américaines du secteur numérique - est bien visible dans cette évolution (Figure 5).

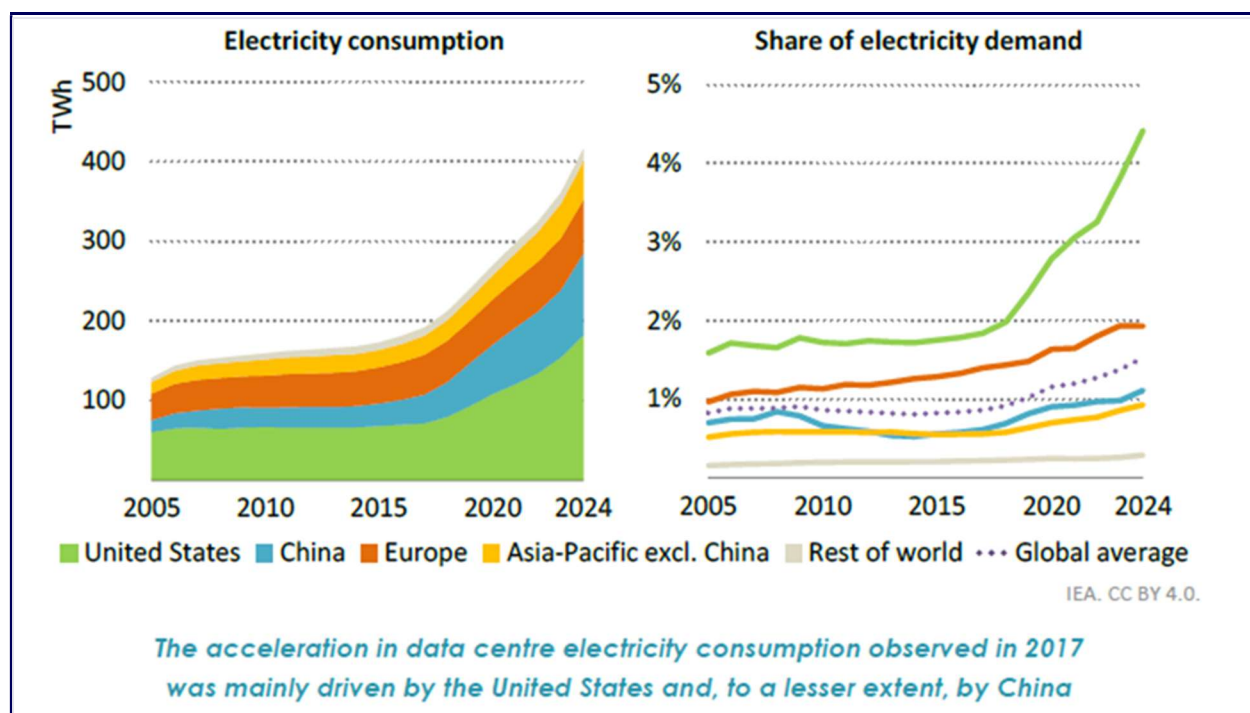


Figure 6 - Consommation électrique totale (TWh) et part dans la demande régionale (%) pour l'utilisation des centres de données³². Source : (IEA, 2025a)

³¹ Descriptible par un facteur de charge pour les centres de données.

³² Sans cryptomonnaies

Points de repère historiques pour analyser rétrospectivement une croyance exacerbée en l'efficacité énergétique comme seul levier permettant d'absorber l'ensemble de la croissance de l'offre de services

Pendant longtemps, faute de relevés et mesures directes disponibles, les seuls points de référence pour évaluer les consommations de la filière centres de données ont été des estimations et modélisations, réalisées dans le cadre de travaux académiques. Parmi ceux-ci, plusieurs ont évalué que les gains d'efficacité énergétique étaient suffisants pour compenser un doublement de la demande en centres de données, permettant ainsi à leur consommation globale de plafonner (Masanet E. et al., 2020).

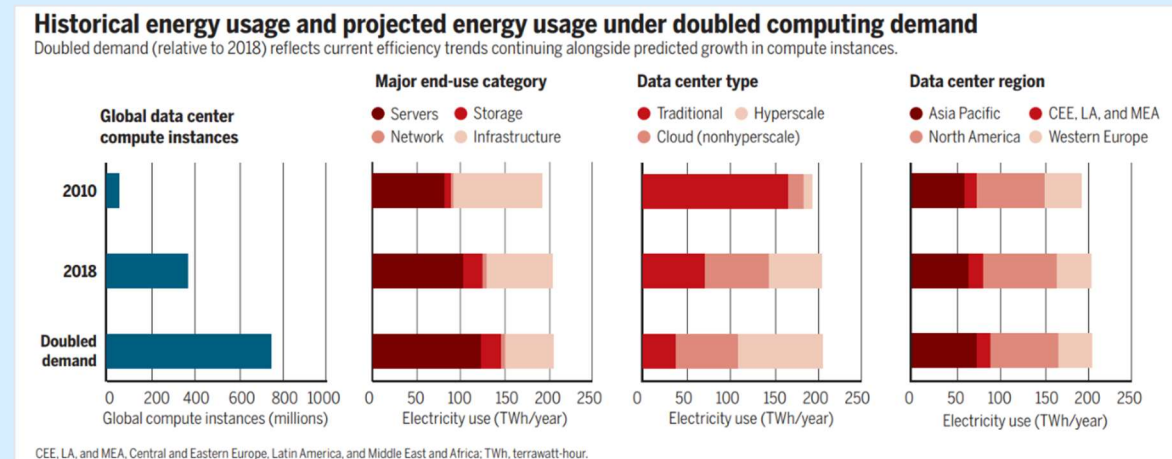


Figure 7 - Consommation énergétique historique et consommation projetée dans un scénario de doublement de la demande de calcul. Source : (Masanet E. et al., 2020)

Ces travaux ont longtemps alimenté des conclusions similaires des publications de l'IEA : « si les tendances actuelles en matière d'efficacité du matériel et de l'infrastructure des centres de données peuvent être maintenues, la demande énergétique mondiale des centres de données peut rester presque stable jusqu'en 2022, malgré une augmentation de 60 % de la demande de services » (IEA, 2021b).

Dans le débat public plus large, les conclusions de cet énoncé ont été de nombreuses fois utilisées à la périphérie voire en-dehors de leur domaine de validité, laissant ainsi croire que l'efficacité absorberait toute hausse des services, quelle qu'elle soit.

Fin 2024, le Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) amorce l'évolution du discours avec un travail historique sur les estimations passées, reconnaissant une hausse importante de la consommation énergétique au lieu d'un plafonnement (Figure 8). L'amélioration de l'efficacité énergétique a bien eu lieu, mais la croissance importante des usages l'a largement surpassée.

À cet historique des estimations aurait pu être ajoutée celui de Borderstep, qui anticipait dès 2020 l'évolution actuelle : 350 TWh en 2017, 500 TWh en 2022 et jusqu'à 880 TWh en 2030 (Borderstep et al., 2020).

Pour comparaison, les 4 scénarios formulés en 2021 par The Shift Project pour décrire les différentes tendances d'usages et d'efficacité estimaient à 420 TWh la consommation d'énergie finale des centres de données en 2019, la voyait évoluer vers 370 TWh à 549 TWh en 2022, et vers 331 TWh à 734 TWh en 2025 (The Shift Project, 2021).

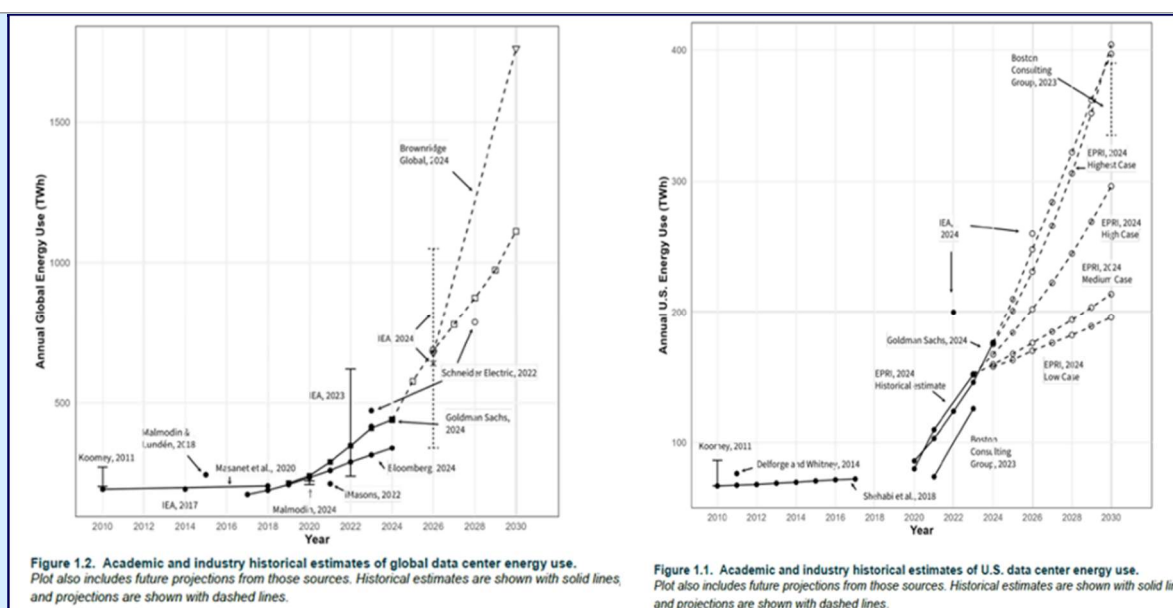


Figure 8 - Historique des estimations en consommation électrique des centres de données dans le monde entre 2020 et 2030 (échelle verticale démarrant à 100 TWh pour le graphique de gauche) et aux Etats-Unis
 Source : (LBNL et al., 2024)

L'intégration de ce constat de non-plafonnement de la consommation s'est graduellement généralisé jusqu'à faire consensus complet³³.

L'IEA poursuit aujourd'hui son travail de suivi et d'évaluation des gains d'efficacité énergétique, et constate le ralentissement de certains de ces indicateurs (Figure 9), alors même que la croissance de services et de demande continuent d'accélérer.

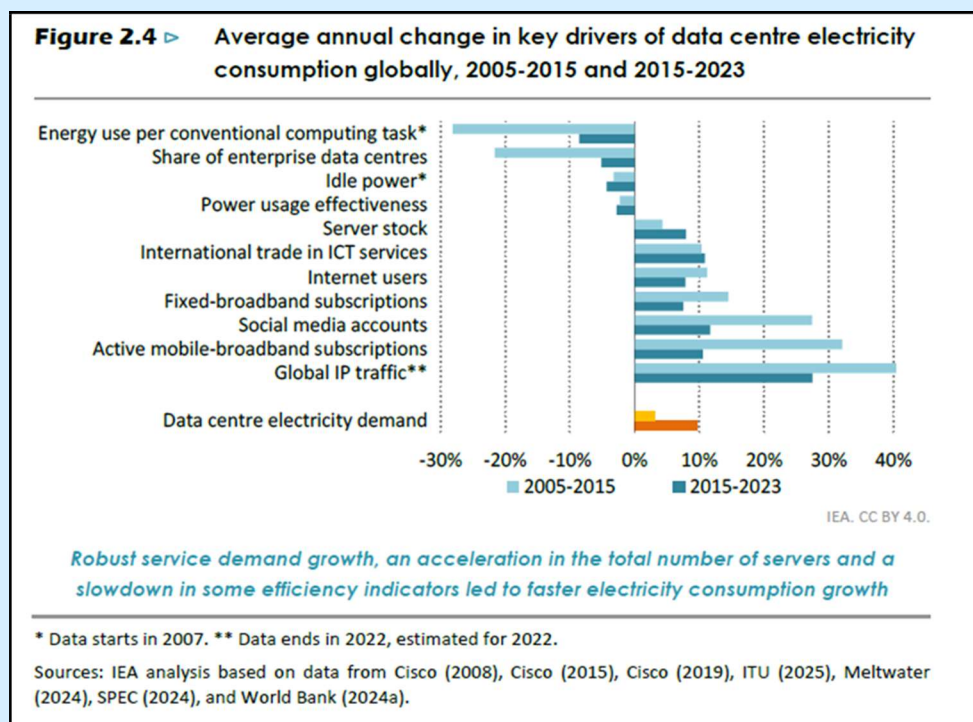


Figure 9 - La forte croissance de la demande de services, l'accélération du nombre total de serveurs et le ralentissement de certains indicateurs d'efficacité ont conduit à une hausse plus rapide de la consommation d'électricité. Source : (IEA, 2025a)

Cette rétrospective historique permet de formuler plusieurs recommandations qui devront être au cœur de futures décisions :

- **Prendre pleinement acte que la mobilisation de ressources énergétiques par la filière centres de données n'a pas atteint un plateau, qu'elle a continué sa croissance soutenue et que l'efficacité énergétique n'est pas capable de compenser seule la croissance de l'offre de services ;**
- Monitorer la consommation électrique des centres de données et les infrastructures électriques associées, avec une fréquence et une exhaustivité suffisante, doit permettre d'assurer une visibilité fiable des ressources demandées par la filière. Les approches par modélisation uniquement ont souvent abouti à des sous-estimations chroniques, ne permettant pas un pilotage efficient³⁴ et les mécanismes existants comme le dispositif EED (Energy Efficiency Directive)³⁵ sont pour l'instant à ce jour inopérant ;
- Dans une approche réflexive, il serait utile pour l'action publique d'évaluer les impacts des décisions passées prises en conséquence de mauvaises informations (notamment la croyance en un plafonnement de la demande d'électricité) ;
- Mettre en place un cadre de pilotage (objectifs, trajectoires, signaux) sera nécessaire pour modérer structurellement la demande énergétique de cette filière.

B. La dynamique des centres de données oriente la consommation électrique en phase d'usage sur une trajectoire sans plafond

Sans évolution majeure dans les dynamiques actuelles, à l'horizon 2030, la consommation électrique des centres de données mondiaux pourrait atteindre 1250 TWh à 1500 TWh, ce qui équivaut à x2,3 à x2,8 en 7 ans et signifierait dès 2028 un dépassement du plafond de 1000 TWh identifié dans la partie précédente (cf. « Une trajectoire climatique soutenable implique une consommation électrique plafond pour la filière centres de données »).

À l'horizon 2035, cette plage pourrait encore s'étendre, entre 2250 TWh et 3000 TWh.

Ces deux chiffres représentent deux scénarios de la Figure 10 dont l'ensemble des données et hypothèses est détaillée dans la suite de ce rapport, puis en Annexe 3 (The Shift Project, 2025a) :

- Le premier (en bleu) résulte de trois dynamiques d'utilisation des centres de données et des ressources de calcul : la part « hors IA », la part « IA » principalement due au « phénomène IA générative » (cf. « Les serveurs accélérés et l'IA générative : les moteurs de la filière centres de données ») et les cryptomonnaies, supposées suivre le rythme actuel.
- Le second (en orange) est « conservatif » : on considère constant le rythme de croissance, alors même qu'il croît.

³⁴ Les rares études académiques effectuées sur le sujet sont en effet des points de repères au moment où elles sont produites, mais ne permettent pas une actualisation continue.

³⁵ L'EED (Energy Efficiency Directive), en imposant un reporting pour les centres de données de plus de 500 kW dans une base de données européenne (Journal officiel de l'Union européenne, 2024), pourrait être un point de départ. Néanmoins, à date, seuls 14 TWh ont été collectés au niveau de l'Union Européenne (European Commission et al., 2025).

La consommation d'électricité en phase d'usage en 2023 est estimée ici à 530 TWh : ce chiffre prend en compte les cryptomonnaies et a été construit avec une approche régionalisée³⁶.

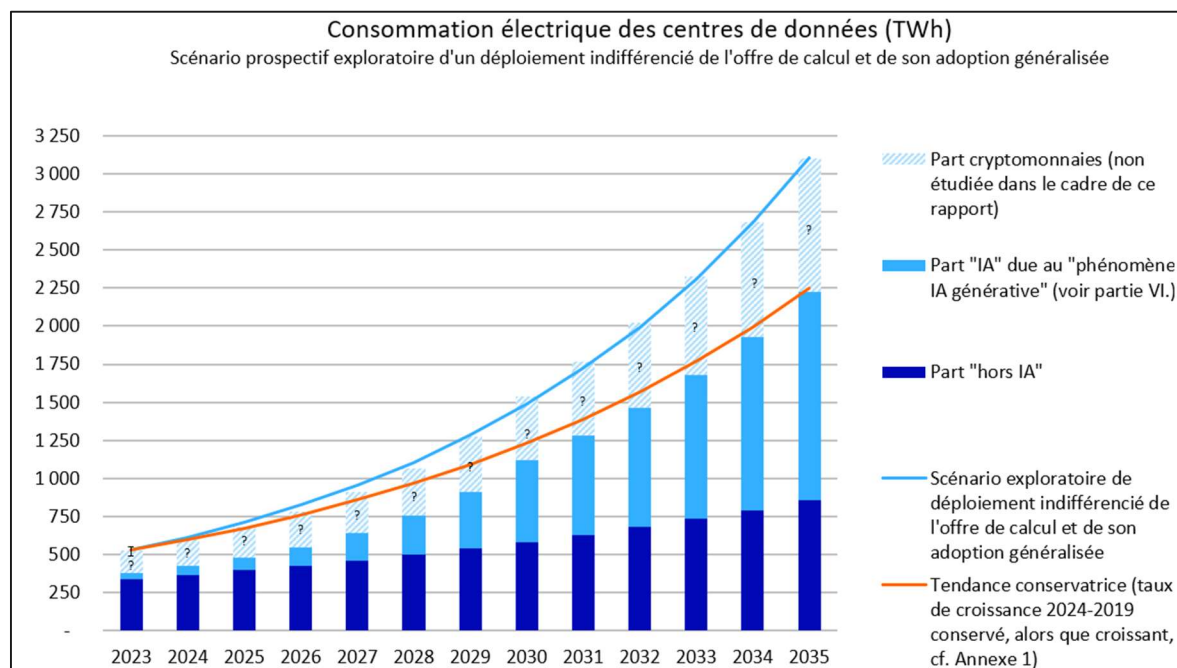


Figure 10 - Consommation d'électricité des centres de données en phase d'usage (TWh) de notre scénario prospectif et exploratoire d'un déploiement indifférencié de l'offre de calcul et de son adoption généralisée en comparaison à une tendance conservatrice. Source : (The Shift Project, 2025a)

Dans le premier scénario (en bleu), la première dynamique correspond à une demande robuste des usages numériques dits « conventionnels » (Figure 5). Amorcée à grande échelle entre 2000 et 2015, cette dynamique inclut l'hébergement de sites web, les jeux en ligne, les réseaux sociaux, les services cloud, les plateformes de vidéo à la demande, le stockage et traitement de données d'entreprise. À cette couche d'usages s'ajoutent progressivement les premiers déploiements d'intelligence artificielle dite traditionnelle (ou « trad AI »), à travers des applications telles que la traduction automatique, le traitement d'image ou encore les moteurs de recommandation.

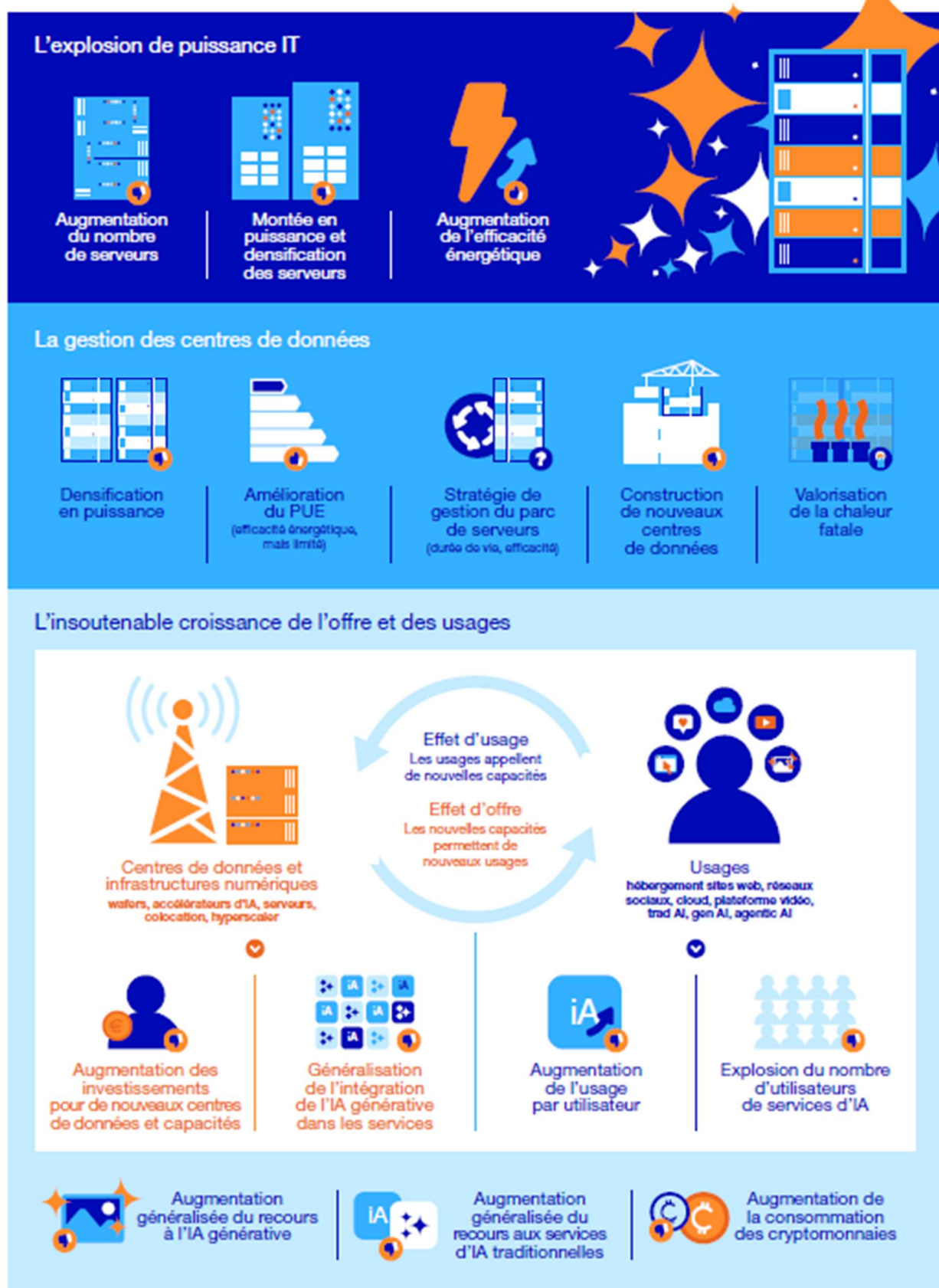
La deuxième dynamique, analysée plus en détail dans la partie VI, réside dans l'essor récent de l'intelligence artificielle générative.

Plusieurs éléments concourent à cette dynamique :

- Une amélioration continue des performances matérielles et algorithmiques (à usage équivalent) ;
- Une progression des rendements énergétiques à chaque génération de serveurs accélérés ;
- Une amélioration des taux d'utilisation effectifs des ressources de calcul avec des questionnements sur la durée de vie et la rentabilité matérielle des équipements ;
- Une augmentation de la taille et des performances des modèles, nécessitant des capacités de calcul accrues, en particulier pour les phases d'entraînement.

³⁶ À titre de comparaison, sans cryptomonnaies la consommation électrique estimée pour 2023 serait de 380 TWh, là où l'IEA retient 361 TWh (IEA, 2025a). Voir annexe 2 pour la construction régionalisée, les périmètres (crypto ou pas), et les comparaisons (The Shift Project, 2025a).

Les dynamiques de la filière centres de données et leurs effets sur la décarbonation



Son rythme est dopé par des investissements massifs dans les infrastructures de calcul, portés à la fois par les acteurs privés et par les politiques industrielles publiques. Ce financement massif a abouti à la mise à disposition rapide d'offres d'IA générative à destination du grand public, dans une logique de déploiement et de capture de marché.

Sur le plan matériel, les accélérateurs d'IA³⁷ ont vu leur puissance thermique³⁸ plus que décupler en quelques années, avec des perspectives de poursuite de cette tendance à moyen terme.

À parc constant, cette densification implique une hausse de la consommation électrique ainsi qu'un renouvellement accéléré des équipements les moins performants (ces équipements pouvant être revendus et utilisés dans ledit parc, un autre parc ou pas du tout). Cette montée en densité affecte l'ensemble de l'écosystème technique, tant au niveau des serveurs que des centres de données, posant des contraintes croissantes en matière d'alimentation électrique et de refroidissement. Cela induit des besoins de mise à niveau importants des infrastructures existantes, voire la recherche de nouveaux sites mieux adaptés à ces nouvelles exigences techniques.

Enfin, couplé à une adoption de l'offre rapide et massive, ceci conduit à une augmentation de la charge sur les centres de données et à la construction de capacités excédentaires afin d'anticiper la montée en charge future et d'assurer la disponibilité continue des services.

La dernière dynamique, souvent moins étudiée, concerne les cryptomonnaies. Si la consommation électrique du bitcoin est aujourd'hui relativement bien documentée (notamment via le Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI, s. d.)), celle des autres cryptoactifs et blockchains reste plus difficile à quantifier et à anticiper.

Finalement, en termes de modélisation (cf. Annexe 2 et 3 (The Shift Project, 2025a)) :

- La première dynamique est modélisée avec un taux de croissance caractéristique de la période à laquelle le cloud s'est développé (CAGR historique 2015-2020 de 8 %, cf. Annexe 1 (The Shift Project, 2025a)).
- La deuxième dynamique est modélisée à l'aide de notre analyse portant sur le parc de serveurs accélérés (voir la partie C-1) et est proche des scénarios « Abundance » (Schneider Electric, 2024), « Lift-off » (IEA, 2025) et « High adoption » (Deloitte, 2024).
- Non étudiée dans ce rapport, la part cryptomonnaie est modélisée avec le même taux de croissance que l'ensemble de la part « hors IA » et de la part « IA » (CAGR 2023-2035 de 15.8 %), cette modélisation étant moins prononcée que celle du bitcoin ces dernières années (CAGR 2019-2023 de 22 %).

Le second scénario, conservatif, (en orange sur la Figure 10) repose sur la conservation du taux de croissance observé dans la période 2018-2023 (CAGR de 12,8 %). Ce choix est aussi conservateur puisque le taux de croissance annuel est considéré constant sur l'ensemble de la période, alors qu'il a augmenté depuis 2015 (cf. Annexe 1 et 3 (The Shift Project, 2025a)).

Ces deux courbes présentées ne reflètent pas l'ensemble des trajectoires possibles, mais uniquement la poursuite des dynamiques actuelles, sans réorientation vers une réelle trajectoire de décarbonation

³⁷ Composants spécialisés qui rendent l'entraînement des modèles beaucoup plus rapide, comme les GPU, NPU, TPU, etc. Et on parle de serveurs accélérés pour désigner les serveurs équipés de ce type d'accélérateurs.

³⁸ TDP, Thermal Design Power

du secteur ni disruption dans la stratégie financière des acteurs. La gamme des possibles est en réalité bien plus large, comme en témoignent les différentes modélisations prospectives disponibles :

- Les quatre scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) (Lift-off, Base, High Efficiency, Headwinds) projettent une consommation électrique des centres de données comprise (hors cryptomonnaies) entre 670 et 1265 TWh en 2030 (IEA, 2025a).
- Schneider Electric explore également quatre scénarios (Abundance, Sustainable AI, Energy Crunch, Limits to Growth), avec une consommation projetée pour l'IA seule allant de 510 à 880 TWh en 2030 (Schneider Electric, 2024).
- Le Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) envisage une fourchette comprise entre 6,7 % et 12 % de la consommation électrique américaine attribuable aux centres de données en 2028 (LBNL et al., 2024).
- Deloitte propose deux scénarios prospectifs (Baseline, High Adoption) avec des consommations électriques de 705 et 970 TWh en 2030 (Deloitte, 2024).
- Enfin, DCByte publie également des corridors d'évolution qui montrent la diversité des trajectoires envisageables (DCByte, 2025).

Parmi ces scénarios, plusieurs poursuivent des hypothèses de déploiement rapide, voire généralisé, des technologies les plus intensives en puissance de calcul et en énergie, en particulier dans les cas « Lift-off », « Abundance » ou « High Adoption ». Ce sont ces scénarios que les dynamiques actuelles semblent engendrer. Or, pour préserver la soutenabilité du secteur numérique, l'enjeu est précisément de **s'écarter de ces trajectoires dites « Lift-off » ou « Abundance »**, qui entraîneraient une pression excessive sur les systèmes énergétiques et climatiques.

Compte tenu des délais de déploiement dans le secteur, une part significative de la consommation électrique projetée à horizon 2027-2028 est déjà engagée avec des investissements actés, des infrastructures en cours de construction, et des usages en phase de captation de marché (Figure 11). À ce titre, il est **probable** que les tendances lourdes des trois prochaines années correspondent à ces scénarios tendanciels — ce qui renforce l'urgence à construire des alternatives crédibles et soutenables à moyen terme.

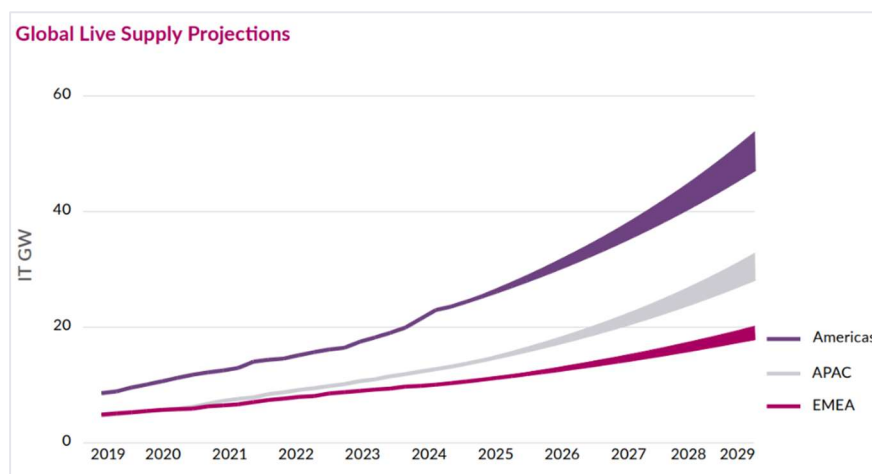


Figure 11 - Projection de puissance IT entrant en service les prochaines années (GW).

Source : (DCByte, 2025)

C. La filière centres de données justifie les infrastructures fossiles

L'ampleur et le rythme de la demande électrique des centres de données exercent une pression croissante sur le secteur de l'énergie.

Dans certains états des États-Unis, cette pression a abouti à un véritable mur énergétique, qui se traduit par une recherche « quoi qu'il en coûte » de nouvelles capacités de production, plutôt que par une incitation à modérer le rythme de déploiement de leur offre³⁹.

Face à ces tensions énergétiques, les grands acteurs du numérique ont d'abord affiché leur volonté de s'approvisionner en électricité bas-carbone dans la poursuite des contrats d'achat PPA⁴⁰. Par exemple, Amazon explore ainsi le déploiement de 0,3 GW de petits réacteurs nucléaires modulaires (SMR) (Data Center Dynamics, 2024b), Microsoft prévoit de permettre la relance de la centrale nucléaire de Three Mile Island précédemment mise à l'arrêt (Le Monde, 2024), Sam Altman, PDG d'OpenAI, finance une start-up de fusion nucléaire (Le Monde, 2024) et Google conduit une expérimentation de géothermie profonde visant une capacité de 0,1 GW (Le Monde, 2025c). Cependant, SMR et géothermie ne pourraient, au mieux, entrer en service qu'à partir de 2030, et demeurent grevés d'incertitudes capacitaires, technologiques et réglementaires (IEA, 2025b).

En attendant, la réponse immédiate à la hausse de la demande énergétique passe par une relance massive des infrastructures fossiles, en particulier au gaz naturel, en raison principalement de leur flexibilité et de leur facilité de déploiement. Par exemple, le centre Colossus de xAI est équipé d'une capacité de 400 MW de générateurs mobiles au gaz naturel (Data Center Dynamics, 2024a; L'usine digitale, 2025c), Meta prévoit la construction de trois centrales à turbines à gaz, totalisant 2,3 GW (The Register, 2024) et les projets de centres de données alimentés au gaz naturel se multiplient, atteignant des capacités à l'échelle du gigawatt (Data Center Dynamics, 2025b). Au total, ce sont 85 installations de production d'électricité à gaz qui sont en développement dans le monde pour les centres de données (Financial Times, 2025). Au moins une initiative intègre une solution partielle comme le captage de CO₂ (DCMag, 2025c). Au total, les réseaux électriques du sud-est des États-Unis prévoient l'ajout de 20 GW de capacités au gaz naturel, ce qui pourrait représenter jusqu'à 80 MtCO₂e d'émissions annuelles sans CCS⁴¹ (Data Center Dynamics, 2025a).

L'extension des pipelines gaziers, tout comme la hausse des investissements et des commandes de turbines à gaz⁴², illustrent une réorientation structurelle de l'amont énergétique, vers une relance de projets fossiles et au service de la montée en charge du numérique (Data Center Dynamics, 2025c; IEA, 2025b).

³⁹ Les gains d'efficacité énergétique accusant en effet déjà un ralentissement depuis quelques années (Figure 9).

⁴⁰ Si ils permettent des calculs comptables théoriques d'émissions carbone, les PPA (Power Purchase Agreement) mobilisés par certains acteurs du numérique consistant à investir dans des projets d'énergies renouvelables sur d'autres territoires que ceux sur lesquels ils sont implantés ne permettent pas d'approvisionner physiquement les sites, et donc ne permettent pas *simultanément* la décarbonation de leur électricité consommée et de celle « produite par lesdites énergies renouvelables pour d'autres clients ».

⁴¹ Carbon Capture and Storage

⁴² Siemens Energy, le fabricant allemand d'équipements énergétiques, a attribué un carnet de commandes record de près de 136 milliards d'euros en août à la demande américaine croissante de turbines à gaz utilisées dans les centres de données (Financial Times, 2025).

Enfin, l'entreprise First Energy a annulé la fermeture programmée de deux centrales à charbon, qu'elle prévoit désormais d'exploiter jusqu'en 2035-2040 (Financial Times, 2024).

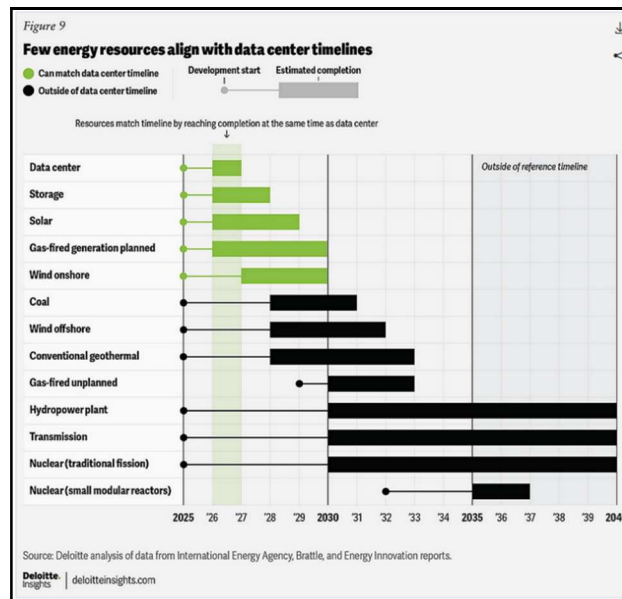


Figure 12 - Evaluation par type de ressources énergétiques de la compatibilité avec les échelles de temps dans la filière centre de données. Source : (Deloitte, 2025)

La Figure 12 met aussi en évidence ce décalage entre la demande croissante et immédiate des centres de données (à 1-2 ans) et les capacités énergétiques disponibles et pouvant répondre à ce rythme : stockage (batteries), solaire, centrales à gaz et éolien terrestre. Finalement, cette nouvelle demande énergétique conduit à préempter les capacités bas-carbone potentiellement déjà prévues pour autre chose à date, ou à déployer des capacités au gaz.

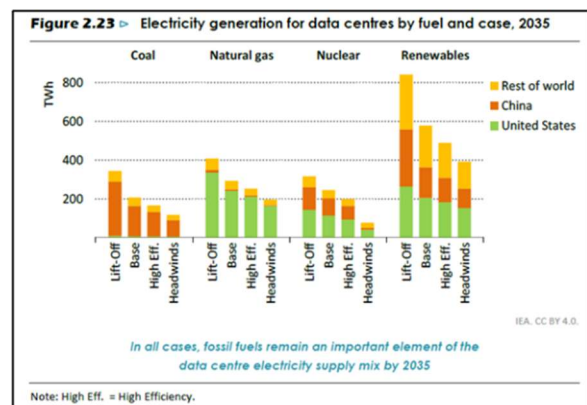
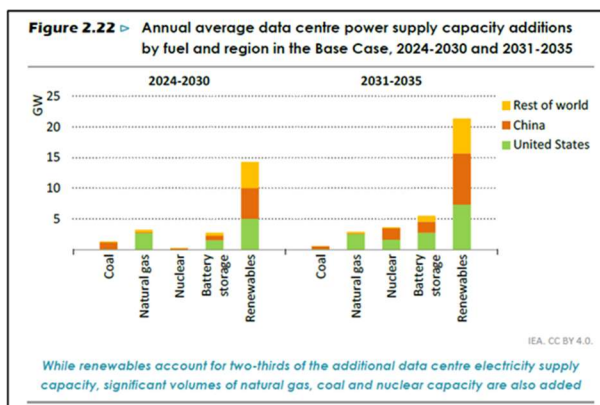


Figure 13 - Ajout annuel moyen de capacités électriques pour l'alimentation des centres de données par source d'énergie sur les périodes 2024-2030 et 2031-2035 (à gauche) et Génération d'électricité pour les centres de données par source d'énergie et par scénario dans les 4 scénarios IEA en 2035 (à droite). Source : (IEA, 2025a)

Selon l'IEA, la dynamique énergétique courante au sein de la filière engendre annuellement l'ajout de nouvelles capacités à hauteur de 3,3 GW de gaz et 1,5 GW de charbon entre 2024 et 2030 (cf. Figure 13, à gauche) (IEA, 2025a). À l'horizon 2030, 19 GW de capacité de production d'électricité à partir du gaz pour les centres de données pourraient mis en service dans les économies avancées, dont 95 % aux États-Unis, avec en Virginie 10 à 15 GW d'ici 2040 (IEA, 2025b).

Visualiser l'importance du mix électrique :

À quoi ressemblerait une traduction en émissions de gaz à effet de serre de la Figure 14 qui est elle en TWh ? Et si le graphique était en MtCO₂e, comment visuellement les barres seraient déformées ?

