

# ➤ Introduction aux impacts environnementaux du numérique

Séminaire *Ethique, enjeux sociaux et environnementaux de l'IA et la science des données*

Hugo Gangloff

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



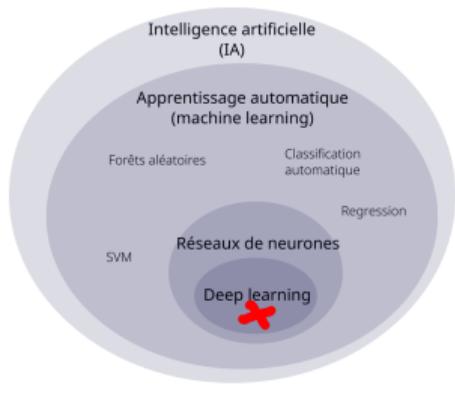
13 février 2026

1. État des lieux de l'IA
2. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
3. Datacenters et GPUs
4. Impacts environnementaux négatifs
  - Retour à l'énergie
  - Impacts environnementaux à l'usage
  - Impacts environnementaux à la fabrication
  - Impacts environnementaux en fin de vie
  - Artificialisation des sols
  - Impact indirect à l'usage : effet rebond
5. Conclusion

1. État des lieux de l'IA
2. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
3. Datacenters et GPUs
4. Impacts environnementaux négatifs
  - Retour à l'énergie
  - Impacts environnementaux à l'usage
  - Impacts environnementaux à la fabrication
  - Impacts environnementaux en fin de vie
  - Artificialisation des sols
  - Impact indirect à l'usage : effet rebond
5. Conclusion

## 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] :



- ▶ **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**

## ► 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

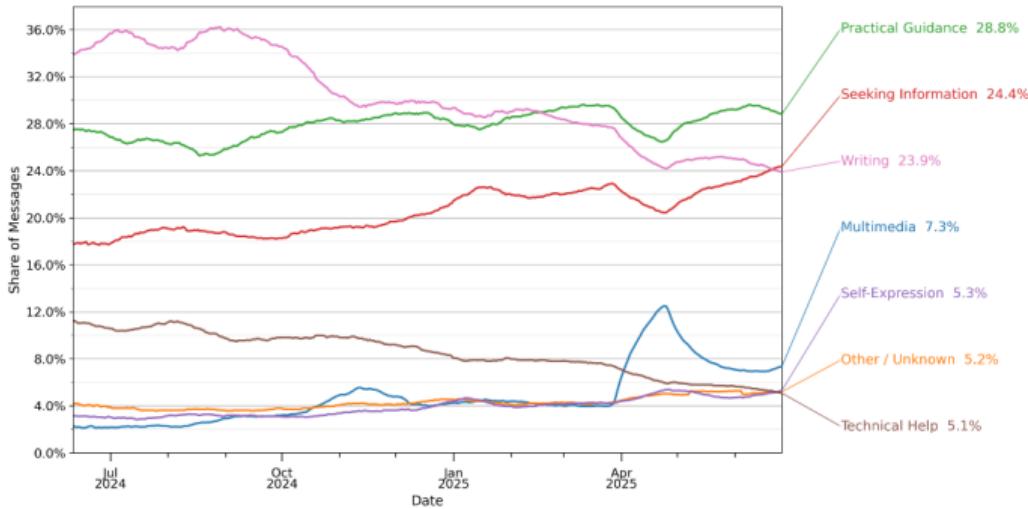
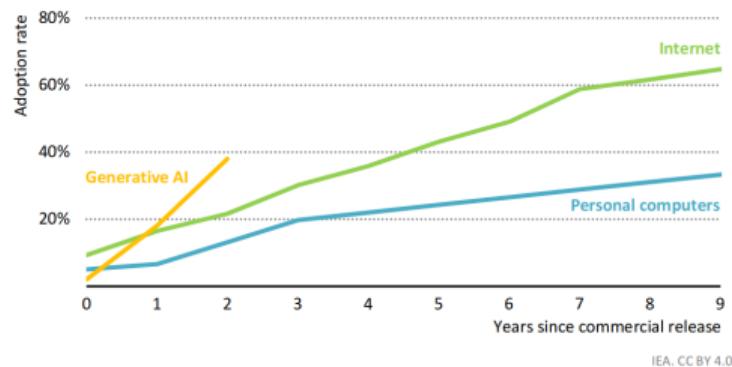
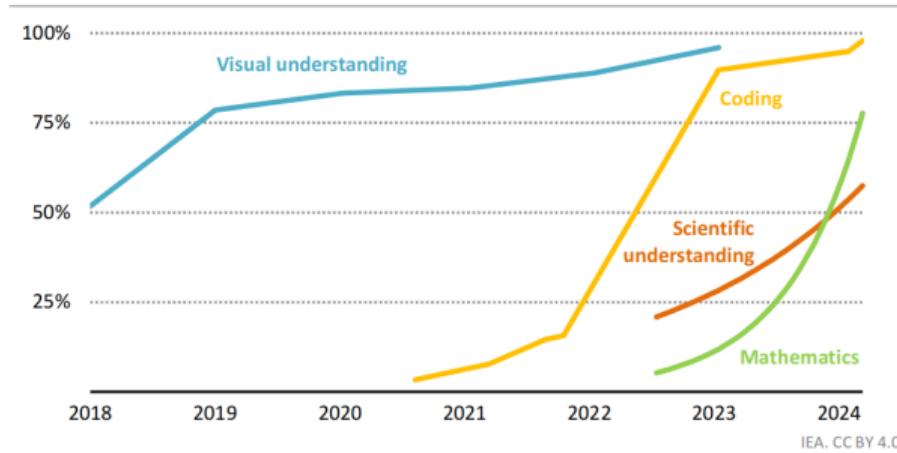


