

➤ Introduction aux impacts environnementaux du numérique, focus sur l'intelligence artificielle

Séminaire MIA Paris-Saclay

Hugo Gangloff

Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, MIA Paris-Saclay



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

18 juin 2026

➤ CATI SOBRE

- ▶ Co-animateur avec Sophie Schbath
- ▶ Lancé en mai 2026
- ▶ Collectif INRAE qui étudie les questions de sobriété numérique, des impacts du numérique de la recherche et les possibles alternatives
- ▶ Quelques groupes de travail
 - ▶ Prolonger les durées de vie (sobriété matérielle via le don d'équipements par exemple)
 - ▶ Promotion et formation de la science ouverte et au logiciel libre (Windows → Linux)
 - ▶ Étude de l'écoconception logicielle
 - ▶ Se former et communiquer sur les impacts environnementaux et aux méthodes de calculs d'empreinte environnementale
 - ▶ **Étude des centres de données** avec GT Éthique et Environnement (Groupe Calcul CNRS)

→ **Contactez-nous si le projet vous intéresse !**



1. Impacts environnementaux du numérique

Contexte

Notions clés

2. Datacenters

3. Impacts environnementaux négatifs

Impacts environnementaux à l'usage

Impacts à l'usage – Quelques spécificités de l'IAg

Impacts environnementaux à la fabrication

Impacts environnementaux en fin de vie

Artificialisation des sols

Impact indirect à l'usage : effet rebond

4. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs

5. Pistes de solutions

6. Conclusion

1. Impacts environnementaux du numérique

Contexte

Notions clés

2. Datacenters

3. Impacts environnementaux négatifs

Impacts environnementaux à l'usage

Impacts à l'usage – Quelques spécificités de l'IAg

Impacts environnementaux à la fabrication

Impacts environnementaux en fin de vie

Artificialisation des sols

Impact indirect à l'usage : effet rebond

4. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs

5. Pistes de solutions

6. Conclusion

Contexte

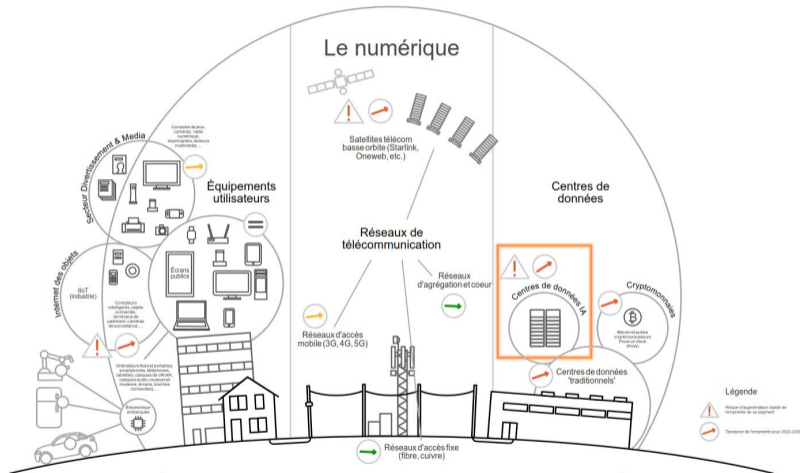


INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

Impacts du numérique – Matérialité

Voir la présentation de David Benaben pour le CATI SOBRE [Benaben, 2026]

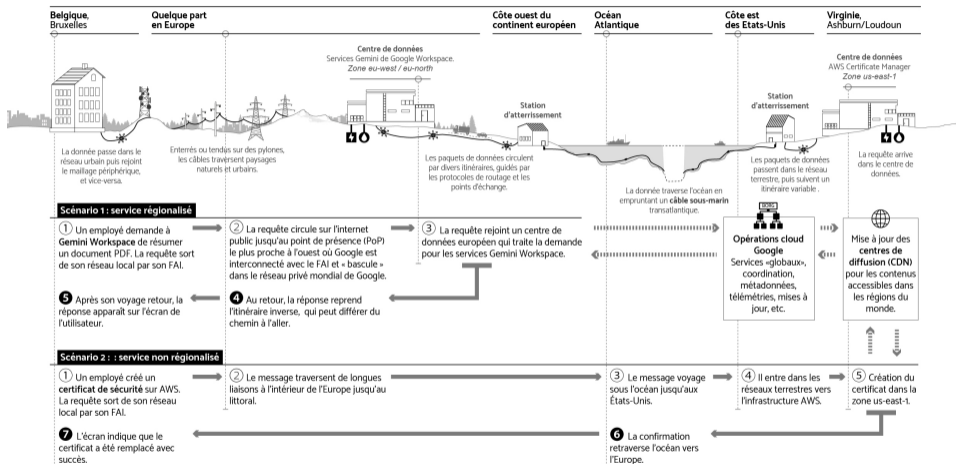


Ressource par Gauthier Roussille



Impacts du numérique – Matérialité

Scénarios de transfert d'une requête en fonction de la localisation des services et infrastructures



Source : Ophélie Coelho, figure 8 dans « Géopolitique du numérique : l'impérialisme à pas de géants » (Éditions de l'Atelier, 2^{ème} éd. 2025), illustration sous licence Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).

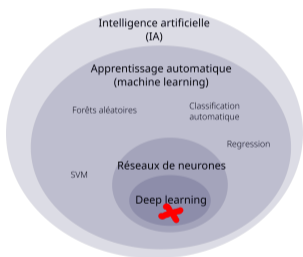


INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Avant d'aller plus loin

- ▶ On va surtout parler d'Intelligence Artificielle (IA) → À l'origine de **l'accroissement récent des impacts environnementaux** du numérique
- ▶ **Plusieurs types d'IA** [Alexandre et al., 2020] :



Adapté de

wikipedia.org/IA

- ▶ **IA symbolique** : modélisations logiques, manipulation explicite des connaissances, ...
- ▶ **IA numérique** : basée sur les données, les modèles probabilistes, les réseaux de neurones, ...
→ **Emballage actuel c'est l'IA générative (IAg)** (basée principalement sur des techniques de l'IA numérique et les *Large Language Models*) qui permet la production de texte, vidéo, image, code, ...
→ **General-purpose models vs task-specific models**



INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Découvertes et innovations clés

- ▶ Des découvertes algorithmiques qui ont permis l'IA numérique (et donc l'IAg) :
 1. Perceptron (1957)
 2. Rétropropagation du gradient
 3. Réseau de neurones (2012)
 4. Renforcement
 5. Attention (2017)
- ▶ et un équipement électronique clé : le Graphics Processing Unit (GPU)



Intelligence Artificielle dans le grand public

Adoption fulgurante de l'IAg et maintenant c'est 2,5 milliards de requêtes quotidiennes et 700 millions d'utilisateurs hebdomadaires [Chatterji et al., 2025]

Figure 1.5 ▶ Growth in the use of digital technologies in the workplace since the year of first commercial release, United States

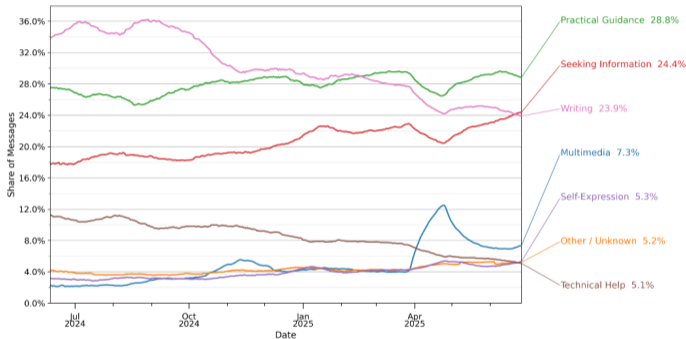
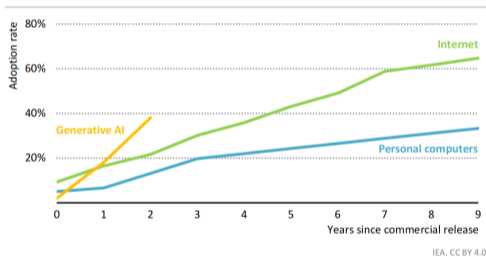
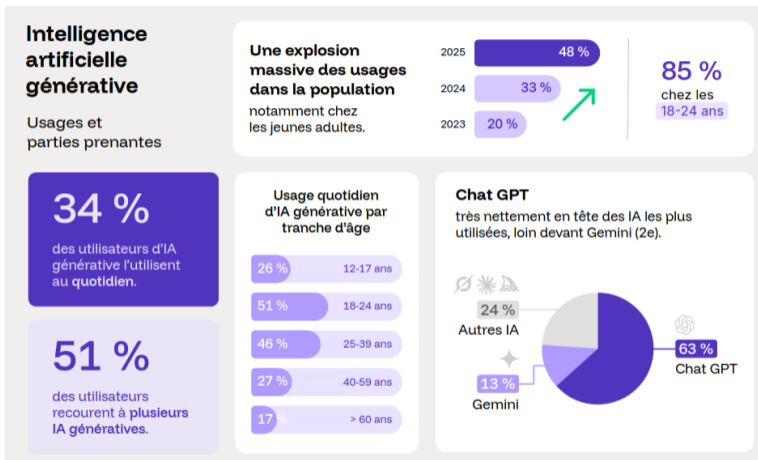


Figure 7: Share of consumer ChatGPT messages broken down by high level conversation topic



Intelligence Artificielle dans le grand public

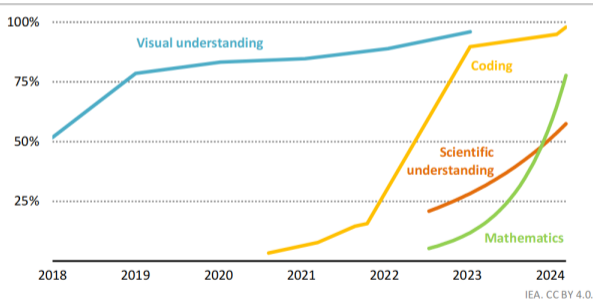
En France, selon le *Baromètre du numérique* [ARCEP, 2026b]



Intelligence Artificielle dans la recherche

- ▶ Dans les années 2010, l'IA numérique a permis d'améliorer significativement les performances (traitement d'images, vision, aide au diagnostic, ...)
- ▶ L'IAg permet de résoudre de nouvelles tâches (génération de texte, de code, problèmes de mathématiques, ...)