Pour répondre à cette question, il faut avoir en tête les ordres de grandeur entre les facteurs d'émissions de production d'électricité selon le type d'énergie : autour de [800 ; 1000 gCO₂e/kWh] pour une centrale à charbon, autour de [350 ; 490 gCO₂e/kWh] pour une centrale à gaz tandis que les sources bas-carbone (nucléaire, photovoltaïque, éolien, hydroélectricité, etc.) se situent dans la fourchette [10 ; 60 gCO₂e/kWh], soit 1 à 2 ordres de grandeur en-dessous.

Ainsi, avec ces facteurs d'émissions de l'électricité, dans le scénario « Lift-off », les 800 TWh de renouvelables émettraient à l'usage 20 MtCO₂e, là où les 725 TWh de fossiles émettraient eux 500 MtCO₂e.

Enfin, en étudiant les consommations énergétiques à l'horizon 2035, une répartition géo-énergétique nette se dessine (cf. Figure 13, à droite) : les États-Unis s'appuient sur le gaz, la Chine sur le charbon.

Loin de servir d'incitation à l'efficacité, au développement de produits et services bas-carbone ou à la modération de l'offre, la rareté énergétique est aujourd'hui perçue par le secteur numérique comme une contrainte à contourner (Data Center Frontier, 2025), voire une opportunité pour le développement de son offre, renvoyant aux systèmes énergétiques la responsabilité d'une transition vers la décarbonation qu'il pourrait pourtant contribuer à maîtriser.

D. L'empreinte carbone de la fabrication tout au long de la chaîne de valeur n'est plus à négliger

Pour avoir une vision complète de l'empreinte carbone de la filière, au-delà de la consommation en phase d'usage, il est nécessaire de tenir compte des émissions produites lors de la fabrication des centres de données (béton, etc.) et de leurs composants (serveurs, processeurs, alimentation, etc.).

À l'échelle mondiale, et à date, on estime que pour les centres de données, la répartition de l'empreinte carbone est la suivante : 75 % pour l'utilisation et 25 % pour l'empreinte embarquée, à partir des données de (Schneider Electric, 2023)^{43,44,45,46}.

⁴³ Autrement dit, l'empreinte carbone de la fabrication représenterait l'équivalent d'environ 35 % de l'empreinte carbone de l'utilisation.

⁴⁴ Cf. Annexe 6 (The Shift Project, 2025a) : Cette estimation résulte d'une analyse du scope 3 d'un centre de données hypothétique de 1 MW (1 MW ; taux de charge à 50% ; 6 kW par rack ; PUE de 1,34 ; facteur d'émission de l'électricité de 0,511 kgCO₂e/kWh ; 5 tCO₂e/kW d'IT en empreinte embarquée ; 94 % de serveurs de stockage et 6 % d'équipements réseaux, peuplés à 50 %) présentée dans le rapport "Quantifying Data Center Scope 3 GHG Emissions to Prioritize Reduction Efforts" (Schneider Electric, 2023). Schneider met à disposition un simulateur en ligne pour faire varier ces caractéristiques : <https://www.se.com/ww/en/work/solutions/system/s1/data-center-and-network-systems/trade-off-tools/data-center-lifecycle-co2e-calculator/>. Ce ratio de 35 % est à + 15 ans de durée de vie sur l'indicateur changement climatique. Le bâtiment est bien inclus. La démarche est de partir de l'empreinte carbone du scope 3 d'un centre de données, d'en retrancher les déplacements des employés, les voyages d'affaires, les carburants et les activités liées à l'énergie pour obtenir l'empreinte carbone embarquée du centre de données. Qui est ensuite comparé à son scope 2 en location-based, lui lié à son utilisation.

⁴⁵ Cette répartition peut être comparée avec celle de (Malmodin J. et al., 2023) (p. 9), qui évalue 69 % de l'empreinte carbone pour l'utilisation et 31%.

⁴⁶ Cette répartition peut être comparée à celle de (Boavizta, 2021b) pour l'Europe : 20 % pour la fabrication contre 80 % pour l'utilisation en Europe (sous hypothèse 2017 d'une intensité carbone du mix électrique européen à 420 gCO₂e/kWh).

À noter que cette répartition d'empreinte carbone entre utilisation et embarquée (fabrication, etc.) est un indicateur intégrant l'intensité carbone de l'énergie à l'utilisation. Ceci implique que dans des scénarios avec décarbonation de l'électricité, sans décarbonation de même intensité de la fabrication du matériel, la part de la fabrication devient prépondérante.

Au niveau d'un centre de données⁴⁷, dans son empreinte carbone embarquée, la part IT (serveurs, composants électroniques, etc) est importante relativement à la gestion de l'infrastructure (construction du centre de données, batteries, etc.) : autour de 75 - 80 % (Figure 14).

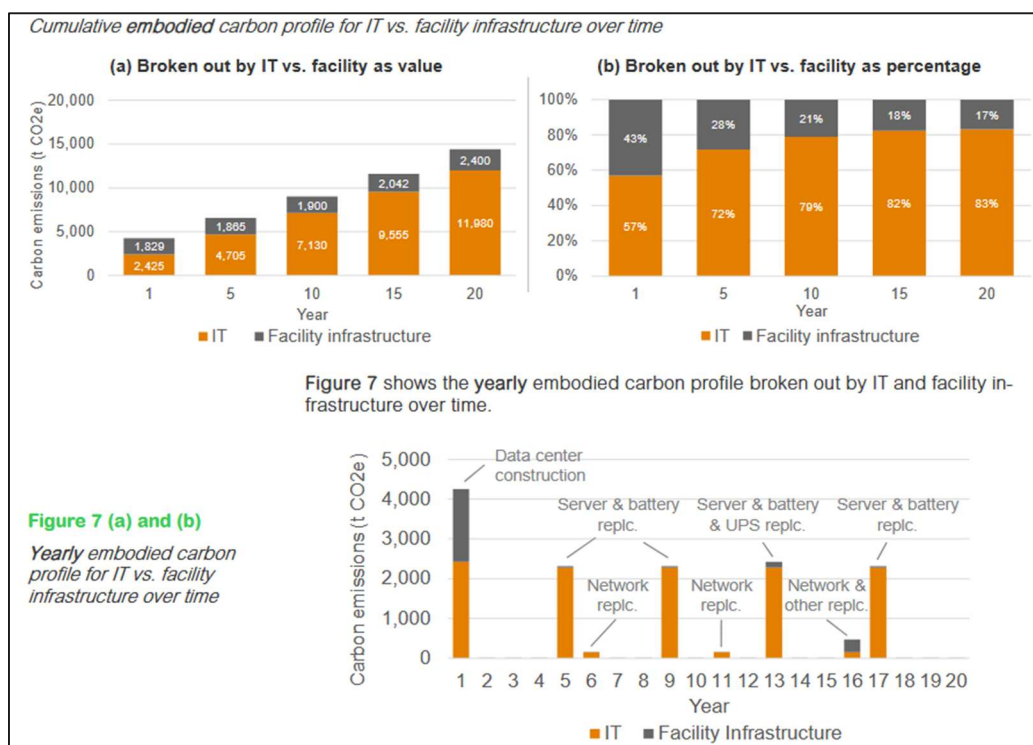


Figure 14 – Dans l'empreinte carbone embarquée d'un centre de données, répartition entre les infrastructures et l'IT : en valeur absolue en cumulé, en proportion, avec décomposition annuelle.

Source : (Schneider Electric, 2023)

Ensuite, au niveau des processeurs, à l'échelle mondiale, à date, et cette fois en regardant l'indicateur énergie, la répartition de la consommation énergétique estimée est la suivante : 80 % pour l'utilisation et 20 % pour la fabrication (Figure 15) (IEA, 2025a) sur la base de (Boavizta, 2021a; Dell, 2019; Garcia Bardon, M., 2021).

Au niveau des serveurs, quelques tentatives d'estimations ont été réalisées (cf. Annexe 6, The Shift Project, 2025a) même si identifier clairement la part des composants électroniques, voire des circuits intégrés, dans l'empreinte carbone de la fabrication des équipements IT d'un centres de données est un exercice périlleux⁴⁸ :

Cette répartition peut être comparée à celle de (Boavizta, 2021b) pour la France : 45 % pour la fabrication contre 55 % pour l'utilisation en Europe (sous hypothèse 2020 d'une intensité carbone du mix électrique européen à 60 gCO₂e/kWh).

Ces répartitions rappellent qu'il s'agit là d'un indicateur intégrant l'intensité carbone de l'électricité, et donc que dans des scénarios intégrant une décarbonation de l'énergie, cet indicateur en dépend.

⁴⁷ Pour le même centre de données type de la note 38 ci-dessus.

⁴⁸ En cause une absence d'esprit scientifique dans les données disponibles contrariant toute tentative de reproductibilité : périmètres confus, méthodologie et base de données de facteurs d'émissions non explicitée, résultats non analysés, pas d'incertitudes, etc.

- Selon le calculateur Boavizta (Boavizta, 2021b)⁴⁹, les composants à forte densité de puces électroniques (RAM, CPU et SSD) peuvent, selon la configuration du serveur, représenter entre 75 % et 95 % de l’empreinte de fabrication sans compter les composants d’IA ;
- À partir des PCF⁵⁰ de serveurs disponibles détaillant *a minima* l’empreinte carbone par composant⁵¹, la partie carte-mère, cartes-filles et SSD constituent entre 70 % à 90 % de l’empreinte carbone de fabrication, toujours sans compter les composants d’IA ;
- À partir du PCF de la carte NVIDIA HGX H100 avec 8 GPU (Nvidia, 2025), et cette fois en incluant les composants d’IA, les parties mémoire et circuits intégrés constitueraient environ 70 % de l’empreinte carbone de fabrication⁵².

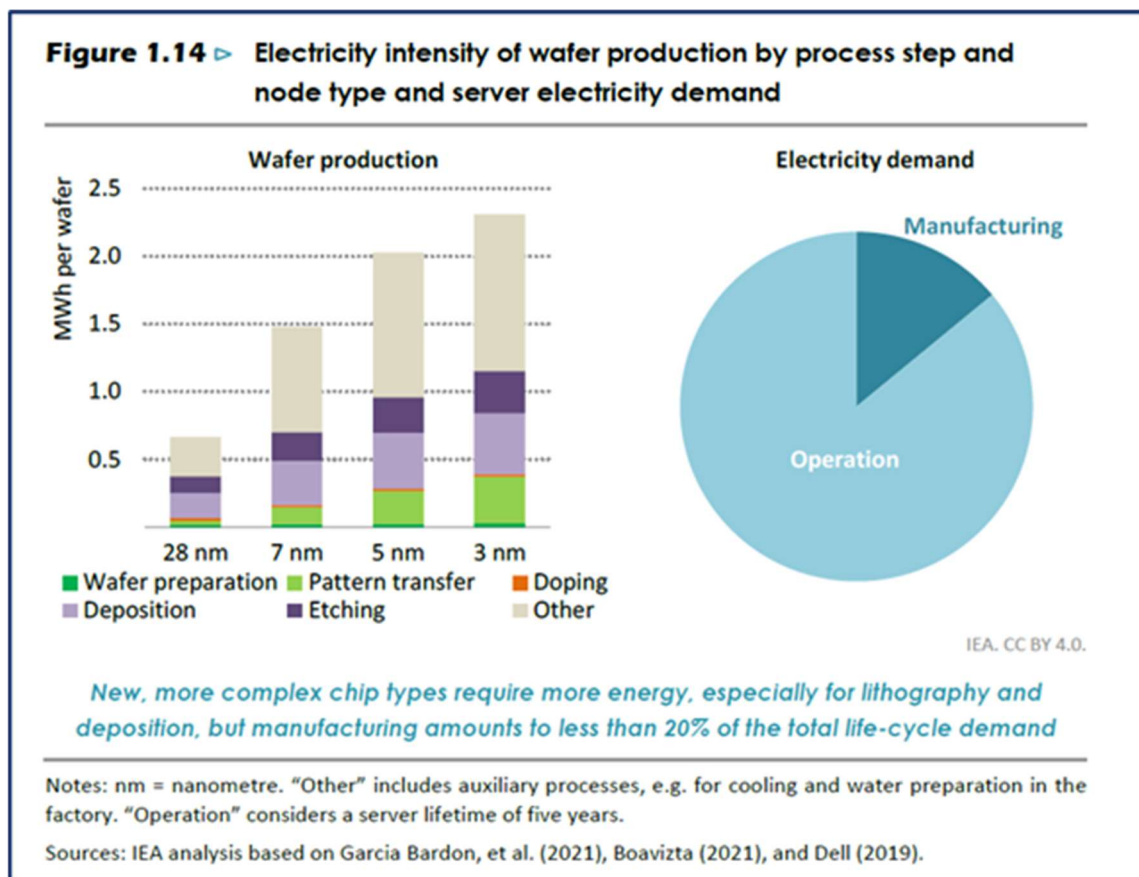


Figure 15 - Energie pour la fabrication des processeurs : proportion et évolution possible.

Source : (IEA, 2025a)

Concernant l'évolution future de l'empreinte carbone embarquée, un centre de données dédié au calcul repose sur des serveurs dont les composants électroniques sont nombreux et hétérogènes : selon l'ADEME, plus de 50 métaux entrent dans la composition des équipements numériques (ADEME, 2024c). Chaque composant mobilisant des procédés de fabrication et des matières premières

⁴⁹ S'appuyant sur une méthodologie publique elle-même basée sur des données de (Agence fédérale allemande pour l'environnement, 2021)

⁵⁰ Product Carbon Footprint

⁵¹ 4 serveurs HPE Proliant (cf. Annexe 6 (The Shift Project, 2025a))

⁵² Comparativement à un serveur, une carte GPU embarque d'importants éléments de refroidissement qui représentent à eux seuls 73 % des 30 % restants de l'empreinte carbone de fabrication. De manière un peu contre-intuitive, ajouter des GPU à un serveur pourrait faire baisser la part relative d'empreinte carbone due aux circuits intégrés.

spécifiques⁵³, ceci multiplie les facteurs susceptibles de faire varier – à la hausse ou à la baisse – leur empreinte carbone embarquée (cf. Table 1 et tableau en fin d'article de Roussilhe G., 2025).

En particulier, la réduction de la taille des nœuds technologiques⁵⁴ entraîne une hausse des émissions de gaz à effet de serre, de consommations d'énergie primaire et d'eau par cm^2 (Figure 15⁵⁵, Figure 16).

Si l'on combinait cela aux projections de demande en wafers⁵⁶, corroborées par la tendance historique de surface de die totale produite, cela dessinerait une trajectoire d'accroissement de l'empreinte carbone liée à la fabrication des infrastructures de calcul ; une autre façon d'évaluer l'augmentation des impacts globaux en valeur absolue de la fabrication des composants électroniques pour l'IA (industriAll Europe, 2025; Roussilhe G., 2025; SemiAnalysis, 2022).

Mais la complexité de la chaîne de valeur et des dynamiques industrielles rend incertaine la projection de cette empreinte future, ce qui serait pourtant un atout pour projeter les tendances à venir sur l'empreinte carbone de la filière centres de données. Celle-ci dépendra notamment de l'intensité carbone des extractions de matières premières, du rythme de décarbonation des chaînes industrielles, ainsi que de l'évolution des spécifications techniques des puces (surface de die, taille des nœuds, densité de transistors, etc.) (cf. Table 1) ?

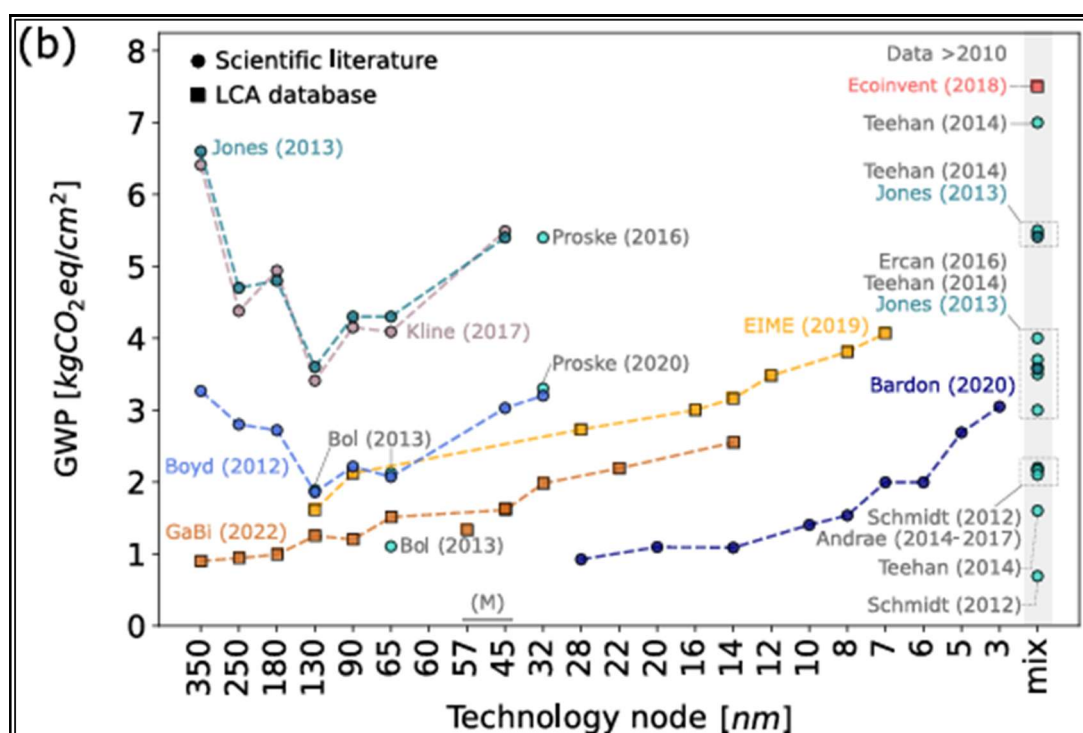


Figure 16 - Evolution de l'empreinte carbone de production d'un circuit imprimé en fonction de la taille des nœuds technologiques, Tendances historiques, Source : (Pirson T., 2022)

⁵³ Dans une étude de 2024, l'ADEME indique la présence de plus de 50 métaux dans les appareils numériques (ADEME, 2024c).

⁵⁴ Un nœud technologique, en nanomètres (nm), désigne une génération de procédé de fabrication des semi-conducteurs. Il est lié à la taille et la densité des transistors.

⁵⁵ Ramenée à la surface de *die* (la surface de *die* est la surface, souvent exprimée en cm^2 , du morceau de plaque de silicium, le *wafer*, gravée et qui constitue l'élément principal d'un circuit intégré ou puce électronique) la tendance des émissions de GES semble croître avec la baisse de la taille des nœuds en dessous de 130 nm (Figure 16).

⁵⁶ Tranche de semi-conducteur (silicium notamment) utilisé en électronique.

Cet état des lieux sur l’empreinte carbone embarquée permet de formuler plusieurs conclusions :

- La distribution entre phase d’usage et fabrication est toujours à recontextualiser en fonction de l’intensité carbone de l’énergie et de sa trajectoire de décarbonation ; à mesure que celle-ci progresse, la fabrication prend un poids croissant.
- Compte-tenu des dynamiques actuelles (réduction taille nœud technologique par ex.) et sans stratégie de décarbonation lisible, une évolution favorable de l’empreinte de fabrication (par flops, par unité de matériel ou par centre de données) demeure incertaine.
- Des stratégies de réduction de l’empreinte carbone de la fabrication sont à mettre en place au niveau des composants électroniques (mémoires, processeurs, accélérateurs d’IA, etc.) puisqu’ils représentent souvent plus de 70 % de l’empreinte carbone embarquée, mais aussi au niveau des centres de données (durée de vie, taux de renouvellement et gestion de parc), voire à l’échelle de la filière (fin de vie, recyclage, etc.).
- Améliorer la qualité des données sur les impacts de fabrication (fiabilité, transparence, reproductibilité, etc.) reste une condition à l’efficacité des stratégies de décarbonation.

Domaine	Facteur	Tendance	Commentaire
Matières premières	Concentration du gisement	Hausse	Plus le gisement est exploité, plus il s’épuise et plus il est nécessaire de mobiliser d’énergie pour extraire la même quantité de métal
Matières premières	Optimisation ou efficacité des procédés d’extraction	Baisse	
Matières premières	Utilisation de matériaux recyclés	Hausse ou baisse	Le recours aux matériaux recyclés est souhaité pour limiter le recours à l’extraction. Cependant, il n’est pas systématique qu’un matériau recyclé est moins carboné qu’un matériau vierge : cela peut dépendre du procédé de recyclage, de la qualité du gisement de matériaux à recycler, etc.
Matières premières	Niveau de pureté	Hausse	Le niveau de pureté souhaité dépend des caractéristiques physiques souhaitées. De manière générale, la quantité d’énergie requise suit le niveau de pureté du matériau.
Procédé de fabrication	Caractéristiques physiques de la puce	Hausse ou baisse	Ruptures technologiques, architectures, densité des transistors, etc.
Procédé de fabrication	Intensité carbone de l’énergie	Baisse	Avec la décarbonation des modes de transport, les émissions associées dans la fabrication des puces électroniques devraient baisser.
Procédé de fabrication	Effets de seuil et d’échelle	Baisse	Ramenée à l’unité produite, l’empreinte carbone de la fabrication décroît avec le nombre d’unités produites.
Procédé d’assemblage	Intensité carbone de l’énergie	Baisse	Un exemple : les composants à assembler pour construire un équipement numérique pouvant provenir de loin, avec la décarbonation des modes de transport, les émissions associées dans la fabrication des puces électroniques devraient baisser. On peut bien sûr aussi évoquer la décarbonation du mix électrique du lieu d’assemblage.
Procédé d’assemblage	Effets de seuil et d’échelle	Baisse	Idem ci-dessus.
Transport	Intensité carbone des modes de transport	Baisse	Avec la décarbonation des modes de transport, les émissions associées dans la fabrication des puces électronique devraient baisser
Transport	Distance parcourue	Hausse ou baisse	Plus les déplacements seront longs et nombreux, plus il faudra d’énergie.

Table 1 - Liste de facteurs à étudier a minima pour évaluer quelle est l’évolution de l’empreinte carbone de la fabrication des centres de données

VI. Les serveurs accélérés et l'IA générative : les moteurs de la filière centres de données

Si les centres de données sont mobilisés pour une **diversité d'usages** (hébergement de sites web, services cloud, vidéo à la demande, jeux en ligne, réseaux sociaux, stockage, traitement de données d'entreprise), à partir de 2015, ils commencent également à être sollicités pour les premiers usages professionnels de l'intelligence artificielle dite « traditionnelle », ou « **trad AI** » (traitement d'image, traduction automatique ou moteurs de recommandation). Puis arrive, fin 2022, l'intelligence artificielle générative (« **IA Gen / Gen AI** ») à usage général, puis progressivement de l'intelligence artificielle agentique (ou « **agentic AI** »).

Cette partie a pour objet l'analyse de la contribution de l'IA et notamment de l'intelligence artificielle générative à l'évolution du taux de croissance de la demande énergétique et des émissions de gaz à effet de serre des centres de données à l'échelle mondiale.

La Figure 17 rassemble plusieurs projections existantes⁵⁷ de l'estimation de la consommation électrique de l'intelligence artificielle⁵⁸ qui, lorsqu'elles sont mises en regard des projections de consommation électrique de l'ensemble des usages de centres de données, traduisent deux éléments notables :

- **Une proportion de l'intelligence artificielle dans l'ensemble des usages des centres de données déjà perceptible en 2025** (de l'ordre de 15 %⁵⁹);
- **Un accroissement majeur de cette proportion en 2030** (de l'ordre de 55 %⁶⁰).

Cette évolution de la part de l'IA dans l'ensemble des usages des centres de données (de 15 % à 55 % en 5 ans) mais aussi son importance en valeur absolue (880 TWh pour l'IA en 2030 (Schneider Electric, 2024) conduit à s'intéresser aux composantes dimensionnantes de l'impact énergétique de l'IA, à travers deux prismes de lectures que sont « l'effet d'offre et l'effet d'usage » (cf. Figure 1):

- **Estimation de l'offre de calcul disponible** : prisme partant de la capacité de calcul offerte par la totalité des accélérateurs d'IA en stock pour évaluer les impacts de l'intelligence artificielle⁶¹ : dans la partie « Estimation des tendances énergie-carbone à partir des dynamiques en capacité de calcul et serveurs accélérés » ;
- **Estimation de la demande en usages d'intelligence artificielle** : prisme partant des volumes de modèles d'entraînements et d'inférences pour évaluer les impacts⁶² : dans la partie B « Scénarios prospectifs à partir des usages de l'intelligence artificielle ».

⁵⁷ Projections issues de publications académiques ou non, dont les méthodologies ont des limites discutées plus loin dans rapport.

⁵⁸ Il s'agit ici uniquement de la consommation associée à l'IA, et non de la totalité des centres de données et de leurs usages.

⁵⁹ La consommation due aux usages IA en 2025 est estimée par (Schneider Electric, 2024) à 100 TWh en 2025, et la consommation totale des centres de données à 500 TWh par l'IEA dans son scénario « Base » (IEA, 2025a) hors ~150 TWh pour les cryptomonnaies

⁶⁰ La consommation due aux usages de l'IA en 2030 est estimée à 880 TWh par (Schneider Electric, 2024) dans son scénario « Abundance », et la consommation totale des centres de données à 1 260 TWh par l'IEA dans son scénario « Lift-off » (IEA, 2025a) à laquelle il faut ajouter environ 300 TWh pour les cryptomonnaies.

⁶¹ Dans cette approche réside un effet engendrant une sous-estimation : certaines tâches d'inférence peuvent ne pas être réalisées sur des serveurs accélérés, en l'étant par d'autres types de serveurs, des ordinateurs ou des smartphones directement. Un effet engendrant une surestimation existe également : les serveurs accélérés sont aussi utiles pour du calcul scientifique haute performance et pas seulement pour de l'intelligence artificielle.

⁶² C'est l'approche développée par (Schneider Electric, 2024) pour développer ses différents scénarios, différenciant au passage les différentes applications d'intelligence artificielle.

L'approche par l'offre de calcul permet d'investiguer **les serveurs accélérés : le facteur identifié par l'IEA sur son scénario « Base » comme étant à l'origine de 50 % de la hausse de la consommation électrique sur 2025-2030** (Figure 18). L'IEA met aussi en avant l'impact ce facteur dans la différence entre les scénarisations « Base » et « Lift-off ».

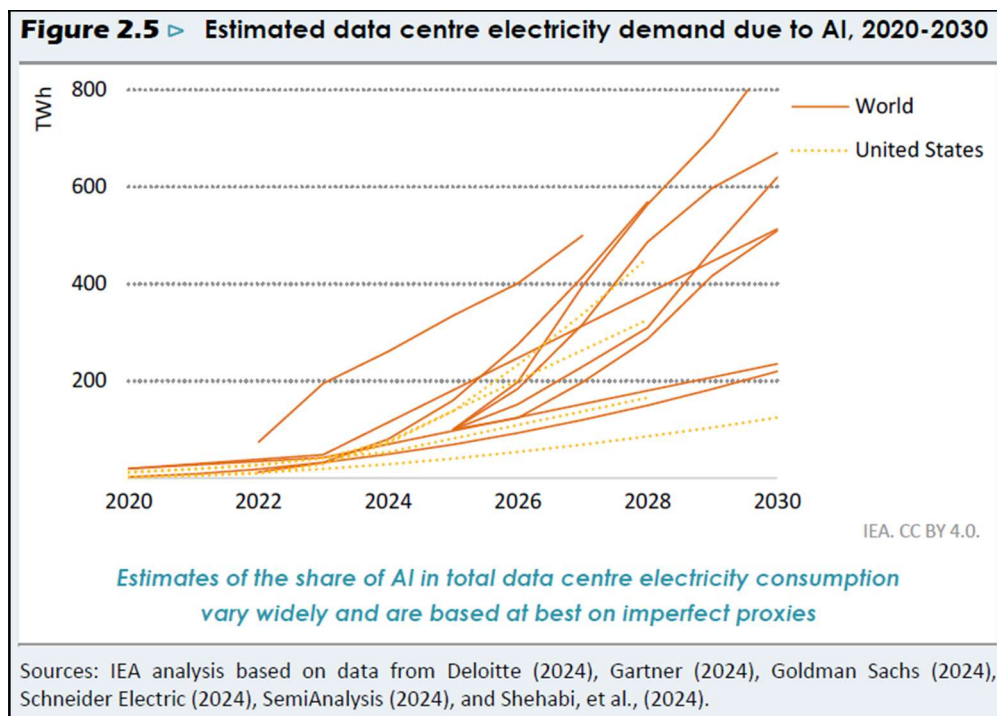


Figure 17 - Estimations de la demande de consommation électrique mondiale des centres de données par l'IA.
Source : (IEA, 2025a) à partir de (Deloitte, 2024; Goldman Sachs, 2024; LBNL et al., 2024; Schneider Electric, 2024)

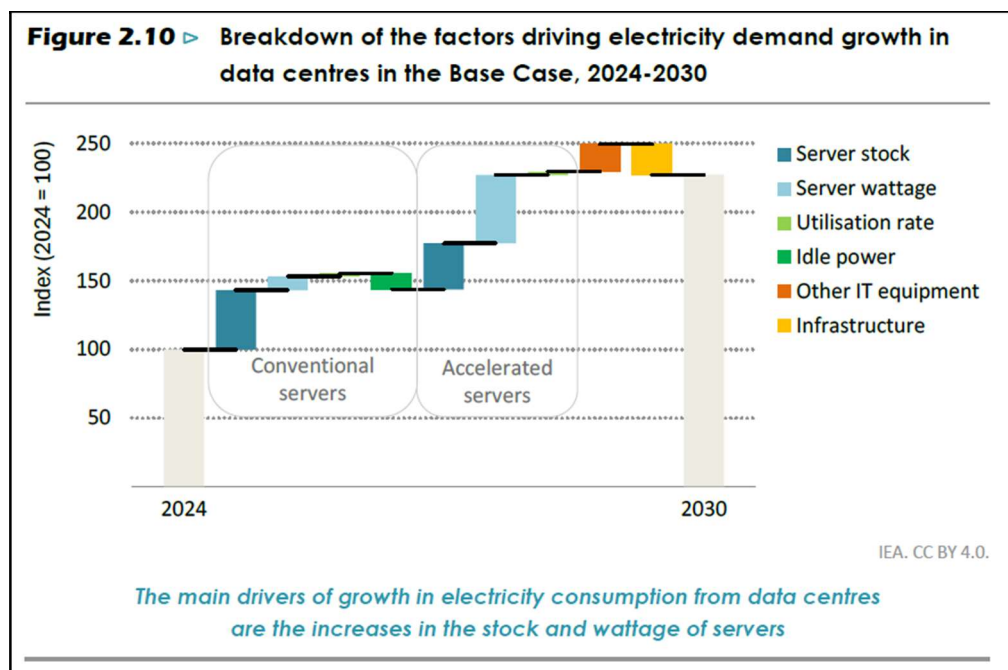


Figure 18 - Facteurs à l'origine de la demande d'électricité des centres de données mondiale (scénario "Base").
Source : (IEA, 2025a)

A. Estimation des tendances énergie-carbone à partir des dynamiques en capacité de calcul et serveurs accélérés

Avec une approche remontante partant de l'offre d'infrastructure, à savoir la quantité d'accélérateurs d'IA⁶³ en stock et l'évolution probable de leurs caractéristiques techniques, nous avons réalisé une projection à l'horizon 2030 menant à :

- **Une consommation électrique de 774 TWh** : comparée aux 1480 TWh pour l'ensemble des centres de données (Figure 10)⁶⁴, elle en représenterait donc 49 %.
- **Des émissions de gaz à effet de serre de 255 MtCO₂e** : comparées aux 600 MtCO₂e pour l'ensemble des centres de données (Figure 2), elles en représenteraient donc 43 %⁶⁵.

Cette approche, décrite de manière détaillée en annexe 6 (The Shift Project, 2025a), est fortement sensible à :

- La variable décrivant le nombre d'accélérateurs d'IA en 2025 et son évolution pour 2030, obtenue en prolongeant les tendances observées sur les 5 dernières années en termes de puissance de calcul totale disponible pour Nvidia : 9 millions d'accélérateurs d'IA en 2025 (Epoch AI, 2025), 61 millions en 2030 (notre estimation, cf. Annexe 7 (The Shift Project, 2025a));
- Les tendances de performance énergétique des accélérateurs d'IA (Epoch AI, 2024).

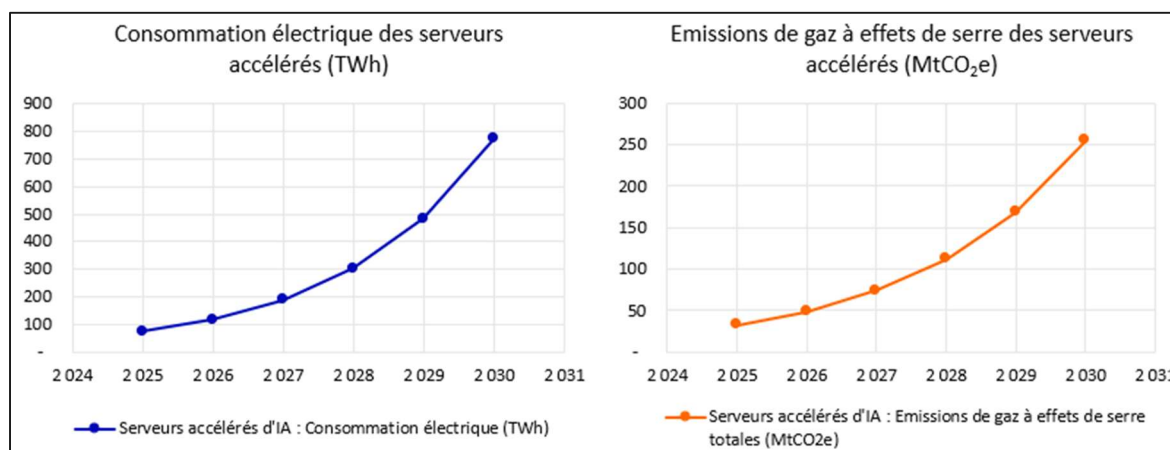


Figure 19 - Consommation électrique mondiale et émissions de gaz à effet de serre mondiales pour l'ensemble des serveurs accélérés (TWh et MtCO₂e). Source : (The Shift Project, 2025a)

Sont ainsi prises en considération les améliorations technologiques, mais ne sont pas considérés de possibles problèmes d'approvisionnement sur les accélérateurs d'IA, sujet qui semble néanmoins

⁶³ Composants spécialisés qui rendent l'entraînement des modèles beaucoup plus rapide, comme les GPU, NPU, TPU, etc. Et on parle de serveurs accélérés pour désigner les serveurs équipés de ce type d'accélérateurs.

⁶⁴ Dans le cas du scénario exploratoire d'un déploiement indifférencié de l'offre de calcul et de son adoption généralisée

⁶⁵ A ce stade, il apparaît que le ratio empreinte carbone fabrication / empreinte carbone usage soit dans ce calcul ~6 % inférieur aux ordres de grandeur de ~25 – 35 % (cf. « L'empreinte carbone de la fabrication tout au long de la chaîne de valeur n'est plus à négliger »). Dans ce calcul-ci, la part infrastructurelle des centres de données par rapport aux serveurs accélérés n'est pas prise en compte (construction par ex.), ce qui explique une partie de l'écart. Une autre partie pourrait être expliquée par l'électro-intensivité de l'activité et la rentabilité matérielle importante des serveurs accélérés (dans le calcul taux d'utilisation 67%, durée de vie 6 ans par ex). Ce point méritera à l'avenir des investigations plus profondes. En l'état, ce chiffre est à manier avec précaution compte-tenu de son périmètre.

important au regard des difficultés de production de TSMC, fournisseur principal de Nvidia et Google pour les GPU et TPU d'IA (de Vries-Gao A., 2025).

Ainsi les grands éléments dimensionnant l'impact de l'IA à travers le prisme des serveurs accélérés sont :

- Le rythme d'introduction de nouvelles générations d'accélérateurs d'IA,
- Le rythme de renouvellement du parc d'accélérateurs d'IA,
- La durée de vie d'un accélérateur d'IA,
- L'amélioration de la performance de calcul à chaque génération d'accélérateurs d'IA,
- L'amélioration de l'efficacité énergétique à chaque génération d'accélérateurs d'IA,
- Le taux d'utilisation effectif des d'accélérateurs d'IA (que l'on peut imaginer différents entre une utilisation en phase d'entraînement ou d'inférence, destinés à un usage privé pour les concepteurs de services d'IA ou en mise à disposition chez un cloud public),
- La performance environnementale des centres de données d'IA, ainsi que leur localisation et l'intensité carbone de l'électricité consommée.

B. Scénarios prospectifs à partir des usages de l'intelligence artificielle

Dans son rapport de 2024 « Artificial Intelligence and Electricity : A System Dynamics Approach », Schneider Electric propose une autre approche de l'estimation de la consommation énergétique du système mondial d'IA. Cette modélisation systémique est elle aussi en approche bottom-up, mais prend comme variable d'entrée les usages attendus de d'IA (le nombre d'inférences et le nombre de modèles entraînés par année), et tente de convertir ses besoins d'usages en infrastructures d'accélérateurs nécessaires pour y répondre.

Aussi, les deux approches (celle-ci, développée par Schneider Electric, et la méthode par l'offre construite dans le cadre de ce rapport par The Shift Project) peuvent se comparer sur un périmètre équivalent :

- L'approche par l'offre questionne les impacts générés si toute l'infrastructure disponible était utilisée ;
- L'approche par l'usage questionne les impacts générés si les usages attendus se matérialisent entièrement en nouvelles infrastructures.

Schneider Electric propose dans son approche quatre scénarios d'évolution de la consommation énergétique pour 2030 et 2035 (Schneider Electric, 2024) :

- Scénario « Sustainable AI » : une croissance mesurée de l'IA, où les progrès technologiques sont équilibrés avec la gestion des ressources énergétiques, avec une installation des centres de données d'IA sur des systèmes énergétiques renouvelables ;
- Scénario « Limits To Growth » : le développement de l'IA est contraint par des limites énergétiques et de demande. La disponibilité de l'énergie, la capacité de production d'accélérateurs d'IA, le tarissement des données d'entraînement, les coûts et le manque de retour sur investissement, entraînent une croissance plus lente et plus contrôlée.

- Scénario « Abundance Without Boundaries » : croissance forte et sans entrave de l'IA, où les améliorations d'efficacité entraînent par effet rebond une augmentation des usages et donc de la consommation énergétique globale.
- Scénario « Energy Crunch » : expansion trop rapide de l'IA qui dépasse les capacités énergétiques disponibles, entraînant des déséquilibres et des pénuries locales et une crise énergétique plus large, et nécessitant des interventions réglementaires et une meilleure planification énergétique.