Figure 7: Share of consumer ChatGPT messages broken down by high level conversation topic

## Intelligence Artificielle dans 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**



1. État des lieux de l'IA
2. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
3. Datacenters et GPUs
4. Impacts environnementaux négatifs
  - Retour à l'énergie
  - Impacts environnementaux à l'usage
  - Impacts environnementaux à la fabrication
  - Impacts environnementaux en fin de vie
  - Artificialisation des sols
  - Impact indirect à l'usage : effet rebond
5. Conclusion

## ➤ 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

## ➤ 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**

## L'IA pour le développement durable



- ▶ 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 emissions reductions that are far larger than emissions from data centres*
- ▶ D'autres secteurs pourraient en bénéficier : logistique, recyclage, etc. [Semedo et al., 2024]

Source : [Schwartz et al., 2020]

## Rendre l'IA plus durable

- ▶ **IA frugale** (sobriété, *sufficiency* ≠ efficacité, optimisation)

Sobriété selon [AFNOR, 2024] :

*Aptitude à se contenter d'un niveau de résultat jugé suffisant en redéfinissant les usages et les besoins*

→ 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]

IA frugale selon [AFNOR, 2024] qui reprend [Cezard and Mourad, 2019] :

*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*

## Comment réduire l'impact ?

Vous voulez vous inscrire dans un projet d'IA frugale. Six étapes peuvent être intégrées :



**1** Questionner le besoin : s'assurer qu'il existe réellement et que les scénarios d'usage sont décrits avec leurs limites

**4** Intégrer une évaluation des impacts environnementaux dans les processus de décisions et de pilotage

**2** Identifier toutes les solutions possibles : celles basées sur l'IA, sans IA ou celles s'appuyant sur l'existant

**5** Outiller le déploiement des solutions pour pouvoir surveiller précisément leur utilisation réelle

**3** Evaluer chaque solution en terme d'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie du projet et de la solution

**6** Réadapter les rôles et les responsabilités des différentes parties prenantes des projets afin que toute la gouvernance intègre la frugalité

## ► Des promesses réalistes ?

- ▶ Les études vendant les nouveaux systèmes d'IA négligent souvent les impacts (directs) de cycle de vie et impacts systémiques  
[Rasoldier et al., 2022, Morand et al., 2025b, Kaack et al., 2022]
- ▶ [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.*
- ▶ Les sources mettant en doute la faisabilité des promesses de l'IA ne manquent pas, principalement à cause du **conflit avec les dynamiques environnementales et énergétiques**, et à cause de l'**effet rebond**