Figure 1.11 ▶ Accuracy of AI models in selected benchmarks, 2018-2024



Notions clés



➤ Typologie des impacts

Schématiquement, 3 types d'impacts [Horner et al., 2016] :

1. Impacts directs : coûts de fabrication, d'utilisation, d'élimination (cycle de vie)
2. Impacts indirects : gain d'efficacité, effets de substitution, effet rebond
3. Impacts indirects (2nd-ordre) : changements systémiques, économiques

- ▶ L'IA mise principalement sur les effets d'efficacité et de substitution
- ▶ **Dans la suite, nous étudierons les impacts sur l'environnement**



➤ Énergie : ordres de grandeurs et rappels

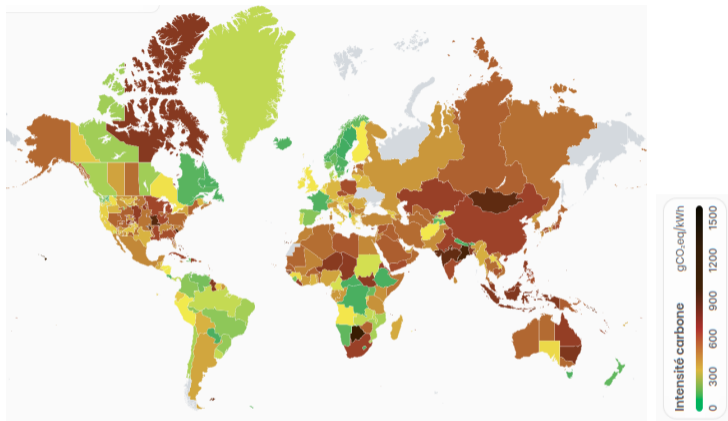
- ▶ Puissance instantannée disponible (W)
- ▶ Énergie consommée sur une période donnée (Wh)
- ▶ Intensité carbone de l'électricité (gCO₂eq/kWh)

(RTE, Bilan électrique 2025, 2026) :

- ▶ La consommation électrique française en 2025 \approx 449 TWh
- ▶ La production électrique française en 2025 \approx 554 TWh
→ +90TWh exportés
- ▶ Intensité carbone de l'électricité française en 2024 \approx 21 gCO₂eq/kWh
→ Production majoritairement décarbonée
- ▶ Réseau HT a une disponibilité de 99,9995%



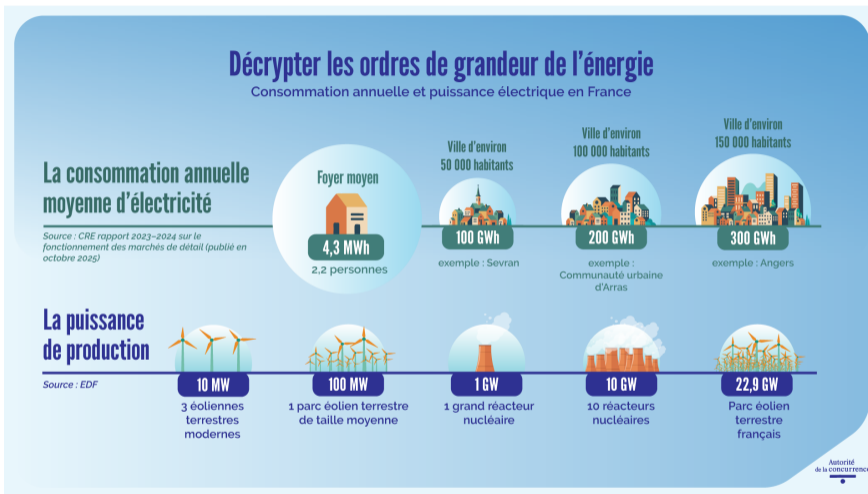
➤ Énergie : ordres de grandeurs et rappels



https://app.electricitymaps.com/map/live/fifteen_minutes

→ **Produire de l'électricité ne pollue pas de la même manière partout !**

Énergie : ordres de grandeurs et rappels



➤ Énergie : ordres de grandeurs et rappels

Dans toute la suite :

- ▶ La puissance électrique annoncée pour les projets de datacenters est la **puissance de raccordement demandée**
 - la puissance électrique réellement installée et donc la consommation y est la plupart du temps inférieure
 - les plus gros projets mettent plusieurs années à atteindre la puissance maximale
 - il faut distinguer saturation programmatique (réservations) et saturation réelle (consommation) de du système électrique
- ▶ Les consommations électriques rapportées pour les datacenters sont en partie des **estimations** et peuvent varier selon les sources
 - les raisons sont discutées dans [[The Shift Project, 2025](#)] par exemple



1. Impacts environnementaux du numérique

Contexte

Notions clés

2. Datacenters

3. Impacts environnementaux négatifs

Impacts environnementaux à l'usage

Impacts à l'usage – Quelques spécificités de l'IAg

Impacts environnementaux à la fabrication

Impacts environnementaux en fin de vie

Artificialisation des sols

Impact indirect à l'usage : effet rebond

4. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs

5. Pistes de solutions

6. Conclusion

➤ Graphical Processing Units (GPUs)

Voir la présentation
Introduction à la
consommation d'énergie
des GPUs



➤ Typologie des datacenters

▶ Datacenters de colocation ou *cloud*

- services de location de salles informatiques, de services, de maintenance etc.
- $\approx 1-100\text{MW}$, il faut de l'électricité et de la connectivité
→ datacenters situés dans les villes ou très proche
- *retrofitting* en cours pour une partie des datacenters pour les tâches d'inférence des modèles d'IAg : **GPU** ↑

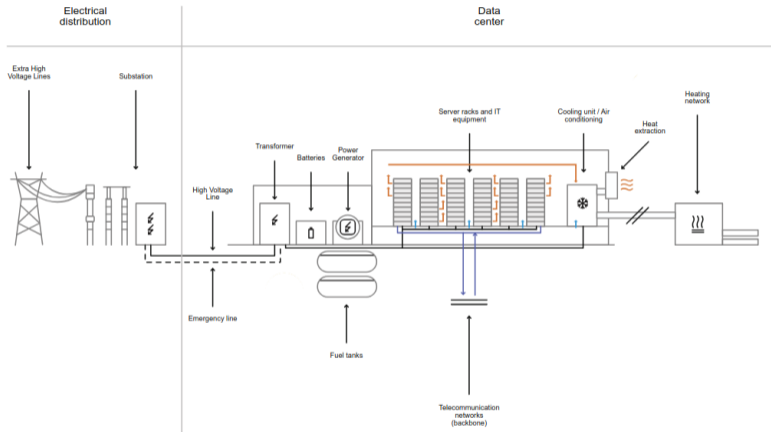
▶ Datacenter de type *AI factory*

- usines à entraînement des gros modèles d'IAg, ou pour le HPC
- les GPUs sont les équipements principaux
- **100MW à plus d'1GW**, il faut beaucoup d'électricité
→ datacenters situés loin des centres urbains près des lignes très haute tension



➤ Typologie des datacenters

Vue schématique d'un datacenter



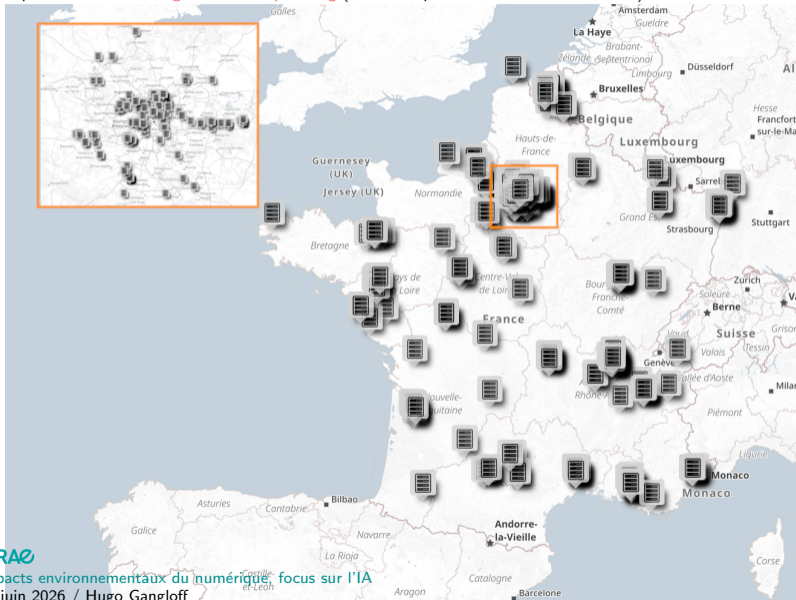
Source : Thèse de Clément Marquet repris par Gauthier Roussilhe (adaptée)





Datacenters en France

Adapté depuis la carte de lenuageetaitsousnospieds.org (visible uniquement : datacenters existant)



INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA

18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Datacenters en France



SITE A OVH DC1 à Paris, 19^e arr.