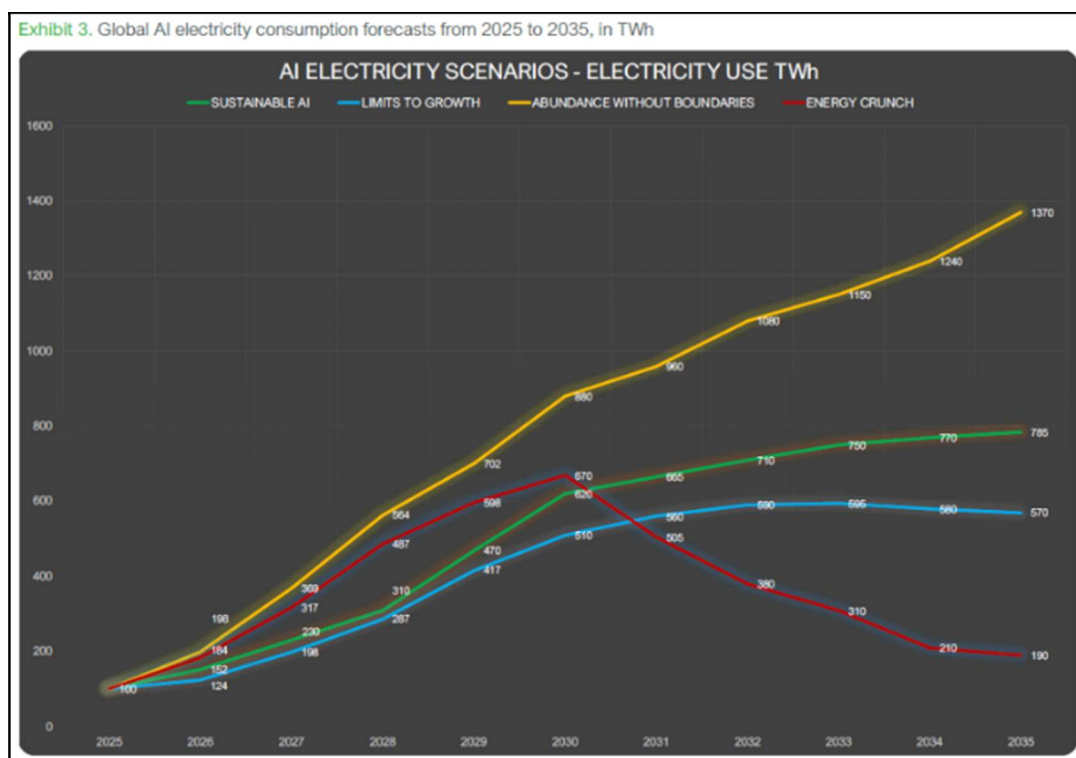


Figure 20 - Consommation électrique mondiale pour les usages IA (TWh) pour 4 scénarios prospectifs : "Sustainable AI", "Limits to growth", "Abundance without boundaries", "Energy crunch".

Source : (Schneider Electric, 2024)

En prenant les scénarios « Sustainable AI » et « Abundance Without Boundaries » comme éléments de référence :

- En 2025, la consommation électrique de l'IA représente 100 TWh (Figure 20), comparable aux 77 TWh de notre estimation (Figure 19),
- En 2030, la consommation électrique représente entre 620 TWh et 880 TWh (Figure 20), encadrant les 774 TWh de notre estimation (Figure 19). Comparée aux 1480 TWh⁶⁶ pour l'ensemble des centres de données, elle en représenterait donc de 40 à 60 %.

⁶⁶ Pour l'ensemble des centres de données (Figure 10) dans le cas du scénario exploratoire d'un déploiement indifférencié de l'offre de calcul et de son adoption généralisée.



Figure 21 - Consommation électrique par usages d'IA ("Trad AI" vs "Gen AI") et par phase (entraînement et inférence) (TWh). Source : (Schneider Electric, 2024)

Cette analyse distingue la consommation énergétique liée à l'IA traditionnelle et à l'IA générative : alors que la consommation relative à l'IA traditionnelle reste globalement stable entre 2025 et 2030, la consommation relative à l'entraînement et l'inférence de l'IA générative présentent chacune une augmentation d'un facteur 10 et sont donc responsables en quasi-totalité de l'augmentation de la consommation énergétique de l'IA.

Et si, en 2025, 38 % de la consommation d'électricité de l'IA concerne la « TradAI », elle n'en représente plus que 6 % en 2030.

À l'inverse, en 2025, 62 % de la consommation d'électricité de l'IA concerne la « GenAI », et cela passe à 94 % en 2030, dont 47 points dus à la phase d'inférence.

C. La dynamique dans la filière centres de données est désormais largement tirée par l'IA générative

Les différentes approches permettent de confirmer plusieurs conclusions essentielles :

- La consommation énergétique des centres de données accuse une augmentation particulièrement rapide et tirée par l'IA (Figure 20) ;
- Dans les usages IA, c'est tout particulièrement l'IA générative qui est le facteur dimensionnant de l'augmentation de la demande énergétique des années à venir (Figure 21) ;

- Entre 2025 et 2030, dans les scénarios « lift-off », « abundance » et en poursuite tendancielle des dynamiques de puissance de calcul, au moins 700 TWh seraient ajoutés au niveau monde⁶⁷.

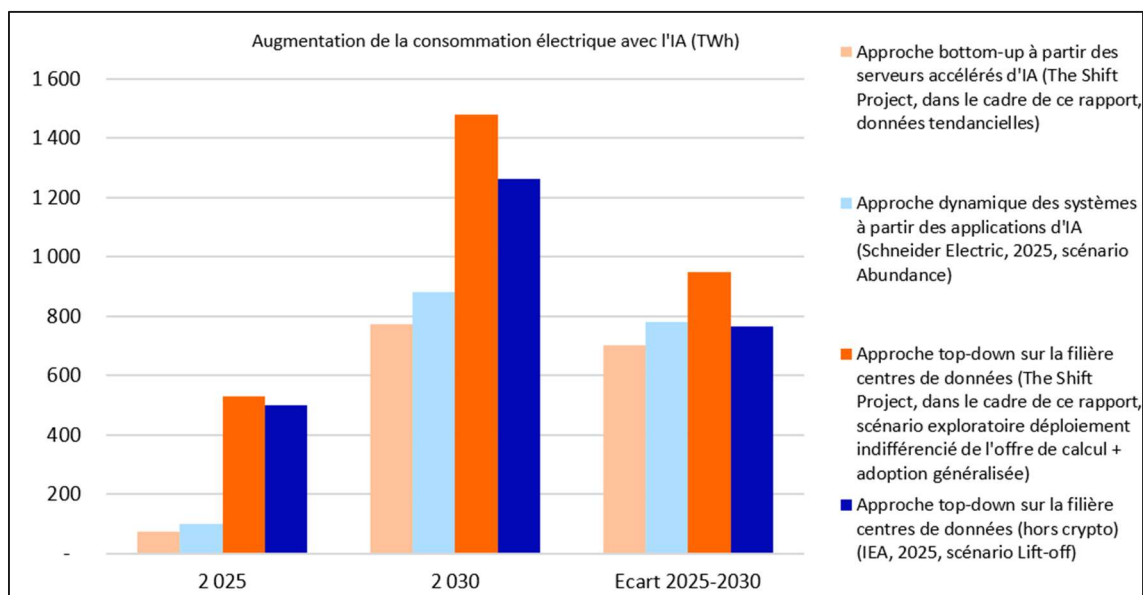


Figure 22 - Consommation électrique et écart entre 2025-2030 (TWh). Source : (IEA, 2025a; Schneider Electric, 2024; The Shift Project, 2025b)

VII. Au-delà des centres de données : premiers signaux sur les terminaux et les réseaux ?

Les centres de données ne sont pas le seul tiers du système numérique concerné par les conséquences de l'intelligence artificielle : les deux autres tiers le sont aussi mais de façon moins directe et, pour l'instant, moins quantifiable.

Décrire les impacts de l'IA sur les terminaux et réseaux peut se faire en adoptant une approche « conséquentielle » : quels nouveaux dimensionnements et nouvelles caractéristiques techniques des systèmes numériques vont être engendrés et motivés par le déploiement des services d'IA ? Cette approche présente l'intérêt de questionner le sujet sous l'angle des déploiements d'applications, services et usages (l'effet d'usage), tout en les liant aux projections infrastructurelles qui sont censées les permettre (l'effet d'offre) (cf. Figure 1).

De la même manière que sont étudiés, dans ces travaux, les effets du déploiement de l'IA sur la répartition de la capacité de calcul (edge, centralisée) ou sur le dimensionnement macroscopique des centres de données, **les approches « conséquentielles » permettent de faire émerger et d'éclairer les effets possibles sur les capacités des terminaux ou les spécifications des réseaux appelées par l'IA à moyen et long terme.**

⁶⁷ Sur la figure 23, seule l'approche top-down sur la filière centres de données (Figure 11) donne un résultat autour de 900 TWh : c'est le seul scénario intégrant aussi la poursuite d'un déploiement tendanciel de cryptomonnaies (cf. « La dynamique des centres de données »).

A. Quels effets induits par l'IA sur les terminaux ?

Les terminaux étant les outils privilégiés pour les interactions humaines avec le numérique, ils participent pleinement de l'effet d'offre.

Le fait de proposer des services d'IA locaux, embarqués et déconnectés⁶⁸, et davantage de capacités locales pourrait accélérer l'**obsolescence des terminaux** (marketing, technologique, psychologique etc.)⁶⁹ et leur **renouvellement**, neutralisant les tentatives d'allongement de leur durée de vie⁷⁰. L'intensification technologique (capacités, complexité) de certains terminaux pourrait également **accroître leur empreinte carbone de fabrication**, compromettant les efforts de **gains d'efficacité énergétique (en phase d'usage) et des procédés**.

L'effet d'usage permet, lui, de mettre en évidence des **effets indirects** (l'augmentation du nombre d'inférences une fois l'interface plus accessible par exemple) et de **verrouillage** (l'instauration d'une dépendance des usages aux technologies basées sur l'IA une fois mises en place, et une complexité à s'en défaire une fois les solutions IA déployées sur des usages essentiels d'une organisation ou de la société).

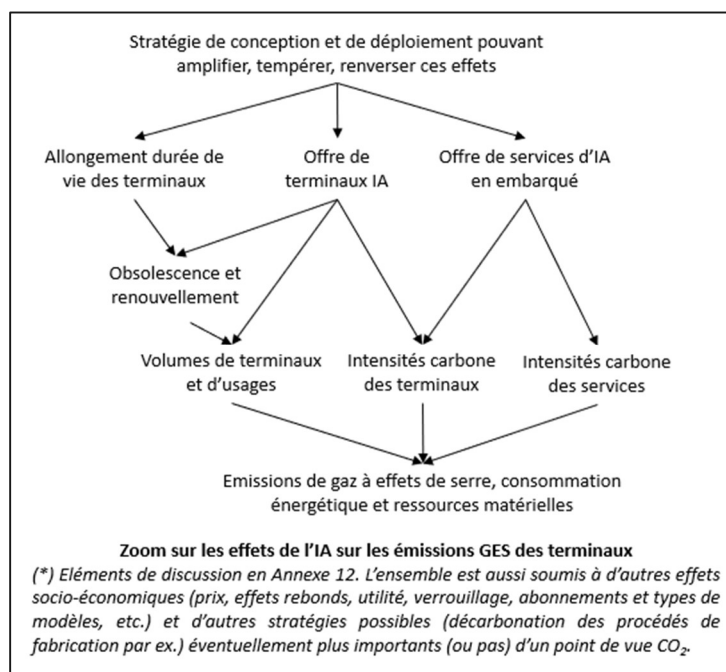


Figure 23 - Représentation simplifiée des différents effets et externalités de l'IA sur les terminaux. (Cf. Annexe 12). Source : (The Shift Project, 2025b)

Avec le temps, les volumes de production de terminaux équipés pour l'IA pourraient augmenter, ce qui pourrait amener à une baisse des prix et donc à une accélération de la demande puis des usages de l'IA. Cette boucle de rétroaction positive, accélérée par une grande disponibilité de services d'IA

⁶⁸ Même si à date, la plupart des services d'IA sont déportés sur centres de données.

⁶⁹ Question similaire à celle de la 5G. A date, en France, parmi les 83,8 millions de cartes SIM en service, 24,3 millions sont actives sur les réseaux 5G (Arcep, Arcom, 2025).

⁷⁰ Ce constat ne vaut pas pour une analyse comparative entre calcul déporté vs embarqué. Une telle analyse demanderait une comparaison carbone propre et potentiellement la considération d'autres externalités comme le fait que l'embarqué permet aussi de viser de l'efficacité tout en s'affranchissant de la dépendance aux services cloud, dépendance à 264 milliards d'euros annuels pour l'UE (même si d'autres stratégies sont possibles pour alléger cette facture de 264 milliards) (Asterès & Cigref, 2025).

gratuits ou abordables, doit pouvoir être identifiée si on souhaite en maîtriser la tendance et ses conséquences énergétiques et climatiques, même si un rééquilibrage de la tendance par les prix pourrait découler d'une stratégie de monétarisation des services et des équipements (une fois le marché captif). Sans changement de paradigme à court-terme, certains besoins d'IA risquent d'être établis, un certain marché captif, rendant une réduction des usages à terme plus coûteuse.

Pour une organisation (entreprise, DSI, laboratoire, état, etc.), piloter ces impacts implique la création d'indicateurs de quantification et de suivi des effets d'obsolescence, des offres et des demandes en puissance de calcul de manière à pouvoir **gérer un effet de parc**, i.e. **concilier des stratégies *a priori* opposées d'allongement de vie des terminaux et déploiements à grande échelle de services demandant toujours plus de capacités de calcul**.

B. Quels effets induits par l'IA sur les réseaux ?

L'analyse et l'étude prospective de l'évolution du trafic des réseaux montre que la tendance actuelle à la hausse due au streaming vidéo (+30 % par an de 2020 à 2024 (Ericsson, 2025)) se poursuivrait pour atteindre, en 2033, un volume multiplié par un facteur compris entre 5 et 9 par rapport à 2023 (Nokia, 2024) (cf. Annexe 13 (The Shift Project, 2025a)). Une approche consistant à séparer trafic IA direct et trafic IA indirect semble montrer que le pari est fait sur le **trafic IA indirect associé à la création de contenu hyper-personnalisé à grande échelle** (cf. Figure 24) (Ericsson, 2024; Nokia, 2024).

Des nuances doivent cependant être apportées : ces études sont produites par des acteurs dont les intérêts commerciaux sont liés à l'augmentation du trafic, et elles ne tiennent compte ni des adaptations et améliorations qui pourraient arriver dans le futur, ni des évolutions des usages.

En plus, l'Arcep identifie aussi que « l'apprentissage de modèles d'IA requiert des interconnexions à très large bande passante et à faible latence entre centres de données, ce qui fait du réseau un facteur déterminant de performance » (Arcep, 2025).

Nous ne pouvons à ce stade qu'appeler à ce qu'un certain nombre de sujets soient abordés de manière plus approfondie :

- Aujourd'hui, le trafic (direct ou indirect) lié à l'IA nécessite un suivi appuyé sur des données publiques et accessibles ;
- Les effets indirects des algorithmes de recommandation (et donc de l'IA) sur le trafic et les réseaux ont besoin d'être documentés ;
- L'IA et le numérique dans des cas d'application très décentralisés par exemple pourraient-ils (ou pas) induire un déploiement des réseaux amplifié ?

Dans les multiples applications liées à l'IA, plusieurs pourraient solliciter les réseaux, et plus particulièrement les réseaux mobiles, d'une manière dimensionnante :

- en couverture géographique (besoins de connectivité pour des actionneurs autonomes en zone rurale par exemple) ;
- en latence (besoins de niveaux de réactivité élevés sur des applications de mobilité par exemple) ;

- en trafic montant⁷¹ (envoi de trafic vers des services IA accru).

Documenter les effets de ces propositions de services devra être fait systématiquement, pour chaque cas d'usage, de manière exhaustive et systémique, afin de permettre la compréhension et l'anticipation de leurs effets sur les infrastructures.

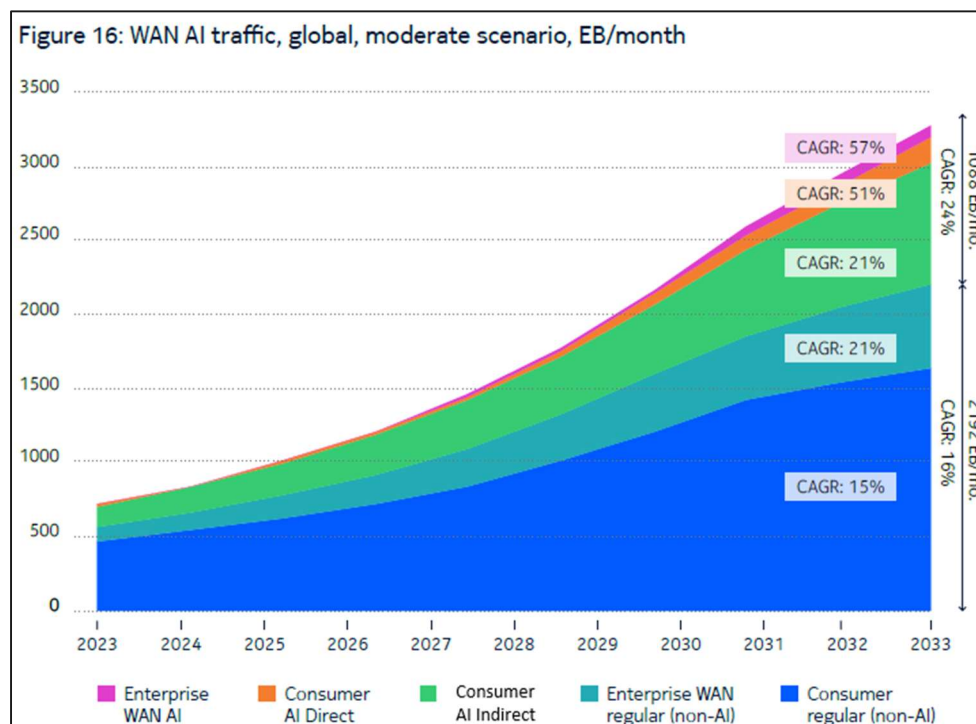
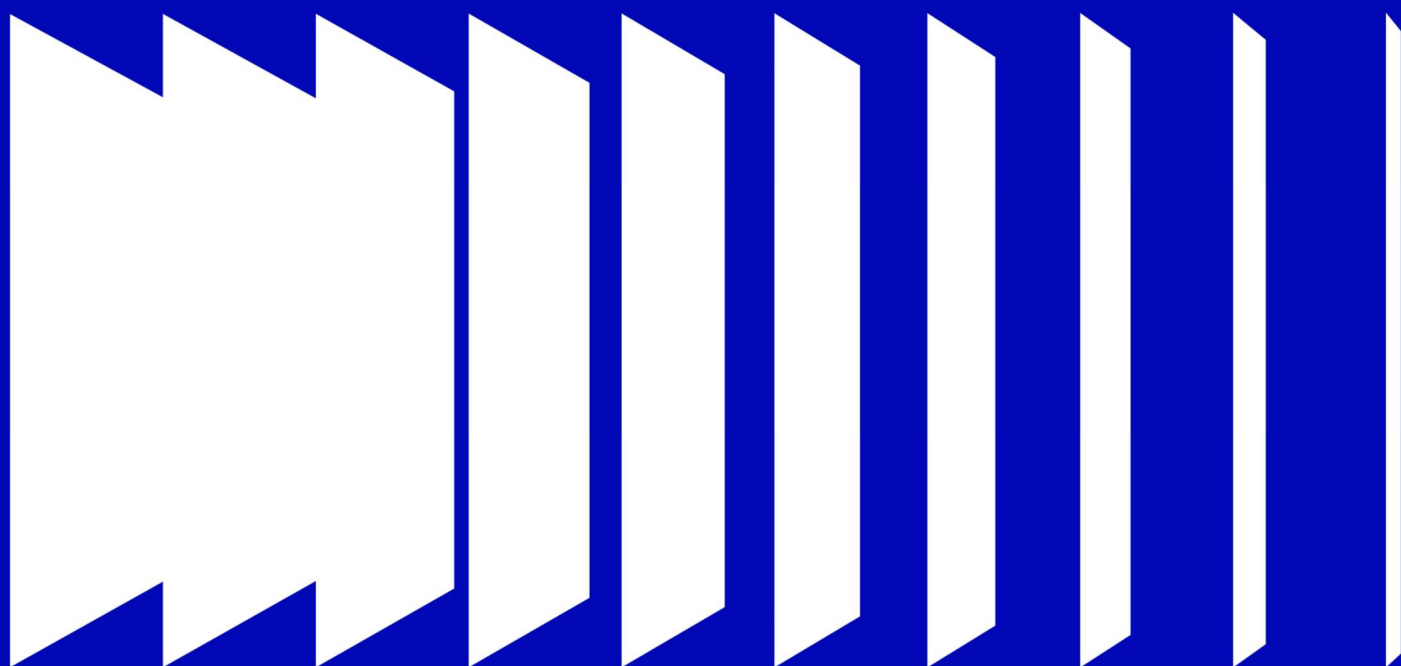


Figure 24 - Projection de trafic internet à 2033 par Nokia dans son scénario « modéré » avec décomposition entre trafic IA direct (trafic directement attribuable à un produit ou un service utilisé et explicitement associé à l'IA) et trafic IA indirect (le trafic induit par l'utilisation de produits ou services d'IA). Source : (Nokia, 2024)

⁷¹ Là où aujourd'hui l'architecture des réseaux, principalement mobile, est adaptée à plus de trafic descendant que montant.

Chapitre 2

**Trajectoires
énergétiques des
centres de données
en France et en
Europe : piloter ou
subir ?**



Si le chapitre précédent décrit des dynamiques mondiales à l'œuvre dans la filière des centres de données et en expose les conséquences climatiques, **ce chapitre instruit leurs implications concrètes pour la France et l'Europe tant sur le plan climatique qu'énergétique.**

Le recours des Etats-Unis au gaz pour l'alimentation électrique de ses centres de données (cf. « La filière centres de données justifie les infrastructures fossiles ») ainsi que le cas de l'Irlande par lequel nous commençons cette partie illustrent la **pression croissante exercée** par le numérique - et l'intelligence artificielle en particulier - **sur les systèmes électriques et la transition énergétique.** Disposer d'une compréhension des niveaux actuels et futurs de consommation du numérique et des centres de données en particulier sera une condition préalable pour penser et réaliser une planification énergétique cohérente avec les objectifs climatiques et *in fine* garantir le succès de la transition énergétique.

VIII..... Les centres de données en Europe : des situations actuelles différenciées mais une dynamique commune

L'échelle européenne est intéressante pour observer à la fois ce qui se passe dans d'autres pays notamment l'adéquation entre les différentes politiques énergétiques (fiscales, commerciales, industrielles, numériques, climatiques, énergétiques, etc.) mais aussi pour encadrer les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre à son échelle.

A. Le cas irlandais illustre la pression qu'exercent les centres de données sur les systèmes électriques et la transition énergétique

L'Irlande est un pays qui s'est positionné comme l'un des leaders européens du secteur numérique avec des politiques très volontaristes (notamment fiscales) pour attirer les investissements. Des problématiques majeures émergent depuis quelques années concernant le dimensionnement des infrastructures électriques afin de soutenir la croissance du déploiement des centres de données tout en restant en maîtrise de la trajectoire carbone du pays et de l'équilibre offre - demande du réseau.

Si l'on exclut les centres de données, la demande en électricité en Irlande est restée relativement stable ces dernières années. En les intégrant, la demande a augmenté de 24,7 % entre 2012 et 2022 (en orange, Figure 25).

Selon l'autorité nationale irlandaise chargée de l'énergie (SEAI), les centres de données consomment déjà plus de 20 % de l'électricité disponible, dépassant la consommation électrique des zones résidentielles urbaines ; et en 8 ans, la consommation des centres de données a rattrapé la consommation industrielle (Central Statistics Office (CSO), 2024; The Journal, 2024).

Certaines projections imaginent que la filière centres de données atteindra autour de 30 % de la consommation globale du pays en 2028, et qu'elle pourrait même être la plus consommatrice en électricité selon certains scénarios, dépassant les secteurs industriels et des services d'ici quelques années (IEA, 2024a; Prof. Hannah Daly, University College Cork, 2024).

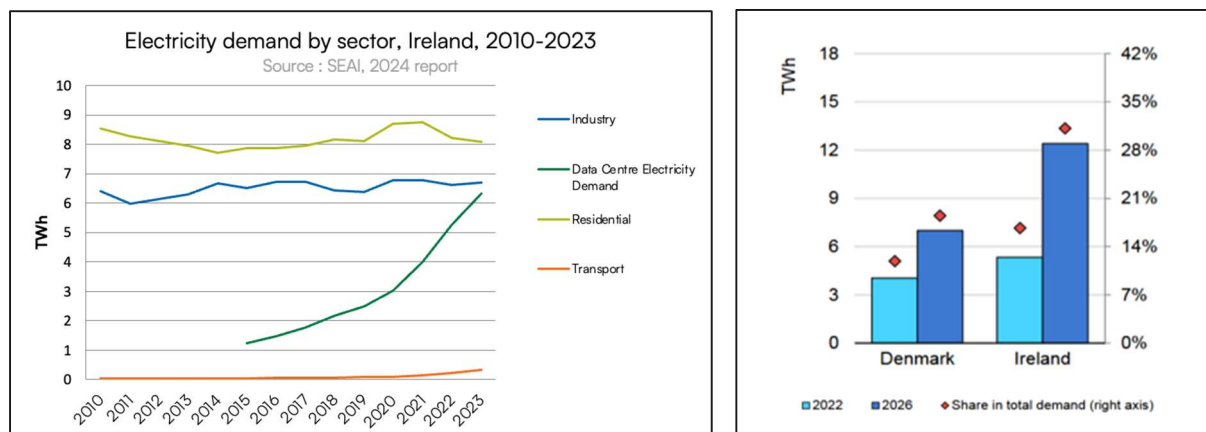


Figure 25 - Demande d'électricité par secteur entre 1990 et 2023 en Irlande (à gauche).
Source : (SEAI, 2024) et estimation de la consommation d'électricité des centres de données et de sa part dans la demande totale d'électricité en Irlande. Source : (IEA, 2024a)

Le développement des capacités électriques bas-carbone en Irlande, initialement planifié pour assurer l'évolution du mix énergétique global, a été pensé dans un contexte de croissance modérée de la demande électrique pour les centres de données. En pratique, la planification s'est avérée insuffisante pour absorber avec de l'électricité bas-carbone la croissance des capacités installées et de leurs consommations électriques.

Ces tensions d'accès à l'énergie ont constitué un goulot d'étranglement pour le développement de nouveaux projets et incité les autorités à renforcer les critères d'octroi des autorisations pour de nouveaux centres de données. En 2021, EirGrid, l'opérateur national du réseau électrique, a ainsi annoncé *de facto* un moratoire sur les nouvelles demandes d'implantation jusqu'en 2028 pour la région de Dublin où se concentre la majorité des centres de données (Data Center Dynamics, 2022). En 2024, le conseil du district de Dublin Sud a mis en avant « la capacité insuffisante du réseau électrique et l'absence d'énergie renouvelable significative sur le site pour alimenter les datacenters » refusant ainsi un projet sur son territoire par un acteur majeur du domaine.

Pour continuer d'assurer leur développement, les centres de données se sont tournés vers des alimentations au gaz naturel notamment, en recourant à l'utilisation en local de générateurs de secours et d'urgence alimentés aux combustibles fossiles. En 2023, l'EPA, l'agence de protection de l'environnement irlandaise⁷², a délivré 13 licences à des centres de données pour l'exploitation de générateurs de secours à Dublin, ce qui témoigne de l'utilisation de combustibles fossiles comme relais à l'électricité (The Journal, 2024).

Quatre ans après l'annonce du moratoire, Microsoft – qui exploite déjà 17 centres, principalement dans la région de Dublin – a déclaré que le manque d'accès à l'électricité en Irlande pousse l'entreprise à réorienter ses investissements dans les centres de données vers les pays nordiques. Dans ce secteur

⁷² Responsable de la délivrance des permis de licences industrielles pour les installations dont la capacité dépasse 50 MW.

concurrentiel, la pression est mise sur les pays européens au titre que « les réglementations européennes et les procédures d'urbanisme sont très lentes, et tout prend 18 mois de plus que partout ailleurs » (Data Center Dynamics, 2025d).

Pourtant, il semble que la réorientation vers les pays nordiques, souvent perçus comme des havres énergétiques grâce à leur abondance en énergies renouvelables, ne constitue pas nécessairement une solution durable. **En Islande aussi, les capacités de production ont atteint leurs limites, illustrant que même les régions historiquement intéressantes peuvent rapidement se retrouver sous tension face à la demande exponentielle du secteur des centres de données** (Le Figaro, 2025b; Le Monde, 2021).

B. L'analyse des tendances énergétiques en Europe révèle des situations différenciées mais une dynamique commune dans la filière des centres de données

Ce phénomène n'est pas isolé :

- **Aux Pays-Bas**, la consommation des centres de données, qui représente actuellement environ 9 % de la consommation électrique totale du pays, a conduit le gouvernement à édicter un moratoire pour la construction de nouveaux sites à Amsterdam jusqu'en 2035. Deux gestionnaires de réseau ont lancé un appel aux autorités politiques pour prendre dès à présent des décisions afin d'éviter un engorgement progressif du système électrique national (DutchNews, 2025).
- **En Italie**, les demandes de raccordement en attente s'élevaient à 42 GW en mars 2025, alors qu'elles étaient de 30 GW fin 2024 (Reuters, 2025).
- **En Belgique**, les demandes de raccordement représentent une consommation potentielle à terme de 45 TWh, pour une consommation nationale actuelle tous secteurs confondus de 80 TWh (L'Echo, 2025b). D'ici à 2050, la demande en électricité des data centers en Belgique sera de trois à dix fois supérieure à aujourd'hui selon les scénarios (L'Echo, 2025a).
- **Au Royaume-Uni**, la capacité installée des centres de données britanniques devrait atteindre 3,61 GW d'ici 2029, soit près du double de sa capacité actuelle. Environ 80 % de cette capacité est concentrée à Londres. Le National Energy System Operator (NESO), organisme public britannique, anticipe une multiplication par quatre de la consommation électrique des centres de données d'ici 2030, en l'encourageant avec l'idée que « cet investissement soutiendra la mise en place d'un système énergétique intelligent » (Data Center Dynamics, 2024c). Le PDG de Nvidia ayant aussi averti le Premier ministre britannique de son retard par rapport à ses rivaux mondiaux dans le développement des infrastructures IA (Financial Times, 2025).
- **Au Royaume-Uni, côté fossiles**, 2,5 GW d'études pour des centrales électriques à gaz à construire sur les sites mêmes des centres de données ont été adressé au réseau de transport de gaz britannique « pour fournir une alimentation stable, face aux longs délais nécessaires pour se raccorder directement au réseau électrique britannique » (Financial Times, 2025).

Ces données révèlent un paradoxe : les politiques publiques qui visent à favoriser l'implantation de centres de données peuvent en réalité devenir contre-productives si elles ne sont pas accompagnées de stratégies énergétiques et climatiques de long terme et cohérentes.

Ce constat est partagé par plusieurs analystes :

- Gartner et Epoch AI considèrent désormais l'énergie comme un facteur limitant central pour le développement des centres de données. Selon leurs projections, plus de 40 % des centres de données d'IA pourraient rencontrer des contraintes opérationnelles dues à des pénuries d'énergie dès 2027 pour Gartner, et à l'horizon 2030 pour Epoch AI (Epoch AI, s. d.; Gartner, 2024).
- Dans le rapport « Energy and AI » de l'AIE, le scénario « Headwinds » imagine une baisse des perspectives de déploiement des centres de données, notamment en raison d'une adoption plus lente que prévu de l'IA et des limitations supplémentaires, telles que celles de la chaîne d'approvisionnement en électricité. L'émergence de goulots d'étranglement locaux, ainsi qu'une chaîne d'approvisionnement tendue, entraînent des retards dans la croissance des capacités installées par rapport aux projections les plus ambitieuses de la filière (IEA, 2025a).

Une question se pose aussi quant aux listes d'attente pour les connexions au réseau électrique : reflètent-elles la demande réelle lorsqu'on les consolide ? Il est possible qu'une part de ces demandes soit redondante, certaines entreprises multipliant les précommandes dans différents pays européens pour maximiser leurs chances d'obtenir une capacité installée suffisante. Une coordination sur cette thématique entre les gestionnaires de réseau nationaux européens pourrait peut-être être appropriée pour affiner les projections et éviter des surévaluations conduisant à des investissements mal orientés.

Finalement, ces dynamiques sont amplifiées sur certaines zones (cf. Figure 26), avec en 2022 :

- **Deux tiers de la consommation énergétique des centres de données pour quatre pays** : Allemagne, France, Pays-Bas et Irlande, alors qu'ils ne rassemblent que 40 % de la population européenne ;
- **Les douze principaux marchés représentent environ 95 % de la consommation d'énergie** des centres de données ;
- **La part dans la consommation nationale d'électricité est très hétérogène**, pouvant pour certains pays atteindre 18 % comme en Irlande, 5,6 % aux Pays Bas ou encore 4,9 % au Luxembourg et 4,6 % au Danemark.

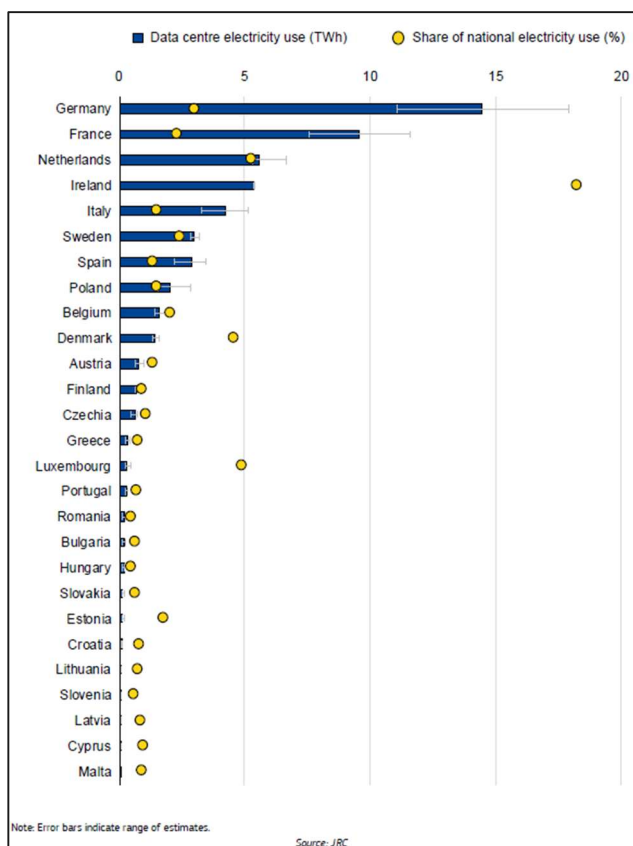


Figure 26 - Estimation de la consommation d'électricité des centres de données par pays en EU27 en 2022 en TWh. Source : (European Commission, Kamiya G., Bertoldi P., 2024)

C. De premiers scénarios permettent d'identifier que les dynamiques dans la filière centres de données européennes ne sont pas soutenables

Plus encore qu'aux Etats-Unis, la consommation d'électricité des centres de données en Europe⁷³ a fait l'objet de peu d'études quantitatives, qu'elles soient historiques ou prospectives :

- En 2020, à la demande de la Commission Européenne, Borderstep Institute a développé un modèle alimentant une scénarisation proposée dans le cadre des travaux de la Commission sur le cloud et les centres de données (Figure 27) (European Commission, 2020). Selon ce modèle (assez similaire à celui utilisé par le Lawrence Berkeley National Laboratory aux Etats-Unis), les centres de données de l'UE (UE28) consommaient 77 TWh d'énergie en 2018, soit 2,7 % de la consommation totale d'électricité⁷⁴.

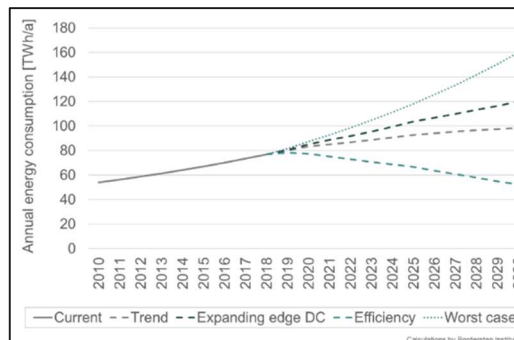


Figure 27 - Scénarios possibles pour l'évolution de la demande énergétique des centres de données dans l'UE28 jusqu'en 2030. Source : (European Commission, 2020)

- En 2024, la Commission européenne a conduit une étude sur la consommation énergétique des centres de données en Europe (UE27) (cf. Figure 28) (European Commission, Kamiya G., Bertoldi P., 2024). D'après ce rapport, les centres de données de l'UE27 consommaient entre 45 et 65 TWh d'électricité en 2022.
- D'après la Commission européenne toujours, cette consommation augmenterait de manière significative d'ici 2030 (+28 % soit 98 TWh) si la tendance identifiée en 2020 (donc sans la prise en compte du déploiement de l'IA générative) se poursuivait et pourrait atteindre 3,2 % de la consommation totale d'électricité (European Commission, 2024).

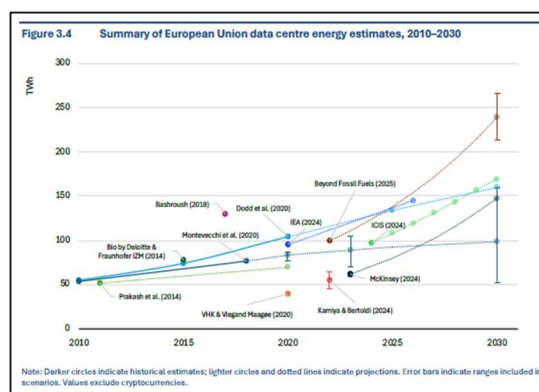
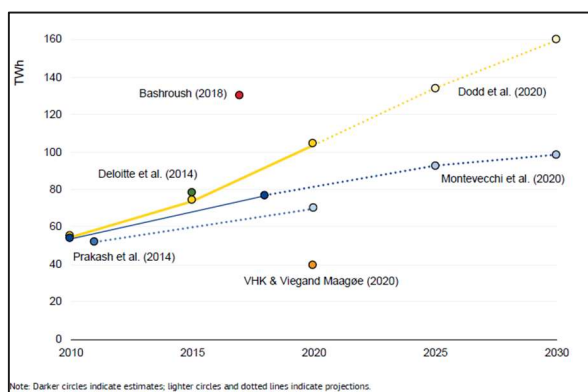


Figure 28 – Etat des lieux de différentes estimations et différents scénarios pour la consommation énergétique des centres de données européens. Source : (EDNA, Technology collaboration programme by IEA, 2025; European Commission, 2020)

⁷³ Périmètre géographique à bien identifier selon les études. Par exemple, UE27 depuis janvier 2020 à la suite du retrait du Royaume-Uni de l'Union Européenne pour des analyses de la Commission européenne, UE28 avant ou pour des analyses à un périmètre mondial où la zone géographique Europe est considérée comme un ensemble. Autre exemple, avec cryptomonnaies pour les analyses basés sur les volumes de serveur, sans cryptomonnaies pour des chiffres extraits d'autres analyses (ex : chiffre de 66 TWh de IEA 2025).