## ► Des promesses réalistes ?

- ▶ Les études vendant les nouveaux systèmes d'IA négligent souvent les impacts (directs) de cycle de vie et impacts systémiques  
[Rasoldier et al., 2022, Morand et al., 2025b, Kaack et al., 2022]
- ▶ [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.*
- ▶ Les sources mettant en doute la faisabilité des promesses de l'IA ne manquent pas, principalement à cause du **conflit avec les dynamiques environnementales et énergétiques**, et à cause de l'**effet rebond**  
→ **Dans la suite, nous étudierons ces impacts négatifs sur l'environnement**

1. État des lieux de l'IA
2. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
3. Datacenters et GPUs
4. Impacts environnementaux négatifs
  - Retour à l'énergie
  - Impacts environnementaux à l'usage
  - Impacts environnementaux à la fabrication
  - Impacts environnementaux en fin de vie
  - Artificialisation des sols
  - Impact indirect à l'usage : effet rebond
5. Conclusion

## ► Matérialité du numérique

*That cloud, we'd endlessly reply, is just someone else's computer. Most likely, it's a computer stuck in an enormous data center somewhere sort of rural, where it consumes impressive amounts of electricity (to power the facility) and water (to cool down all those hot servers).*

– Anne Pasek, *Getting Into Fights With Data Centers : Or, a Modest Proposal for Reframing the Climate Politics of ICT*, 2023

## ➤ GPU : exemple du NVIDIA A100 GPU (2020)

Composants :

- puce GPU
- SRAM
- Voltage regulators
- PCIe
- Power connector
- (- Heat sink)
- (- Casing)
- TDP = 400W

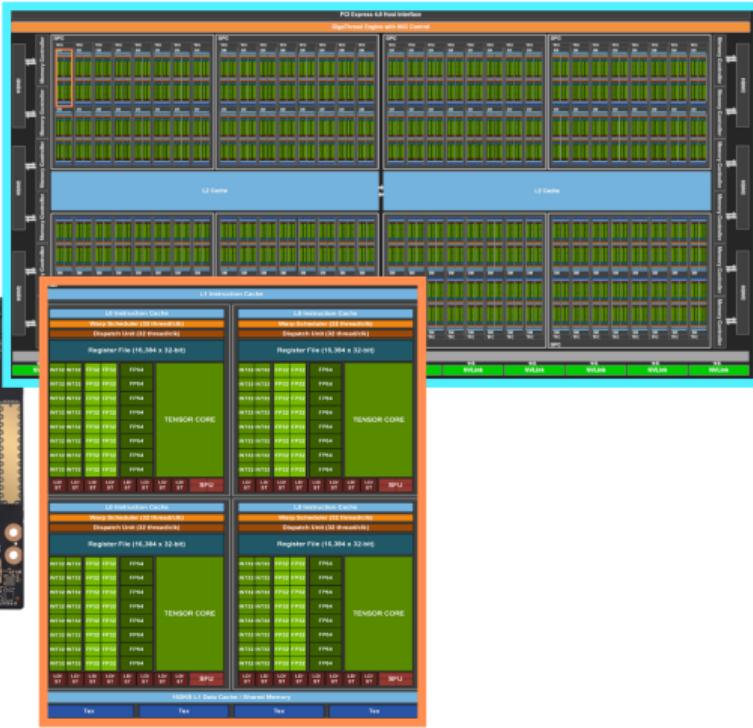
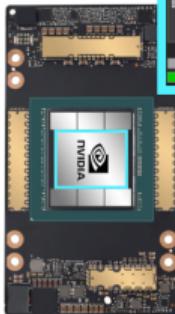
Source : NVIDIA



A100 WhitePaper

# GPU : exemple du NVIDIA A100 GPU (2020)

Zoom sur la puce GPU :  
GA100



# GPU : exemple du NVIDIA A100 GPU (2020)

Cœurs de calculs :