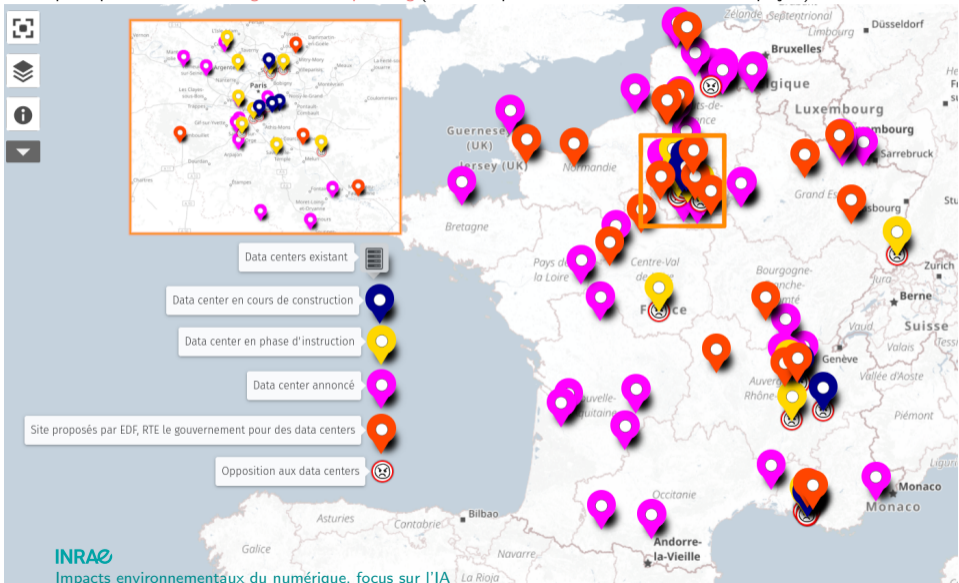


Source : Institut Paris Région, LE DÉVELOPPEMENT DES DATA CENTERS EN ÎLE-DE-FRANCE, 2023



Datacenters en France

Adapté depuis la carte de lenuageetaitsousnospieds.org (visible uniquement : constructions en cours et projets)



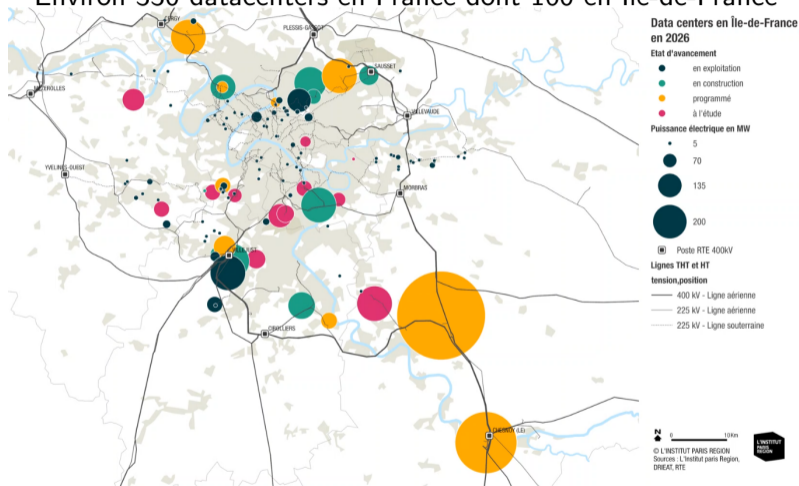
INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA

18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Datacenters en France

Environ 330 datacenters en France dont 160 en Ile-de-France



➤ Datacenters en France

Fouju (77) dans les années 2030 (projet en instruction)



Source : Dossier de demande d'autorisation environnementale, Étude d'impact, Campus IA, 2026

INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Datacenters monde et USA

datacentermap.com :

- ▶ ~ 11000 datacenters dans 174 pays
- ▶ ~ 4000 datacenters aux USA

Figure 1.13 ▶ Global map of large data centre clusters, 2024



➤ Datacenters monde et USA

Stargate Abilene, Texas, 445ha, 1.5GW à terme



Source : <https://openai.com/fr-FR/index/stargate-advances-with-partnership-with-oracle/>

1. Impacts environnementaux du numérique
 - Contexte
 - Notions clés
2. Datacenters
3. Impacts environnementaux négatifs
 - Impacts environnementaux à l'usage
 - Impacts à l'usage – Quelques spécificités de l'IAg
 - Impacts environnementaux à la fabrication
 - Impacts environnementaux en fin de vie
 - Artificialisation des sols
 - Impact indirect à l'usage : effet rebond
4. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
5. Pistes de solutions
6. Conclusion

Impacts environnementaux à l'usage



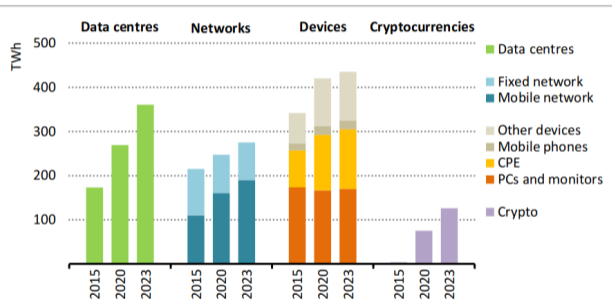
INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Consommation d'énergie du numérique dans le monde

- ▶ Le numérique c'est ≈ 1000 TWh d'énergie électrique en 2023 soit 4% de la consommation mondiale [IEA, 2025]¹

Figure 2.15 ▶ Global electricity demand from data centres, data transmission networks, devices and cryptocurrency mining, 2015-2023



IEA. CC BY 4.0.

1. Ce nombre exclut les cryptomonnaies (!!!) et le secteur du divertissement et des médias (TV, consoles de jeux, production, ...)

➤ Consommation d'énergie des datacenters dans le monde

- ▶ 415 TWh \approx 1.5% de la conso électrique globale en 2024 [IEA, 2025]
- ▶ → Au moins **x2 d'ici 2030** dans 3 scénarios sur 4 [IEA, 2025]

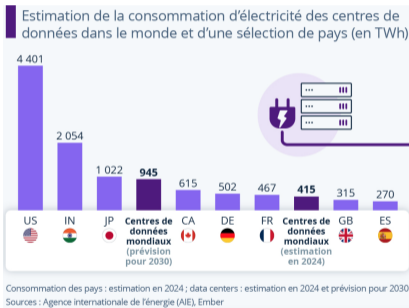
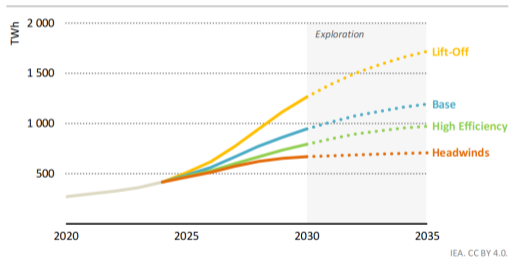


Figure 2.14 ▶ Global data centre electricity consumption by sensitivity case, 2020-2035



<https://fne-idf.fr/dossiers/l-essentiel-sur-l-impact-environnemental-des-data-centers>



➤ Consommation d'énergie des datacenters en France

- ▶ Le numérique ≈ 50 TWh ($\approx 10\%$ de la conso. elec.)
dont datacenters ≈ 10 TWh [The Shift Project, 2025]
- ▶ **Stratégie Nationale Bas Carbone 3** (Déc. 2025) :
→ **consommation datacenters x4 d'ici 2050**

La SNBC 3 établit une **cible indicative de consommation des centres de données** visant à ne pas concurrencer les autres leviers d'électrification de

40 TWh en 2050

➤ Consommation d'énergie des datacenters en France

- ▶ Le numérique ≈ 50 TWh ($\approx 10\%$ de la conso. elec.)
dont datacenters ≈ 10 TWh [The Shift Project, 2025]
- ▶ **Stratégie Nationale Bas Carbone 3** (Déc. 2025) :
→ **consommation datacenters x4 d'ici 2050**

La SNBC 3 établit une **cible indicative de consommation des centres de données** visant à ne pas concurrencer les autres leviers d'électrification de

40 TWh en 2050

40 TWh c'est :

- ▶ \approx l'énergie produite annuellement par tout le parc éolien français actuel (Voir les calculs)
- ▶ \approx l'énergie produite annuellement par 6 réacteurs nucléaires (Voir les calculs)



➤ Consommation d'énergie des datacenters : problèmes

- ▶ Des temps d'attente de raccordement au réseau électrique qui s'allongent

Table 2.4 ➤ Reported connection queues for new data centres in selected jurisdictions

Jurisdiction	Average time in queue
United States	1-3 years
North Virginia (United States)	Up to 7 years
California (United States)	3 years
Germany	Up to 7 years
United Kingdom	5-7 years
Netherlands	Up to 10 years
Kanto (Japan)	More than 5 years
Malaysia	Under 3 years
Queensland (Australia)	More than 2 years
Italy	Under 3 years
Spain	3-5 years
Ireland	In Dublin, paused until 2030

Sources: IEA analysis based on energy.gov (United States), datacenterdynamics.com (Virginia, Netherlands, United Kingdom), electricalreview.co.uk (Germany), businesspost.ie (Ireland) and IEA survey results (Australia, Italy, Japan, Malaysia, Spain).

- ▶ Les datacenters ne sont pas, *a priori*, flexibles et fonctionnent 24/7
→ **incompatibilité énergies renouvelables**
- ▶ Certaines entreprises vont produire leur propre énergie !
→ **behind-the-meter**
- ▶ IA n'est pas la seule cause de l'explosion de la demande électrique (industrie lourde, autres équipements IT, électrification des transports, ...)
→ **Conflits dans les usages !** [The Shift Project, 2025]

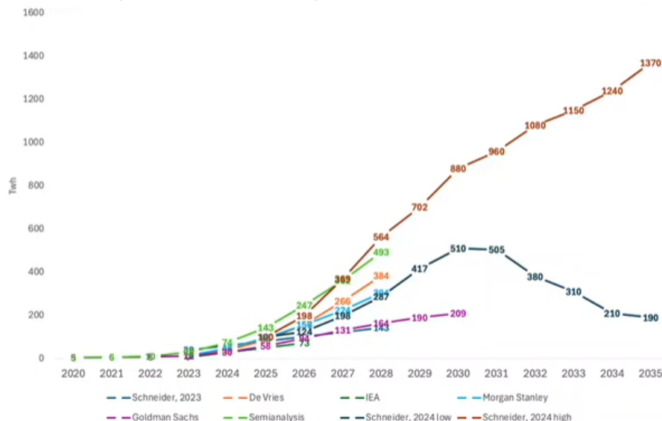
➤ Consommation d'énergie de l'IA

- ▶ 15%-20% de l'énergie des datacenters en 2025 dans le monde selon [The Shift Project, 2025] ou [Aczel et al., 2026]
- ▶ Il est projeté que **la part de l'IA** (portée par l'IAg) **explose** dans un futur proche !