⁷⁴ Basée sur les volumes de serveurs, cette modélisation intègre les cryptomonnaies.

Plusieurs études ont été publiées récemment et tiennent compte de l'impact de l'IA mais citent des chiffres sensiblement différents de l'une à l'autre, bien qu'ils témoignent tous d'une croissance forte :

- En 2024, l'Agence Internationale de l'Énergie a estimé une consommation électrique de 100 TWh pour l'Europe en 2022, avec une projection à 150 TWh pour 2026 (IEA, 2024a).
- En 2025, l'Agence Internationale de l'Énergie a partagé de nouveaux chiffres : 66 TWh pour l'Europe en 2023, avec une projection à 113 TWh pour 2030 (IEA, 2025a). Ces chiffres, contrairement aux précédents, n'intègrent pas les cryptomonnaies mais ce facteur (autour de 3 - 7 TWh en 2023⁷⁵) ne suffit pas à expliquer l'écart.
- De son côté, le cabinet de conseil en stratégie McKinsey propose un scénario de référence faisant passer la consommation de 65 TWh en 2023 à 150 TWh en 2030 pour l'Europe (UE27 + Royaume-Uni). Cette croissance étant notamment attribuée aux hyperscalers (70 % de la demande prévue d'ici à 2028) et aux centres de données de colocation. Selon McKinsey toujours, 25 GW de capacités IT pourraient être à installer d'ici à 2030, ce qui représenterait 15 à 25 % de l'ensemble de la nouvelle demande européenne nette jusqu'en 2030 ((McKinsey & Company, 2024)
- Le site spécialisé DCByte qui tient à jour une base de données d'environ 7500 centres de données dans le monde estime que la puissance IT installée en Europe⁷⁶ était de 5,5 GW en 2019, est passée à 10,3 GW en 2024 et devrait progresser au minimum jusqu'à 20,2 GW en 2029, soit un quadruplement en dix ans (DCByte, 2025).
- Les analystes d'ICIS estiment quant à eux la consommation à 96 TWh en 2024 et la projettent à 168 TWh en 2030 et 236 TWh en 2035 (ICIS, 2025).

Cette énumération met en évidence à la fois l'absence de statistiques et des différences méthodologiques en général non explicitées (cf. difficultés listées sur ce sujet dans ce rapport à la fois aux échelles mondiale et française).

L'une de ces difficultés est relative à la prise en compte des centres de données d'entreprise : pour la Commission européenne, ceux-ci représentent environ 35 % de la consommation alors que la proportion est plutôt de 40 % pour McKinsey et ICIS⁷⁷. De fait, les données qui y sont relatives sont encore moins disponibles que celles des grands centres de données (notamment centres de données de colocation et hyperscalers).

Au niveau européen, l'Energy Efficiency Directive (EED), la directive relative à l'efficacité énergétique (qui structure la réglementation de l'Union européenne de promotion de l'efficacité énergétique et de réduction de la consommation d'énergie) a été révisée et impose désormais aux exploitants de centres de données de communiquer leurs indicateurs de performance clés tels que la consommation électrique, les performances informatiques ou les bandes passantes nécessaires pour le réseau (European Commission et al., 2025; Journal officiel de l'Union européenne, 2024). Cette mise à jour de la directive vise à accroître la transparence dans le domaine, en établissant une base européenne de données pertinentes pour la performance énergétique (et l'empreinte hydrique) des centres de

⁷⁵ Fourchette approximative : 3 – 5 TWh selon ICIS (ICIS, 2025). Si 5 % (Harshrate Index, 2025, 2025) des cryptos monde, avec une conso totale monde à 150 TWh, cela donnerait 7,5 TWh.

⁷⁶ Il s'agit en fait de la zone EMEA mais les puissances installées au Moyen-Orient et en Afrique sont d'un ordre de grandeur inférieur.

⁷⁷ Et (Dodd N. et al., 2020) estimaient une répartition 56/44 en 2020 puis prévoient une répartition 66/34 en 2025.

données et également, à promouvoir de nouvelles conceptions et de nouveaux développements en matière d'efficacité.^{ES}

Avec le règlement délégué sur le système de notation des centres de données, l'Union Européenne va pouvoir collecter des informations sur les centres de données et attribuer des indicateurs de soutenabilité, ce qui est un premier pas (en juillet 2025, le recensement organisé n'a remonté qu'une consommation de 14 TWh pour l'ensemble de l'UE (European Commission et al., 2025)) mais reste insuffisant pour infléchir les courbes de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre.

En tout état de cause, l'évolution de la consommation électrique des centres de données en Europe apparaît d'autant plus préoccupante du fait de l'incomplétude et du manque de fiabilité des données nécessaires pour exercer un pilotage informé.

Sur la base des informations de DCByte (DCByte, 2025) et en utilisant de façon simplifiée la modélisation que nous avons construite pour la France (décrite en Annexe 7 (The Shift Project, 2025a)), nous estimons que **la consommation électrique des centres de données en Europe (Union Européenne, Royaume-Uni, Suisse, Norvège) passerait de 97 TWh en 2023 à [165 ; 200] TWh en 2030 et [290 ; 369] TWh en 2035** (cf. Figure 29) (cf. Annexe 15 (The Shift Project, 2025a)).

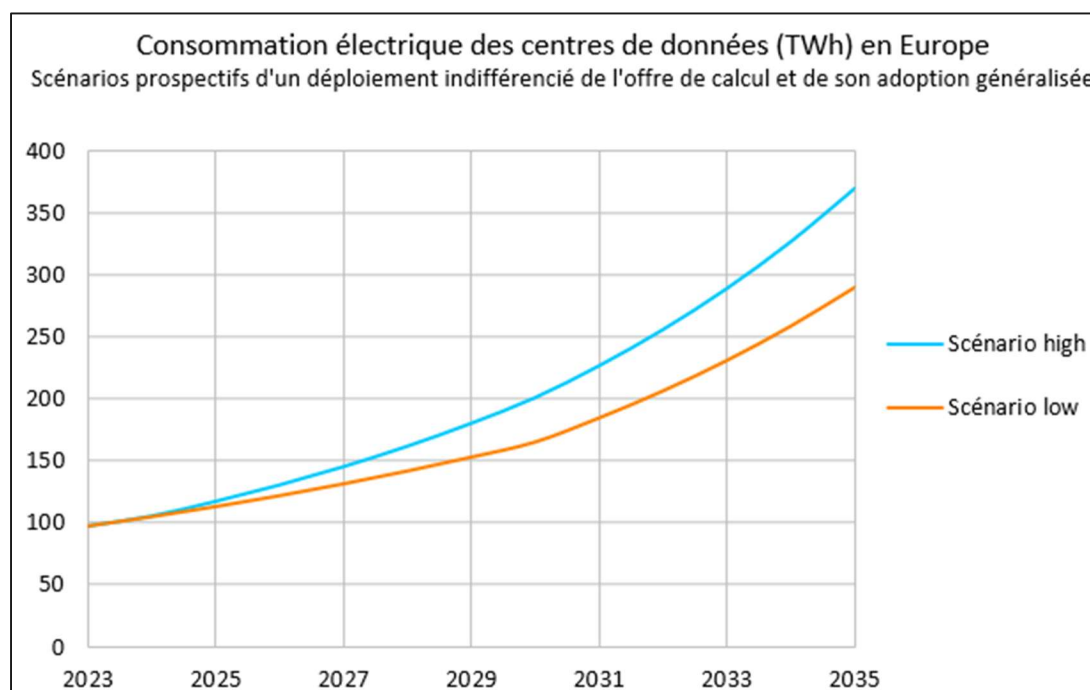


Figure 29 - Consommation d'électricité des centres de données en phase d'usage (TWh) en Europe (UE27, Royaume-Uni, Suisse, Norvège) de nos scénarios prospectifs exploratoire d'un déploiement indifférencié de l'offre de calcul et de son adoption généralisée. Source : (The Shift Project, 2025a)

En d'autres termes, si la tendance construite par l'industrie des centres de données est effectivement mise en œuvre, les centres de données représenteraient environ 7,5 % de la production d'électricité en Europe en 2035⁷⁸. Ce chiffre est proche de l'estimation basse de [6,7 % ; 12 %] de Lawrence Berkeley

⁷⁸ Par comparaison à 4390 TWh : la projection de génération d'électricité pour l'UE27 du scénario Stated Policies STEPS de l'AIE en 2035 (IEA, 2024b), à laquelle est ajoutée la production d'électricité de 2024 du Royaume-Uni, de la Suisse et de la Norvège (Our World in Data, 2025).

National Laboratory pour les Etats-Unis en 2028 (LBNL et al., 2024) et apparaît donc paradoxalement comme relativement mesuré, même en tenant compte du « décalage de phase » existant traditionnellement entre les deux zones. Il pourrait même s'avérer sous-estimé dans le cas où le nombre et le rythme d'ouverture de nouveaux sites venait à s'accélérer du fait de mesures incitatives telles qu'annoncées par la Commission et par les États.

Quoiqu'il en soit, cette augmentation de consommation supérieure à 200 TWh (Figure 29) n'est à notre connaissance pas prise en compte dans les scénarios de planification énergétique alignés sur les objectifs climatiques.

Or, elle représente environ la moitié de la réduction de production d'électricité à partir de gaz⁷⁹ qui est censée avoir eu lieu à cette échéance (Figure 30) (IEA, 2024b) et hypothèque donc la capacité de l'Europe à atteindre ses objectifs climatiques à hauteur d'environ 100 MtCO₂e annuels en 2035⁸⁰, en considérant uniquement la phase d'usage des centres de données.

A contrario, il est donc indispensable d'intégrer les centres de données (et plus généralement le numérique) dans la planification énergétique, d'en faire un outil de pilotage et d'adapter la stratégie industrielle de l'Europe pour la rendre nativement compatible avec ses engagements climatiques.

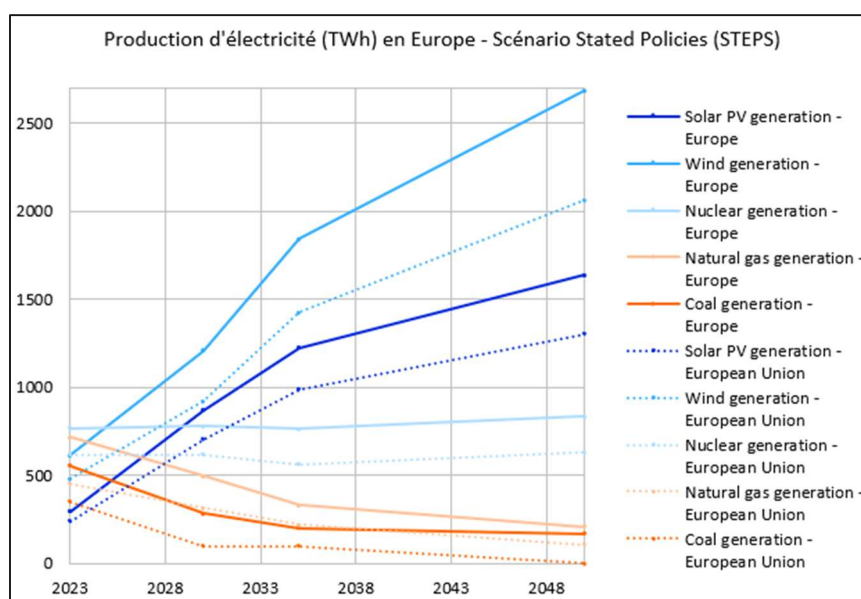


Figure 30 – Scénario Stated Policies STEPS de l'AIE sur la production d'électricité en Europe et EU27 (TWh). Source : (IEA, 2024b)

⁷⁹ L'UE ayant « l'intention » d'acheter du GNL, du pétrole et des produits nucléaires américains pour un montant estimé à 750 milliards de dollars (environ 700 milliards d'euros) au cours des trois prochaines années (Contexte, 2025; Le Monde, 2025d).

⁸⁰ Sans prise en compte des émissions de gaz à effets de serre à la fabrication et en supposant que cette électricité non programmée énergétiquement supplémentaire est fournie par du GNL, ce serait l'ajout en 2035 par rapport à 2020 de **97 à 136 MtCO₂e** d'émissions de gaz à effets de serre (selon le scénario low ou high).

Ce calcul est réalisé avec un facteur d'émission de 500 gCO₂e/kWh, représentatif de l'utilisation de gaz aujourd'hui (Electricity Maps, s. d.), mais aussi fourchette haute des facteurs d'émissions du gaz naturel, pour être représentatif de l'import qui s'organise (Contexte, 2025; Le Monde, 2025d) de GNL américain à partir de gaz de schiste et dont la liquéfaction regazéification est énérgivoire (Connaissance des énergies, Joly A., 2022)

Pour prendre en compte les émissions de gaz à effets de serre à la fabrication, ce serait l'ajout en 2035 par rapport à 2020 de **130 à 184 MtCO₂e** d'émissions de gaz à effets de serre (selon le scénario low ou high).

Le calcul est réalisé avec une répartition utilisation / fabrication de 75 / 25 qui est réaliste aujourd'hui quand l'électricité tourne autour de 500 gCO₂e/kWh (cf. « L'empreinte carbone de la fabrication tout au long de la chaîne de valeur n'est plus à négliger »).

IX. Les centres de données en France : éviter le conflit d’usage

A. Climat : état des lieux sur les émissions de gaz à effet de serre de la filière centres de données

En France, l’empreinte carbone du numérique (centres de données, réseaux, terminaux) **pour l’année 2020** a été estimée à **17 MtCO₂e** sans inclure les émissions importées des centres de données situé à l’étranger servant à des usages français (ADEME & Arcep, 2023).

Une mise à jour publiée en janvier 2025 a révisé cette évaluation en portant **sur l’année 2022** et en intégrant les émissions importées des centres de données, ce qui amène ainsi l’empreinte carbone du secteur numérique à **29,5 MtCO₂e en 2022** (ADEME, 2025). **Pour 2022, l’empreinte carbone du secteur numérique représente ainsi 4,4 % de l’empreinte carbone totale de la France, dont 46 % attribuables aux centres de données**, en tenant compte des émissions importées liées à l’utilisation de services sur centres de données à l’étranger. Toutefois, comme l’indique d’ailleurs l’ADEME, cette évaluation à 29,5 MtCO₂e est probablement sous-estimée car elle ne prend pas en compte l’arrivée récente de l’intelligence artificielle générative et la partie importée d’échanges de données sur les réseaux hors de France et ne réalise pas une actualisation détaillée des centres de données en France.

Cette mise à jour, qui a multiplié le résultat par presque deux notamment du fait d’un changement de périmètre, souligne le besoin de disposer de mesures fréquentes et fiables de l’empreinte carbone du secteur dont le rythme d’évolution est effréné.

En termes de prospective, l’étude ADEME - Arcep de 2023 a également estimé les émissions territoriales en 2030 et 2050 de leur scénario tendanciel exploratoire⁸¹ et de plusieurs scénarios normatifs⁸².

Empreinte carbone du numérique (MtCO ₂ e)	2020	2030	Empreinte carbone du numérique (MtCO ₂ e)	2020	2050
Scénario tendanciel	17,2	25	Scénario tendanciel	17,2	49
Scénario sobriété numérique	17,2	14,4	Scénario « Génération frugale » (S1)	17,2	9,4
Scénario écoconception modérée	17,2	20,7	Scénario « Coopérations territoriales » (S2)	17,2	22,8
Scénario écoconception généralisée	17,2	18,1	Scénario « Technologies vertes » (S3)	17,2	48,7
			Scénario « Pari réparateur » (S4)	17,2	81,1

Table 2 -Empreinte carbone du numérique dans les scénarios tendanciels et de prospective 2030 et 2050 de l’étude ADEME-Arcep. Source : (ADEME & Arcep, 2023)

B. Energie : lever les incertitudes sur l’état des lieux en consommation électrique de la filière centres de données sur le territoire français

En France, la consommation électrique du secteur numérique est estimée à **51,5 TWh pour l’année 2022**, soit **11 % de la consommation électrique française** (ADEME, 2025). En prenant en compte la

⁸¹ Les scénarios exploratoires décrivent, à partir d’une situation présente et des tendances, une suite d’événements conduisant d’une façon logique à un futur possible. L’objectif est de mettre en évidence les conséquences qui en découlent.

⁸² Un scénario normatif détermine un ensemble donné d’objectifs à réaliser, dont la synthèse produit une image d’un futur possible.

consommation d'électricité des centres de données situés à l'étranger qui hébergent des usages français, la consommation totale est de 65 TWh.

Pour les centres de données en particulier, depuis 5 ans, les estimations des consommations territoriales à date et les projections ne cessent de s'accroître :

- En 2022, RTE, dans son étude « Futurs énergétiques 2050 », déclare 3 TWh de consommation électrique pour 2019 et projette 5 TWh et 9,5 TWh pour 2030 et 2050 respectivement. Les centres de données apparaissent alors dans la catégorie « secteur tertiaire », et seuls des centres de données en colocation sont intégrés dans l'étude (RTE, 2022).
- En 2023, l'ADEME-Arcep, dans l'étude « Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective », modélise 11,6 TWh de consommation électrique pour 2020 prenant en compte plusieurs types de centres de données : colocation, HPC (Calcul Haute Performance), traditionnels pour acteurs publics et entreprises, ne prenant ni en compte le phénomène IA générative, ni les usages français sur les centres de données à l'étranger. Cette étude modélise dans son scénario tendanciel des consommations d'électricité par les centres de données de 16,4 TWh et 39 TWh pour 2030 et 2050 respectivement. Ce scénario sera désigné, dans la suite de ce rapport, comme « ancien tendanciel » (ADEME & Arcep, 2023).
- En 2023, le cabinet Hubblo modélise 11,59 TWh de consommation sur le territoire français et 11,3 TWh de consommation cloud à l'étranger pour 2020, rappelant ainsi que dans l'empreinte carbone des services numériques français hébergés à l'étranger comptent tout autant (Hubblo & Fourboul E., 2023).
- En décembre 2023, dans le « Bilan Prévisionnel 2023-2035 », RTE évalue à 10 TWh la consommation pour 2020 et prévoit entre 23 et 28 TWh pour 2035 à partir de ses demandes courantes, toujours dans la catégorie « secteur tertiaire » (RTE, 2023).
- En 2024, RTE, dans le schéma de développement du réseau⁸³ (SDDR), étudie 8 GW de demande pour les centres de données à partir de l'état de ses demandes courantes de raccordement⁸⁴. Ces 8 GW sont traduits en 25,3 TWh en Ile-de-France et 3,8 TWh à Marseille à 2040 (RTE, 2024).
- En février 2025, lors du Sommet pour l'action sur l'intelligence artificielle, plusieurs annonces commerciales et stratégiques ont été simultanément effectuées. Il est toutefois difficile d'anticiper les taux de concrétisation de ces projets :
 - EDF, a proposé 4 sites sur son domaine foncier pour 2 GW et annoncé 2 nouveaux sites à venir (DCMag, 2025b; Le Figaro, 2025a),
 - L'Elysée a mis en avant 3 sites de 1 GW (Le Monde, 2025a, 2025b; L'usine digitale, 2025a),
 - Le gouvernement a annoncé 35 sites prêts à l'emploi avec une carte à l'échelle régionale administrative dont 15 en mesure d'être raccordés au réseau à haute tension et pouvant atteindre 750 MW de puissance (DCMag, 2025a; LeMagIT, 2025)⁸⁵,
 - Certaines sont en cours de concrétisation, notamment 1,4 GW en Ile-de-France pour une entrée opérationnelle en 2028 (L'usine digitale, 2025b).

⁸³ A la différence des Futurs énergétiques et des Bilans Prévisionnels, le SDDR n'est pas un document prospectif.

⁸⁴ En septembre 2024, RTE disait avoir signé pour 4,5 GW d'offres de raccordement de centres de données et « un volume équivalent » était en cours d'instruction (LeMagIT, 2025).

⁸⁵ RTE liste environ 50 postes sources capables d'accueillir 250 MW et une vingtaine capable de supporter 750 MW, pas seulement dédiés aux centres de données (LeMagIT, 2025). En février 2025, dans ses 140 projets signés pour 21 GW, RTE inventorie 40 projets de datacenters, pour une moyenne de 130 MW chacun, soit 5.2 GW (LeMagIT, 2025).

- En mars 2025, les centres de données apparaissent cette fois dans la catégorie « industrie » dans la fiche n°5 du SDDR publiée par RTE (RTE, 2025c). Ce dernier a déjà raccordé 8 centres de données depuis 2016 pour une capacité totale de 800 MW et fin 2024, ces derniers fonctionnaient à une puissance maximale de 120 MW (environ 15 % de la puissance contractualisée) (RTE, 2025b). Par ailleurs,
 - 25,5 GW sont en cours d'instruction,
 - 10 GW sont au stade de la proposition technique et financière (PTF), dont 5 sont déjà signé par les industriels,
 - 0,6 GW sont au stade de la convention de raccordement,
 - 0,8 GW sont déjà raccordés.
- En juin 2025, ENEDIS fournit l'évolution de la consommation électrique de certains de leurs centres de données entre 2019 et 2024 dans L'observatoire français de la transition écologique avec 2,34 TWh en 2019 et 2,9 TWh en 2024 (Enedis, 2025)⁸⁶.
- En juillet 2025, le recensement organisé par la Commission européenne dans le cadre de la directive EED n'a remonté qu'une consommation de 14 TWh pour l'ensemble de l'UE avec seulement 36 % des centres de données éligibles, résultat donc parcellaire et sans indication publique de la part située en France (European Commission et al., 2025).
- Pour l'automne 2025, une étude aux méthodologies de recensement complémentaire est encore à venir pour consolider les périmètres et créer une base de données recensant les centres de données en activité en France (consommation d'énergie, d'eau et de foncier) ainsi qu'avec une étude prospective 2060 prenant en compte le phénomène IA générative (Hubblo, ADEME, s.d.).
- Pour décembre 2025, le CEA, via une étude prospective 2040 multipartenaires, vise à analyser le cycle de vie des centres de données et élaborer des scénarios prospectifs intégrant opportunités technologiques et contraintes énergétiques et matérielles (Y. Spot, CEA, s. d.).

Cet état des lieux met en lumière les divergences notables entre les estimations successives de la consommation électrique des centres de données sur le territoire français pour l'année de référence des études : 3 TWh pour 2019 (RTE, 2022), 11,6 TWh pour 2020 (ADEME & Arcep, 2023), 12 TWh pour 2022 (ADEME, 2025), et 10 TWh pour 2022 (RTE, 2023). Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'écart sur l'état des lieux :

- Certaines évaluations se sont concentrées sur une certaine catégorie de centres de données seulement, dans un contexte où l'identification des centres de données reste encore complexe administrativement et où le recensement via des acteurs de la distribution d'électricité n'a pas encore été organisé ou n'est pas encore public.
- À ce jour, les données relatives à la consommation, à la capacité installée ou aux volumes de demandes de raccordement ne sont pas systématiquement partagées. Ce manque de transparence des entreprises exploitant ces centres empêche une vision claire de la demande énergétique pour cette filière.

⁸⁶ Données au 20.06.2025 – Périmètre géographique : France continentale, réseau exploité par Enedis. Sources : Enedis, SDES, Données locales de consommation d'électricité, ©ADEME-baseOPÉRA – Traitements SDES/Enedis

- Bien que les projections et les scénarios puissent différer, les hypothèses sous-jacentes n'ont pas toujours été clairement explicites (par exemple, le rythme de montée en charge des centres de données). De plus, ces hypothèses peuvent évoluer rapidement.

Si l'on observe, ces derniers temps, une montée en compétence progressive sur ces enjeux qui pourrait, dans une certaine mesure, réduire ces divergences, **il demeure essentiel de mettre en place des mécanismes robustes pour mesurer et identifier avec précision les capacités et les consommations, dont le fait d'assurer un suivi à iso-périmètre et rythme régulier, par exemple par un observatoire.** Il convient également de favoriser le partage de ces informations entre les acteurs concernés, d'encourager leur publication et éventuellement de développer des méthodes d'agrégation des données permettant de dépasser les problématiques de confidentialité.

Cet état des lieux révèle également une tendance de révision à la hausse des projections pour 2030, 2035 et au-delà.

C. Conflit d'usage : anticiper pour réduire les risques de tensions entre centres de données et transition énergétique

Les analyses menées dans le cadre du SDDR par RTE montrent que le raccordement effectif de la totalité des demandes réceptionnées par RTE engendrerait une consommation théorique de 45 TWh⁸⁷ en 2030, à comparer aux 15 à 20 TWh projetés dans le Bilan Prévisionnel 2023, et contribuant très significativement à porter la consommation industrielle bien au-delà de l'estimation faite dans la PPE (Figure 31).

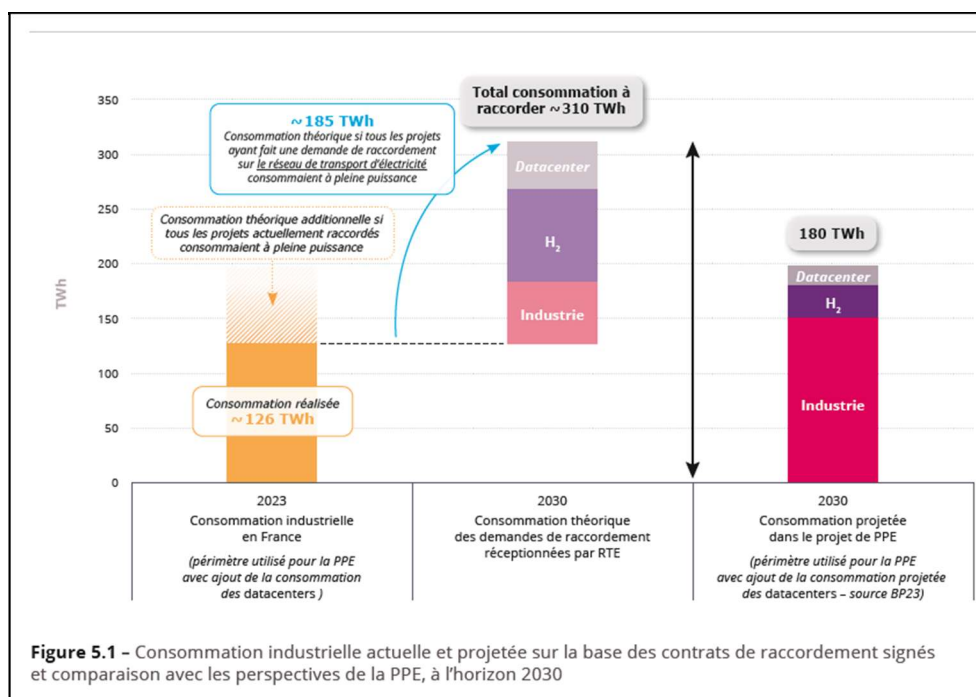


Figure 31 - Consommation industrielle actuelle et projetée par RTE sur la base des contrats de raccordement signés et comparaison avec les perspectives de la PPE, à l'horizon 2030.

Source : (RTE, 2025c)

⁸⁷ Cf. (RTE, 2025c)

Les centres de données, une aubaine pour la France et son équilibre offre-demande en électricité ?

Un problème récurrent dans un contexte de marché marqué par une surabondance d'offre d'électricité par rapport à la demande est celui des prix négatifs⁸⁸, dont la fréquence d'occurrence augmente en France : avant 2022, la Commission de régulation de l'énergie l'évaluait à 102 heures maximum par an (soit 1,2 % du temps), contre 235 heures pour le seul premier semestre 2024 (5,4 % du temps).

Une trop faible demande en électricité vis-à-vis de la production induit des conséquences physiques et économiques sur le réseau, d'où l'idée et les discours selon lesquels les centres de données (qui consomment de l'électricité) représenteraient un atout pour la France.

Mais les centres de données dont le raccordement se valide aujourd'hui verront leur pic de consommation d'électricité en 2035.

Les équilibres annuels actuels ne permettent donc pas d'évaluer la pertinence des centres de données à cet horizon, à un moment où leur implantation pourrait constituer un véritable défi pour la transition énergétique, largement appuyée sur l'électrification de secteurs majeurs de l'économie (transports, chauffage ou production d'hydrogène, par exemple).

De plus, la consommation électrique additionnelle des centres de données en 2035 par rapport à 2020 représenterait entre 10 % et 23 % du supplément d'électricité consommée en 2035 par rapport à 2020⁸⁹. Dit autrement, cette part des capacités nouvellement installées de production d'électricité ne serait pas dédiée à la transition énergétique (voitures électriques, décarbonation de l'industrie, électrolyseurs, etc.) mais aux besoins additionnels des centres de données.

- Entre 2020 et 2030, la croissance de la consommation des centres de données est estimée à 5 TWh⁹⁰ par l'ADEME-Arcep (ADEME & Arcep, 2023), **soit 6 %** de l'électricité consommée supplémentaire prévue par RTE sur la même période, et ce sans la prise en compte du « phénomène IA » et de l'accélération de la filière centres de données qui en découle.
- Entre 2020 et 2030, les évaluations mises à jour dans le bilan prévisionnel de RTE, en pleine période du « phénomène IA », estiment la croissance de la consommation des centres de données à 10 TWh⁹¹, soit **13 %** de l'électricité consommée supplémentaire prévue par RTE dans le bilan prévisionnel 2024⁹².
- Entre 2020 et 2035, les évaluations mises à jour dans le bilan prévisionnel de RTE, en pleine période du « phénomène IA », estiment la croissance de la consommation des centres de données à 18 TWh⁹³, soit **12 %** de l'électricité supplémentaire prévue par RTE dans le bilan prévisionnel⁹⁴.
- Entre 2020 et 2035, notre scénario « nouveau tendanciel » et ses deux variantes (cf. « Les centres de données en France : des tendances actuelles aux scénarios de décarbonation »)

⁸⁸ Observés lorsque le tarif du marché spot de l'électricité (livraison le lendemain) est strictement inférieur à zéro, ces prix illustrent des comportements variés des acteurs du système, en fonction de leur capacité à s'adapter ou à se déconnecter. Lors de périodes de faible demande, telles que les dimanches ou l'été, les prix de l'électricité sur les marchés de gros deviennent de plus en plus fréquemment négatifs.

⁸⁹ Détails des chiffres ci-dessous

⁹⁰ 16,4 TWh en 2030 contre 11,6 TWh en 2020. Il s'agit de la courbe orange Figure 32.

⁹¹ 20 TWh en 2030 et 10 TWh en 2020, scénario haut (RTE, 2023).

⁹² +76 TWh pour 2030 et +156 TWh pour 2035 : 454 TWh en 2020, 530 TWh en 2030, et 610 TWh en 2035 dans « le Bilan prévisionnel 2035 » (fig. 2.9, sc. A) (RTE, 2023). Il s'agit de la courbe en pointillés noire Figure 32.

⁹³ 28 TWh en 2035 et 10 TWh en 2020, scénario haut (RTE, 2023). Il s'agit du faisceau bleu Figure 32.

⁹⁴ +76 TWh pour 2030 et +156 TWh pour 2035 : 454 TWh en 2020, 530 TWh en 2030, et 610 TWh en 2035 dans « le Bilan prévisionnel 2035 » (fig. 2.9, sc. A) (RTE, 2023). Il s'agit de la courbe en pointillés noire Figure 32.

estiment le surcroît de consommation en 2035 par rapport à 2020 à 24 TWh, voire 37 TWh soit de **15 % à 23 %** de l'électricité supplémentaire prévue par RTE dans le bilan prévisionnel⁹⁵.

- Entre 2020 et 2050, la trajectoire ADEME-Arcep (ADEME & Arcep, 2023), formulée avant le « phénomène IA », atteint 27 TWh supplémentaires sur la période pour les centres de données, soit près de **14 %** de l'électricité supplémentaire prévue par RTE dans ses « Futurs énergétiques »⁹⁶.

La dynamique actuelle du déploiement des centres de données soulève donc des questions quant à la disponibilité (production et interconnexions) de l'électricité consommée en France⁹⁷ et **pose aussi la question de la concurrence d'usage à l'horizon 2035 entre la filière des centres de données et les secteurs dont la décarbonation complète ne peut passer que par leur électrification (électrification (transports, industrie, production d'hydrogène par électrolyse etc.)).**

Ces questions sont d'autant plus justifiées qu'il n'est pas envisagé de consommation supplémentaire à accorder aux centres de données dans les scénarios long terme « Futurs Énergétiques 2050 » de RTE publiés en 2022, ni dans le scénario « Référence » ni dans le scénario « Réindustrialisation profonde » dans lequel la consommation totale de la France en 2035 est supérieure de 45 TWh à celle du scénario « Référence » avec : 16 TWh supplémentaires dans l'industrie, 24 TWh supplémentaires dans l'électrolyse, 5 TWh supplémentaires dans le secteur de l'énergie.

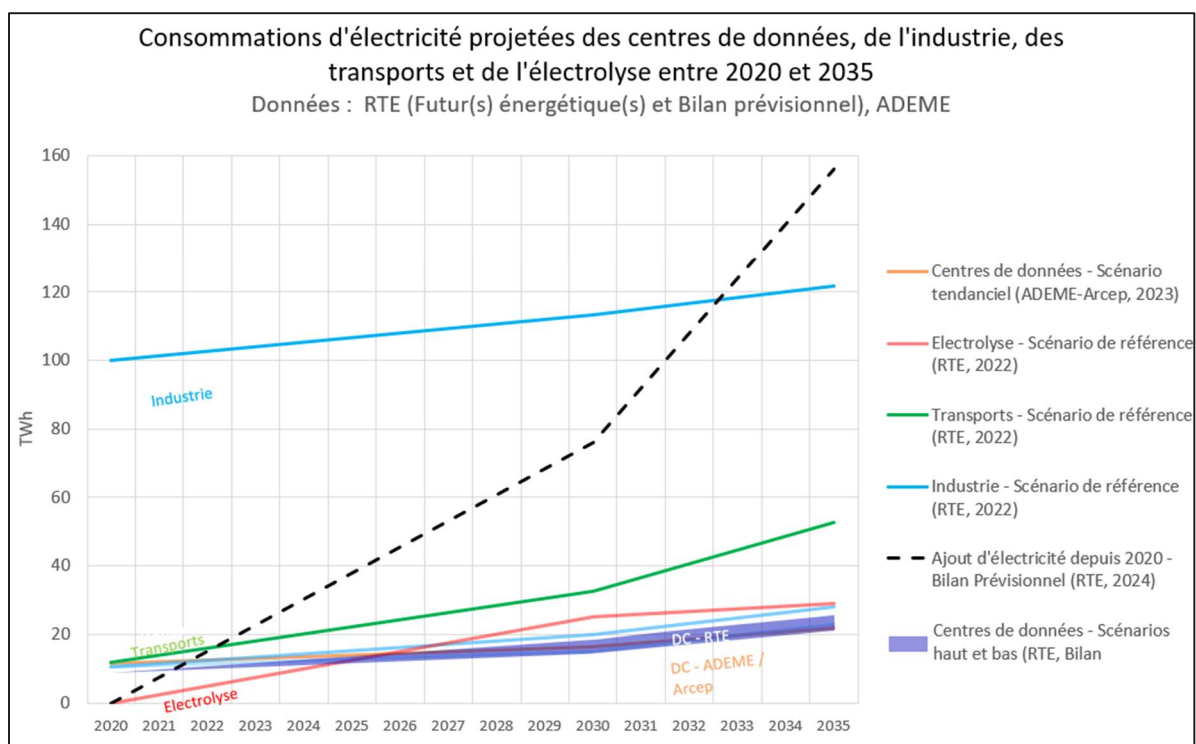


Figure 32 - Consommations d'électricité projetées totale et consommation des centres de données entre 2020 et 2035.

Sources : selon (RTE, 2022), (RTE, 2024), l'(ADEME-Arcep, 2023) et le (The Shift Project, 2025)

⁹⁵ +76 TWh pour 2030 et +156 TWh pour 2035 : 454 TWh en 2020, 530 TWh en 2030, et 610 TWh en 2035 dans « le Bilan prévisionnel 2035 » (fig. 2.9, sc. A) (RTE, 2023). Il s'agit de la courbe en pointillés noire Figure 32.

⁹⁶ +191 TWh : 454 TWh en 2020 et 645 TWh en 2050 dans les « Futurs énergétiques 2050 » (RTE, 2022)

⁹⁷ Ainsi que du rôle d'équilibrage des réseaux voisins (au Royaume-Uni et en Allemagne) durant l'hiver notamment.

En comparant la consommation électrique prévue pour les centres de données (RTE, 2023) avec la consommation électrique prévue pour l'industrie dans deux des scénarios de « Futurs énergétiques » (RTE, 2022)⁹⁸, la Figure 33 montre la part « non anticipée » pour les centres de données dans la consommation pour l'industrie, à la fois en consommation totale (à gauche, qui passe de 10 % en 2020 à plus de 20 % en 2035) et à la fois en ajouts additionnels depuis 2020 (à droite, qui peut aller jusqu'à 58 % en 2035).