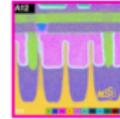
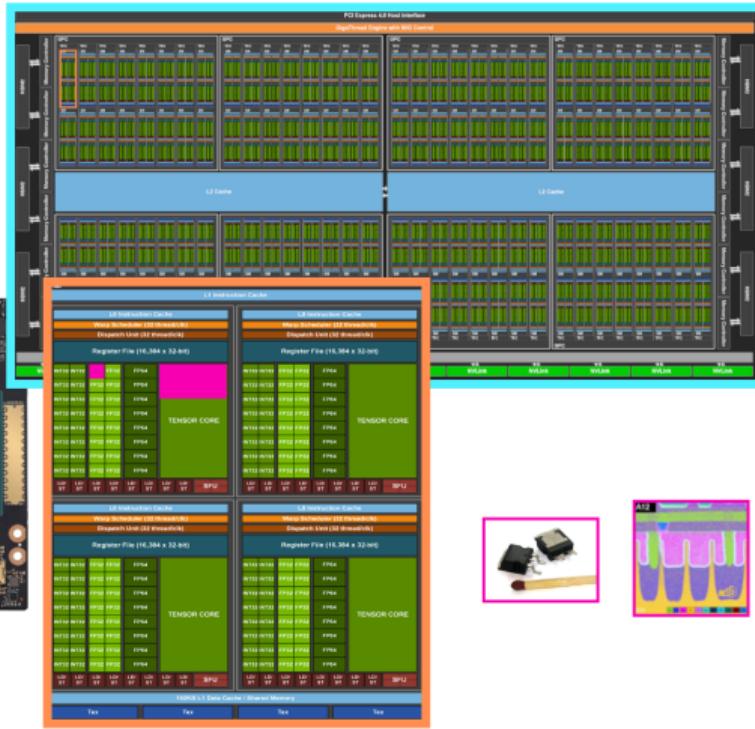
- 8192 CUDA cores
  - 512 Tensor cores
- 54.2 milliards de transistors

(TSMC 7 nm FinFET)

Sources : NVIDIA A100 WhitePaper

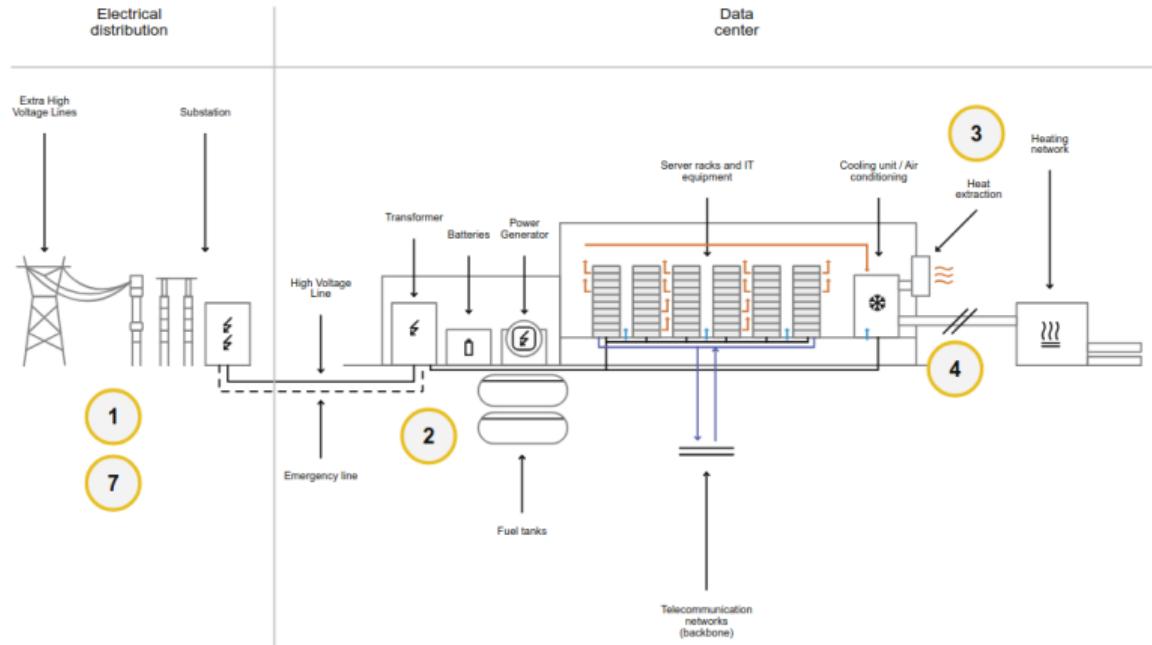
[en.wikipedia.org/MOSFET](https://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET)