Consommation d'énergie de l'IA par année dans la phase d'usage

Présentation de Lynn Kaack, Forum pour l'IA durable, 2026

<https://www.youtube.com/watch?v=1e3hojUNpqQ>



Source: adapted from Roegen Centre for Sustainability and INFRAS with data from Schneider Electric, 2023; Schneider Electric, 2024; De Vries, 2023; IEA, 2024; Morgan Stanley, 2024; Goldman Sachs, 2024; Semianalysis, 2024

➤ Mesures de la consommation d'énergie

Différents outils de mesure de l'énergie électrique

- ▶ Wattmètre pour une mesure directe
- ▶ GreenAlgorithms (estimation modélisée)
- ▶ CodeCarbon (estimation embarquée)
- ▶ Ecologits (estimation modélisée)
- ▶ Alumet (estimation in situ)

→ Les résultats peuvent différer selon l'outil [Jay et al., 2023]



➤ Mesures de la consommation d'énergie

À partir des mesures on construit le **Power Usage Effectiveness** :

$$\text{PUE} = \frac{\text{Total Facility Energy}}{\text{IT Equipment Energy}},$$

on a alors $\text{PUE} \geq 1$.

➤ Mesures de la consommation d'énergie

À partir des mesures on construit le **Power Usage Effectiveness** :

$$\text{PUE} = \frac{\text{Total Facility Energy}}{\text{IT Equipment Energy}},$$

on a alors $\text{PUE} \geq 1$.

En général, *IT Equipment Energy*=

- ▶ Serveurs (stockage, calcul)
- ▶ Équipements réseaux

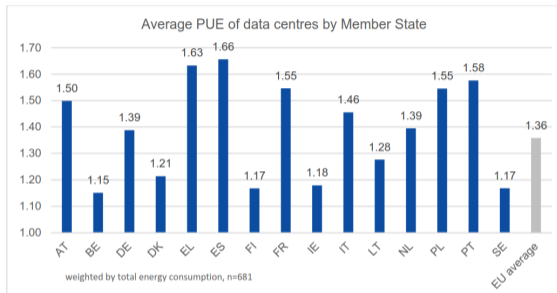
et *Total Facility Energy* = *IT Equipment Energy*+

- ▶ Équipements d'alimentation en énergie (UPS, PDU, générateurs, batteries, ...)
- ▶ Équipements de refroidissement



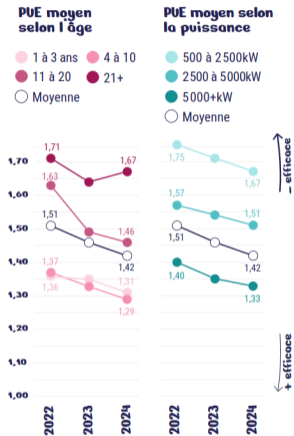


Mesures de la consommation d'énergie



[European Commission et al., 2025]

/!\ rapport où il manque une bonne partie des datacenters (premier rapport lié à la Directive EU 2023/1791)



[ARCEP, 2026a]



INRAE

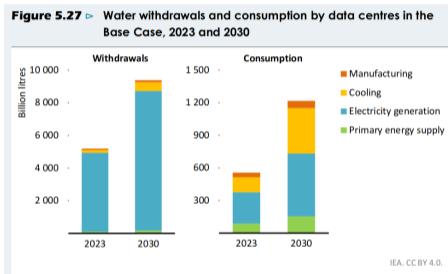
Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Consommation d'eau des datacenters

- ▶ Consommation² dans le monde \approx 560 milliards L en 2023³

→ **x2 en 2030** [IEA, 2025]

- ▶ Beaucoup de systèmes de refroidissement différents [ADEME, 2025]



→ **Conflits dans les usages** prévisibles : c'est surtout de l'eau potable et beaucoup de datacenters se situent dans des zones de stress hydrique [Nature Finance, 2025]

2. eau prélevée qui n'est pas retournée à la source
3. pour comparer, Paris consomme \approx 155 milliards de litres d'eau par an

<https://www.paris.fr/pages/paris-se-dote-d-un-plan-de-sobriete-hydrique-pour-reduire-sa-consommation-d-eau-28937>



➤ Consommation d'eau des datacenters

En plus du PUE, un autre indicateur est le : **Water Usage Effectiveness**

$$WUE = \frac{\text{Total Water Consumed (L/year)}}{\text{Electricity Consumption (KWh/year)}}$$

- ▶ *scope 1* : eau consommée par le datacenter → refroidissement surtout → **Usage** (direct)
- ▶ *scope 2* : + eau pour produire l'électricité (indirect)
- ▶ *scope 3* : + eau pour produire les équipements (indirect, cas de la slide précédente)

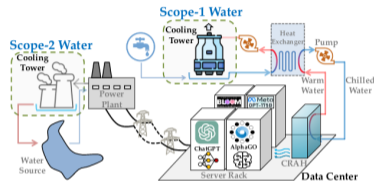
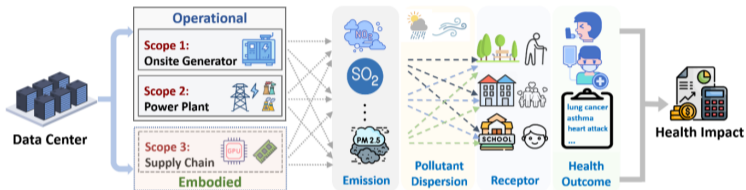


Figure 1: An example of data center's operational water usage: on-site scope-1 water usage for data center cooling (via cooling towers in the example), and off-site scope-2 water usage for electricity generation. The icons for AI models are only for illustration purposes.

De [Li et al., 2025]

➤ Autres pollutions

- ▶ Fonctionnement au gazole ou HVO génère du NO_x , $PM_{2.5}$, etc.
 - Générateurs de secours testés tous les mois [ADEME, 2024a]
 - Réaction de combustion et stockage de fioul → risque industriel élevé (ICPE...)



[Han et al., 2024]

- ▶ Les fluides frigogènes sources de pollution aux PFAS [Kim, 2026] (les datacenters peuvent être situés sur des zones de captage d'eau potable !)
- ▶ Pollution sonore également documentée [Diguet et al., 2019]

Impacts à l'usage – Quelques spécificités de l'IAg



➤ Coûts à l'entraînement vs à l'inférence

Entraînement

- ▶ Beaucoup de flou, hypothèses dures à vérifier
- ▶ GPT-3, 175 milliards de paramètres : 1287MWh, 700000L d'eau, 4millions \$ [Patterson et al., 2021]
- ▶ GPT-4, 1800 milliards de paramètres : **ordre de grandeur coût énergétique**²
→ $49 * 1,18 \approx 58$ GWh d'énergie électrique pour les datacenters à l'entraînement³
→ (énergie produite par 1 réacteur nucléaire pendant 3j)

2. <https://medium.com/data-science/the-carbon-footprint-of-gpt-4-d6c676eb21ae>

3. Voir les calculs

➤ Coûts à l'entraînement vs à l'inférence

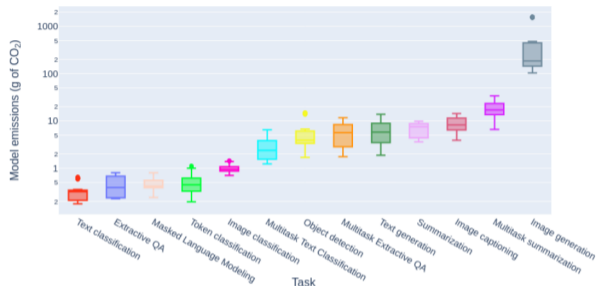
Inférence

- ▶ Beaucoup d'estimations et des hypothèses difficiles à vérifier
- ▶ Le coût croît avec la complexité de la tâche
- ▶ Le nombre d'inférences (2,5 milliards / jour sur ChatGPT) est tel que **les inférences dans l'IAg n'ont plus le coût négligeable qu'elles avaient souvent dans l'IA task-specific**
 - ▶ En terme de coût \$, on peut s'attendre à ce que ça soit 50-50 entre entraînement et inférence [EPRI and epoch.ai, 2025]
 - ▶ En terme de puissance de calcul on trouve souvent que 80 à 90% de la ressource en calcul des datacenters est pour l'inférence [Luccioni et al., 2024]





Coûts différents selon modèles / applications



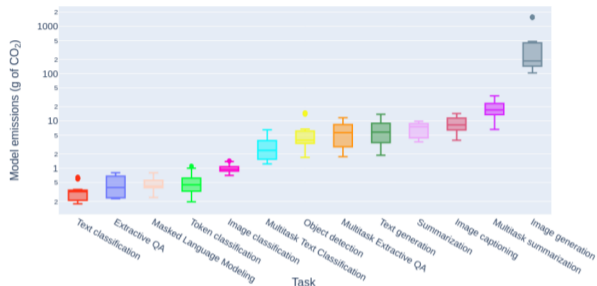
gCO₂e pour 1000 inférences [Luccioni et al., 2024]

-
- <https://www.technologyreview.com/2025/05/20/1116327/ai-energy-usage-climate-footprint-big-tech/>





Coûts différents selon modèles / applications



gCO₂e pour 1000 inférences [Luccioni et al., 2024]



Text-to-video ?

→ 30× plus coûteux en énergie que text-to-image

→ 45000× plus coûteux en énergie que de la classification de texte

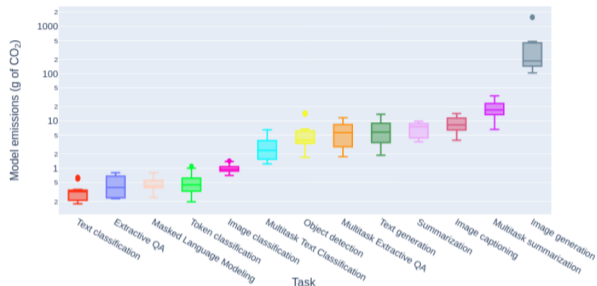
[Delavande et al., 2025]

2. <https://www.technologyreview.com/2025/05/20/1116327/ai-energy-usage-climate-footprint-big-tech/>





Coûts différents selon modèles / applications



gCO₂e pour 1000 inférences [Luccioni et al., 2024]



Text-to-video ?