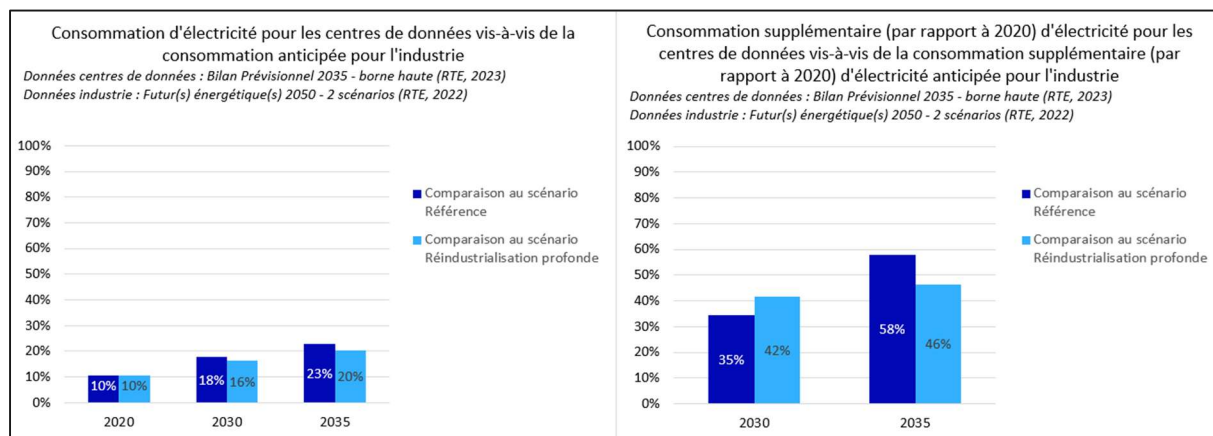


Figure 33 – Consommation électrique pour les centres de données vis-à-vis de la consommation électrique anticipée pour l'industrie : à gauche en valeur totale, à droite en consommation additionnelle depuis 2020. Sources : (RTE, 2023) pour centres de données, (RTE, 2022) pour industrie

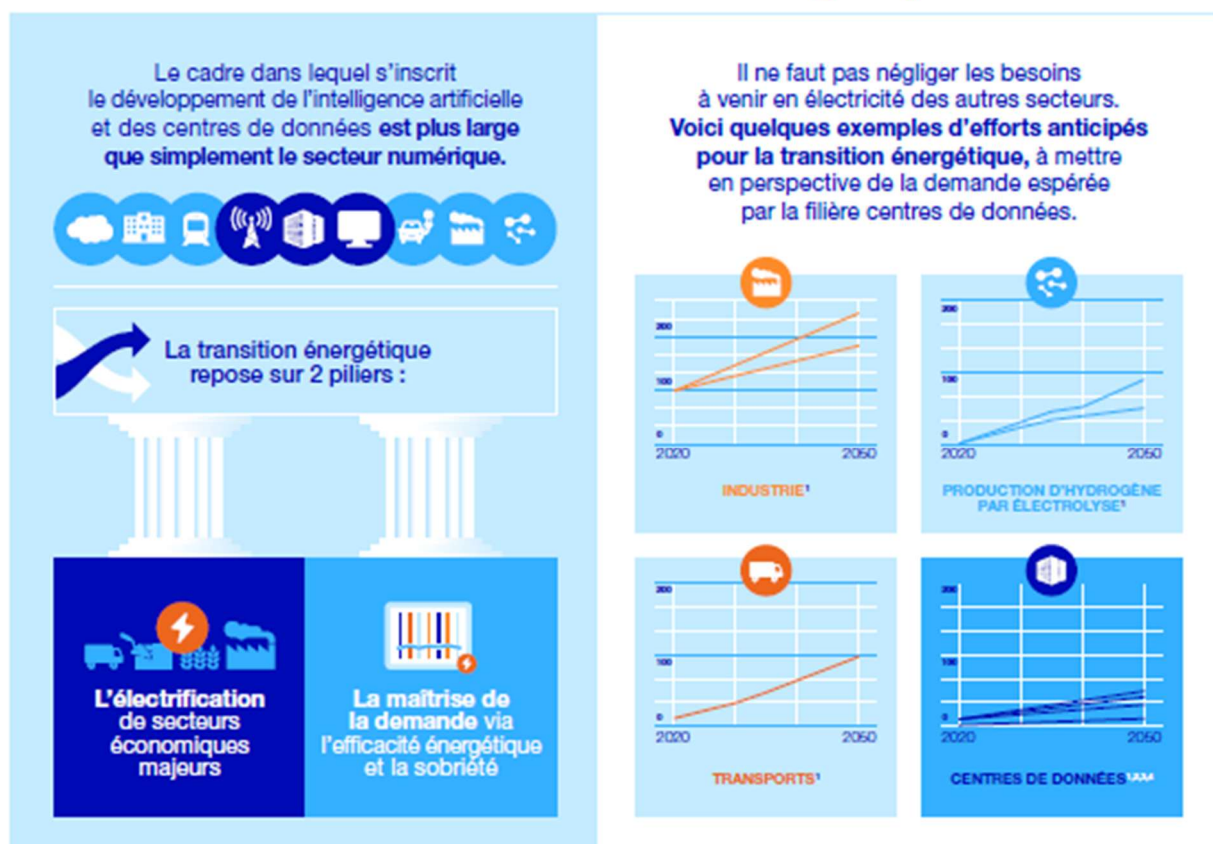
Cette concurrence doit être accompagnée et arbitrée, afin de ne pas laisser le déploiement massif de centres de données mettre en péril d'autres transformations sans s'en rendre compte. L'un des effets de concurrence les plus directs est celui concernant l'industrie : les grands projets de centres de données « IA » annoncés au Sommet de l'IA sont en concurrence avec les plus gros projets industriels, centraux dans les stratégies de réindustrialisation et de décarbonation du pays (production d'acier décarboné, production d'e-carburant, production d'hydrogène par électrolyse, etc. (The Shift Project, 2022)) (cf. Figure 33). Cette concurrence visible sur l'enveloppe totale d'électricité disponible se traduira en effet au niveau des sites, des implantations de certains gros projets, de développement des infrastructures ou encore des enjeux de raccordement au réseau de très haute tension⁹⁹. Il s'agit donc de les anticiper dès maintenant, car **les raccordements validés aujourd'hui entraîneront des consommations dont la pleine capacité sera atteinte dans environ dix ans.**

Enfin, deux dernières questions doivent se poser en ce qui concerne les politiques et paris de sobriété d'une part et le déploiement de capacités de production électriques sur le territoire d'autre part : quelle appétence et quelle crédibilité auraient des politiques d'encouragement à la sobriété dans le logement par exemple si l'électricité dégagée est utilisée à la place pour les centres de données ; quelle peut être la réaction citoyenne à la pré-emption de telles capacités de production électrique (bas-carbone ou non) pour les centres de données ?

⁹⁸ Alors même que dans ces scénarios, la consommation électrique dédiée aux centres de données étaient peu pris en compte (5 TWh en 2030 dans tertiaire, 0 TWh dans industrie).

⁹⁹ Ces arbitrages futurs sont d'autant plus anticipables aujourd'hui que la Commission de régulation de l'énergie (CRE) vient de valider une procédure de raccordement « fast track » pour raccorder les sites de consommation de grande puissance au réseau très haute tension (400 kV) (Commission de Régulation de l'Énergie, 2025).

Conflit d'usage : anticiper pour réduire les risques de tensions entre centres de données et transition énergétique



- 1 **Réussir un bouclage électrique et anticiper les conflits d'usage sur l'électricité** mérite de porter le regard à horizon 2035 sur les conséquences de nos choix structurels d'aujourd'hui.
- 2 **Il faut une trajectoire énergie-carbone planifiée** pour la filière centres de données et **des mécanismes de priorisation** tenant compte des échelles de temps respectives des filières et se projetant sur les durées de vie escomptées des infrastructures.
- 3 Pour cela, **la déclinaison d'objectifs climatiques explicités en empreinte carbone des usages français à horizon 2030/2050 en scénario de consommation électrique*** est une première étape.
- 4 Afin d'éviter que **les centres de données ne grignotent l'électricité requise pour la décarbonation** de l'ensemble de l'économie française.

1. RTE, 2022 : Futurs énergétiques 2050

2. The Shift Project, 2025 : dans le cadre de ce rapport, scénario France « Nouveau Business as Usual »

3. ADEME-Arcep, 2023 : Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France

4. RTE, 2023 : Bilan prévisionnel - Édition 2023 - Futurs énergétiques 2050 - 2023-2035 : première étape vers la neutralité carbone

* Par exemple, -45 % entre 2020 et 2030 (SBTi, 2022), -90 % entre 2020 et 2050 pour s'approcher de scénarios « net zero ».

X. Les centres de données en France : des tendances actuelles aux scénarios de décarbonation

Cette partie explore l'impact sur la consommation d'électricité, les émissions de gaz à effet de serre et les objectifs de décarbonation de la France du déploiement des centres de données en France, en se concentrant sur deux éléments clés : les capacités de ces centres (puissance installée et leur montée en charge) et leur utilisation (évolution du facteur de charge et du PUE).

En ce qui concerne les capacités, c'est-à-dire la puissance des installations, plusieurs éléments en conditionnent l'évolution :

- L'état actuel des capacités installées,
- La quantité de capacités demandées (par les acteurs du secteur aux gestionnaires du réseau RTE et ENEDIS pour leur raccordement),
- L'état d'avancée de ces demandes dans le processus entre la demande et le raccordement effectué : études exploratoires, proposition technique et financière (PTF), convention de raccordement, raccordement disponible,
- Le rythme réel de déploiement des capacités actuellement en file d'attente.

En ce qui concerne l'usage des capacités raccordées, cela dépend :

- Du rythme réel de montée en charge des capacités déjà raccordées : combien de temps un centre de données met-il à avoir sa puissance maximale ?
- De la puissance maximale effectivement installée à terme vis-à-vis des puissances annoncées initialement (qui sont des maxima théoriques),
- Du PUE¹⁰⁰ initial et son évolution au cours du temps,
- Du facteur de charge initial et son évolution au cours du temps : quelle est l'utilisation de la puissance installée ?

Ce sont quelques variations possibles de ces éléments et réponses à ces questions qui mènent aux scénarios détaillés ci-dessous. Les informations relatives à la modélisation sont disponibles en Annexes 8 et 9¹⁰¹ (The Shift Project, 2025a).

A. Scénarios étudiés

Dans ce rapport, trois scénarios ont été étudiés :

- **Le scénario « nouveau tendanciel »** qui décrit ce qu'il se passerait si les projets correspondant aux capacités actuellement réservées¹⁰² dans le pipe de RTE arrivaient à terme. Il est décliné

¹⁰⁰ Power Usage Effectiveness : indicateur d'efficacité énergétique utilisé pour qualifier l'efficacité énergétique d'un centre de données. C'est le ratio entre l'énergie totale consommée par l'ensemble du centre d'exploitation (avec entre autres, le refroidissement, le traitement d'air, les onduleurs...) et la partie qui est effectivement consommée par les systèmes informatiques que ce centre exploite (serveurs, stockage, réseau).

¹⁰¹ A noter en particulier, l'hypothèse d'évolution de la consommation des usages français dans les centres de données hors territoire français choisie : à partir d'une modélisation du point 2020 (Hubblo & Fourboul E., 2023), nous avons modélisé une évolution avec la même proportion de consommation électrique en France.

¹⁰² Celles pour lesquelles une proposition technique et financière (PTF) a été faite.

en deux variantes prenant en compte la réalisation intégrale ou, au contraire, l'absence de réalisation des objectifs définis lors du Sommet de l'IA selon ses deux variantes. Il s'agit de scénarios exploratoires¹⁰³.

- **Le scénario « anciennement tendanciel »**, qui n'est pas issu de notre modélisation mais de précédentes approches prospectives réalisées par l'ADEME - Arcep et publiée en 2023 (ADEME & Arcep, 2023).
- **Le scénario « cible »**, dans lequel nous analysons la faisabilité du respect de plusieurs objectifs de réduction d'émissions de gaz à effets de serre. Il s'agit d'un scénario normatif¹⁰⁴. Deux objectifs sont définis :
 - En 2030 par rapport à 2020 : - 30 % d'émissions territoriales et - 45 % d'émissions pour les usages français à l'étranger, objectifs proposés par le Shift Project dans la note d'analyse de 2023 (The Shift Project, 2023).
 - En 2050 par rapport à 2020 : - 90 % d'émissions (territoriales et usages français sur des centres de données situés à l'étranger), chiffre correspondant à une stratégie de neutralité carbone à horizon 2050 (Commission européenne, 2019).

B. Soutenabilité climat-énergie : identifier les conditions de compatibilité

En 2035, la consommation des centres de données en France pourrait atteindre 7,5 % de la consommation totale d'électricité, contre seulement 2 % aujourd'hui.

La consommation d'électricité dans le scénario « nouveau tendanciel » est très importante : entre 33 TWh et 45 TWh en 2035 selon que les annonces du Sommet de l'IA soient réalisées ou non. Soit entre 5,5 et 7,5 % de la consommation projetée dans par RTE en 2035 (autour de 610 TWh) (RTE, 2023) et jusqu'à un tiers de la consommation de l'industrie^{105,106}.

La comparaison entre les scénarios « nouveau tendanciel » et « ancien tendanciel » témoigne de la difficulté à anticiper la croissance du secteur et les risques qui en découlent.

En comparant ces résultats (Figure 34) à ceux du scénario « ancien tendanciel » (pour rappel, il s'agit de l'étude ADEME - Arcep qui ne date que de 2023), cela donne une vision claire de la difficulté de l'exercice prospectif face à la fois à la dynamique effrénée du secteur et au manque de transparence sur les données caractéristiques. Sur l'état des lieux tout d'abord, l'incertitude est conséquente : 8,3 TWh pour le scénario « nouveau tendanciel », 11,6 TWh pour l'ancien¹⁰⁷. Pour 2030, le tendanciel a augmenté de 50 % passant de 16,4 TWh à 23,3 TWh dans cette modélisation.

Le manque de transparence sur les centres de données opérationnels a conduit aux Etats-Unis à une impasse énergétique (et à un détricotage des scénarios de décarbonation du secteur électrique) ; en France il induit un risque réel dans l'exercice de programmation pluriannuelle de l'énergie.

¹⁰³ Les scénarios exploratoires décrivent, à partir d'une situation présente et des tendances, une suite d'événements conduisant d'une façon logique à un futur possible. L'objectif est de mettre en évidence les conséquences qui en découlent.

¹⁰⁴ Un scénario normatif détermine un ensemble donné d'objectifs à réaliser, dont la synthèse produit une image d'un futur possible.

¹⁰⁵ Comparaison consommation industrie du scénario réindustrialisation (RTE, 2022)

¹⁰⁶ Même constat que dans la partie « Conflit d'usage : anticiper pour réduire les risques de tensions entre centres de données et transition énergétique » actualisé avec les données de ce scénario.

¹⁰⁷ Avec une part importante des centres de données entreprise. Cf. explications plus haut sur la consolidation des chiffres des différents acteurs : pour quelles raisons sont-ils différents, etc.

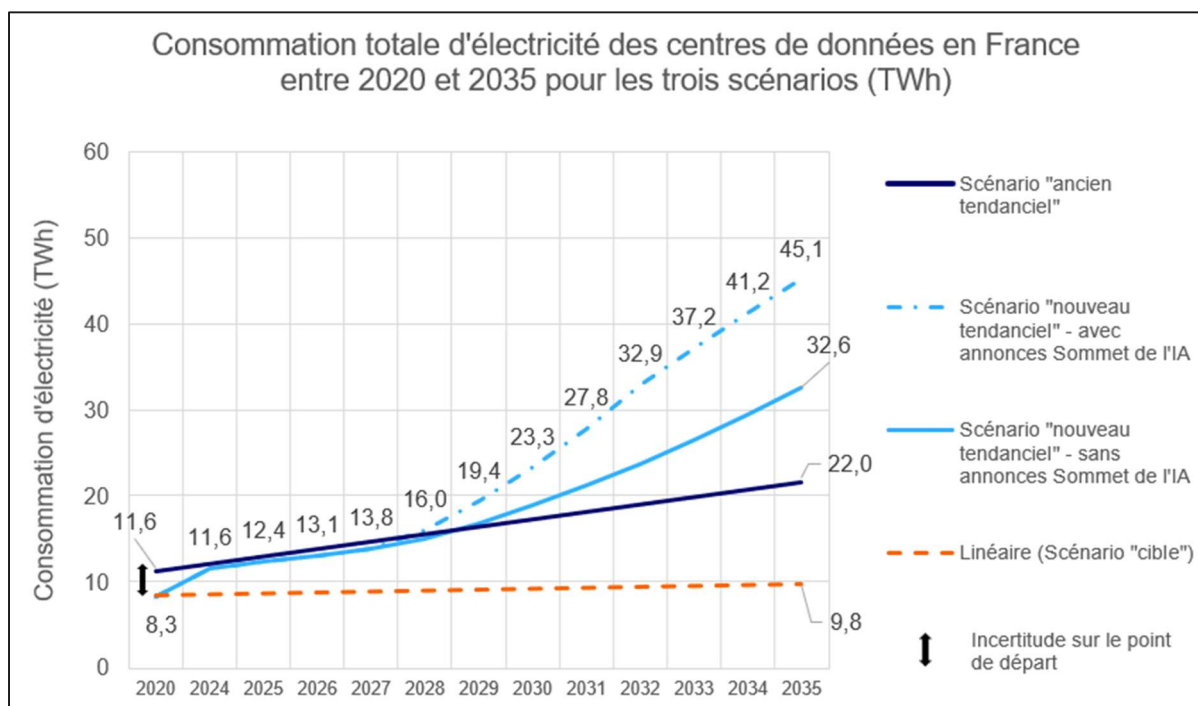


Figure 34 - Consommation des centres de données en France entre 2020 et 2035 pour les trois scénarios. Source : (The Shift Project, 2025b)

La poursuite du scénario « nouveau tendanciel » rendrait totalement incompatible l'atteinte des objectifs 2030.

Sur la Figure 35 sont tracées les émissions de gaz à effet de serre en empreinte des centres de données dans la variante avec les annonces du Sommet de l'IA. La ligne en pointillé correspond à l'objectif en empreinte pour 2030, qui n'est donc absolument pas atteint.

Conserver la dynamique actuelle rendrait caduque l'atteinte des objectifs de décarbonation du secteur pour 2030, en inventaire national et en empreinte.

Si la tendance actuelle de la filière se poursuit et que les annonces du sommet de l'IA se concrétisent, les émissions territoriales du secteur en 2030 seraient de 1,5 MtCO₂e, soit une augmentation de 67 % par rapport à 2020 en lieu et place d'une réduction de 30 %. Afin de tenir cet objectif fixé dans le scénario cible, il faudrait limiter la consommation du secteur en France à 9,3 TWh en 2030, soit une quasi-stabilité alors que le scénario « nouveau tendanciel » conduit à minima à un doublement (18,9 ou 23,3 TWh en 2030 selon la variante).

Côté empreinte, pour rappel, nous visons l'objectif de - 45 % pour les émissions de nos consommations d'usages sur les centres de données situés à l'étranger pour 2030 : ce sont les objectifs SBTi. En prenant en compte la réduction de l'intensité carbone de l'électricité monde, afin de respecter ces objectifs, il faudrait que la consommation des centres de données étrangers soit de 12,4 TWh, contre 13,3 TWh¹⁰⁸ aujourd'hui.

108 (ADEME, 2025)

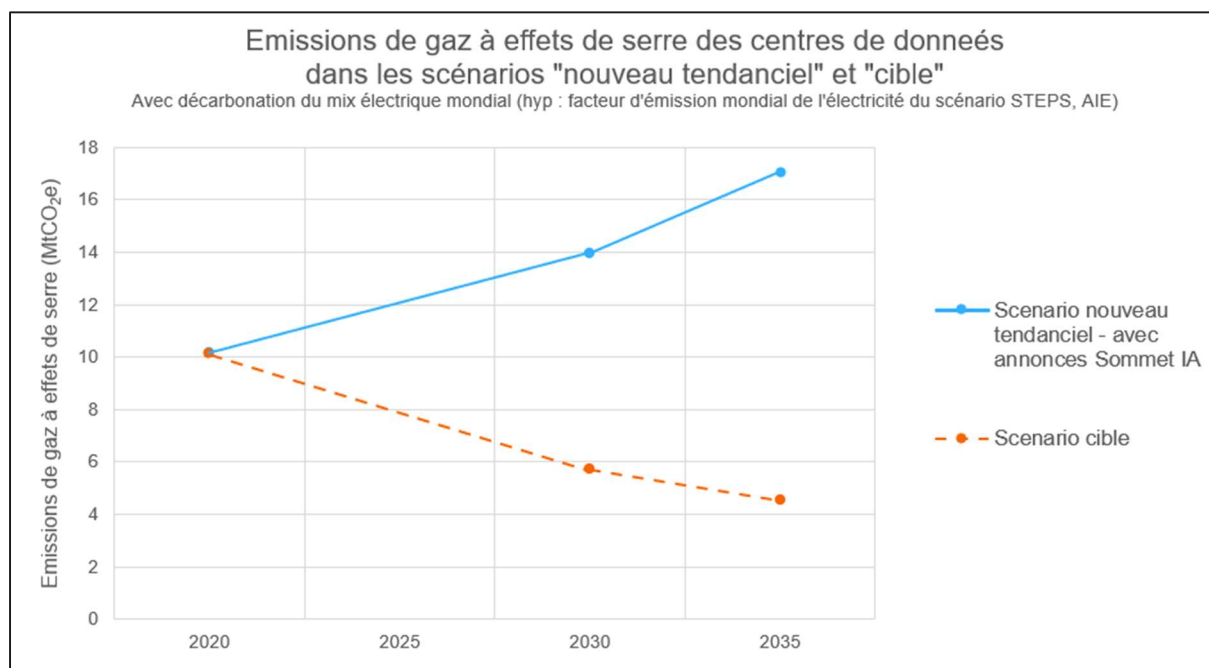


Figure 35 - Empreinte carbone du secteur des centres de données selon la variante « avec annonces sommet IA » du scénario « nouveau tendance » et cible.

Source : (The Shift Project, 2025b)

Même si la consommation d'électricité engendrée par les usages français de centres de données à l'étranger restait constante, il serait impossible d'atteindre les objectifs 2050.

En 2050, malgré la diminution continue des facteurs d'émission de l'électricité, l'objectif de - 90 % de l'empreinte par rapport à 2020 est inatteignable : les seules émissions dues aux consommations à l'étranger actuelles seraient supérieures à cet objectif.

L'argument du facteur d'émission faible de l'électricité en France est parfois avancé pour justifier une politique forte d'attraction des projets de construction.

Si l'on fait l'expérience de pensée qui consiste à laisser 3 TWh de consommation électrique pour les usages français sur les centres de données situés à l'étranger, alors, respecter les objectifs pour 2050 reviendrait à accepter au maximum autour de 40 TWh sur le territoire français en 2050¹⁰⁹. L'abaque Figure 36 permet de généraliser cette expérience de pensée en faisant varier la consommation électrique résiduelle sur les centres de données situés à l'étranger entre 0 et 13,3 TWh¹¹⁰. Par ailleurs, respecter cette stratégie de réduction des émissions de gaz à effets de serre à l'international nécessiterait une politique stricte obligeant les entreprises à utiliser le cloud en France.

Au vu de la tendance actuelle, cette consommation sera déjà dépassée en 2035 selon le scénario « nouveau tendanciel » (45 TWh pour les consommations nationales).

¹⁰⁹ Consommation ré-importée incluse.

¹¹⁰ Clés de lecture de la figure 36 : Si la consommation des usages français à l'étranger, qui est estimée à 13,3 TWh en 2020, est de 3 TWh en 2050, alors il serait possible de consommer jusqu'à 37 TWh dans les centres de données en France pour respecter un objectif de décarbonation de - 90 % entre 2020 et 2050. Autre exemple, si cette consommation reste constante à 13,3 TWh, alors il est impossible de respecter les objectifs (consommation négative en France, courbe en pointillée).

Tenir l'objectif 2050 ne peut donc se faire qu'en limitant l'installation de nouveaux centres de données en France quand bien même notre électricité est relativement décarbonée ; ceci ne pouvant se faire sans une réflexion sur la structuration de l'offre dans la filière centres de données et de ses modèles d'affaires.

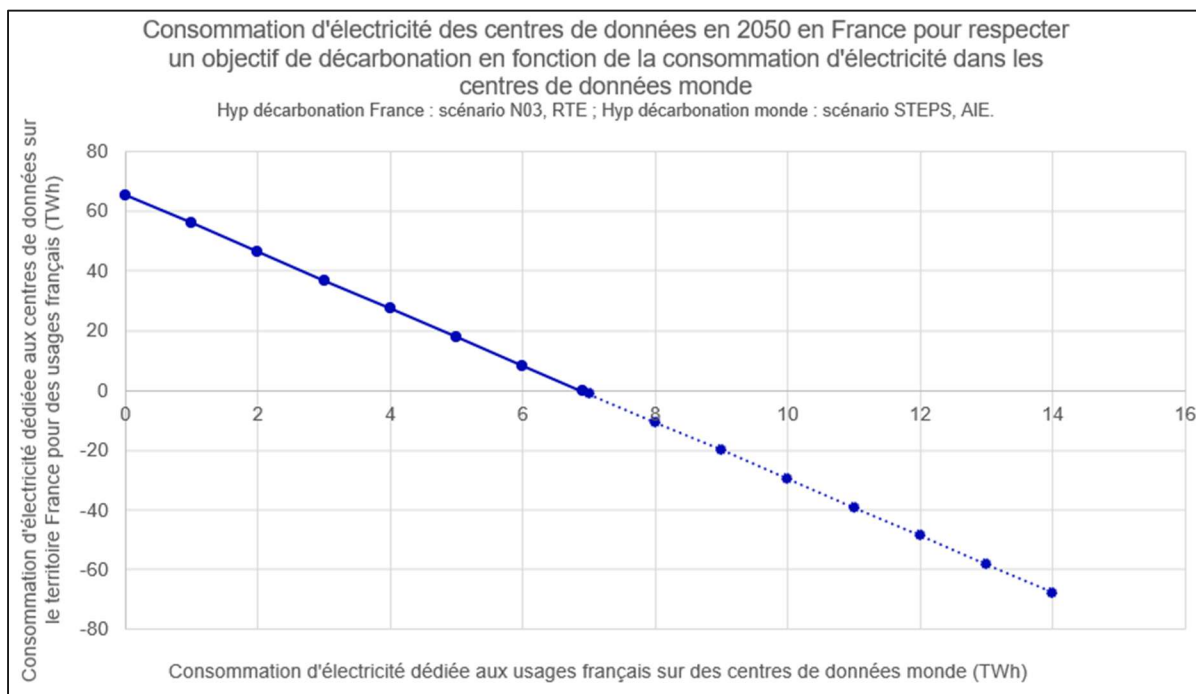


Figure 36 - Consommation d'électricité 2050 restante pour les centres de données en France (ou pays équivalent en décarbonation de l'électricité) afin de respecter un objectif de décarbonation en 2050 (-90 % entre 2020 et 2050) une fois décompté l'empreinte carbone des usages français dans les centres de données monde. Source : (The Shift Project, 2025b)

XI. L'intégration des centres de données, un enjeu local : gestion de l'eau, débat public, évolutions réglementaires¹¹¹

Afin de permettre un développement pérenne, à la fois pour les régions, territoires et filières économiques, ces acteurs vont dorénavant avoir à intégrer plusieurs facteurs incontournables dans leurs stratégies : gestion de l'eau, **intensification des événements climatiques extrêmes**, objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN), préservation de zones naturelles, etc.

Si les **externalités positives et négatives des centres de données** (attractivité, emploi, pollution de l'air¹¹², ressources limitées en eau, sols, énergie, climat, environnement, etc.) **restent relativement stables en nature, leurs impacts quantitatifs peuvent varier, voire franchir des seuils critiques**. Ainsi, une externalité jugée mineure hier pourrait devenir significative demain.

A. La gestion de l'eau par les centres de données et l'intensification des événements climatiques extrêmes

Les centres de données nécessitent un refroidissement constant et le maintien d'un taux d'humidité suffisant pour maintenir la performance des serveurs et leur bon état. Sans refroidissement, les températures dans les centres de données peuvent atteindre des niveaux susceptibles d'endommager les équipements, de provoquer des pertes de données et de réduire leur efficacité. Le système de refroidissement est souvent l'un des principaux facteurs de consommation d'eau dans ces installations.

Systèmes de refroidissement et consommation d'eau :

Consommation directe ou indirecte :

Cette consommation peut être directe (l'eau est utilisée dans les circuits de refroidissement) ou indirecte (pour produire l'électricité consommée par les centres de données, et pour la fabrication des équipements) (Alkrush A. et al., 2024).

Types de refroidissement (selon taille du centre de données et technologies disponibles) :

- Le **refroidissement par climatisation**. Ce système repose sur la réfrigération mécanique à compression de vapeur, assurée par un climatiseur. Les salles informatiques sont équipées de dispositifs permettant de diriger l'air froid vers les serveurs.
- Le « **free cooling** ». Cette méthode consiste à utiliser l'air frais extérieur pour refroidir les serveurs, éliminant ainsi le besoin de climatisation. Elle est efficace tant que la température extérieure ne dépasse pas 25°C. Elle est souvent combinée avec un refroidissement par évaporation d'eau.
- Les **refroidissements liquides** :
 - Le « **Indirect Liquid Cooling** ». Ce système combine le refroidissement à air avec l'efficacité thermique des liquides. Le liquide n'est pas en contact direct avec les équipements informatiques, mais il aide à soutenir le refroidissement à air traditionnel.
 - Le « **Direct Liquid Cooling** ». Dans ce système, un liquide froid circule à travers des tuyaux en contact direct avec les composants générant de la chaleur (comme les processeurs ou les cartes graphiques).

¹¹¹ L'ensemble des enjeux n'est pas traité dans cette partie. Au sujet de la chaleur fatale, voir par exemple : (ADEME, 2024a)

¹¹² Le sujet de la pollution de l'air n'a pas été étudié dans le cadre de ce rapport bien que des participants aux ateliers collaboratifs que nous avons organisé le 6/03/2025 aient mentionné son importance. La pollution de l'air est majoritairement due aux systèmes de secours utilisés en cas de crise mais aussi régulièrement pour tester leur bon fonctionnement. L'impact sur la pollution de l'air de la concentration des centres de données (en puissance, GW) et donc des systèmes de secours est à surveiller. De plus, l'impact GES des groupes électrogènes de secours est un élément qu'il faudra investiguer plus en profondeur.

- Le « **Immersion Cooling** ». Cette technique consiste à immerger les serveurs dans un liquide diélectrique, c'est-à-dire un liquide isolant.

Boucle fermée ou ouverte

L'eau permet d'évacuer la chaleur au moyen de systèmes à boucle fermée ou ouverte. Dans les boucles ouvertes, l'eau est prélevée d'un environnement naturel (comme un fleuve ou une nappe phréatique), passe par des échangeurs thermiques où elle capte la chaleur, puis est rejetée, souvent sous forme de liquide ou de gaz après un réchauffement, via un procédé de refroidissement adiabatique où l'eau est évaporée.

Types d'eau

Les types d'eau utilisés dans ces systèmes peuvent varier : en majorité de l'eau potable¹¹³, et parfois des eaux grises¹¹⁴, ou encore de l'eau de mer¹¹⁵.

Les études d'impact sont essentielles pour garantir la préservation des ressources en eau locales et le bon fonctionnement des serveurs.

La gestion de l'eau dans les centres de données relève d'une approche locale spécifique, car elle dépend de nombreux facteurs propres à chaque territoire.

En aval de la construction, l'impact environnemental de la consommation d'eau des centres de données devrait être étudié. Un rapport de Nature Finance évalue à 45 % la part des centres de données dans le monde qui sont situés dans des bassins fluviaux où la disponibilité de l'eau est un risque élevé (Nature Finance, 2025). Le rapport de Nature Finance suggère ainsi que des évaluations de l'impact environnemental de la consommation d'eau des centres de données doivent être réalisées, surtout dans les régions où l'eau est une ressource rare. Parmi les indicateurs essentiels figurent la disponibilité de l'eau de base, la pollution de l'eau et le risque de sécheresse.

Ainsi, une première étape, dans la poursuite de l'article 33 de la SREN (Légifrance, 2024) pourrait être de **rendre obligatoire la transparence sur les prélèvements et consommations d'eau** des centres de données existants : quantité, sources d'approvisionnement et méthodes de gestion de l'eau. Pour les centres de données encore en projet, il pourrait être **rendu obligatoire d'effectuer des études d'impacts** quant à :

- À la **disponibilité de l'eau** :
 - Y a-t-il un risque d'assèchement de la source ?
 - Y a-t-il un risque de stress hydrique pour les écosystèmes locaux, pour les habitants ou pour d'autres usages de l'eau par l'agriculture notamment ?
 - Dans la zone d'implantation, quelles sont les prévisions quant à l'évolution de la disponibilité en eau ?
 - L'eau utilisée est-elle en concurrence avec un autre usage (agriculture, foyers, etc.) ?
- À la **qualité de l'eau** :
 - En sortie des circuits de refroidissement, est-elle de qualité moindre ?
 - Est-elle rejetée à une température acceptable pour les écosystèmes aquatiques ?
- Aux **lieux de prélèvement et de restitution** :
 - Sont-ils identiques ?
 - S'ils ne le sont pas, quel est le risque d'assèchement de la zone de prélèvement ?

¹¹³ C'est par exemple le cas à Marseille : les centres de données de Digital Reality sont refroidis par « river-cooling », à partir d'une galerie d'exhaure de qualité potable. L'eau est alors détournée via un réseau de pipelines et transite ensuite par des stations de pompage, avant de rejoindre les centres de données.

¹¹⁴ Certaines installations utilisent des eaux usées non traitées pour refroidir les serveurs. C'est le cas du centre données Infomart à San Jose (Californie), ou de celui de Google à Douglas (Géorgie, Etats-Unis) qui utilisent les eaux grises locales pour leur refroidissement (Diguët C. et al., 2019).

¹¹⁵ Au-delà du refroidissement par eau de mer, Microsoft a immergé un petit centre de données (800 serveurs) pendant deux ans (futura-sciences, 2020).

La gestion des ressources en eau est également un enjeu opérationnel pour les centres de données. En effet, si l'eau venait à manquer ou si les températures devenaient trop élevées pour un refroidissement efficace, cela impacterait directement le fonctionnement des installations.

Il faut anticiper l'intensification des événements climatiques extrêmes

Les trajectoires de réchauffement peuvent définir de nouvelles contraintes. Par exemple, des zones interdites car ne disposant pas du volume d'eau requis pour les centres de données en période de sécheresse et de forte chaleur, des zones interdites car pouvant créer des îlots de chaleur en ville, etc.

La prise en compte de l'évolution des conditions climatiques d'un territoire est essentielle pour assurer la pérennité des territoires et des filières économiques. Autre exemple, les risques d'inondations et de tempêtes peuvent endommager les bâtiments et perturber les systèmes de refroidissement.

Mais aussi, en cas de sécheresse ou de canicule, la disponibilité en eau peut fortement diminuer ce qui accroît la pression sur la ressource et les besoins en climatisation sont accrus.

Ces événements climatiques peuvent par ailleurs fragiliser les réseaux électriques : en période de crise, les coupures de courant peuvent se multiplier, entraînant un recours accru aux installations de secours, souvent polluantes et coûteuses.

B. Le débat public doit tenir compte de la double contrainte carbone

L'IA, souvent considérée par défaut dans le débat public comme une force motrice tant pour la transition énergétique que pour d'autres progrès, est une transformation numérique d'importance aux impacts infrastructurels et matériels majeurs (cf. parties précédentes sur les évaluations carbone monde, Europe, France). Cette direction technologique, matérielle, énergétique et climatique est un choix politique (tout comme le déploiement des usages vidéo et des réseaux associés, 5G etc.) (The Shift Project, 2019, 2021) même s'il n'est pas formalisé comme tel et réclame un débat public informé dans lequel la contrainte carbone est considérée tant pour l'évaluation des externalités que pour la définition même du cadre de soutenabilité : quid des progrès attendus et des bénéfices espérés pour l'ensemble de la société dans des trajectoires matérielles, énergétiques et climatiques complexifiées ?

Pour ce faire, le débat doit impliquer les différentes parties prenantes (société civile, représentations citoyennes, institutions planificatrices du numérique, régulateur, institutions planificatrices des trajectoires carbone-énergie et environnementales, monde économique, acteurs du secteur etc.) aux niveaux les plus pertinents pour adresser les questions réglementaires (France, Europe ou autres).

C. Un état des lieux des évolutions réglementaires en cours

L'installation de centres de données sur le territoire français est encouragée via l'exonération de la taxe sur la consommation d'électricité (TICFE) pour les opérateurs de centres de données qui respectent certaines conditions (Legifrance, 2022)¹¹⁶. Parallèlement, quelques récentes évolutions réglementaires

¹¹⁶ Relève d'un tarif réduit de l'accise, pour la fraction qui excède un gigawattheure sur une année civile, l'électricité consommée pour les besoins de l'infrastructure immobilière qui répond aux conditions cumulatives suivantes : [...] 3° Elle comprend des dispositifs spécifiques et dédiés de contrôle de son environnement thermique, de la qualité de son air, de son alimentation en énergie et de prévention des incendies ; 4° Elle intègre un système de management de l'énergie conforme aux critères prévus au second alinéa de l'article L. 233-2 du code de l'énergie ; 5° L'exploitant adhère à un programme, reconnu par une autorité publique, nationale ou internationale, de mutualisation des bonnes pratiques de gestion énergétique des centres de données incluant : a) L'écoconception des

pourraient alléger les conditions d'installation des centres de données : le label projet d'intérêt national majeur, les assouplissements de la Zéro Artificialisation Nette (ZAN) et la procédure de raccordement « fast track » pour les sites à forte consommation d'énergie.

Le label projet d'intérêt national majeur (PINM)

Le projet de loi de simplification de la vie économique (Vie publique, 2025), en particulier son article 15, prévoit de délivrer à certains centres de données le label de Projet d'Intérêt National Majeur (PINM). Pour les projets ayant ce label, il sera possible pour l'autorité compétente d'autoriser les projets qualifiés d'intérêt national majeur à déroger aux règles des plans locaux d'urbanisme relatives à la hauteur, dans des limites déterminées par décret en Conseil d'État.

Ce label vise les « gros » centres de données ayant une importance particulière « eu égard à [leur] objet et à [leur] envergure, notamment en termes d'investissement, de puissance installée et de soutien à l'émergence d'écosystèmes domestiques compétitifs ». Pour un centre de données labélisé PINM, la loi permettrait d'accélérer certaines démarches administratives (compatibilité des documents d'urbanisme, raccordement au réseau électrique, reconnaissance des raisons impératives d'intérêt public majeur - RIIPM) (Vie publique, 2024).

La loi Zéro Artificialisation Nette (ZAN)

Dans le cadre du projet de loi de simplification de la vie économique (Sénat, 2024) deux amendements relatifs au ZAN ont été adoptés visant à supprimer l'exonération intégrale des implantations industrielles du décompte de l'artificialisation des sols par les communes dans le cadre de la loi Climat et résilience de 2021 (Assemblée nationale, 2025) et à supprimer l'objectif national intermédiaire de réduction de moitié de l'artificialisation sur la période 2021-2031 par rapport à la décennie précédente.

Le 28 mai 2025, lors de l'examen du projet de loi sur la simplification économique, plusieurs amendements ont été adoptés (Assemblée nationale, s. d.), dont un permettant de dépasser de 30 % la surface des terrains naturels aménageables sans justification, dans le cadre de la mise en œuvre du ZAN. Ces évolutions pourraient transformer le cadre dans lequel les centres de données sont déployés, et selon quelles conditions.

La procédure « fast track »

Les centres de données annoncés lors du Sommet sur l'IA et à l'événement Choose France ont des capacités demandant leur raccordement au réseau très haute tension (400 kV), pour lequel la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) a approuvé en mai 2025 un raccordement accéléré (Commission de Régulation de l'Énergie, 2025). Cette procédure « fast track » permet un raccordement sans limitation de capacité pour les sites de consommation d'énergie élevée, préalablement désignés par l'État. En juin 2025, la CRE a validé les modalités contractuelles et financières pour ce raccordement accéléré, permettant aux porteurs de projets de demander un raccordement rapide sans

centres de stockage de données ; b) L'optimisation de l'efficacité énergétique ; c) Le suivi de la consommation énergétique et la réalisation de comptes rendus périodiques y afférents ; d) La mise en œuvre de technologies de refroidissement qui répondent à des critères de performance. 6° La chaleur fatale qu'elle génère est valorisée au sein d'un réseau de chaleur ou de froid ou l'installation respecte un indicateur chiffré sur un horizon pluriannuel en matière d'efficacité dans l'utilisation de la puissance, déterminé par décret ; 7° L'eau qui y est utilisée à des fins de refroidissement est limitée selon un indicateur chiffré sur un horizon pluriannuel, déterminé par décret ; 8° Le niveau d'électro-intensité, apprécié à l'échelle de cette installation, est au moins égal à 2,25 %.

restriction. Ainsi, les délais d'installation de ces centres de données sont bien plus courts : il est prévu que ceux-ci soient opérationnels dès 2028.

Le dispositif de « Use it or lose it » (UIOLI)

Il arrive fréquemment que les capacités de raccordement demandées par les projets aux gestionnaires du réseau d'électricité RTE et ENEDIS soient bien supérieures à la puissance qui sera réellement utilisée. En effet, il faut quelques années pour remplir de serveurs un centre de données et que les serveurs soient progressivement utilisés. Cependant, il peut arriver que la capacité initiale soit volontairement annoncée bien supérieure, et cela pour diverses raisons : concurrence entre entreprises qui veulent jouer sur des coups d'annonces ou prendre les raccordements possibles avant leurs voisins, investissements revus à la baisse en cours de projet etc.

Avec ce dispositif, la puissance de raccordement des datacenters pourra désormais être récupérée par RTE (DCMag, 2025d) lorsque la puissance maximale soutirée par ces installations est inférieure à la puissance de raccordement en soutirage prévue. C'est le dispositif UIOLI (Use it or lose it), instauré par l'article L. 342-24 du Code de l'énergie, qui s'appliquera à compter d'août 2025 à toutes les installations, existantes comme nouvelles. Ainsi, si la puissance réellement utilisée est inférieure à celle demandée, RTE pourra ajuster à la baisse la puissance allouée. Les centres de données ne bénéficient d'aucune dérogation, malgré la demande du secteur qui invoquait leur rôle stratégique dans la souveraineté numérique et la montée en charge progressive de leur activité (DCMag, 2025d)¹¹⁷.

La réglementation européenne

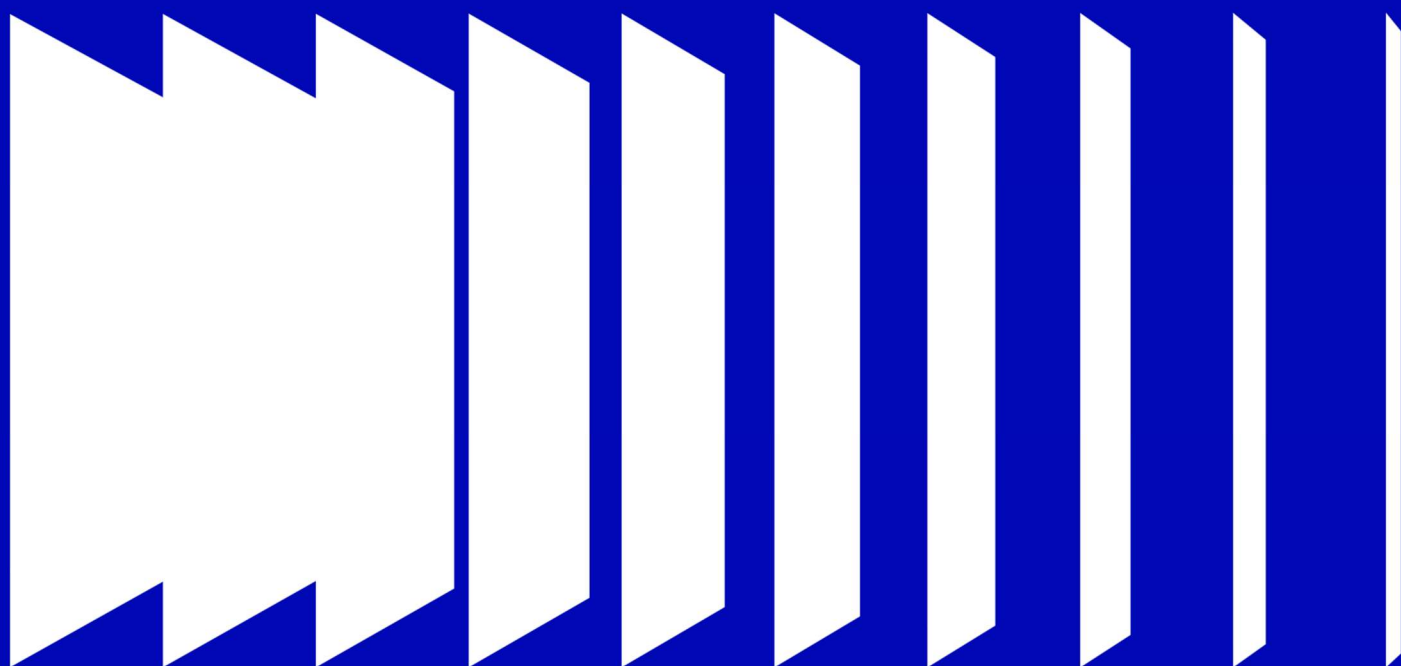
Dans le cadre des politiques numériques européennes, plusieurs initiatives visent à promouvoir la transformation numérique tout en intégrant des objectifs de durabilité. La directive européenne sur l'efficacité énergétique (EED) impose notamment un reporting de l'empreinte environnementale des centres de données, traduisant une volonté d'améliorer la transparence et la performance énergétique de ces infrastructures. Il est plus que probable que cette directive ne soit que partiellement appliquée aujourd'hui puisque les consommations déclarées sont autour de 14 TWh au total en juillet 2025 (European Commission et al., 2025).

Ces mesures européennes s'inscrivent dans le projet de Digital Decade (Commission européenne, s. d.) à l'horizon 2030, qui fixe des cibles ambitieuses, comme l'adoption généralisée de l'intelligence artificielle, du cloud ou des Big Data dans au moins 75 % des entreprises. Ce projet global s'appuie sur plusieurs instruments législatifs, dont le Gigabit Infrastructure Act, visant à renforcer les capacités de connectivité à l'échelle du continent. Enfin, il est à noter que l'AI Act, qui joue un rôle central dans la régulation de l'intelligence artificielle, ne prévoit à ce stade aucune obligation spécifique¹¹⁸ relative à l'empreinte environnementale des systèmes d'IA.

¹¹⁷ « Malgré la demande de la filière, l'arrêté du 14 novembre 2024 relatif aux installations soumises à l'article L. 342-24 du Code de l'énergie s'applique aux data centers. La filière souhaitait en effet être exclue du dispositif, compte tenu de l'importance stratégique des data centers pour la souveraineté numérique de la France et de l'évolution progressive de leurs besoins en fonction de la demande de leurs clients. En ce sens, dans sa réponse publique à la seconde consultation menée par la Commission de régulation de l'énergie (CRE) sur ce dispositif, Microsoft prenait l'exemple des Pays-Bas. Cet Etat a également introduit des règles similaires au dispositif UIOLI, en exemptant néanmoins certains clients fournissant des « services essentiels », à l'instar des datacenters. » (DCMag, 2025d)

¹¹⁸ Les recommandations des codes de conduite, rédigés par le bureau de l'IA, doivent donner « la mesure et la minimisation de l'impact des systèmes d'IA sur la soutenabilité environnementale, et non des obligations » (article 95) (European union law, s. d., p. 95).

Chapitre 3 IA & climat : Réorienter nos choix et stratégies technologiques jusqu'à la compatibilité carbone



XII. L'intelligence artificielle : un système d'usages numériques comme les autres

A. L'insoutenable usage de l'intelligence artificielle

De la même manière que les usages vidéo, les offres de mondes virtuels ou les usages mobiles, les services relevant de l'intelligence artificielle constituent bien un « système d'usages » numériques (The Shift Project, 2019, 2024a, 2024b) : un ensemble de services, d'activités et de modes d'utilisation rendus possibles par certaines infrastructures, dont elles justifient et alimentent les dynamiques macroscopiques.

L'intelligence artificielle s'appuie sur l'infrastructure numérique dans son ensemble, mais tout particulièrement sur son cœur battant : les centres de données. Or, les dynamiques de cette filière ne sont compatibles ni avec les contraintes climatiques, ni avec la transition énergétique - ni aujourd'hui, ni au vu des trajectoires dans lesquelles le secteur se projette :

- Les centres de données connaissent une augmentation sans précédent de leurs émissions de gaz à effet de serre (+ 9 à 13 % / an atteignant 0.6 à 0.9 GtCO₂e en 2030¹¹⁹) qui alimente la dérive climatique du secteur et des territoires dans lesquels ils s'implantent ;
- Les infrastructures énergétiques étant prises de vitesse par les dynamiques du numérique et de ses acteurs, le déploiement massif de centres de données alimente continument le recours aux énergies fossiles pour assurer leur mise en fonctionnement suffisamment rapidement¹²⁰ ;
- L'effort réclamé au secteur de l'énergie, sur les territoires français et européen a minima, pourrait mettre en péril la disponibilité électrique pour la transition énergétique si les dynamiques actuelles ne sont pas remises en question¹²¹.

Sans être une fatalité, l'absence d'objectif carbone pour la filière centres de données renforce cette situation.

Comprendre que le numérique et l'IA relèvent d'une dynamique aujourd'hui structurée par l'effet d'offre (cf. Figure 2)¹²² est un prérequis pour **éviter l'écueil qui consisterait à s'imaginer infléchir les dynamiques sectorielles plus tard, une fois les centres de données installés** : non seulement la demande sera structurée par cet effet d'offre, mais en plus de cela les impacts du déploiement seront des coûts carbone, énergie et environnementaux irrécupérables (coût carbone de la fabrication des équipements, coûts environnementaux de la construction de l'infrastructure, coûts et orientations des infrastructures électriques déployées pour assurer le raccordement de ces sites etc.).

La filière des centres de données, de par les dynamiques industrielles et les modèles d'affaires majoritaires qui la composent aujourd'hui, place le secteur et ses acteurs sur des trajectoires

¹¹⁹ Ces émissions de GES représenteraient non seulement 1.1 à 1.7 % des émissions mondiales en 2030 tous secteurs confondus, mais constituent aussi une part significative lorsqu'on les compare à la capacité d'absorption résiduelle d'une économie bas-carbone (cf. partie IV.A - Les choix actuels induisent une hausse sans précédent des émissions de gaz à effet de serre et Figure 2).

¹²⁰ Cf. « La filière centres de données justifie les infrastructures fossiles » et Figure 2.

¹²¹ Cf. « Conflit d'usage : anticiper pour réduire les risques de tensions entre centres de données et transition énergétique » et Figure 31.

¹²² Par exemple, les centres de données sont installés sur base de prévisions haussières, 1 à 5 ans avant d'en bénéficier et avec une incertitude sur la demande réelle qui se présentera : cela génère d'ailleurs un risque de saturation « contractuelle » de raccordement au réseau, pointé par RTE (p46, RTE, 2025b).

incompatibles avec les contraintes climatiques et énergétiques¹²³. **Il est donc nécessaire de définir un cap commun pour les parties prenantes, une trajectoire de référence donnant à la filière les budgets carbone et énergie au sein desquels elle doit structurer ses infrastructures, biens et services.** C'est ce qui permettra aux acteurs de s'organiser, pour rendre possible l'élaboration d'un terrain et de règles de jeu partagés, et compatibles avec les contraintes physiques de notre époque.

B. Les multiples usages de l'intelligence artificielle

Le terme « intelligence artificielle » recouvre une grande variété d'applications et de dynamiques (cf. « Pourquoi travailler sur l'intelligence artificielle et les centres de données au Shift Project ? ») :

- Des applications algorithmiques déjà déployées depuis plusieurs années voire décennies ;
- Des technologies et applications d'IA générative, dont la forte simplification de l'accès par le grand public ces dernières années a créé un « moment IA générative » ;
- Des dynamiques plus larges liées à l'intensification, l'augmentation et la dissémination de la capacité de calcul disponible (dans les terminaux, les montres connectées, les caméras de vidéo-surveillance, les automobiles...).

Sous la définition « d'intelligence artificielle », on peut ainsi trouver des biens, usages et services présents dans tous les secteurs de l'économie, dont par exemple¹²⁴ :

- Des analyses embarquées dans les caméras de vidéosurveillance (analyse de la circulation, analyses comportementales, déploiement en espaces publics ou privés, détection d'objets ou déchets sur l'espace public etc.) ;
- Des assistants conversationnels pédagogiques (apprentissage des langues, maths, français etc.) par interactions écrites ou verbales ;
- Des assistants conversationnels commerciaux (service client, simple conseil à identification de produits, accompagnement jusqu'à l'acte d'achat à partir d'une instruction simple etc.) dans de nombreux secteurs (assurance, tourisme, commerce et grande consommation etc.) ;
- Des algorithmes de recommandations et des outils de détection de contenus pour assistance à la modération de plateformes et réseaux sociaux (contenus violents, générés par IA etc.) ;
- Des assistants de génération de code informatique (génération d'un code en réponse à un cahier des charges, traduction d'un langage informatique à un autre etc.) ;
- Des outils de modélisation et d'amélioration des capacités de calcul haute performance dans la recherche et les sciences appliquées (chimie et pharmacologie, matériaux, modélisation climatique etc.) ;
- Des assistants de recherches d'informations au sein de corpus documentaires donnés (démarches administratives, corpus légaux, synthèses de rapports techniques etc.) ;
- Des applications dans l'énergie et l'assistance à pilotage de systèmes électriques ;
- Des applications industrielles pour la maintenance prédictive ou l'optimisation logistique ;
- Des applications « agentiques », en robotique et en automatisation ; etc.

¹²³ Plusieurs grands acteurs du numérique constataient la dérive de leurs trajectoires carbone (+ 30 % et + 48 % en 3-4 ans) par rapport à leurs engagements climatiques, suite au déploiement de l'IA générative notamment (Google, 2024; Microsoft, 2024).

¹²⁴ La liste n'est pas/ne pourrait pas être exhaustive. Le choix a été fait de ne pas accompagner cette liste d'exemple concrets pour éviter la mise en avant de certaines solutions commercialisées par rapport à d'autres. Dans le cadre des travaux préalables à la rédaction de ce rapport, différents cas d'usage ont été étudiés plus en détails, cf. Annexe 14 (The Shift Project, 2025a).

Les travaux réalisés dans le cadre de ce rapport ne peuvent prédire ni les évolutions technologiques, ni les combinaisons techniques à venir, ni les applications qui en découleront. D'autant plus que le terme « **intelligence artificielle** » est dynamique et toujours situé dans un contexte technologique et temporel, c'est-à-dire qu'il désigne un horizon technologique qui se déplace plutôt qu'une définition normative (en France *a minima*, l'intelligence artificielle désigne les applications d'automatisation les plus avancées, à un moment donné, en matière de traitement de l'information, de complexité des tâches, de précision et de fiabilité). Ainsi il n'est pas possible de prédire ses frontières futures.

C'est d'ailleurs pour ces raisons que **ce rapport décrit les dynamiques de l'intelligence artificielle au travers de ses infrastructures** qui, elles, ont une définition normative et une inertie industrielle qui rend leurs dynamiques **davantage appréhendables par la méthode prospective**. Pour analyser les dynamiques d'impact des cas d'usage IA de manière robuste, **l'approche retenue dans ces travaux passe par la description des effets, sur les infrastructures sous-jacentes, des choix technologiques faits au niveau des services et solutions**.

Dans les applications possibles de l'IA, on retrouve en fait les différentes catégories de services numériques au vu de leur positionnement vis-à-vis des contraintes environnementales :

- Les applications visant une réduction des impacts environnementaux (du numérique lui-même ou bien d'autres secteurs), communément désignés par l'appellation « AI for Green », l'intelligence artificielle au service des objectifs environnementaux (ces objectifs n'étant atteints que si le bilan net entre bénéfices et impacts environnementaux de la solution elle-même est positif) (cf. méthodologie EGDC, 2024¹²⁵);
- Les applications visant d'autres objectifs que des objectifs environnementaux : qualité des services de santé, amélioration de la productivité, efficacité ou rentabilité de certaines activités, amélioration de la fiabilité de certains processus etc.

L'IA, et plus largement le numérique, est un catalyseur du système dans lequel on l'intègre (amélioration de l'efficacité, de la rapidité d'exécution, de la productivité etc.). La déployer sans mettre en place de trajectoire de référence et de point de repère pour en orienter la conception et les infrastructures mènera donc mécaniquement à placer l'IA dans un paradigme systémique qui augmente les impacts environnementaux.

Autrement dit, déployer des cas d'usage de l'IA sans les intégrer dans une stratégie globale de décarbonation volontaire, pilotée et cohérente, c'est construire une IA qui restera tout autant fossile que l'économie dans laquelle on la place, tant dans les ressources qu'elle mobilisera pour son propre fonctionnement que dans les dynamiques qu'elle participera à alimenter dans le reste de l'économie.

¹²⁵ L'impact carbone net d'une solution ICT est la comparaison entre les impacts carbone d'un scénario avec une solution ICT et d'un scénario de référence sans solution ICT dans le même périmètre. Les impacts carbone positifs et négatifs totaux de chaque scénario sont pris en compte, y compris tous les effets directs et indirects dans le périmètre de l'évaluation.

XIII..... Évaluer les impacts carbone-énergie : complexité et diversité technique de l'IA

Comme mentionné précédemment, le terme IA fait référence à de nombreuses solutions, des services et des usages différents, dépassant l'IA générative et recouvrant une diversité technique importante. Les méthodes d'IA sont souvent définies comme des approches reposant sur de l'apprentissage machine permettant à un système de réagir à des situations jamais rencontrées précédemment. Or différentes techniques d'apprentissage existent (supervisées, non supervisées, par renforcement...) pour différentes applications visées (classification, génération de texte ou d'image, régression...).

Poser la question de la pertinence de ces solutions vis-à-vis de la contrainte carbone-énergie doit donc se faire de manière méthodique, en débutant par la première étape : comprendre les possibilités et limites de l'évaluation des impacts unitaires des solutions IA sur leur cycle de vie (phase d'inférence et phase d'entraînement).

A. Évaluer les impacts carbone-énergie de la phase d'inférence

Il existe de nombreux algorithmes d'apprentissage et modèles différents, et **leurs empreintes carbone respectives peuvent différer de plusieurs ordres de grandeur. Par exemple, sur la phase d'inférence :**

- Une évaluation de l'empreinte carbone directe de la phase d'inférence (Desroches C. et al., 2025), réalisée sur tout le cycle de vie des systèmes d'IA et pour des cas d'usage représentatifs d'applications en entreprise, montre la diversité des impacts associés, qui peuvent varier de plusieurs ordres de grandeurs suivant la taille du modèle ou encore la structuration du calcul et de ses étapes (étapes de calculs et de génération de *tokens*). Pour la phase d'inférence, les consommations énergétiques mesurées sont par exemple 50 à 25 000 fois plus importantes pour un large modèle d'IA générative agentique que pour un modèle d'apprentissage traditionnel¹²⁶(Desroches C. et al., 2025).
- **Une différence importante de consommation suivant les tâches est aussi constatée** dans certaines évaluations, avec par exemple des consommations qui peuvent être 50 à 100 fois plus élevées pour la génération d'images que pour de la génération de texte (Luccioni A. S. et al., 2024).

Les marges d'incertitudes sur ces mesures sont suffisamment importantes pour que les ordres de grandeur ne puissent pas être généralisés (Luccioni A. S. et al., 2024) : ils dépendent des outils de mesure utilisés et de nombreux paramètres, aujourd'hui documentés sur un nombre trop restreint de cas pour en tirer des analyses globales. Ils donnent néanmoins un aperçu des différences de consommations entre les modèles et leurs applications (Bouza L. et al., 2023; Jay M. et al., 2023), ainsi que des grands déterminants dans l'augmentation de leurs impacts carbone-énergie (Desroches C. et al., 2025; Luccioni A. S. et al., 2024) :

¹²⁶ De 3,5 mWh/inférence pour un modèle d'apprentissage traditionnel (Random Forest Classifier) à 96 Wh/inférence pour un large modèle d'IA agentique (table 1, p. 5).

- Taille du modèle, nombre de couches d'attention, la précision des poids (quantization) et niveau de polyvalence,
- Intensité bien plus importante des tâches de génération par rapport aux tâches de classification,
- Structuration des étapes de calculs.

À l'échelle macroscopique, ces augmentations d'impact très importantes suivant les modèles et applications sont tout sauf secondaires : certains de ces modèles, destinés à des applications très spécifiques (simulation numérique par exemple) mèneront à peu d'inférences et donc à un impact relativement faible à l'utilisation, quand d'autres sont utilisés des millions de fois par jour (cf. Figure 21 (Schneider Electric, 2024)).

B. Évaluer les impacts carbone-énergie de la phase d'entraînement

Le même constat peut être fait sur la phase d'entraînement que sur la phase d'inférence des modèles, avec de fortes variations entre les modèles d'IA génératives et de plus petits modèles adaptés à une tâche spécifique.

Si on s'intéresse à l'évolution historique, les besoins en calcul associés à l'entraînement des modèles d'apprentissage automatique pour une même tâche ont augmenté de manière exponentielle ces dernières années, **et ce malgré les stratégies d'optimisation visant à réduire la consommation d'énergie et l'impact carbone associés** (Morand C. et al., 2025).

Les stratégies mises en place par les acteurs de l'IA pour améliorer l'efficacité énergétique et carbone des modèles (optimisation technologique, réduction du contenu carbone de l'électricité utilisée etc.) n'ont en effet pas suffi à réduire les impacts de la phase d'entraînement : tirés par la croissance des intensités et quantités de calculs nécessaires, **les impacts liés à la production et l'utilisation des cartes graphiques, serveurs et centres de données ont augmenté exponentiellement le bilan carbone de la phase d'entraînement des modèles, entre 2013 et 2025.**

L'intensité énergie et carbone de la phase d'entraînement reste très largement supérieure à celle d'une seule tâche d'inférence, mais cette dernière croît directement avec le nombre d'utilisations du service : ainsi, si la phase d'entraînement peut représenter l'équivalent de plusieurs centaines de millions d'inférences pour de larges modèles polyvalents (Luccioni A. S. et al., 2024)¹²⁷, des déploiements généralisés comme ceux des *chatbots* actuels les plus populaires renversent la balance en quelques semaines seulement.

C. Évaluer les impacts carbone-énergie d'une solution d'IA : le cahier des charges

Non seulement comme tous les services numériques mais avec en plus ses spécificités fortes (diversité des applications couvertes et des solutions techniques disponibles, croisements et évolutions rapides), l'IA est donc une famille d'usages dont l'évaluation des impacts carbone-énergie unitaires est complexe parce que dépendant de nombreuses variables, qui seront propres à chaque typologie de situation de déploiement et de choix de conception. **Le cahier des charges d'une approche rigoureuse et au bon**

¹²⁷ p. 12-13

niveau de l'analyse de la pertinence d'une solution numérique reste cependant bien valable pour l'intelligence artificielle et ses applications. L'évaluation de la pertinence énergie-climat d'une application ou d'un service d'IA doit être :

- **Une évaluation systématique** : les conditions de pertinence d'une solution dépendent en grande partie des conditions dans lesquelles est effectué le déploiement. Il ne peut donc y avoir de réponse générique à la question de la pertinence d'une solution d'IA du point de vue énergie-carbone¹²⁸ : celle-ci doit être effectuée chaque fois, avant de valider un déploiement, afin de pouvoir prendre en compte son contexte spécifique (qui sera déterminant au premier ordre : nombre d'utilisations, quelle superposition avec d'autres services, quel appel de nouvelles infrastructures, quelles substitutions ou économies réelles par rapport à la situation initiale etc.).
- **Une évaluation exhaustive, en « bilan net »** : la pertinence énergie-climat d'une solution d'IA ne peut s'évaluer qu'en prenant en compte tous les impacts liés à son cycle de vie, y compris la phase de production des supports physiques qu'elle nécessite (terminaux, réseaux, cartes graphiques, serveurs et centres de données). Un bilan qui ne prendrait en compte que les impacts (positifs comme négatifs) liés à la phase d'utilisation, par exemple, n'apporterait pas d'indication qui puisse être pertinente pour aider au pilotage de l'impact carbone-énergie.
- **Une évaluation systémique** : les effets et impacts pris en compte dans l'évaluation de la pertinence d'une solution d'IA doivent intégrer les effets indirects (effets rebonds¹²⁹, transformation du système et des usages numériques dans lesquels la solution est déployée, transformation des usages hors-numérique, évolution des besoins de maintenance etc.). Se passer de cette analyse systémique, c'est choisir de courir le risque de voir les apports potentiels de la solution (énergie-climat ou autres) être intégralement contrebalancés par des effets indirects souvent puissants et pourtant régulièrement sous-estimés.

Cette évaluation des coûts carbone-énergie, pour permettre d'éclairer des choix de conception et déploiement de solutions d'IA, devra s'insérer dans une démarche complète, décrite dans la suite de ce rapport (cf. « Énergie, carbone - Orienter ses choix technologiques pour construire une IA soutenable : »).

XIV.....Évaluer les bénéfices énergie-carbone liés à une solution d'IA ?

Pour évaluer la pertinence des solutions numériques suivant leurs bénéfices environnementaux, plusieurs méthodologies existent aujourd'hui, aux niveaux français et européen (ADEME, 2024d;

¹²⁸ Par exemple, dans le cas d'usage sur les éclairages connectés (The Shift Project, 2020), la pertinence énergie-carbone de la solution dépend du type d'équipement préexistant (lampes LED ou non), de l'exposition lumineuse de la pièce et des profils d'utilisation des locaux. De même pour le compteur électrique communicant, dépendant au premier ordre des comportements humains (The Shift Project, 2020). Ou encore pour le cas des réunions en réalité virtuelle (The Shift Project, 2024b), dont les conclusions dépendent totalement du contexte : par exemple, la substitution réelle aux déplacements physiques n'ayant lieu que dans des environnements favorables au télétravail avec politique d'entreprise adaptée et appétence des collaborateurs.

¹²⁹ Avec des effets de différents types : gains financiers, effets d'induction, effet de substitution, d'optimisation, effet macroéconomiques et transformations sociétales, etc.

Carbone 4 et al., 2024; EGDC, 2024)¹³⁰. Elles permettent de dégager les grandes questions à documenter suivant les grandes familles d'applications, que nous spécifions ici sur les cas d'usage d'IA :

- Pour les applications d'IA au service d'une réduction de la consommation d'énergie et des émissions carbone :
 - Au sein de cette catégorie, on trouve certaines applications dont l'objectif est d'améliorer les rendements et l'efficacité de processus directement liés aux industries et infrastructures énergétiques fossiles. **Même dans le cas où ils permettent de réduire les impacts unitaires de procédés fossiles, ces cas d'usage, parfois désignés par l'appellation « AI for Brown », ne peuvent être considérées comme des applications « AI for Green »** (Carbone 4 et al., 2024). Cette catégorie rassemblant en effet les technologies de type « IA » aidant la transition à venir, **toute application s'inscrivant dans un scénario de maintien des énergies fossiles n'est, par construction, pas compatible avec ce périmètre.**
 - L'évaluation doit être transparente et rigoureusement établie - tout comme pour l'évaluation des coûts carbone-énergie de la solution, celle des bénéfices doit être :
 - **Systématique** : elle ne doit pas produire de constats généralisés à partir de cas d'usage ou d'exemple isolés, leur reproductibilité étant quasi-systématiquement fortement limitée (The Shift Project, 2020) ;
 - **Exhaustive** :
 - Elle doit prendre en compte toutes les phases du cycle de vie (y compris la production des équipements, et non uniquement la phase d'utilisation) ;
 - Elle ne doit pas uniquement se focaliser sur les bénéfices énergétiques, mais bien prendre en compte la dimension « carbone »¹³¹. Sans cela, l'évaluation de la pertinence de la solution ne sera pas utile au pilotage environnemental, donc la double-contrainte n'est elle-même que l'indispensable premier niveau de prise en compte.
 - **Systémique et contextualisée** : les conditions de pertinence d'une solution d'IA relèvent non seulement des effets indirects de son déploiement (effets rebonds, transformations de certains usages etc.) mais également du contexte dans lequel le service est déployé (infrastructures déjà présentes sur le territoire, systèmes d'usages déjà présents dans un groupe, politique et règles présentes dans une organisation etc.). L'évaluation doit prendre en compte ces limites, pour éviter des extrapolations de situations mal documentées, pouvant mener à la neutralisation des bénéfices potentiels d'un déploiement.
- Pour les applications d'IA visant à contribuer à relever le défi énergie-carbone via des effets autres que directs sur les émissions des activités humaines (par exemple, aide au développement de puits de carbone) : l'évaluation du coût carbone-énergie devra être effectuée au préalable de tout déploiement, selon le même cahier des charges que les autres types d'application. Ceci afin d'assurer que les choix effectués sont bien compatibles avec la trajectoire carbone de l'organisation, la prise en compte des effets bénéfiques devant être effectuée dans un second temps et à plus large échelle (Carbone 4 et al., 2024).

¹³⁰ Le Référentiel général pour l'IA Frugale (AFNOR, 2024) normalise le concept de « service d'IA à impact positif ».

¹³¹ Voir même d'autres dimensions comme la dimension « ressources minérales ».

- Pour les applications visant d'autres objectifs environnementaux que les enjeux énergie-carbone (adaptation au changement climatique, eau, biodiversité, pollution des sols etc.) : l'évaluation des coûts carbone-énergie devra être effectuée au préalable de tout déploiement, selon le même cahier des charges que les autres types d'application. Ceci afin d'assurer que le choix de déploiement ne se permette pas de porter préjudice à certains objectifs environnementaux au détriment d'autres¹³².

La prise en compte de cette évaluation dans l'orientation des choix technologiques doit se faire en s'assurant que le déploiement ait bien un impact énergie-carbone net positif, et en s'intégrant dans une démarche dont la première condition est la compatibilité de la réalité physique¹³³ de l'organisation avec des objectifs énergie-climat identifiés.

XV. Énergie, carbone - Orienter ses choix technologiques pour construire une IA soutenable : objectifs et méthode

A. Les objectifs à remplir : un cap pour une IA compatible avec la contrainte énergie-carbone

Pour aligner le numérique et l'IA sur une trajectoire énergie-carbone soutenable, **trois objectifs doivent être simultanément remplis** :

- Ne déployer que des solutions d'IA qui puissent exister dans un mix de biens et services numériques décarbonés et sobres, au sein d'un numérique qui suit une trajectoire sectorielle compatible avec la contrainte énergie-climat ;
- Augmenter, dans l'offre d'IA, la part étant nativement pensée pour être utilisée dans un monde bas-carbone (transformations des secteurs de l'économie, des usages et modes de vie, de la disponibilité énergétique et matière, des modes de production et de consommation etc.), et réduire celle ne l'étant pas ;
- Eco-concevoir et éco-déployer les produits et services numériques et d'IA, afin d'en réduire les impacts unitaires au maximum, et d'assurer que leurs effets sur les infrastructures, leurs impacts et les dynamiques macroscopiques ne sont pas incompatibles avec les deux premiers objectifs

B. La méthode à adopter : une boussole pour évaluer et adapter les services d'IA aux contraintes énergie-climat

Répondre à ces objectifs implique, au moment d'effectuer un choix technologique relevant de la conception ou du déploiement d'un service d'IA, de suivre une réflexion progressive qui permet de passer de l'analyse fonctionnelle de la solution (quels besoins, quelles fonctions) à la qualification de

¹³² Bien que la méthodologie présentée dans ce rapport soit centrée sur l'énergie et le climat et que la documentation (nécessaire) des autres impacts dépasse le périmètre ici traité, les méthodes et recommandations proposées dans nos travaux visent à s'assurer de ne pas aggraver les autres impacts environnementaux, et au mieux à participer également à leur réduction.

¹³³ Énergie réellement consommée, émissions effectivement engendrée par l'activité, etc.

ses effets sur les impacts énergie-climat, non seulement de manière directe mais également avec une vision claire du contexte réel, qui est macroscopique (les infrastructures) et systémique (les effets indirects) :

1. **Avoir une trajectoire énergie-carbone de référence** pour le système numérique dans lequel la solution serait déployée : trajectoire carbone de l'organisation, trajectoire carbone sectorielle à l'échelle nationale, objectif SBTi, objectif territorial etc.
2. **Caractériser le besoin** auquel on souhaite répondre avec le service d'IA : à quels besoins précis la solution d'IA permet-elle de répondre, et grâce à quelles fonctions ?
3. **Associer une ou des solutions techniques possibles** à chaque fonction, pour la rendre possible et donc répondre aux différents besoins : l'IA (et l'IA générative) est-elle nécessaire pour répondre à ces besoins, ou des solutions plus sobres sont-elles disponibles ?
4. **Évaluer les impacts énergie-carbone de chacun des choix technologiques effectués** :
 - a. A la fois en évaluant les impacts carbone-énergie d'une solution d'IA (cf. « Évaluer les impacts carbone-énergie : complexité et diversité technique de l'IA »), et si pertinent en évaluant les bénéfices d'une solution d'IA (cf. « Évaluer les bénéfices énergie-carbone liés à une solution d'IA ? »)
 - b. A la fois, en cartographiant les effets que chaque solution technique va avoir sur les supports physiques du numérique une fois déployée (sollicitations des réseaux et centres de données, déploiement de nouveaux équipements) et sur leurs dynamiques macroscopiques (alimentation de la croissance des besoins, compatibilité avec une trajectoire de sobriété etc.) ;
5. **Réduire l'impact des solutions jusqu'à rendre leur déploiement compatible avec la trajectoire de référence**, en activant les **leviers de conception** (optimisation ; altération ou abandon de certaines fonctionnalités) et **les leviers de déploiement** (adapter l'échelle de déploiement, voire ne pas déployer la solution si aucun scénario n'est compatible avec la contrainte de référence une fois tous les leviers possibles activés).

Ces différentes étapes doivent **impliquer trois parties prenantes du service d'IA**, entre lesquels elles doivent permettre une discussion éclairée :

- **Les sphères stratégiques et décisionnelles**, qui pilotent les grandes orientations technologiques (fonctionnalités souhaitées, modèle et conditions de rentabilité ou pertinence du service, scénarios de déploiement/mise sur le marché/achat, expression du besoin etc.) ;
- **Les sphères de conception technique**, qui effectuent les choix technologiques visant à répondre aux grandes orientations ;
- **Les sphères techniques de l'impact environnemental**, capables de mener l'analyse de cycle de vie, de mener l'étude d'impact quantitative et/ou l'analyse de compatibilité avec la trajectoire sectorielle ou de l'organisation.

La décision finale doit ainsi repartir de la réalité physique, qui permet d'éclairer la viabilité d'une décision intégrant bien entendu d'autres enjeux (productivité, marketing, humains et ressources humaines etc.), mais qui **doit toujours rester explicite sur les arbitrages effectués** (décision de grever son budget carbone pour répondre à un besoin marketing, par exemple). C'est cela qui permettra de construire des écosystèmes de parties prenantes capables de comprendre les enjeux et arbitrages qu'il

faudrait être en mesure de pouvoir faire, et donc capables de construire, à termes, un numérique sobre et décarboné.

Mobiliser des acteurs

Transmettre une méthode



XVI.....Energie, carbone - Orienter ses choix technologiques pour construire une IA soutenable : les étapes à suivre

A. Avoir un repère quantitatif de référence : budgets et trajectoires énergie-carbone

La première composante incontournable pour orienter les choix technologiques liés à l'IA est un cadre de référence macroscopique et quantitatif :

- Trajectoire du secteur numérique et de la filière centres de données au niveau territorial, national ou mondial pour la rendre compatible avec la double contrainte carbone ;
- Trajectoire carbone de l'organisation et/ou de son système informatique ;
- Trajectoire de consommation d'énergie des équipements numériques d'une organisation qui soit compatible avec ses objectifs climatiques ; etc.

Sans ces références chiffrées et macroscopiques, les évaluations quantitatives des impacts du service n'auront aucun cadre et seront de fait caduques, puisque resteront sans réponse les questions dont les réponses permettent précisément le pilotage des choix technologiques : le service tel qu'il est conçu est-il compatible avec nos objectifs carbone-énergie ? **Quand est-ce que nos choix de déploiement sont cohérents avec les enjeux de décarbonation ? Ces trajectoires et les objectifs de décarbonation**

qui les structurent sont donc les points de repère indispensables, qui rendent ensuite pertinent de mener les analyses de coûts énergie-carbone des solutions pour éclairer les choix technologiques.

B. Objectiver le besoin et les choix technologiques : l'analyse fonctionnelle

L'analyse d'un service d'IA à concevoir et/ou déployer débute par l'objectivation de sa fonction et des besoins auxquels il répond. Dans un monde sans contrainte, on pourrait peut-être s'en affranchir. Dans la réalité qui est la nôtre, cartographier ces fonctions et besoins est indispensable puisqu'elle permettra d'objectiver les potentiels et effets des leviers portant sur les fonctionnalités.

De nombreux outils existent déjà pour construire l'analyse fonctionnelle des services numériques, IA comprise¹³⁴. Ce que cette analyse doit permettre, c'est de :

- **Caractériser le besoin** auquel on souhaite répondre avec le service d'IA (comme préconisé par la spécification « IA frugale » construite par l'AFNOR (AFNOR, 2024)) :
 - A quels besoins précis la solution d'IA permet-elle de répondre (technique, de productivité, marketing etc.) ? Qu'apporte-t-elle par rapport à la situation et au contexte initiaux dans lesquels elle va être ajoutée ?
 - Quelles sont les fonctions que la solution doit remplir pour répondre à ces besoins ?
- **Associer une ou des solutions techniques possibles** à chaque fonction :
 - Si une solution d'IA est proposée pour permettre une fonction : le recours à l'IA est-il nécessaire, ou des solutions plus sobres sont-elles disponibles ?
 - Si le recours à l'IA est nécessaire pour rendre une fonction possible, dispose-t-on de solutions d'IA plus sobres pour rendre le même service¹³⁵ ?