→ 30× plus coûteux en énergie que text-to-image
→ 45000× plus coûteux en énergie que de la classification de texte

[Delavande et al., 2025]

IA agentique ? ! ? !²

2. <https://www.technologyreview.com/2025/05/20/1116327/ai-energy-usage-climate-footprint-big-tech/>



➤ Analyse de cycle de vie

- ▶ Les coûts à *la requête* précédents sont issus d'**Analyses de Cycles de Vie**
 - Définir une unité fonctionnelle (ex : UF = *Générer une page de 400 tokens*)
 - ACV va s'intéresser à combien **de ressources** / **d'impacts** pour produire l'UF
- ▶ Exemples de ressources : énergie, eau, ressources abiotiques (minerais, ...), etc.
- ▶ Exemples d'impacts : potentiel changement climatique, destruction couche d'ozone, etc.



➤ Analyse de cycle de vie

Un exemple d'ACV [ADEME and ARCEP, 2025]

UF = Utiliser les équipements et systèmes basés en **France** liés aux équipements et infrastructures numériques sur un an.

	Épuisement des ressources abiotiques naturelles - éléments - kg	Épuisement des ressources abiotiques naturelles - fossiles - MJ	Acidification - mol H+ eq.	Ecotoxicité - CTUe	Changement climatique - kg CO2 eq.	Radiations ionisantes - kBq U235 eq.	Emissions de particules fines - Disease occurrence	Création d'ozone photochimique - kg NMVOC eq.	MIPS - kg	Consommation d'énergie primaire - MJ
TIER 1 - Fabrication, Distribution, Fin de vie	85,7%	17,0%	41,5%	50,7%	42,1%	18,3%	25,3%	44,2%	54,6%	16,1%
TIER 1 - Utilisation	0,1%	37,9%	6,7%	2,9%	7,5%	45,9%	27,7%	6,7%	4,6%	38,6%
TIER 2 - Fabrication, Distribution, Fin de vie	5,6%	1,4%	2,5%	2,9%	1,8%	1,9%	2,0%	3,1%	4,4%	1,5%
TIER 2 - Utilisation	0,1%	7,9%	1,6%	1,1%	2,0%	9,4%	6,0%	2,1%	0,9%	8,0%
TIER 3 - Fabrication, Distribution, Fin de vie	8,4%	7,3%	14,9%	15,8%	16,5%	4,3%	9,7%	14,6%	15,5%	7,2%
TIER 3 - Utilisation	0,1%	28,5%	32,8%	26,6%	30,3%	20,3%	29,4%	29,4%	20,0%	28,6%

Tableau 11 - Décomposition des impacts par phase du cycle de vie

TIER 1=Terminaux / TIER 2=Réseaux / TIER 3=Datacenters

- ▶ Tout l'épuisement en ress. abiotiques = fabrication (col 1)
- ▶ En contribution CC, fabrication des terminaux \geq utilisation des terminaux (utilisation en Fr.) (col 5)
- ▶ En contribution CC, utilisation des datacenters \geq fabrication des datacenters (utilisation en Fr.) (col 5)



➤ Analyse de cycle de vie

- ▶ Les ACV donnent des ordres de grandeurs (utile!) mais :
 - ▶ Elle reposent sur des hypothèses (systèmes étudiés complexes et/ou opaques)
 - ▶ Souvent problème de clarté de l'UF → ACV non comparables³
 - ▶ Difficulté d'inclure les effets rebonds dans les ACV (système fermé)
 - ▶ Les sorties sont des chiffres abstraits et souvent petits, **ils cachent la réalité des infrastructures** :

1 Gemini prompt = 9 sec of TV (in terms of energy)⁴

1 Gemini prompt = 5 waterdrops (in terms of water)⁵

3. <https://theconversation.com/lia-generative-est-elle-soutenable-le-vrai-cout-ecologique-dun-prompt-269432>

4. <https://medium.com/@dnafus/>

[why-saying-ai-uses-the-energy-of-nine-seconds-of-television-is-like-spraying-dispersant-over-an-f0d0cfd67d68](https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2025-environmental-report.pdf) : TLDR : *the smaller the number, the more you should be worried*

5. <https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2025-environmental-report.pdf> *In 2024, we consumed a total of approximately 8.1 billion gallons (31 billion liters or 31 million cubic meters) of water across our data centers*



Impacts environnementaux à la fabrication



INRAE

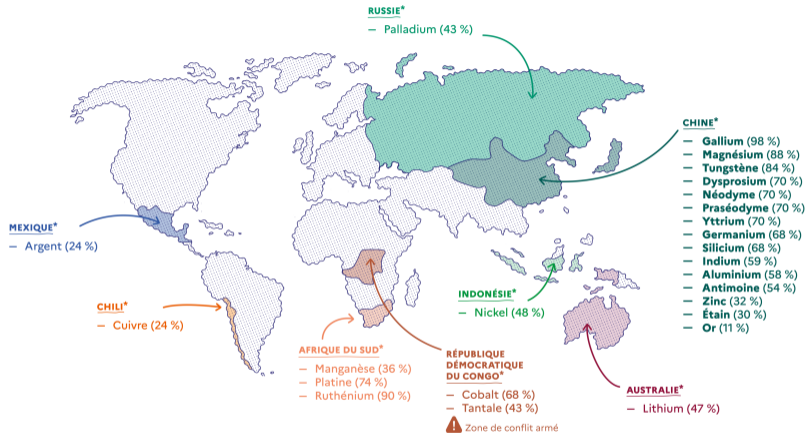
Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Impacts environnementaux à la fabrication

- ▶ Les procédés de fabrication des composants du numérique sont à nouveau source d'une grande consommation [[ADEME, 2024b](#)] :
 - ▶ d'énergie
 - ▶ d'espaces naturels (déforestation, destruction de terres agricoles, etc.)
 - ▶ d'eau
 - ▶ de ressources abiotiques
- ▶ Grande opacité des industries minière et du semi-conducteur [[Luccioni et al., 2025](#)]
- ▶ Pollutions et conflits dans les zones minières [[Crawford, 2021](#)]
→ *L'extractivisme en RDC ou l'empreinte du numérique*, Fabien Lebrun, 2023 [[Lebrun, 2023](#)]



Impacts environnementaux à la fabrication



Co-métal : métal récupéré dans le minerai où se trouve en majorité un autre métal, celui pour lequel on a ouvert la mine. [ADEME, 2024b]



Impacts environnementaux à la fabrication



Rampura Agucha (India), the largest zinc mine in the world by volume (2018), <https://www.mining.com/top-ten-zinc-producing-mines-world/>



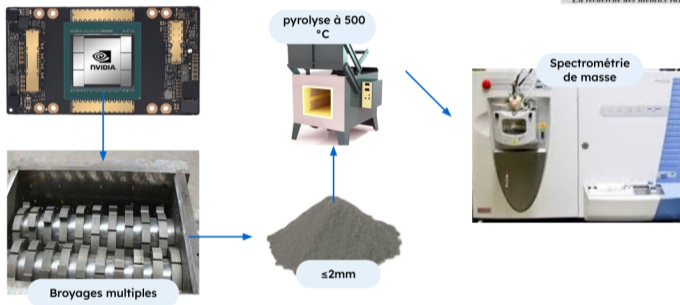
INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Destruction d'une NVIDIA GPU A100

Besoin en matières premières : exemple de NVIDIA GPU A100

Analyses élémentaires



Sources : David Ekchajzer (Présentation IA2, 2025) et [Falk et al., 2025]

➤ Destruction d'une NVIDIA GPU A100

Besoin en matières premières : exemple de NVIDIA GPU A100

Elemental Composition of Nvidia A100 SXM GPU

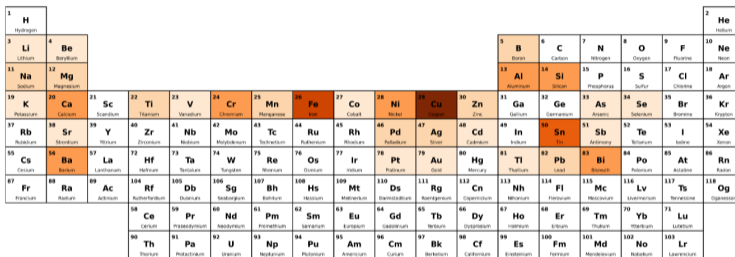


Figure 2. Proportion of elements in the Nvidia A100 SXM 40GB GPU (author illustration).

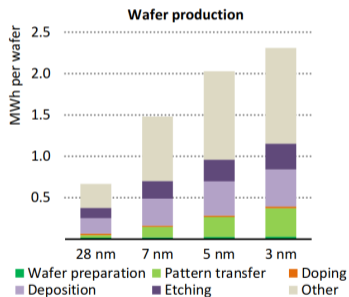
Sources : David Ekchajzer (Présentation IA2, 2025) et [Falk et al., 2025]



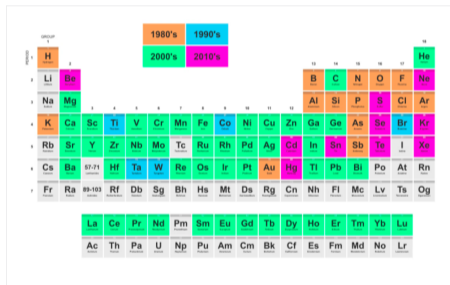
➤ L'industrie du semi-conducteur

→ Réduction de la taille des transistors

→ Augmentation de la pureté et de la diversité des matériaux nécessaires : **besoin en matière premières** et **coût environnemental** (procédés lithographie, substrat semi-conducteurs...)