Ce travail permet de construire une description claire et objective du service, ainsi qu'une vision d'ensemble de ses marges de manœuvre fonctionnelles, requise pour la suite du raisonnement.

Dans le déploiement de solutions technologiques, il est bien entendu impossible de prévoir l'intégralité des possibilités d'usage d'un service, et donc de prévoir l'ensemble des besoins auquel il pourrait répondre suivant son échelle et ses modes d'adoption. Si un déploiement est décidé sans avoir de besoin précis auquel répondre (déploiement généralisé d'une technologie polyvalente par exemple), il ne pourra cependant être affranchi de l'exercice d'évaluation de ses impacts carbone-énergie associés, et de leur compatibilité avec le budget ou la trajectoire de référence. En cas d'incompatibilité, l'analyse fonctionnelle devra alors être réalisée, pour comprendre les marges de manœuvre qui existent pour réduire les impacts réponse à un besoin essentiel ou non, grâce à quelle fonctionnalité etc.).

C. Passer de l'analyse fonctionnelle aux coûts énergie-carbone directs

L'analyse économique n'est pas suffisante pour savoir si une solution est sobre ou frugale, même lorsqu'elle permet de traduire une réduction des consommations énergétiques directes du service : les postes d'impact ne sont pas nécessairement directs mais sont au contraire mutualisés dans les infrastructures (réseaux, centres de données, chaînes de valeur des terminaux, capteurs et électronique). Les cas unitaires sont ainsi rarement de gros postes directs d'émissions : c'est l'échelle

¹³⁴ Dont les premières étapes de la méthode « arbre de conséquence » de l'ADEME, par exemple (ADEME, 2024d).

¹³⁵ IA non-générative plutôt que générative par exemple (cf. « Complexité et diversité technique de l'IA : comment évaluer ses impacts carbone-énergie ? » sur les différences d'impacts entre les solutions d'IA et les modèles sollicités)

de déploiement (attendue ou réalisée) et les dimensionnements qu'elle engendre sur les infrastructures nationales et mondiales qui détermine les impacts véritables.

1. L'analyse qualitative : identifier rapidement les postes structurants

L'évaluation des impacts énergie-carbone des choix technologiques consiste ainsi à lier chaque choix de solution technique à la sollicitation des infrastructures numériques qu'elle engendre. Cela commence par poser, pour chacune des solutions techniques choisies, les quatre grandes questions de l'impact macroscopique d'une solution numérique :

Le déploiement de cette solution technique s'appuie-t-il sur...

- ... la généralisation d'un nouvel équipement (capteur, terminal utilisateur etc.) ?
- ... la multiplication des capacités de calcul disponibles ?
- ... l'augmentation des volumes de données valorisables et/ou stockées ?
- ... l'augmentation des capacités réseaux (bande passante, couverture, latence) ?

Ces quatre questions permettent d'identifier rapidement la tendance des infrastructures physiques que la solution va alimenter si elle est déployée. **Plus une solution technique alimente de dynamiques parmi ces quatre-ci, moins elle est susceptible de pouvoir exister dans un monde où l'infrastructure numérique est décarbonée et sobre.**

L'objectif est de dépasser la vision des impacts directs du service en se donnant un premier cadre de réflexion au niveau du système numérique : **dans quelle trajectoire macroscopique s'est-on implicitement projeté pour effectuer nos choix technologiques et en déduire leur pertinence technique ?**

Pour préciser la caractérisation des futurs numériques (taille des infrastructures réseaux mobiles et satellitaires, capacités et niveaux de service disponibles des infrastructures cloud et de calcul, taux d'équipement de la population etc.) avec lesquels les solutions techniques choisies peuvent être utilisées, une grille de lecture est proposée en annexe 11 (The Shift Project, 2025a)¹³⁶. Inspirée de l'approche développée dans les scénarios ADEME « Transition(s) 2050 » (ADEME, 2021), elle permet de **donner des points de repères qualitatifs sur les dynamiques structurantes du système numérique en les projetant dans quatre grands niveaux d'intensité énergie, carbone et matérielle :**

- **Pour les centres de données :**
 - Les niveaux de services disponibles (disponibilité, latence etc.) par rapport à aujourd'hui ;
 - Les capacités de stockage disponibles (données accessibles et/ou valorisables) ;
- **Pour les réseaux :**
 - La part d'usages mobiles par rapport aux usages fixes/WiFi ;
 - Les capacités du réseau en termes de bande passante et de latence ;
 - Le niveau de couverture géographique ;
- **Pour les terminaux :**
 - Les performances des équipements utilisateurs (smartphones, ordinateurs) ;
 - Le déploiement de nouveaux objets connectés (nouveaux objets ou non, nouvelles véritables infrastructures connectées etc.) ;
 - Le taux d'équipement de la population et des organisations (écrans, TV, consoles et nouveaux terminaux, tablettes etc.).

¹³⁶ De nombreuses méthodes existent déjà pour effectuer ce type d'analyse, dites « conséquentielles », documentées dans la littérature académique. Par exemple, les méthodes « Empreinte projet » (ADEME, 2024b) et « QuantiGES » (ADEME, 2022) de l'ADEME.

2. L'analyse quantitative : produire l'indicateur de pilotage

Cette démarche, qualitative et simplifiée, permet d'identifier rapidement quels choix technologiques seront les plus déterminants dans l'impact du service d'IA : plus le scénario minimal dans lequel la solution technique peut exister est proche du quatrième niveau d'intensité (par exemple parce qu'elle a besoin, pour pouvoir fonctionner, d'un niveau de service équivalent ou supérieur aux meilleurs standards actuels en termes de données et de calcul), plus elle serait un poste déterminant dans l'impact direct et systémique final du service d'IA une fois conçu et déployé.

Cette première analyse qualitative permet d'alimenter la phase d'analyse quantitative, qui consiste à effectuer l'analyse en cycle de vie du service d'IA pour en évaluer l'impact énergie-carbone suivant un scénario de conception et de déploiement représentant ce que l'organisation prévoit. Il existe déjà de nombreuses méthodes qui permettent d'effectuer l'analyse quantitative¹³⁷. L'enjeu aujourd'hui n'est donc pas tant la production de nouvelles méthodologies que celle de la consolidation des existantes et de leur déploiement :

- Des apports de données sont nécessaires pour rendre robuste l'application de ces méthodes aux spécificités de l'IA (ACV des accélérateurs d'IA et équipements sollicités, transparence sur les spécificités techniques et de consommation des différents modèles dans leurs phases d'entraînement comme d'inférence etc.) ;
- Une catégorisation et standardisation des méthodes à utiliser suivant les filières et/ou types de services est indispensable, afin d'aligner les parties prenantes du secteur sur une palette d'outils consolidés et comparables.

D. Eco-concevoir et éco-déployer : rendre le service d'IA compatible avec les budgets énergie-carbone de l'organisation

L'éco-conception et l'éco-déploiement regroupent les leviers à disposition des acteurs concevant ou déployant les services d'IA pour en **réduire les impacts énergie-carbone, jusqu'à les rendre compatibles avec la trajectoire de référence** de l'organisation, du territoire ou du secteur.

1. L'éco-conception : un levier pour concevoir des biens et services numériques compatible avec des scénarios de transition

Les leviers de conception rassemblent ceux à la main des acteurs produisant les services d'IA à déployer :

- **Optimiser** : comment assurer les mêmes fonctionnalités en consommant le moins d'énergie et de budget carbone possible (sur la phase d'utilisation comme de production) ? **Les leviers d'optimisation consistent à maintenir exactement la même proposition de service final**, en n'agissant que sur les supports qui le permettent pour en **réduire l'impact unitaire** : modèles compacts (plus légers, plus spécialisés etc.), softwares et paradigmes de calculs moins consommateurs de ressources informatiques, hardwares à l'impact de production réduit,

¹³⁷ La méthode d'Analyse de cycle de vie (ISO 14040 et 14044) et ses déclinaisons et applications aux biens et services numériques permettent de réaliser ces quantifications, ou une partie d'entre elles sur des périmètres différents. Par exemple, le calculateur simplifié EcoLogits ou l'outil CodeCarbon permettent d'évaluer les consommations d'énergie et les émissions carbone directes associées à des applications d'IA suivant les modèles, la structuration des étapes et du code, les tâches réalisées etc.

énergie consommée moins carbonée, appui sur des équipements plus efficaces énergétiquement mais avec les mêmes capacités etc.

- **Agir sur les fonctionnalités** : quelles fonctionnalités peut-on transformer, altérer, voire abandonner, pour réduire l'empreinte carbone-énergie du service ? **Les leviers portant sur les fonctionnalités permettent un premier niveau d'arbitrage**, en questionnant chaque fonction dans son apport essentiel :
 - Une fonction initialement imaginée peut être altérée voire abandonnée sans que cela ne porte finalement atteinte à l'apport central du service d'IA ;
 - Une fonction peut être altérée voire abandonnée au prix d'une altération du service final rendu suffisamment contenue pour que la pertinence du service d'IA reste satisfaisante tout en réduisant son impact énergie-carbone.

La mobilisation de ces leviers doit être réintégrée dans l'analyse quantitative précédemment effectuée sur les coûts carbone-énergie, pour pouvoir en caractériser les potentiels, et évaluer dans quelle mesure ils permettent ou non de rendre le service d'IA compatible avec la trajectoire de référence. **Ces leviers peuvent être rendus accessibles pour les acteurs déployant les services sans les concevoir, ceci en rendant les solutions modulaires** : cela permet à une organisation utilisatrice de services d'IA de choisir le mix de fonctionnalités le plus adapté à la fois à la réponse à son besoin et à son enjeu de compatibilité avec sa trajectoire de carbone.

2. L'éco-déploiement : un levier pour une sobriété numérique à la bonne échelle

Les leviers de déploiement rassemblent ceux à la main des organisations effectuant les choix d'achats et de déploiement des services d'IA qui leur sont proposés : jusqu'où est-il nécessaire de réduire l'ampleur du déploiement de la solution (nombre d'utilisations, lieux ou publics auxquels la solution est rendue accessible etc.) pour respecter ses budgets énergie-carbone, une fois les autres leviers activés ? Est-il possible de la déployer en respectant la contrainte énergie-carbone ?

Une analyse qualitative peut être menée dans un premier temps, pour évaluer les différentes possibilités de déploiement. Une grille de lecture permettant de guider cet exercice est proposée en annexe 11 (The Shift Project, 2025a). Elle permet de se projeter dans quatre grands niveaux d'intensité de déploiement :

- **Déploiement très ciblé pour répondre à un besoin particulièrement caractérisé** (plages d'activités très précisément identifiées de par l'apport essentiel que le cas d'usage aura pour elles) ;
- **Déploiement ciblé, sur certaines typologies de sites ou d'usages** ;
- **Déploiement indifférencié** (déploiement large sans priorisation sur certaines plages ou familles d'usages) ;
- **Déploiement indifférencié et adoption généralisée** (déploiement large avec dynamique soutenue visant à généraliser et systématiser l'utilisation du service d'IA).

Cette analyse, qui peut être menée tant au niveau de l'organisation, d'un territoire que d'une équipe ou même d'une personne individuelle, permet de se **comprendre quelles sont les grandes possibilités de structuration du nouveau système d'usage qui va se mettre en place autour de la solution d'IA à déployer ou adopter** : est-on en train de créer une dynamique d'usages maximaliste, qui suit la tendance, éco-conçue, ou bien à la fois éco-conçue et sobre ?

Cette analyse qualitative permettra de faire émerger les grands déterminants des scénarios d'usages envisagés pour le service d'IA, et d'ainsi alimenter l'analyse quantitative, qui viendra modifier les hypothèses de niveaux de déploiement dans l'analyse quantitative des coûts énergie-carbone initiaux, permettant ainsi d'évaluer la mesure dans laquelle les leviers de déploiement permettent ou non de rendre le service d'IA compatible avec la trajectoire de référence.

E. Rendre le service d'IA compatible avec la trajectoire, l'abandonner sinon

Les leviers d'optimisation sont les leviers habituellement mobilisés en premier lieu par les acteurs souhaitant réduire l'impact de leurs services d'IA : ils permettent de mobiliser toutes les marges d'efficacité carbone et énergie, sans modifier le service final rendu.

Si l'optimisation ne suffit pas à réduire suffisamment les impacts unitaires pour permettre au plan initial de déploiement du service d'être compatible avec la trajectoire de référence, les leviers relevant d'arbitrages deviennent nécessaires : soit l'échelle de déploiement est revue, soit on simplifie ou abandonne certaines fonctionnalités initialement prévues dans le service. Dans certains cas, les différentes combinaisons de leviers peuvent n'aboutir qu'à des situations ne permettant pas de rendre le service d'IA compatible avec la trajectoire carbone de référence :

- Impact carbone qui reste trop important même après mobilisation maximale des leviers ;
- Service d'IA rendu caduque par le niveau d'arbitrages devant être réalisés pour le rendre compatible avec la trajectoire : déploiement trop restreint ou fonctionnalités trop altérées pour maintenir la capacité du service à répondre au besoin initialement caractérisé.

Dans ce cas, la conclusion est que le service en l'état n'est pas compatible avec la contrainte énergie-carbone, et doit donc être abandonné en tant que solution potentielle : soit en dépriorisant le besoin auquel il était censé répondre, soit en cherchant des moyens d'y répondre sans recourir à un service d'IA. S'il existe une ou plusieurs combinaison de leviers qui permettent de rendre le service compatible avec la trajectoire, elles forment la palette des options physiquement possibles à partir desquelles éclairer, au prisme de la contrainte énergie-climat, le choix final (qui prendra les autres éléments de la réalité de l'organisation en compte - voir partie suivante).

XVII.....Energie, carbone - Orienter ses choix technologiques pour construire une IA soutenable : une étude de cas : l'assistant personnel de compte-rendu

Nous donnons ici un exemple d'une démarche simplifiée permettant de faire émerger de premières questions largement dimensionnantes sur la viabilité énergie-climat d'un service d'IA. Le cas d'usage choisi¹³⁸ est un assistant personnel de compte-rendu : ce service permet de rédiger des comptes-rendus basés sur les échanges vocaux des utilisateurs lors d'une réunion en ligne.

¹³⁸ Parmi ceux ayant servi à la réflexion collaborative dans le cadre de ce travail (cf. Annexe 14, (The Shift Project, 2025a).

Objectiver le besoin et les choix technologiques : l'analyse fonctionnelle :

Ses fonctionnalités peuvent avoir différents niveaux de complexité :

- Acquérir l'enregistrement des échanges vocaux ;
- Traduire le contenu audio en contenu texte ;
- Synthétiser la retranscription en compte-rendu ;
- Des fonctionnalités supplémentaires peuvent être proposées : enrichir le compte-rendu avec des propositions ou ressources supplémentaires etc. ; intervention de l'assistant directement dans les échanges écrit lors de la réunion pour proposer des ressources supplémentaires, etc.

Dans notre exemple, qui ne prend pas en compte les fonctionnalités supplémentaires, l'analyse fonctionnelle détaillée permet d'identifier le recours à l'intelligence artificielle pour répondre à deux fonctions (à hauteur de 250 tokens¹³⁹) : la retranscription de l'audio en texte ; la synthèse du texte.

Evaluer : De l'analyse fonctionnelle aux coûts carbone-énergie directs :

La quantification de l'impact énergie-climat du déploiement de ce service a été réalisée en construisant un cas fictif simplifié caractérisé par les spécifications suivantes

- Chaque compte-rendu est équivalent à 250 tokens ;
- Le service est déployé dans une entreprise de 1000 personnes, réalisant chacune 4 réunions par jour ouvré en employant le service de retranscription.

L'évaluation quantitative a été réalisée, pour cet exercice illustratif, avec le calculateur EcoLogits (Ecologits, GenAI Impact et al., 2025), qui nous permet ici de visualiser les effets des différents leviers¹⁴⁰.

Orienter les choix technologiques : Eco-concevoir et éco-déployer :

On retrouve, dans ce cas d'usage, les différentes familles de leviers décrites dans notre méthode :

- **Les leviers d'optimisation** : s'appuyer sur un modèle dont les capacités de calcul sont hébergées dans une zone géographique à intensité carbone de l'électricité plus faible permet de réduire l'impact carbone du service sans en changer les fonctionnalités (l'efficacité des leviers reposant sur la décarbonation de l'électricité dépendant grandement du contenu carbone de départ) ;
- **Les leviers de conception** : agir sur le choix du modèle et sa taille peuvent permettre de réduire l'impact carbone du service au prix de renoncement à certaines fonctionnalités ou performances n'étant pas jugées comme étant au coeur de l'apport du service (modèle moins polyvalent, précis ou rapide par exemple) ;
- **Les leviers de déploiement** : le choix d'adopter dans l'entreprise une politique d'éco-déploiement, limitant le nombre d'utilisation de ce service à un minimum de réunions pour lesquelles le besoin est clairement caractérisé, permet de réduire l'impact du service à l'échelle de l'organisation¹⁴¹.

¹³⁹ En tokens de sortie pour < 1 page de compte-rendu. L'hypothèse pour l'exemple est donc plutôt bas de fourchette.

¹⁴⁰ Si le calcul de l'impact final du service est essentiel, le calcul quantitatif des effets de chaque leviers pour les comparer entre eux va dépendre de l'ordre d'activation des leviers. L'efficacité des leviers les uns par rapport n'est donc pas une conclusion indépendante du choix de modélisation.

¹⁴¹ La longueur du compte-rendu de réunion type peut aussi faire partie de ce type de politique.

Rendre le service d'IA compatible avec la trajectoire, l'abandonner sinon

C'est la comparaison avec un seuil de référence qui permettra de déterminer si les leviers mobilisés permettent bien de rendre la solution compatible avec les contraintes énergie-carbone ou non, et d'évaluer si son déploiement est envisageable :

- Le seuil de référence doit être déterminé sur la base d'une trajectoire ou d'un budget de référence de l'organisation, traduit sur ses systèmes et services numériques¹⁴². Il est spécifique à l'organisation et au périmètre considéré pour le déploiement.
- Si cette analyse quantitative carbone n'est pas l'alpha et l'omega de la décision, elle est pourtant incontournable. Les décisions de déploiement ont aussi à considérer les risques de potentiels effets indirects et systémiques (effets rebonds sur le nombre de documents stockés, modifications indirectes d'usages en réunions etc.) et assurer que des garde-fous sont déployés en même temps que la solution pour endiguer les effets délétères potentiels.

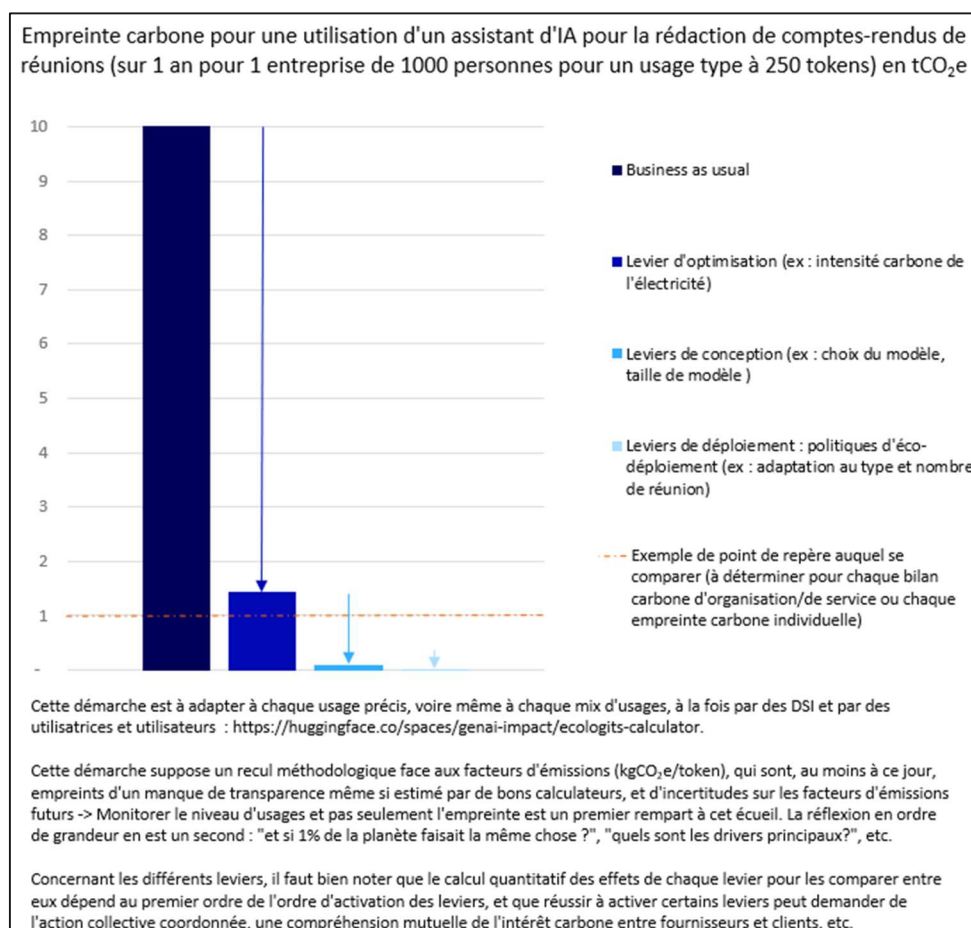
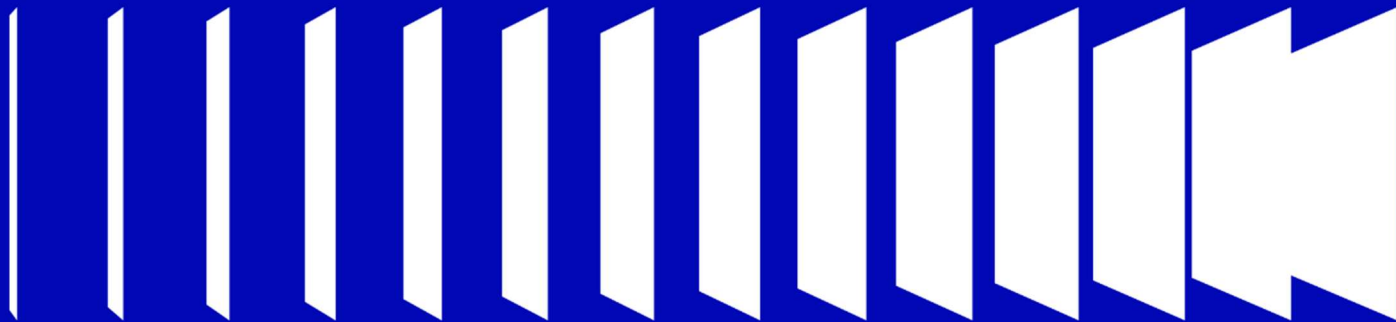


Figure 37 - Démarche de calcul d'empreinte carbone avec calculateur en ligne pour des services ou mix de services d'IA. Source : (The Shift Project, 2025b, 2025c)

Ce cas d'usage illustre la démarche décrite ci-dessus, démarche qui a vocation à accompagner le numérique à s'aligner sur une trajectoire énergie carbone soutenable (cf. « Énergie, carbone - Orienter ses choix technologiques pour construire une IA soutenable : objectifs et méthode »).

¹⁴² Qui peut être construit sur la base d'objectifs sectoriels ou nationaux sur le numérique, comme l'objectif SBTi (SBTi et al., 2020).



Recommandations

Ce rapport montre que le coût environnemental du mode actuel de conception et de déploiement de l'IA est réel, avéré et substantiel. Les raisons en sont largement systémiques et en grande partie identiques à celles responsables de la dérive de l'empreinte énergie-carbone de l'ensemble de l'écosystème numérique. Y parer nécessite d'impliquer l'ensemble des parties prenantes :

- **Les acteurs de la décision et du pilotage publics** : pouvoirs publics, acteurs publics de la planification carbone-énergie, acteurs publics de la régulation et planification numérique ;
- **Les entreprises et organisations utilisatrices de services d'IA** ;
- **Les concepteurs et fournisseurs de services d'IA** ;
- **Les concepteurs et fournisseurs d'infrastructures et composants d'IA** ;
- **Les acteurs (publics et privés) de l'information médiatique** ;
- **Les sphères académiques** ;
- **Les acteurs de la formation** : acteurs de la formation Initiale (universités, écoles d'ingénieurs, écoles des métiers du numérique etc.), acteurs publics et privés de la formation continue ;
- **Les utilisateurs grand public.**

La magnitude des changements de dynamiques à effectuer impose de recourir à l'ensemble des types de leviers à notre disposition pour transformer les infrastructures et les usages de l'intelligence artificielle. Les leviers technologiques sont indispensables, mais insuffisants s'ils ne sont pas agencés avec les leviers sociétaux et organisationnels : **la décarbonation du numérique implique non seulement des décisions techniques, mais également sociétales et politiques.**

C'est l'approche systémique qui permettra, en mobilisant **les quatre familles d'actions** aux bons endroits et bon niveau, de réorienter l'intelligence artificielle et les centres de données vers un futur compatible avec la double contrainte carbone :

- **La mesure et la transparence** : sans mesure, pas de priorisation éclairée possible. Sans transparence, pas de mesure ni d'ordres de grandeurs fiables à disposition ;
- **L'optimisation** : un levier complémentaire qui n'est véritablement utile que qu'à services rendus constants, à coupler donc avec des mécanismes agissant sur les volumes de services pour éviter les effets rebonds ;
- **La réorganisation collective vers la sobriété** : c'est la transformation en rupture des systèmes d'usages et des modèles organisationnels économiques, sans laquelle les objectifs de décarbonation ne peuvent être atteints ;

- **L'information, la formation et les compétences** : pour donner la capacité aux acteurs d'opérer des choix éclairés de conception, d'utilisation ou de régulation avec la meilleure maîtrise possible des enjeux (carbone-énergie notamment environnementaux).

Les recommandations que nous décrivons ici ne sont pas exhaustives (voire vise précisément à combler les lacunes et adresser les angles morts où des recommandations sont pourtant fondamentales) et doivent se lire en complément et en appui d'actions de transformation radicale de l'écosystème numérique qui sont nécessaires pour qu'il devienne soutenable, afin de traiter les aspects structurels et génériques de cette dérive que nous avons mis en évidence au fil de nos rapports depuis 2018 : modèles d'affaires volumiques, cadre réglementaire, asymétrie d'information, designs addictifs etc.

Enfin, nous avons identifié pour chacune de nos 20 recommandations à quelle(s) partie(s) prenante(s) elle s'adresse plus particulièrement.

Mesure et transparence

Objectif : Assurer un suivi public de la filière centres de données

Mesurer et mettre à jour annuellement la consommation électrique des centres de données (y compris celle des centres de données d'entreprises¹⁴³).

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la planification et de la régulation du numérique
- Acteurs publics de l'évaluation et planification des trajectoires électrique, énergie et carbone

Communiquer trimestriellement sur l'état des demandes de raccordement de sites de centres de données.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la planification et de la régulation du numérique
- Acteurs publics de l'évaluation et planification des trajectoires électrique, énergie et carbone

Rendre l'appareil statistique national beaucoup plus granulaire pour les activités numériques afin de disposer notamment d'un suivi trimestriel du volume de livraison de serveurs.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la planification et de la régulation du numérique
- Acteurs publics des statistiques nationales

Assurer et mettre à disposition des données fiables et transparentes sur les impacts de fabrication (accélérateurs d'IA, composants etc).

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la régulation du numérique
- Acteurs publics réglementaires
- Les concepteurs et fournisseurs d'infrastructures et composants d'IA

¹⁴³ Au besoin via un échantillon représentatif d'entreprises

Objectif : Assurer la transparence des services fournis

Assurer la transparence des fournisseurs sur la consommation énergétique des services achetés, auprès des entreprises utilisatrices (au besoin via une obligation légale).

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la régulation du numérique
- Acteurs publics réglementaires
- Fournisseurs de services d'IA

Assurer la transparence des fournisseurs sur l’empreinte énergie-carbone des services d'IA mis à disposition, auprès des utilisateurs grand public.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la régulation du numérique
- Acteurs publics réglementaires
- Fournisseurs de services d'IA

Objectif : Documenter les effets du déploiement de l'IA

Evaluer l’impact du développement de l’IA et de la dissémination de la puissance informatique sur les terminaux et les réseaux.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la régulation du numérique
- Acteurs publics de l'évaluation et planification des trajectoires électrique, énergie et carbone
- Sphères académiques
- Fournisseurs de services d'IA
- Fournisseurs d’infrastructures et composants d’IA

Optimisation

En matière d'IA générative, prioriser le recours à des IA spécialisées (verticalisation sectorielle) plutôt qu'à des IA généralistes.

Acteurs à l'initiative :

- Entreprises utilisatrices de services d'IA
- Fournisseurs de services d'IA

Concentrer les efforts de recherche et de développement sur des solutions d'IA efficaces, compatibles avec une trajectoire soutenable des capacités de calcul (IA spécialisées et adaptées à une verticalisation sectorielle, peu gourmandes en ressources informatiques et matérielles etc.).

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs de la recherche et développement
- Sphères académiques
- Fournisseurs de services d'IA
- Fournisseurs d’infrastructures et composants d’IA

Intégrer le référentiel général pour l'IA frugale (AFNOR) dans les politiques d'achat et de développement des acteurs publics pour en faire un levier sur l'offre.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics utilisateurs de services d'IA

En matière d'IA agentique, mener systématiquement une évaluation d'impact net sur le cas d'usage considéré.

Acteurs à l'initiative :

- Entreprises utilisatrices de services d'IA

Objectif : Réduire les impacts de fabrication (accélérateurs d'IA, composants etc).

Amorcer, élaborer et piloter une stratégie de décarbonation de l'ensemble de la chaîne de valeur (fabrication, fin de vie, réparation, etc.) afin de réduire les impacts de fabrication.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la planification et de la régulation du numérique
- Acteurs publics de l'évaluation et planification des trajectoires électrique, énergie et carbone
- Fournisseurs d'infrastructures et composants d'IA

Réorganisation collective des usages vers la sobriété

Objectif : Piloter les impacts et dynamiques de la filière centres de données

Construire une trajectoire pour les biens et services numériques en France au sein de la SNBC3, en explicitant la part des centres de données, et la piloter :

- Une trajectoire plafond des ressources (électricité, surfaces, eau) consommables par le numérique d'ici 2035 et 2050 ;
- Une trajectoire des émissions associées (en empreinte et en inventaire).

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs réglementaires
- Acteurs publics de la planification et de la régulation du numérique
- Acteurs publics de l'évaluation et planification des trajectoires électrique, énergie et carbone

Rendre le déploiement des centres de données conditionné à la compatibilité avec la trajectoire de référence (énergie, climat, ressources), et autoriser le recours à des moratoires (nationaux ou territoriaux) en cas de déviation significative par rapport à ces trajectoires de référence.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics réglementaires
- Acteurs publics de la planification et de la régulation du numérique

Rendre obligatoire une étude d'impact environnemental pour l'implantation d'un centre de données au-delà d'un certain seuil de puissance.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics réglementaires

-
- Acteurs publics de la planification et de la régulation du numérique

Objectif : Encadrer le déploiement des systèmes d'usages d'IA

Plafonner, pour rester compatible avec sa trajectoire, la quantité d'utilisation d'IA génératives à usage général dans l'organisation et refuser l'intégration par défaut de composantes IA dans les logiciels d'usage général.

Acteurs à l'initiative :

- Entreprises et organisation privées utilisatrices de services d'IA
- Organisations publiques utilisatrices de services d'IA

Maintenir la réglementation européenne existant sur le numérique y compris l'AI Act et la faire évoluer en y intégrant un objectif de performance environnementale.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics réglementaires
- Acteurs publics de la planification et de la régulation du numérique

Information, formation et compétences

Maintenir les ressources (humaines, organisationnelles, financières etc.) nécessaires à poursuivre l'effort de formation initiale et continue sur les enjeux énergie-climat, et ne pas les réorienter vers des formations sur l'IA.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics et privés de la formation initiale et continue
- Entreprises utilisatrices du numérique

Pousser le débat public à la rigueur sur les promesses et réalités de l'IA (impacts carbone-énergie, environnementaux, sociaux et sociétaux) grâce à des campagnes d'information et des analyses critiques, dont portant sur les discours portés par les acteurs.

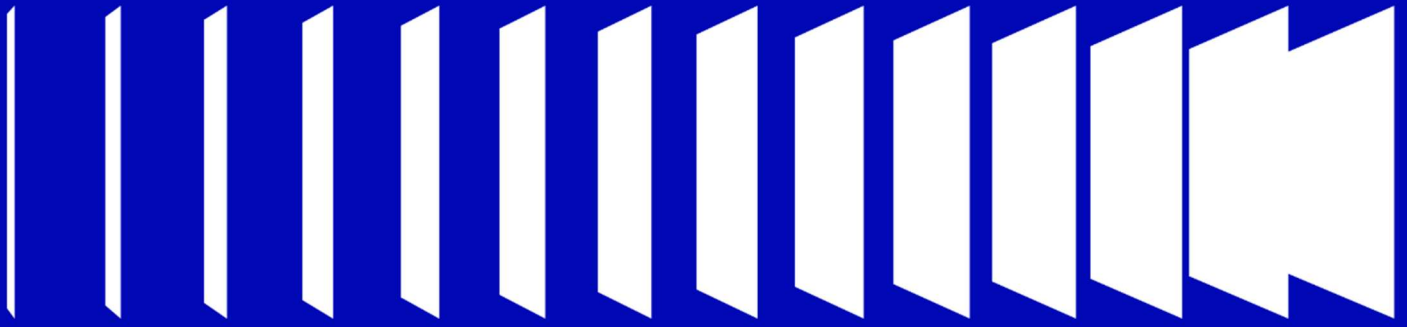
Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics à l'initiative de campagnes d'information ou en encadrant les conditions de déploiement
- Acteurs publics et privés de l'information médiatique
- Sphères académiques

Organiser un débat citoyen informé sur la juste place du numérique et de l'IA dans la société en 2030 et au-delà, les caractéristiques d'un numérique décarboné et résilient, les usages à prioriser en situation de concurrence forte sur les ressources.

Acteurs à l'initiative :

- Acteurs publics de la concertation sur les sujets numériques, technologiques, sociétaux et/ou environnementaux
 - Acteurs publics et privés de l'information médiatique
-



Conclusion

Le manque de transparence (voire l'opacité organisée) des acteurs dominants du domaine de l'IA, le manque de granularité et de standardisation des données accessibles ainsi que la documentation plus que perfectible du parc existant de centres de données et des nouveaux projets, notamment en France et en Europe, rend difficile toute évaluation quantitative des impacts énergie-carbone du « phénomène IA générative », même en ce qui concerne les impacts directs.

Il est malgré tout possible – et nécessaire compte tenu de la vitesse de propagation du « phénomène IA générative » – de livrer un certain nombre de constats, dont certains sont aussi des alertes :

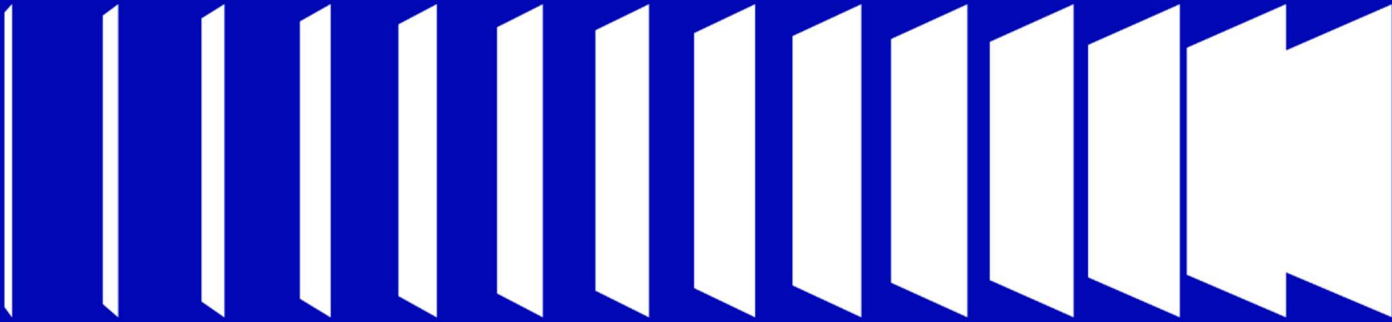
- Alors que l'empreinte énergie-carbone du numérique augmentait d'ores et déjà à un rythme soutenu avant l'apparition il y a deux ans du « phénomène IA générative », celui-ci aggrave considérablement la tendance et alimente la dérive climatique (voir chapitre IV). L'utilisation à grande échelle et de façon indifférenciée de l'IA générative et de grands modèles de langage pour en faire une technologie d'application générale y joue un rôle central. Et par ailleurs, le retour d'expérience venant des entreprises montre souvent que le recours à des IA spécialisées (génératives s'appuyant sur de petits modèles, ou autres) s'avère plus efficace. Il est donc urgent de déconstruire un premier mythe selon lequel la seule voie possible serait forcément de l'IA générative s'appuyant sur des modèles de fondation gigantesques et absolument polyvalents engendrant structurellement une explosion de la consommation énergétique (voir chapitre VI).
- Au-delà de l'effet néfaste sur l'empreinte propre du numérique, le « phénomène IA générative » est constitutif d'un risque important – clairement avéré aux Etats-Unis mais aussi en Irlande – de déstabilisation du système électrique (voirs chapitre V.C et VIII.A). Risque d'ailleurs identifié par l'Agence internationale de l'Énergie : le rythme de croissance de la consommation électrique des centres de données devient beaucoup trop rapide pour y répondre de façon optimale, que ce soit en termes de transport ou de production d'électricité bas-carbone. Les conséquences attendues vont des conflits d'usage avec d'autres secteurs (industrie, transports, logement) à l'impossibilité (voire au refus) de tenir les trajectoires de décarbonation de l'électricité. Il faut donc renverser la logique et identifier au moins en France et en Europe un budget énergie-carbone (et une trajectoire pluriannuelle) disponible pour le numérique (dont l'IA) au sein duquel les acteurs peuvent élaborer des stratégies compatibles avec nos objectifs collectifs.