Source : [IEA, 2025]



1. Liste des éléments mobilisés par l'industrie électronique des années 80 aux années 2010. Credit: Grabel and Allery, TSMC. Reproduction et adaptation par Gauthier Roussilhe

≈ 85% de tous les éléments non radioactifs sont ou ont été nécessaires [Roussilhe et al., 2025]

Impacts environnementaux en fin de vie



INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

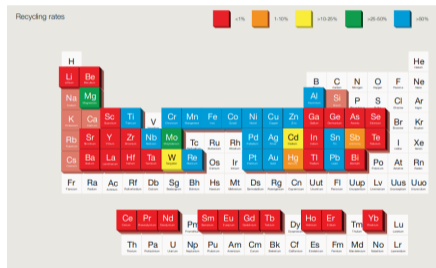
➤ Impacts environnementaux en fin de vie

- ▶ **Des déchets (cause de pollution et toxicité)** sont présents à **chaque phase** de la vie d'un équipement électronique (extraction, design, fabrication, ...) ⁶

6. Josh Lepawski, *Reassembling Rubbish : Worlding Electronic Waste*, MIT Press, 2018

Impacts environnementaux en fin de vie

- ▶ **Des déchets (cause de pollution et toxicité)** sont présents à **chaque phase** de la vie d'un équipement électronique (extraction, design, fabrication, ...) ⁶

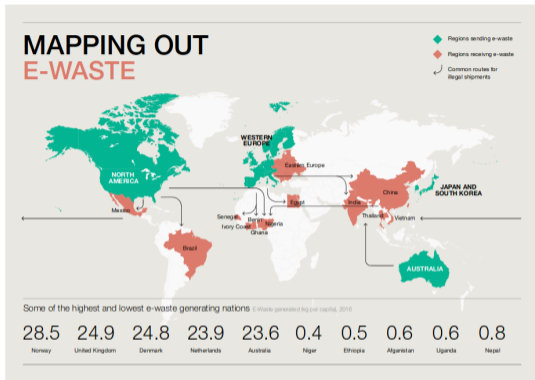


Source : [PACE, 2019]

- ▶ Le recyclage des métaux issus des DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) est encore très limité et ne cible que les métaux les plus chers [ADEME, 2024b]
- ▶ Si le processus de recyclage existe, il peut être très coûteux (eau, énergie, ...)

6. Josh Lepawski, *Reassembling Rubbish : Worlding Electronic Waste*, MIT Press, 2018

Impacts environnementaux en fin de vie



Source: Lewis 2011, The Global E-waste Statistics Partnership, 2018

- ▶ Avec l'IA : forte hausse des DEEE attendue (+ 1,2 million à + 5 millions tonnes supplémentaires d'ici à 2030 [Luccioni et al., 2025])
(Durée de vie GPU : 3 à 5 ans [Valdivia, 2025])



INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

Artificialisation des sols

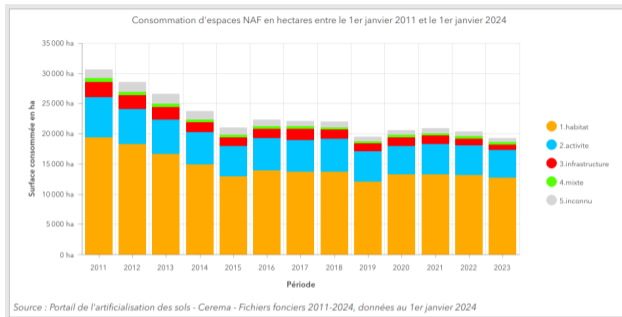


Artificialisation des sols

Surface consommée 1er janvier 2011-1er janvier 2024

297 236,7 ha

≈ 1/2 département
français [CEREMA, 2025]



- ▶ Les datacenters font peser un risque d'augmentation du rythme de l'artificialisation des sols (mesurée en Espaces Naturels, Agricoles et Forestiers consommés)
→ voir le nombre important de projets sur la carte du début

➤ Artificialisation des sols

- ▶ Implantation normalement privilégiée sur d'anciennes friches industrielles pour les nouveaux gros projets de type *hyperscale* [Comité IA, 2025]
→ procédure *Fast Track*⁶

Data centers en France : EDF mobilise son patrimoine foncier

EDF a identifié d'anciens sites lui appartenant, capables d'accueillir rapidement des projets à forte consommation électrique. Ces terrains bénéficient d'une situation favorable pour le raccordement au réseau public de transport, permettant d'optimiser les délais de mise en œuvre des projets.

<https://www.edf.fr/groupe-edf/accompagner-nos-clients/ami-data-centers>

6. <https://www.services-rte.com/files/live/sites/services-rte/files/Fiche%20descriptive%20fast-track%20-%205%20sites.pdf>

➤ Artificialisation des sols

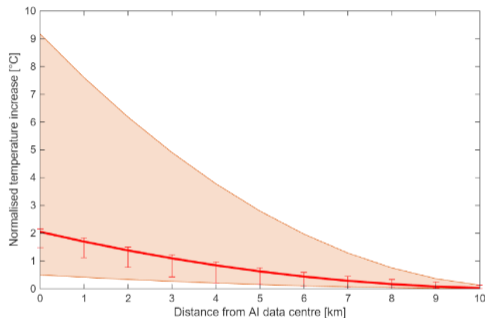
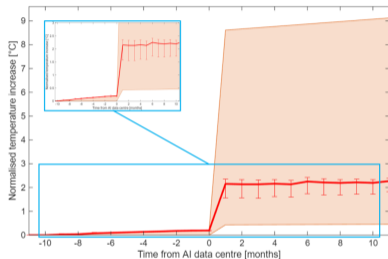
- ▶ Toute l'économie numérique va être boostée
→ entrepôts logistiques, centrales production et acheminement énergie, *etc.*



Source : www.aboutamazon.fr, *Amazon poursuit le développement de son réseau logistique en France, 2025*

➤ Ilots de chaleur

- ▶ Dans [Marinoni et al., 2026], sur une base de données de datacenters 2004-2024 :



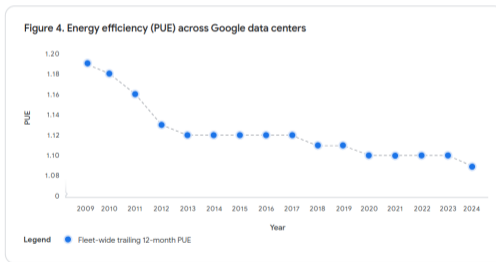
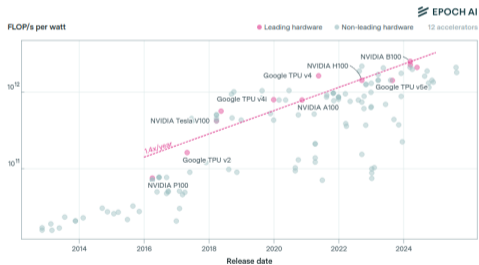
- ▶ Phénomène encore très peu étudié aux conséquences inconnues avec les nouvelles générations de datacenters : zones agricoles, période de canicules, etc.

Impact indirect à l'usage : effet rebond



➤ Effet rebond

- ▶ Historiquement (~ 2010s, avant IA_g) on a cru à un découplage possible entre capacités de calculs et consommation d'énergie [Kooimey et al., 2011, The Shift Project, 2025]
- ▶ Les gains d'efficacité sont réels [Morand et al., 2025a]
→ PUE, WUE, efficacité des modèles, etc.



Google Environmental Report 2025

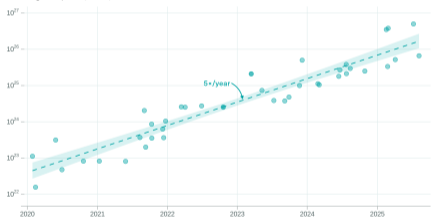
➤ Effet rebond

- ▶ Mais les modèles d'IAg ne cessent de requérir des capacités de calculs grandissantes

→ ex : la consommation des puces GPU explose

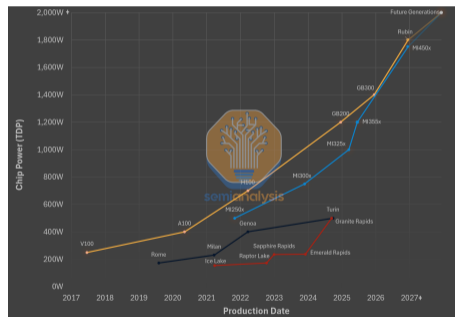
Training compute has grown 5x per year since 2020

Training compute (FLOP)



EPØCH AI | CC-BY

epoch.ai



INRAE

Impacts environnementaux du numérique, focus sur l'IA
18 juin 2026 / Hugo Gangloff

➤ Effet rebond

- ▶ Et en valeur absolue la consommation explose
- ▶ La demande et l'offre ne cessent d'augmenter, c'est d'ailleurs le modèle actuel de l'IA :

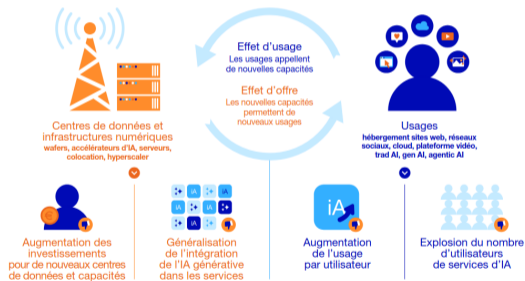
Genuinely climate-aligned AI strategies might require business models that do not hinge on perpetual growth, in order to ensure that increased AI efficiency does not simply spur more consumption.

[Luccioni et al., 2025]

Voir aussi [Gujral et al., 2026]

▶ [The Shift Project, 2025] :

L'insoutenable croissance de l'offre et des usages



1. Impacts environnementaux du numérique
 - Contexte
 - Notions clés
2. Datacenters
3. Impacts environnementaux négatifs
 - Impacts environnementaux à l'usage
 - Impacts à l'usage – Quelques spécificités de l'IAg
 - Impacts environnementaux à la fabrication
 - Impacts environnementaux en fin de vie
 - Artificialisation des sols
 - Impact indirect à l'usage : effet rebond
4. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
5. Pistes de solutions
6. Conclusion

L'IA pour le développement durable



Source : [Schwartz et al., 2020]

- ▶ Opportunités de réductions d'émissions de GES dans des domaines clés [Rolnick et al., 2022] : transport, industrie, agriculture, etc.
→ **décarbonation**
- ▶ (IEA, Energy and AI, 2025) :
The widespread adoption of existing AI applications could lead to emission reductions that are far larger than emissions from data centres
- ▶ D'autres secteurs pourraient en bénéficier : logistique, recyclage, etc. [Semedo et al., 2024]

Rendre l'IA plus durable

▶ IA frugale

→ Réduire la taille des modèles, communication sur les coûts CO₂eq des expériences, partage du code, redéfinir les benchmarks, interprétabilité, quantification des incertitudes, travail des données, etc. [[Varoquaux et al., 2025](#)]

▶ D'autres concepts de la *green AI* : durée de vie des équipements, chaleur fatale, etc. [[Semedo et al., 2024](#)]

➤ Des promesses réalistes ?

- ▶ Les études vendant les nouveaux systèmes d'IA négligent souvent les impacts (directs) de cycle de vie et impacts systémiques (effet rebond) qui sont **en conflit avec les dynamiques environnementales et énergétiques** [Rasoldier et al., 2022, Kaack et al., 2022, Morand et al., 2025b, Bhardwaj et al., 2025]



➤ Des promesses réalistes ?

▶ [IEA, 2025] :

Rebound effects – *for example from modal shifts away from public transport to autonomous cars – could undercut some of these benefits. AI can be a tool in reducing emissions, but it is not a silver bullet and does not remove the need for proactive policy.*

▶ [Gujral et al., 2026] :

*We argue that these sustainable-growth narratives begin to function as green-washing when they use **efficiency** improvements to claim sustainability even as **absolute** energy, water, material, and public health burdens continue to increase.*



1. Impacts environnementaux du numérique
 - Contexte
 - Notions clés
2. Datacenters
3. Impacts environnementaux négatifs
 - Impacts environnementaux à l'usage
 - Impacts à l'usage – Quelques spécificités de l'IAg
 - Impacts environnementaux à la fabrication
 - Impacts environnementaux en fin de vie
 - Artificialisation des sols
 - Impact indirect à l'usage : effet rebond
4. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
5. Pistes de solutions
6. Conclusion

➤ Quantification des impacts

- ▶ Évaluer l'empreinte environnementale de notre recherche
 - sensibilisation
 - formation aux outils et méthodologies [[Guennebaud et al., 2025](#)]
- ▶ Mieux évaluer l'empreinte environnementale de l'IA
 - obliger à la transparence totale des acteurs sur les impacts de leurs activités : lois (REEN, SREN, LSVE) et directives européennes (2023/1791) à revoir ?!
 - continuer les études et les projections pour mieux quantifier, au-delà du CO2e
 - s'intéresser aux *angles morts environnementaux* [[Diguët et al., 2019](#)] : îlots de chaleur, dépollution des sites après usage, PFAS, etc.



➤ Vers une réelle sobriété numérique

Selon [AFNOR, 2024] qui reprend [Cezard and Mourad, 2019] :

[La sobriété] assemble un continuum de démarches qui promeuvent – à différents degrés et à différentes échelles – une modération de la production et de la consommation de ressources énergétiques et matérielles, par une transformation des modes de vie au-delà de la recherche d'efficacité

- ▶ Comprendre les limites à la recherche habituelle d'efficacité
 - *Efficiency is not enough* [Wright et al., 2025]
 - *Rebound-informed test* [Gujral et al., 2026]
- ▶ **Sobriété numérique (digital sufficiency)** [AFNOR, 2024, Gujral et al., 2026]
 - quels besoins veut-on prioriser ?
 - quel budget (infrastructure, énergie, etc.) est justifié pour ces besoins ?



➤ Pluridisciplinarité : ouverture vers les SHS et STS

- ▶ Aller plus loin que la simple quantification
 - comprendre les limites de la quantification [Becquey et al., 2025]
 - comprendre comment l'IAg affecte nos métiers⁶ et les sociétés
- ▶ Définition des besoins et les adoptions des nouvelles solutions technologiques
 - pré-requis à une réelle sobriété
 - exemples dans l'agriculture ou le médical[Piot-Lepetit et al., 2023, Malfilatre and Louvel, 2025]
- ▶ Sophie Quinton, **Quelle recherche en informatique une fois que l'on a compris l'effet rebond ?**, 2024

6. Voir **présentation** d'Anne Laure Ligozat au colloque Labo1.5 le 12 juin 2026

1. Impacts environnementaux du numérique

Contexte

Notions clés

2. Datacenters

3. Impacts environnementaux négatifs

Impacts environnementaux à l'usage

Impacts à l'usage – Quelques spécificités de l'IAg

Impacts environnementaux à la fabrication

Impacts environnementaux en fin de vie

Artificialisation des sols

Impact indirect à l'usage : effet rebond

4. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs

5. Pistes de solutions

6. Conclusion

➤ Conclusion

- ▶ On a révélé la **matérialité du numérique** et ses impacts sur des domaines clés : énergie, eau, ressources abiotiques, environnement, *etc.*
- ▶ **L'IA et surtout l'IA générative** amplifient les impacts du numérique
- ▶ **Les datacenters** sont les éléments clés de cette vague
- ▶ On a vu ce que pourrait être une **sobriété numérique**



➤ Conclusion

- ▶ Nous n'avons pas abordé les **nombreux impacts sociaux et éthiques** du numérique et de l'IA ([voir une petite liste](#))
- ▶ La **dynamique de croissance** du secteur semble totalement **insoutenable** :
 - conflits avec les dynamiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique (décarbonation, ...)
 - conflits d'usage de l'eau, des sols, de l'énergie, ...
- ▶ Infléchir les trajectoires, si on le souhaite, implique des **choix de société** et donc une mobilisation citoyenne
 - luttes locales fortes contre les nouveaux gros projets de centres de données !



Conclusion

En dernière lecture, les centres de données IA, vu comme des unités de production électro-intensives de bien immatériels/semi-matériels, semblent être le pire des deux mondes : l'intensité matérielle [de l'industrie lourde] et l'insuffisance économique et financière [de l'économie numérique].

- Gauthier Roussilhe, *Les centres de données IA : entre réquisition énergétique et éclipse environnementale*, 2026



References I



Aczel, M., Chamanara, S., Matin, M., Farsi, A., Marwala, T., and Madani, K. (2026).

Environmental cost of ai's energy use : Carbon, water and land footprints.

<https://unu.edu/inweh/collection/environmental-cost-of-AIs-Energy-Use-Carbon-water-and-land-footprints>.



ADEME (2024a).

Avis d'experts - les data centers ou centres de données.

librairie.ademe.fr/batiment/7712-avis-d-exper-les-data-centers-ou-centres-de-donnees.html.



ADEME (2024b).

Etude numérique et métaux.

<https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/7713-etude-numerique-et-metaux.html>.



ADEME (2025).

Refroidissement des datacenters - technologies utilisées en france, potentiel d'économies.

<https://librairie.ademe.fr/energies/>

[8608-refroidissement-des-datacenters-technologies-utilisees-en-france-potentiel-d-economies.html](https://librairie.ademe.fr/energies/8608-refroidissement-des-datacenters-technologies-utilisees-en-france-potentiel-d-economies.html).



ADEME and ARCEP (2025).

Impacts environnementaux du numérique.

[https:](https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/7880-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france.html)

[//librairie.ademe.fr/changement-climatique/7880-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france.html](https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/7880-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france.html).



References II



AFNOR (2024).

Référentiel général pour l'ia frugale.

<https://www.afnor.org/actualites/intelligence-artificielle/referentiel-reduire-impact-environnemental-ia/>.



Alexandre, F., Amgoud, L., Bessiere, C., Bonnefon, J.-F., Cazenave, T., Chatila, R., Cornuejols, A., Cuppens, F., Destercke, S., Daille, B., et al. (2020).

L'intelligence Artificielle : De quoi s'agit-il vraiment ?

Cépaduès.



ARCEP (2026a).

Enquête annuelle "pour un numérique soutenable" - édition 2026 (données 2024).

<https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/impact-environnemental/enquete-annuelle-pour-un-numerique-soutenable-edition-2026.html#c41418>.



ARCEP (2026b).

Le baromètre du numérique - édition 2026.

<https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-publications-chiffrees/barometre-du-numerique/le-barometre-du-numerique-edition-2026.html>.



Becquey, X., Cottalorda, P.-J., Goupil, C., Haffner, F., Renouard, C., and Saadé, M. (2025).

Manuel de l'ingénieur du xxie siècle.

https://www.editionslesliensquilibrent.fr/livre-Manuel_de_l_ing%C3%A9nieur_du_XXIe_si%C3%A8cle-9791020923011-1-1-0-1.html.



References III



Benaben, D. (2026).

Empreinte environnementale du numérique - introduction et calcul (cati sobre, 2026).



Bhardwaj, E., Alexander, R., and Becker, C. (2025).

Limits to ai growth : the ecological and social consequences of scaling.

arXiv preprint arXiv :2501.17980.



CEREMA (2025).

Analyse de la consommation d'espaces naturels agricoles et forestiers entre 2011 et 2024.

<https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/comprendre-et-sensibiliser/bibliographie/analyse-la-consommation-despaces-naturels-agricoles-et-forestiers-entre-2011-et-2024>.



Cezard, F. and Mourad, M. (2019).

Panorama sur la notion de sobriété.

<https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/489-panorama-sur-la-notion-de-sobriete.html>.



Chatterji, A., Cunningham, T., Deming, D. J., Hitzig, Z., Ong, C., Shan, C. Y., and Wadman, K. (2025).