- Il existe des solutions numériques décarbonantes (« green digital solutions ») au sens défini par exemple par la European Green Digital Coalition (EGDC, 2024) et il existe effectivement des cas d'usage où le recours à l'IA peut permettre de réduire les impacts environnementaux d'un système – sous certaines conditions contextuelles et une fois explicitée la trajectoire de référence à laquelle se comparer. En première analyse, il apparaît cependant que l'IA utilisée dans ces cas d'usage est rarement de l'IA générative. Dans ces conditions il est injustifié de prétendre que les coûts environnementaux directs du « phénomène IA générative », bien réels et liés au recours à l'IA générative, seraient “justifiés” par des gains indirects qui, même lorsqu'ils se matérialisent, ne sont pas dus à l'IA générative : rien ne le démontre à ce stade, au contraire. Sans compter que l'évolution du volume des émissions de gaz à effet de serre directes de la seule filière centres de données interroge sur la capacité à pouvoir neutraliser ces émissions de gaz à effet de serre dans une configuration net-zero.
- L'IA - et le numérique dans son ensemble - agit comme un catalyseur. Y avoir recours sans discernement au sein de modes de production et de consommation linéaires et reposant encore substantiellement sur l'utilisation d'énergies fossiles va aboutir à une augmentation des émissions plutôt qu'à une baisse. Le « référentiel général pour l'IA frugale » développé par l'AFNOR constitue une première réponse en ce qu'il conduit à questionner dans un premier temps le recours à une solution IA puis à répondre au besoin en mobilisant le moins de ressources techniques possibles (AFNOR, 2024). La méthodologie que nous avons développée ambitionne d'accompagner le développement et le déploiement de services d'IA compatibles avec la double contrainte carbone (cf. chapitre « La méthode à adopter : une boussole pour évaluer et adapter les services d'IA aux contraintes énergie-climat »).

Il y a urgence à acter du coût climatique du « phénomène IA générative » et à analyser là où ces dynamiques nous embarqueraient d'un point de vue énergétique. Il serait précieux de poursuivre l'éclairage de la problématique énergie-climat du « phénomène IA générative » mais aussi de tenir un débat sociétal informé avant de prendre des options qui s'avéreraient délétères. Organiser sur le long-terme une décarbonation de la filière centres de données et du secteur numérique implique non seulement des décisions techniques, mais également sociétales et politiques.

Ceci est d'autant plus vrai en France et en Europe où le déploiement de l'IA tel qu'il est promu par les acteurs dominants (américains) est non seulement susceptible de compromettre la transition énergétique mais également d'accroître la dépendance numérique et énergétique. Le plan pour l'IA annoncé le 23 juillet 2025 par le Président Trump (Le grand continent, 2025) ne fait d'ailleurs pas mystère des objectifs de domination qu'il poursuit.

Nous espérons donc que les éclairages contenus dans ce rapport contribueront à créer une dynamique autonome de développement spécifique et d'usage sélectif du numérique et de l'IA, résiliente et contribuant à l'atteinte de nos objectifs climatiques et énergétiques.



Bibliographie

- ADEME. (2021). *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat*. <https://librairie.ademe.fr/societe-et-politiques-publiques/5072-prospective-transitions-2050-rapport.html>
- ADEME. (2022). *Méthode QuantiGES*. <https://librairie.ademe.fr/societe-et-politiques-publiques/4827-methode-quantiges-9791029718236.html>
- ADEME. (2024a). *Avis d'experts—Les data centers ou centres de données*. <https://librairie.ademe.fr/batiment/7712-avis-d-experts-les-data-centers-ou-centres-de-donnees.html>
- ADEME. (2024b). *Dossier : La méthode Empreinte Projet*. <https://infos.ademe.fr/lettre-strategie-octobre-2024/la-methode-empreinte-projet/#notes-end-page>
- ADEME. (2024c). *Etude numérique et métaux*. <https://librairie.ademe.fr/industrie-et-production-durable/7713-etude-numerique-et-metaux.html>
- ADEME. (2024d). *Evaluation environnementale des effets directs et indirects du numérique pour des cas d'usage (IT4Green)*. <https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/7785-evaluation-environnementale-des-effets-directs-et-indirects-du-numerique-pour-des-cas-d-usage.html>
- ADEME. (2025). *Numérique & environnement : Entre opportunités et nécessaire sobriété*. <https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/7883-avis-de-l-ademe-numerique-environnement-entre-opportunités-et-nécessaire-sobriete.html>
- ADEME, & Arcep. (2023). *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective—Analyse prospective à 2030 et 2050 (3/3)*. https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-prospective-2030-2050_mars2023.pdf
- AFNOR. (2024). *Référentiel général pour l'IA frugale, Un référentiel pour mesurer et réduire l'impact environnemental de l'IA, Afnor Spec 2314*. <https://www.afnor.org/actualites/referentiel-pour-mesurer-et-reduire-impact-environnemental-de-ia/>
- Agence fédérale allemande pour l'environnement. (2021). *Green cloud computing*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-17_texte_94-2021_green-cloud-computing.pdf
- Alkrush A., Salem M., Abdelrehim O., & Hegazi A. (2024). *Data centers cooling : A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700724000458>
- Arcep. (2025). *Réseaux du futur—L'intelligence artificielle et les réseaux télécoms*. https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/reseau-du-futur-note-synthese-ia-et-Reseaux_juin2025.pdf
- Arcep, Arcom. (2025). *Référentiel des usages numériques*. https://www.arcep.fr/fileadmin/user_upload/pole-numerique-arcep-arcom/Referentiel-usages-numeriques-2025-arcep-arcom.pdf
- Assemblée nationale. (s. d.). *Amendements du texte : Texte de la commission sur le projet de loi, adopté par le Sénat, après engagement de la procédure accélérée, de simplification de la vie économique (n°481 rectifié), n° 1191-A0 et du dossier : Projet de loi de simplification de la vie économique*. Consulté 26 août 2025, à l'adresse <https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/17/amendements/1191/AN/293>
- Assemblée nationale. (2025). *AMENDEMENT de simplification de la vie économique*. <https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/17/amendements/0481/CSVIEECO/460.pdf>
- Asterès, & Cigref. (2025). *La Dépendance technologique aux softwares & cloud services américains : Une estimation des conséquences économiques en Europ*. <https://www.cigref.fr/wp/wp-content/uploads/2025/04/Etude-Asteres-La-dependance-technologique-aux-services-de-cloud-et-logiciels-americains-avril-2025.pdf>
- Boavizta. (2021a). *Digital & environment : How to evaluate server manufacturing footprint, beyond greenhouse gas emissions?* <https://boavizta.org/en/blog/empreinte-de-la-fabrication-d-un-serveur>
- Boavizta. (2021b). *Numérique et environnement : Comment évaluer l'empreinte de la fabrication d'un serveur, au-delà des émissions de gaz à effet de serre ?* | Boavizta. <https://www.boavizta.org/blog/empreinte-de-la-fabrication-d-un-serveur>
- Bol, D., Pirson, T., & Dekimpe, R. (2020). *Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene* (Electronic Circuits and Systems group, ICTEAM Institute, Université catholique de Louvain.).
- Borderstep, Hintemann R., & Hinterholzer S. (2020). *Borderstep 2020—Energy consumption of data centers worldwide*. https://www.researchgate.net/publication/341427004_Energy_consumption_of_data_centers_worldwide_How_will_the_Internet_become_green
- Bouza L., Bugeau A., & Lannelongue L. (2023). *How to estimate carbon footprint when training deep learning models ? A guide and review*. <https://arxiv.org/abs/2306.08323>
- Carbone 4, Vasselin Z., Maquet P., Benedini C., & Paulmier B. (2024). *Net Zero Initiative for IT : Understanding the role of digital solutions in the global net zero effort (NZI for IT)*. <https://www.carbone4.com/publication-nzi-it>
- CBECL. (s. d.). *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index*. <https://ccaf.io/cbsi/cbeci>
- Central Statistics Office (CSO). (2024). *Data Centres Metered Electricity Consumption 2023*. <https://www.cso.ie/en/releasesandpublications/ep/p-dcmec/datacentresmeteredelectricityconsumption2023/keyfindings/>

- Commission de l'intelligence artificielle, & Gouvernement français. (2024). *IA : Notre ambition pour la France*. <https://www.gouvernement.fr/upload/media/content/0001/09/4d3cc456dd2f5b9d79ee75feea63b47f10d75158.pdf>
- Commission de Régulation de l'Energie. (2025). *La CRE approuve la convention de raccordement « fast track » au réseau très haute tension (400 kV) de RTE pour les sites de consommation de grande puissance*. <https://www.cre.fr/actualites/toute-lactualite/la-cre-approuve-la-convention-de-raccordement-fast-track-au-reseau-tres-haute-tension-400-kv-de-rte-pour-les-sites-de-consommation-de-grande-puissance.html>
- Commission européenne. (s. d.). *Europe's Digital Decade : Digital targets for 2030*. Consulté 26 août 2025, à l'adresse https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_en
- Commission européenne. (2019). *Stratégie à long terme à l'horizon 2050*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_fr
- Connaissance des énergies, Joly A. (2022, avril 11). *GNL américain : Une très mauvaise idée pour le climat*. <https://www.connaissancedesenergies.org/tribune-actualite-energies/gnl-americain-une-tres-mauvaise-idee-pour-le-climat>
- Contexte. (2025, juillet 30). *Énergie et climat : Les cinq zones d'ombre de l'accord commercial entre l'UE et les États-Unis*. https://www.contexte.com/fr/article/energie/energie-et-climat-les-cinq-zones-dombre-de-laccord-commercial-entre-lue-et-les-etats-unis_235830
- Data Center Dynamics. (2022, janvier 11). *EirGrid says no new applications for data centers in Dublin until 2028—Report—No national moratorium, but a de facto one in Dublin?* <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/eirgrid-says-no-new-applications-for-data-centers-in-dublin-till-2028/>
- Data Center Dynamics. (2024a, août 27). *Elon Musk's xAI data center 'adding to Memphis air quality problems'—Campaign group*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/elon-musks-xai-data-center-adding-to-memphis-air-quality-problems-campaign-group/>
- Data Center Dynamics. (2024b, octobre 18). *Dominion Energy outlines long-term strategy for Virginia's power infrastructure*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/dominion-energy-outlines-long-term-strategy-for-virginia-power-infrastructure/>
- Data Center Dynamics. (2024c, décembre 16). *DESNZ: Grid connection reform required to support deployment of data centers in UK*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/desnz-grid-connection-reform-required-to-support-deployment-of-data-centers-in-uk/>
- Data Center Dynamics. (2025a, janvier 30). *Southeastern US utilities to add 20GW of natural gas by 2040 to meet data center demand—Report*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/southeastern-us-utilities-plan-more-than-20gw-of-new-natural-gas-capacity-by-2040-to-meet-unprecedented-data-center-demand-report/>
- Data Center Dynamics. (2025b, mai 16). *Five Point launches PowerBridge, targets gigawatt-scale natural gas-powered data centers*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/five-point-launches-powerbridge-targets-gigawatt-scale-natural-gas-powered-data-centers/>
- Data Center Dynamics. (2025c, mai 21). *Williams and Co to expand flagship gas pipeline to serve Virginian data center market*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/williams-and-co-to-expand-flagship-gas-pipeline-to-serve-virginian-data-center-market/>
- Data Center Dynamics. (2025d, juillet 3). *Microsoft shifting data center focus away from Ireland due to lack of power availability—Report—Focusing on Nordics instead*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/microsoft-shifting-data-center-focus-away-from-ireland-due-to-lack-of-power-availability-report/>
- Data Center Frontier. (2025). *Facing the Post-AI Energy Crunch : New Research Correlates Data Center Power Delays with Innovation Strategies*. <https://www.datacenterfrontier.com/machine-learning/article/55289418/facing-the-post-ai-energy-crunch-new-research-correlates-data-center-power-delays-with-innovation-strategies>
- DCByte. (2025). *Global Data Centre Index*. <https://www.dcbyte.com/global-data-centre-index/2025-global-data-centre-index/>
- DCMag. (2025a, février 9). *La carte régionale des 35 sites de data centers dédiés à l'IA identifiés par le gouvernement*. <https://dcmag.fr/la-carte-regionale-des-35-sites-de-data-centers-dedies-a-lia-identifies-par-le-gouvernement/>
- DCMag. (2025b, février 13). *EDF confirme : 4 + 2 sites de data centers pré-identifiés sur son foncier et 2 GW*. <https://dcmag.fr/edf-confirme-4-2-sites-de-data-centers-pre-identifies-sur-son-foncier-et-2-gw/>
- DCMag. (2025c, mars 18). *Chevron veut construire des data centers alimentés au gaz naturel*. <https://dcmag.fr/chevron-veut-construire-de-data-centers-alimentes-au-gaz-naturel>
- DCMag. (2025d, juin 13). *"Use it or lose it : UIOLI" : Quels impacts pour le raccordement des datacenters ?* <https://dcmag.fr/use-it-or-lose-it-uioli-quels-impacts-pour-le-raccordement-des-datacenters/>
- de Vries-Gao A. (2025). *Artificial intelligence : Supply chain constraints and energy implications*. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.101961>
- Dell. (2019). *Life Cycle Assessment of Dell R74*. https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/products/servers/technical-support/Full_LCA_Dell_R740.pdf
- Deloitte. (2024). *Powering artificial intelligence A study of AI's environmental footprint—Today and tomorrow*. <https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/powering-ai.html>
- Deloitte. (2025). *Can US infrastructure keep up with the AI economy?* <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/power-and-utilities/data-center-infrastructure-artificial-intelligence.html>
- Desroches C., Chauvin M., Ladan L., Vateau C., Gosset S., & Cordier P. (2025). *Exploring the sustainable scaling of AI dilemma : A projective study of corporations' AI environmental impacts*. <https://arxiv.org/abs/2501.14334>
- Digital Information World. (s. d.). *hatGPT Usage Statistics : Numbers Behind Its Worldwide Growth and Reach (July, 2025)*. Consulté 28 juillet 2025, à l'adresse <https://www.digitalinformationworld.com/2025/05/chatgpt-stats-in-numbers-growth-usage-and-global-impact.html>
- Diguet C., Lopez F., & ADEME. (2019). *L'impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires*. <https://hal.science/hal-02133607/document>
- Dodd N., Alfieri, F., Gama Caldas M., & Maya-Drysdale, L. (2020). *Development of the EU Green Public Procurement (GPP) criteria for data centres, server rooms and cloud services—Final technical report*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/89971797-a9fa-11ea-bb7a-01aa75ed71a1/language-en>
- DutchNews. (2025, mai 14). *Surging demand from data centres "is straining electricity grid"*. <https://www.dutchnews.nl/2025/05/surging-demand-from-data-centres-is-straining-electricity-grid/>
- Ecologits, GenAI Impact, Rincé S., Banse A., Defour V., & Jean-Pierre C. (2025). *EcoLogits Calculator*. <https://huggingface.co/spaces/genai-impact/ecologits-calculator>
- EDNA, Technology collaboration programme by IEA. (2025). *Data Centre Energy Use : Critical Review of Models and Results*. <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2025/05/Data-Centre-Energy-Use-Critical-Review-of-Models-and-Results.pdf>
- EGDC. (2024). *Net Carbon Impact Assessment Methodology for ICT Solutions*. <https://www.greendigitalcoalition.eu/net-carbon-impact-assessment-methodology-for-ict-solutions/>

- Electricity Maps. (s. d.). *Electricity Maps : Live 24/7 CO₂ emissions of electricity*. Consulté 29 août 2025, à l'adresse <https://app.electricitymaps.com/map/72h/hourly>
- Elysée. (2025). *Sommet pour l'action sur l'Intelligence Artificielle*. <https://www.elysee.fr/sommet-pour-l-action-sur-l-ia>
- Enedis. (2025). *Observatoire français de la transition écologique—Suivre les tendances de l'électrification en France—Data Centers*. <https://observatoire.enedis.fr/focus-consommation-electricite?tabs=tab-2&charts=section-2-section-dataviz-3>
- Epoch AI. (s. d.). *Can AI Scaling Continue Through 2030?* Consulté 12 février 2025, à l'adresse <https://epoch.ai/blog/can-ai-scaling-continue-through-2030>
- Ericsson. (2024). *Ericsson Mobility Report—Novembre 2024*. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/november-2024>
- Ericsson. (2025). *Ericsson Mobility Visualizer*. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/mobility-visualizer?f=1&ft=2&r=2,3,4,5,6,7,8,9&t=1,2,3,4,5,6,7&s=4&u=1&y=2024,2030&c=3>
- European Commission. (2020). *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market—Final study report*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/energy-efficient-cloud-computing-technologies-and-policies-eco-friendly-cloud-market>
- European Commission. (2024, mars 15). *Commission adopts EU-wide scheme for rating sustainability of data centres*. https://energy.ec.europa.eu/news/commission-adopts-eu-wide-scheme-rating-sustainability-data-centres-2024-03-15_en
- European Commission, Austrian Institute of Technology, Borderstep, & EY. (2025). *Assessment of the energy performance and sustainability of data centres in EU - First technical report*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/83be4c3e-5c79-11f0-a9d0-01aa75ed71a1/language-en>
- European Commission, Kamiya G., Bertoldi P. (2024). *Energy Consumption in Data Centres and Broadband Communication Networks in the EU*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135926>
- European union law. (s. d.). *Article 95—Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act) (Text with EEA relevance)*. Consulté 26 août 2025, à l'adresse <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj/eng>
- 4https://www.ft.com/content/052fc091-3720-4d8d-9493-2a16d100220c
- Financial Times. (2025, août 25). *Data centres look to tap UK gas pipelines to meet power demands*. <https://www.ft.com/content/75407616-1328-4ab8-9d81-a9dc18de920d>
- futura-sciences. (2020). *Microsoft : L'expérience d'un data center sous l'eau est une réussite totale*. <https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/informatique-microsoft-experience-data-center-sous-eau-reussite-totale-61458/>
- Garcia Bardon, M. (2021). *DTCO including Sustainability : Power-Performance-Area-Cost-Environmental score (PPACE) Analysis for Logic Technologies*. <https://doi.org/10.1109/IEDM13553.2020.9372004>
- Gartner. (2024, novembre 12). *Gartner Predicts Power Shortages Will Restrict 40% of AI Data Centers By 2027*. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-11-12-gartner-predicts-power-shortages-will-restrict-40-percent-of-ai-data-centers-by-20270>
- Goldman Sachs. (2024, mai 14). *AI is poised to drive 160% increase in data center power demand*. <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/AI-poised-to-drive-160-increase-in-power-demand>
- Google. (2024). *Environmental report 2024*. <https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2024-environmental-report.pdf>
- GreenIT.fr. (2019). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. GreenIT.fr. <https://www.greenit.fr/empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>
- Harshrate Index. (2025, Q3). *Global Hashrate Heatmap*. <https://hashrateindex.com/>
- Haut Conseil pour le Climat. (2024). *Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population*. <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-annuel-2024-tenir-le-cap-de-la-decarbonation-protger-la-population/>
- HCC. (2020). *Maîtriser l'impact carbone de la 5G* [Haut conseil pour le climat]. <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/maitriser-limpact-carbone-de-la-5g/>
- Hubblo, & Fourboul E. (2023). *Impacts importés des datacenters : L'angle mort des analyses territoriales des impacts du numérique*. <https://hubblo.org/fr/blog/datacenters-imported-impacts/>
- ICIS. (2025). *Data centres : Hungry for power—Forecasting European power demand from data centres to 2035*. <https://www.icis.com/explore/resources/data-centres-hungry-for-power/>
- IEA. (2019). *Data centres and energy – from global headlines to local headaches?* <https://www.iea.org/commentaries/data-centres-and-energy-from-global-headlines-to-local-headaches>
- IEA. (2021a). *Global CO₂ emissions from transport by subsector, 2000-2030*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-subsector-2000-2030>
- IEA. (2021b, février 15). *Data Centres and Data Transmission Networks—Tracking report*. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- IEA. (2022). *Data Centres and Data Transmission Networks—Tracking report*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- IEA. (2024a). *Electricity 2024—Analysis and forecast to 2026*. <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>
- IEA. (2024b). *World Energy Outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- IEA. (2025a). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- IEA. (2025b). *World Energy Investment 2025, 10th edition*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1b241aed-501c-4612-947e-8b4ad0d234a0/WorldEnergyInvestment2025.pdf>
- industriAll Europe. (2025). *The semiconductor industry in Europe : Between geopolitics and tech race*. https://www.industriall-europe.eu/documents/upload/2024/5/638503252902676944_semi_conductors_Draft_policy_brief_-_common_part_%28002%29.pdf
- IPCC. (2018). *AR5—WG3—Technology-specific Cost and Performance Parameters, p1335*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf

- Ipsos. (2025). *Intelligence artificielle : Quels sont les usages des Français ?* <https://www.ipsos.com/fr-fr/intelligence-artificielle-quels-sont-les-usages-des-francais>
- ITU-T. (2020). *Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement* [L.1470. Series L: environment and icts, climate change, e-waste, energy efficiency; construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1470-202001-l/en>
- Jay M., Ostapenko V., Lefèvre L., Trystram D., & Fichel B. (2023). *An experimental comparison of software-based power meters : Focus on CPU and GPU*. <https://inria.hal.science/hal-04030223v2>
- Journal officiel de l'Union européenne. (2024). *Règlement délégué (UE) 2024/1364 de la Commission du 14 mars 2024 sur la première phase de la mise en place d'un système commun de notation des centres de données à l'échelle de l'Union*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401364
- LBL, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, Shehabi A., Smith, S.J., Hubbard, A., Newkirk, A., Lei, N., Siddik, M.A.B., Holecek, B., & Koomey J., Masanet, E., Sartor, D. (2024). *2024 United States Data Center Energy Usage Report*. <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/2024-12/lbnl-2024-united-states-data-center-energy-usage-report.pdf>
- Le Figaro. (2025a, janvier 30). *Le patron d'EDF en opération séduction pour attirer les data centers*. <https://www.lefigaro.fr/economie/le-patron-d-edf-en-operation-seduction-pour-attirer-les-data-centers-20250130>
- Le Figaro. (2025b, juin 28). *« Il n'y a plus d'électricité à vendre ici » : En Islande, la ruée des data centers atteint ses limites*. <https://www.lefigaro.fr/conjoncture/il-n-y-a-plus-d-electricite-a-vendre-ici-en-islande-la-ruée-des-data-centers-atteint-ses-limites-20250628>
- Le grand continent. (2025, juillet 24). *Le plan IA de Trump : Discours intégral*. <https://legrandcontinent.eu/fr/2025/07/24/le-plan-ia-de-trump-discours-integral/>
- Le Monde. (2021, octobre 2). *L'Islande se rêve en terre promise des data centers*. https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/10/02/l-islande-se-reve-en-terre-promise-des-data-centers_6096865_3234.html
- Le Monde. (2024, septembre 23). *Les géants du numérique se convertissent au nucléaire pour éteindre les besoins énergétiques toujours plus importants de l'IA*. https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/09/23/les-geants-du-numerique-se-convertissent-au-nucleaire_6329378_3234.html
- Le Monde. (2025a, février 6). *IA : les Emirats arabes unis annoncent la construction en France d'un data center géant*. https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/02/06/intelligence-artificielle-les-emirats-arabes-unis-construiront-en-france-un-data-center-geant_6535048_3234.html
- Le Monde. (2025b, février 9). *Sommet de l'IA : le fonds canadien Brookfield va investir 20 milliards d'euros en France, notamment pour développer ses data centers*. https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/02/09/sommet-de-l-ia-le-fonds-canadien-brookfield-va-investir-20-milliards-d-euros-en-france-notamment-pour-developper-ses-data-centers_6538362_3234.html
- Le Monde. (2025c, juin 10). *Les data centers, toujours à la recherche de plus d'énergie, s'intéressent à la géothermie profonde, une source pas si écologique*. https://www.lemonde.fr/planete/article/2025/06/10/les-data-centers-prets-a-s-en-remettre-a-la-geothermie-profonde-pour-etancher-leur-soif-d-energie_6612026_3244.html
- Le Monde. (2025d, juillet 30). *Droits de douane : L'UE renonce un peu plus encore à son pacte vert avec sa promesse d'achat d'énergie américaine*. https://www.lemonde.fr/economie/article/2025/07/30/l-ue-renonce-un-peu-plus-encore-a-son-pacte-vert-avec-sa-promesse-d-achat-d-energie-americaine_6625493_3234.html
- L'Écho. (2025a, juin 2). *Les data centers vont-ils prendre en otage le réseau électrique belge ?* <https://multimedia.lecho.be/datacenter-consommation-electricite-belgique/>
- L'Écho. (2025b, juin 28). *Frédéric Dunon (CEO d'Elia Belgique) : « Industrie, batteries, data centers... Le réseau ne pourra pas accueillir tout le monde »*. <https://www.lecho.be/entreprises/energie/frederic-dunon-ceo-d-elia-belgique-industrie-batteries-data-centers-le-reseau-ne-pourra-pas-acueillir-tout-le-monde/10613498.html>
- Legifrance. (2022, août 18). *Code des impositions sur les biens et services*. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000046196792
- Légifrance. (2024). *LOI n° 2024-449 du 21 mai 2024 visant à sécuriser et à réguler l'espace numérique (1)*. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000049563616
- LeMagIT. (2025, février 17). *Datacenters IA en France : Promesses contre promesses*. <https://www.lemagit.fr/actualites/366619359/Datacenters-IA-en-France-promesses-contre-promesses>
- Luccioni A. S., Jernite Y., & Strubell E. (2024). *Power hungry processing : Watts driving the cost of AI deployment?* <https://arxiv.org/pdf/2311.16863>
- L'usine digitale. (2025a, février 12). *Sommet IA : Fluidstack veut construire un supercalculateur décarboné de 1 GW d'ici 2028*. <https://www.usine-digitale.fr/article/sommet-ia-fluidstack-veut-construire-un-supercalculateur-decarboné-de-1-gw-d-ici-2028.N2227340>
- L'usine digitale. (2025b, mai 19). *MGX, Bpifrance, Nvidia et Mistral AI vont créer en France le plus grand campus IA d'Europe*. <https://www.usine-digitale.fr/article/mgx-bpifrance-nvidia-et-mistral-ai-vont-creeer-en-france-le-plus-grand-campus-ia-d-europe.N2232196>
- L'usine digitale. (2025c, juin 19). *xAI ferait tourner Colossus avec des turbines à gaz naturel installées sans permis*. <https://www.usine-digitale.fr/article/xai-fait-tourner-colossus-avec-des-turbines-a-gaz-naturel-polluantes-installees-sans-permis.N2233978>
- Malmodin J. et al. (2023). *ICT Sector Electricity Consumption and Greenhouse Gas Emissions—2020 Outcome*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4424264>
- Masanet E., Shehabi A., Lei N., Smith S., & Koomey J. (2020). *Recalibrating global data center energy-use estimates*. https://datacenters.lbl.gov/sites/default/files/Masanet_et_al_Science_2020.full_.pdf
- McKinsey & Company. (2024). *The role of power in unlocking the European AI revolution*. <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/the-role-of-power-in-unlocking-the-european-ai-revolution>
- Microsoft. (2024). *How can we advance sustainability ? 2024 Environmental Sustainability Report*. <https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RW1IMJE>
- Morand C., Ligozat A., & Névéal A. (2025). *Does Efficiency Lead to Green Machine Learning Model Training ? Analyzing Historical Trends in Impacts from Hardware, Algorithmic and Carbon Optimizations*. <https://hal.parisnanterre.fr/ENSIE/hal-04839926v4>
- Nature Finance. (2025). *Navigating AI's Thirst in a Water-Scarce World—A Governance Agenda for AI and the Environment*. <https://www.naturefinance.net/wp-content/uploads/2025/02/NavigatingAIsThirstInAWaterScarceWorld.pdf>
- Nokia. (2024). *Global network traffic report*. <https://onestore.nokia.com/asset/213660>

- Nvidia. (2025). *PCF Summary for HGX H100 | Datasheet | 1 Product Carbon Footprint (PCF) Summary for HGX H100*. <https://images.nvidia.com/aem-dam/Solutions/documents/HGX-H100-PCF-Summary.pdf>
- Our World in Data. (2025). *Electricity generation, 2024*. <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-generation?mapSelect=~GBR>
- Pirson T. (2022). *The Environmental Footprint of IC Production : Meta-Analysis and Historical Trends*. https://www.researchgate.net/publication/366172064_The_Environmental_Footprint_of_IC_Production_Review_Analysis_and_Lessons_from_Historical_Trends
- Prof. Hannah Daly, University College Cork. (2024). *Data centres in the context of Ireland's carbon budgets*. https://www.friendsoftheearth.ie/assets/files/pdf/data_centres_and_the_carbon_budgets_-_prof_hannah_daly_dec_2024.pdf
- Reuters. (2025, mai 15). *Power connection requests for Italy data centres rise to 42 GW at end-March*. <https://www.reuters.com/business/energy/power-connection-requests-italy-data-centres-rise-42-gw-end-march-2025-05-15/>
- Roussilhe G. (2025). *La phase G : les GPU et les IA génératives comme nouvelle phase de l'histoire environnementale de la numérisation ? (Partie 1)*. <https://gauthierroussilhe.com/articles/la-phase-g-les-gpu-et-les-ia-generatives-comme-nouvelle-phase-de-l-histoire-environnementale-de-la-numerisation-partie-1>
- RTE. (2022). *Futurs énergétiques 2050—Rapport complet* [Février 2022]. <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>
- RTE. (2023). *Bilan prévisionnel—Édition 2023—Futurs énergétiques 2050—2023-2035 : Première étape vers la neutralité carbon*. <https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/2024-07/Bilan%20previsionnel%202023%20Chapitre%20%20Consommation.pdf>
- RTE. (2024). *Schéma décennal de développement du réseau—Édition 2024—Consultation publique—Hypothèses et analyses technico-économiques—Document B*. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2024-03/SDDR2024-volet-etudes-technico-%C3%A9conomiques-doc-B.pdf>
- RTE. (2025a). *Bilan électrique 2024*. <https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-2024/synthese>
- RTE. (2025b). *Dossier du maître d'ouvrage—Proposition de schéma décennal de développement du réseau 2025—Débat public du 4 septembre 2025 au 14 janvier 2026*. <https://www.debatpublic.fr/schema-decennal-de-developpement-du-reseau-rte-sddr-7045>
- RTE. (2025c). *Schéma décennal de développement du réseau—Fiche n°5—Raccordement de l'industrie*. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2025-02/2025-02-27-sddr-fiche-5-raccordement-industrie.pdf>
- Sagot B. (2023). *Apprendre les langues aux machines*. <https://youtu.be/uPiD8SFv41A?feature=shared>
- SBTi, ITU, GeSI, & GSMA. (2020). *Guidance for ICT companies setting science based targets—Mobile networks operators, fixed networks operators and data centres operators*. <https://sciencebasedtargets.org/sectors/ict>
- Schneider Electric. (2023). *Quantifying Data Center Scope 3 GHG Emissions to Prioritize Reduction Efforts—White Paper 99*. https://www.se.com/ww/en/download/document/SPD_WP99_EN/
- Schneider Electric. (2024). *Artificial Intelligence and Electricity—A System Dynamics Approach*. https://www.se.com/ww/en/download/document/TLA_System_Dynamics_Approach/
- SEAI. (2024). *Energy in Ireland*. <https://www.seai.ie/sites/default/files/publications/energy-in-ireland-2024.pdf>
- SemiAnalysis. (2022). *ASML & The Semiconductor Market In 2025 & 2030 A critical look at ASML's long term projections and assumptions*. <https://semanalysis.com/2022/11/22/asml-and-the-semiconductor-market/>
- Sénat. (2020). *Pour une transition numérique écologique. Rapport d'information n°555 (2019-2020)*. https://www.senat.fr/rap/r19-555/r19-555_mono.html
- Sénat. (2024). *PROJET DE LOI de simplification de la vie économique*. <https://www.senat.fr/petite-loi-ameli/2023-2024/635.html>
- The Journal. (2024, novembre 28). *Ireland's data centres turning to fossil fuels after maxing out country's electricity grid*. <https://www.thejournal.ie/investigates-data-centres-6554698-Nov2024/>
- The Register. (2024, décembre 5). *Day after nuclear power vow, Meta announces largest-ever datacenter powered by fossil fuels*. https://www.theregister.com/2024/12/05/meta_largestever_datacenter/
- The Shift Project. (2019). *Climat : L'insoutenable usage de la vidéo en ligne*. The Shift project. <https://theshiftproject.org/article/climat-insoutenable-usage-video/>
- The Shift Project. (2020). *Déployer la sobriété numérique*. The Shift Project. <https://theshiftproject.org/article/deployer-la-sobriete-numerique-rapport-shift/>
- The Shift Project. (2021). *Impact environnemental du numérique : Tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G*. The Shift Project. <https://theshiftproject.org/article/impact-environnemental-du-numerique-5g-nouvelle-etude-du-shift/>
- The Shift Project. (2022). *Décarboner l'industrie sans la saborder—Dans le cadre du plan de transformation de l'économie française*. <https://theshiftproject.org/publications/decarboner-industrie-sans-la-saborder/>
- The Shift Project. (2023). *Planifier la décarbonation du système numérique en France : Cahier des charges*. <https://theshiftproject.org/article/planifier-la-decarbonation-du-systeme-numerique-en-france-cahier-des-charges/>
- The Shift Project. (2024a). *Energie-climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients*.
- The Shift Project. (2024b). *Energie-climat : Quels mondes virtuels pour quel monde réel ?*
- The Shift Project. (2025a). *Annexes—Intelligence artificielle, données, calcul : Quelles infrastructures dans un monde décarboné ?*
- The Shift Project. (2025b). *Intelligence artificielle, données, calcul : Quelles infrastructures dans un monde décarboné ?*
- The Shift Project. (2025c). *The-Shift-Project-2025-Materials. Cas d'usage-Assistant personnel CR*.
- The Shift Project, & Supaero Decarbo. (2021). *Pouvoir voler en 2050, quelle aviation dans un monde contraint ?* <https://theshiftproject.org/article/quelle-aviation-dans-un-monde-contraint-nouveau-rapport-du-shift/>
- Vie publique. (2024, octobre 22). *Projet de loi de simplification de la vie économique*. <https://www.vie-publique.fr/loi/293913-entreprises-projet-de-loi-de-simplification-de-la-vie-economique>
- Vie publique. (2025, mars 25). *Énergie, environnement, IA... Les data centers en sept questions*. <https://www.vie-publique.fr/questions-reponses/297730-energie-environnement-ia-les-data-centers-en-sept-questions>
- Wikipédia. (s. d.). *Centrale nucléaire de Flamanville*. Consulté 29 juillet 2025, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_nucl%C3%A9aire_de_Flamanville
- Y. Spot, CEA. (s. d.). *Data 2040*. Consulté 22 août 2025, à l'adresse <https://yspot.fr/etude-data-2040/>

The Shift Project est un think tank qui oeuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et d'influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité.

www.theshiftproject.org

Remerciements

Le Shift remercie tous les membres du groupe de travail de ce projet.

Contact

Maxime Efoui Hess

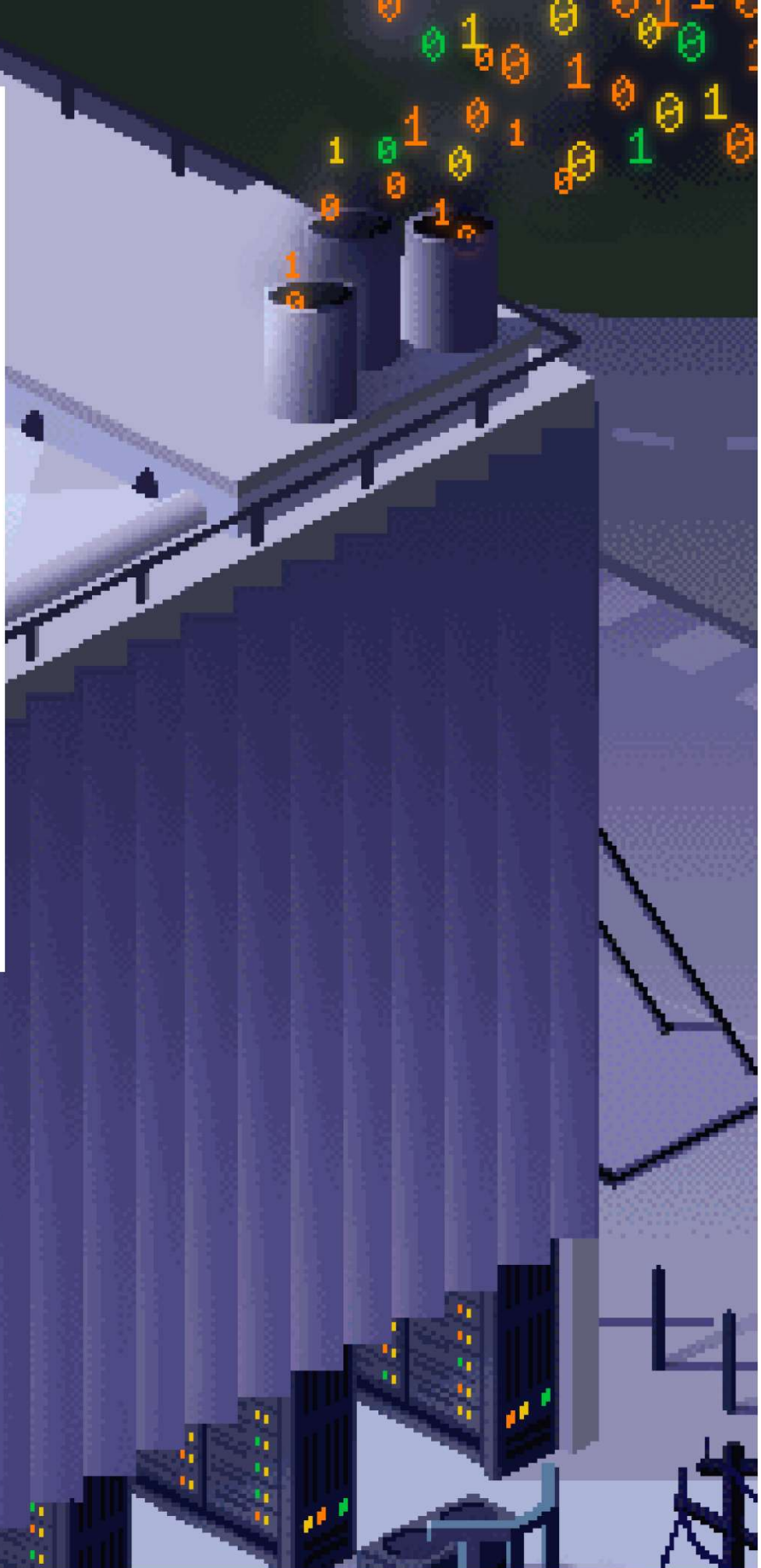
Coordinateur de projet

maxime.efoui@theshiftproject.org

Graphisme

Jérémy Garcia-Zubialde

Virgile Bellaiche



Nos partenaires

Le Shift Project remercie les partenaires du projet pour leur soutien technique et financier.