How people use chatgpt.



Comité IA (2025).

Faire de la france une puissance de l'ia.

<https://www.info.gouv.fr/dossier-de-presse/faire-de-la-france-une-puissance-de-lia>.



References IV



Crawford, K. (2021).
The atlas of AI : Power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence.
Yale University Press.



Delavande, J., Pierrard, R., and Luccioni, S. (2025).
Video killed the energy budget : Characterizing the latency and power regimes of open text-to-video models.
arXiv preprint arXiv :2509.19222.



Diguet, C., Lopez, F., and Lefèvre, L. (2019).
L'impact spatial et énergétique des data centers sur les territoires.
PhD thesis, ADEME, Direction Villes et territoires durables.



EPRI and epoch.ai (2025).
Scaling intelligence : The exponential growth of ai's power needs.
<https://www.epri.com/research/products/000000003002033669>.



European Commission, EY, AIT, and Borderstep (2025).
Assessment of the energy performance and sustainability of data centres in eu.
https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/83be4c3e-5c79-11f0-a9d0-01aa75ed71a1/language-en?WT.mc_id=Searchresult&WT.ria_c=153343&WT.ria_f=8810&WT.ria_ev=search&WT.URL=https%3A%2F%2Fenergy.ec.europa.eu%2F.



Falk, S., Ekchajzer, D., Pirson, T., Lees-Perasso, E., Wattiez, A., Biber-Freudenberger, L., Luccioni, S., and van Wynsberghe, A. (2025).
More than carbon : Cradle-to-grave environmental impacts of genai training on the nvidia a100 gpu.
arXiv preprint arXiv :2509.00093.

References V



Guennebaud, G., Ligozat, A.-L., Orgerie, A.-C., and Simonin, M. (2025).
Evaluating and reporting the carbon footprint of shared computing platforms : Choices and limits.
In 24th IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC 2025).



Gujral, H., Bhardwaj, E., Perera, D., Becker, C., and Easterbrook, S. (2026).
Plateau that never comes : When efficiency claims in datacenters and ai become greenwashing.
arXiv preprint arXiv :2606.04214.



Han, Y., Wu, Z., Li, P., Wierman, A., and Ren, S. (2024).
The unpaid toll : Quantifying and addressing the public health impact of data centers.
arXiv preprint arXiv :2412.06288.



Horner, N. C., Shehabi, A., and Azevedo, I. L. (2016).
Known unknowns : indirect energy effects of information and communication technology.
Environmental Research Letters, 11(10) :103001.



IEA (2025).
Energy and ai.
<https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>.



Jay, M., Ostapenco, V., Lefèvre, L., Trystram, D., Orgerie, A.-C., and Fichel, B. (2023).
An experimental comparison of software-based power meters : focus on cpu and gpu.
In 2023 IEEE/ACM 23rd International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid), pages 106–118. IEEE.



References VI



Kaack, L. H., Donti, P. L., Strubell, E., Kamiya, G., Creutzig, F., and Rolnick, D. (2022).
Aligning artificial intelligence with climate change mitigation.
Nature Climate Change, 12(6) :518–527.



Kim, K. (2026).
Data center cooling water discharge : Assessing environmental transparency and information gaps.
UC Law Environmental Journal, 32(2) :177.



Koomey, J. et al. (2011).
Growth in data center electricity use 2005 to 2010.
A report by Analytical Press, completed at the request of The New York Times, 9(2011) :161.



Lebrun, F. (2023).
L'extractivisme en rdc ou les empreintes du numérique : Du désastre écologique à la catastrophe humanitaire.
EcoRev', 54(1) :107–120.



Li, P., Yang, J., Islam, M. A., and Ren, S. (2025).
Making ai less' thirsty'.
Communications of the ACM, 68(7) :54–61.



Luccioni, A. S., Strubell, E., and Crawford, K. (2025).
From efficiency gains to rebound effects : The problem of jevons' paradox in ai's polarized environmental debate.
In *Proceedings of the 2025 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, pages 76–88.



References VII



Luccioni, S., Jernite, Y., and Strubell, E. (2024).

Power hungry processing : Watts driving the cost of ai deployment ?

In *Proceedings of the 2024 ACM conference on fairness, accountability, and transparency*, pages 85–99.



Malfilatre, M. G. and Louvel, S. (2025).

A medical profession towards empowerment ? the uncertain future of digitalization in private general practice.

Social Science & Medicine, 365 :117575.



Marinoni, A., Cambria, E., Lin, W., Mura, M. D., Chanussot, J., Ragusa, E., Tso, C. Y., Zhu, Y., and Horton, B. (2026).

The data heat island effect : quantifying the impact of ai data centers in a warming world.

arXiv preprint arXiv :2603.20897.



Morand, C., Ligozat, A.-L., and Névéol, A. (2025a).

Does efficiency lead to green machine learning model training ? analyzing historical trends in impacts from hardware, algorithmic and carbon optimizations.



Morand, C., Ligozat, A.-L., and Névéol, A. (2025b).

The environmental impacts of machine learning training keep rising evidencing rebound effect.

arXiv preprint arXiv :2510.09022.



Nature Finance (2025).

Navigating ai's thirst in a water-scarce world : A governance agenda for ai and the environment.

<https://www.naturefinance.net/resources-tools/navigating-ais-thirst-in-a-water-scarce-world/>.



References VIII

-  PACE (2019).
A new circular vision for electronics.
https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf.
-  Patterson, D., Gonzalez, J., Le, Q., Liang, C., Munguia, L.-M., Rothchild, D., So, D., Texier, M., and Dean, J. (2021).
Carbon emissions and large neural network training.
arXiv preprint arXiv :2104.10350.
-  Piot-Lepetit, I., Florez, M., Gauche, K., et al. (2023).
Digitalisation des exploitations agricoles—déterminants et impacts de l'adoption des innovations numériques.
TechInn, 8 :1–15.
-  Rasoldier, A., Combaz, J., Girault, A., Marquet, K., and Quinton, S. (2022).
How realistic are claims about the benefits of using digital technologies for ghg emissions mitigation ?
In *LIMITS 2022-Eighth Workshop on Computing within Limits*.
-  Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A. S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A., et al. (2022).
Tackling climate change with machine learning.
ACM Computing Surveys (CSUR), 55(2) :1–96.
-  Roussilhe, G., Pirson, T., Bol, D., and Mitra, S. (2025).
Purer than pure : how purity reshapes the upstream materiality of the semiconductor industry.
arXiv preprint arXiv :2509.18768.

References IX



Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., and Etzioni, O. (2020).

Green ai.

Communications of the ACM, 63(12) :54–63.



Semedo, A., Institut, G., and informatique des grandes entreprises françaises, C. (2024).

Ai for green and green ai.

<https://documentation.insp.gouv.fr/insp/doc/SYRACUSE/496670/>

[ai-for-green-and-green-ai-rapport-redige-par-ana-semedo-institut-g9-numeum-l-institut-g9-le-cigref-p?_lg=fr-FR](https://documentation.insp.gouv.fr/insp/doc/SYRACUSE/496670/ai-for-green-and-green-ai-rapport-redige-par-ana-semedo-institut-g9-numeum-l-institut-g9-le-cigref-p?_lg=fr-FR).



Sofies (2021).

Synthèse des études sur le gisement de deee ménagers et professionnels.

<https://www.ecologic-france.com/images/medias/document/26599/050522-SynthseEtude-gisement-DEEE.pdf>.



The Shift Project (2025).

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

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



Valdivia, A. (2025).

The supply chain capitalism of ai : A call to (re) think algorithmic harms and resistance through environmental lens.

Information, Communication & Society, 28(12) :2118–2134.



Varoquaux, G., Luccioni, S., and Whittaker, M. (2025).

Hype, sustainability, and the price of the bigger-is-better paradigm in ai.

In *Proceedings of the 2025 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, pages 61–75.

References X



Wright, D., Igel, C., Samuel, G., and Selvan, R. (2025).

Efficiency is not enough : A critical perspective on environmentally sustainable ai.
Communications of the ACM, 68(7) :62–69.

➤ Énergie produite par le parc éolien

- ▶ Aujourd'hui, parc éolien français $\approx 25\text{GW}$
- ▶ Facteur de charge de l'éolien $\approx 22\%$
- ▶ → Puissance réelle du parc éolien $25 * 22\% \approx 5.56\text{GW}$
- ▶ → Énergie produite par le parc éolien pendant un an $\approx 5.56 * 24 * 365 \approx 50\text{TWh}$

➤ Énergie produite par un réacteur nucléaire

- ▶ Puissance moyenne d'un réacteur nucléaire $\approx 1\text{GW}$
- ▶ Facteur de charge : 80%
- ▶ Puissance réelle d'un réacteur 0.8GW
- ▶ Énergie produite en un an par un réacteur $0.8 * 365 * 24 \approx 7\text{TWh}$

➤ Estimation pour GPT-4

- ▶ Fuite d'info : 25000 Nvidia A100 pour 100 jours (voir article)
- ▶ Imaginons que les puces étaient rangées par 8 dans des serveurs Nvidia DGX A100 (TDP = 6,5kW) → 3125 serveurs
- ▶ Énergie consommée par les serveurs = $6500 * 100 * 24 * 3125 \approx 49\text{GWh}$
- ▶ PUE=1,18 (datacenters Microsoft Azure utilisés à l'entraînement)
- ▶ → $49 * 1,18 \approx 58\text{GWh}$ d'énergie électrique pour les datacenters à l'entraînement
- ▶ (énergie produite par 1 réacteur nucléaire pendant $58 / 0,8 = 72\text{h} = 3\text{j}$)

➤ Impacts sociaux et éthiques

- ▶ travailleurs du clic
- ▶ perte de compétences
- ▶ destructions d'emplois
- ▶ souveraineté numérique
- ▶ désinformation
- ▶ déshumanisation de la société
- ▶ bulle financière et spéculative
- ▶ déresponsabilisation
- ▶ santé mentale
- ▶ utilisation des données (entraînement / utilisateurs)
- ▶ etc.