[en.wikichip.org/wiki/7\\_nm\\_lithography\\_process](https://en.wikichip.org/wiki/7_nm_lithography_process)



## ➤ Des datacenters remplis de GPUs

## Vue schématique d'un datacenter



Source : Thèse de Clément Marquet repris par Gauthier Roussilhe

# Des datacenters remplis de GPUs

IA = centre de données dits **hyperscale**<sup>1</sup> en forte croissance

≈10-100MW



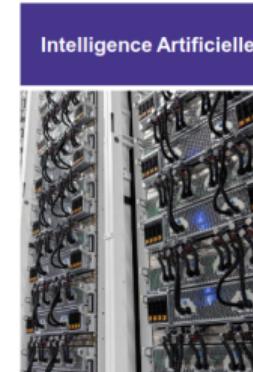
## Hébergement

Refroidissement Air,  
Climatisation  
Utilisation de CPU standard  
3-15 kW/rack  
PUE entre 1,4 et 2  
Peu de densité  
Haute latence  
Peu de valorisation thermique



## Virtualisation

Refroidissement Air, liquide  
Utilisation mixte CPU-GPU  
10-40 kW/rack  
PUE entre 1,2 et 1,4  
Optimisation de la densité  
Moyenne-haute latence  
Récupération chaleur difficile



## Intelligence Artificielle

Refroidissement liquide  
Utilisation de GPU  
100 kW/rack et plus  
PUE 1 et 1,1  
Très haute densité  
Conteneurs préfabriqués (POD)  
Haute latence interne  
Opportunité pour récupération

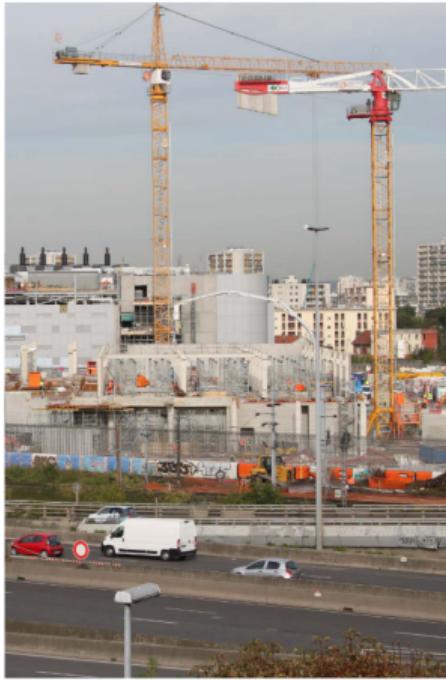
≥ 500MW

Source : Gianluca Marzilli (Institut Paris Région)

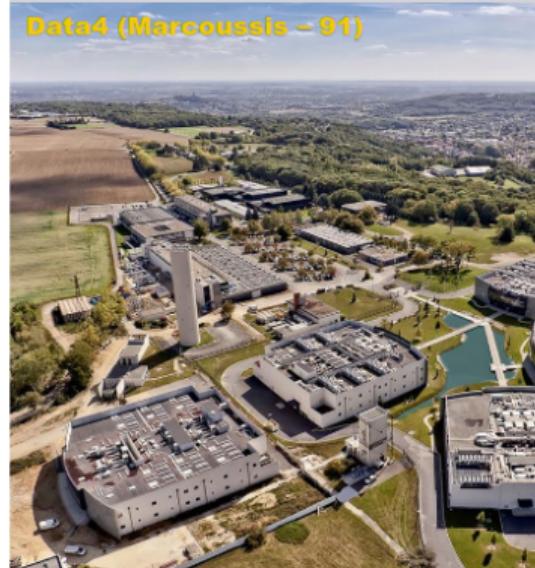
1. Typologie des datacenters : <https://www.ibm.com/fr-fr/think/topics/hyperscale-data-center>

# ➤ Datacenters en France

La Courneuve (2021)



**Data4 (Marcoussis - 91)**



**SITE A** OVH DC1 à Paris, 19<sup>e</sup> arr.



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

**INRAE**

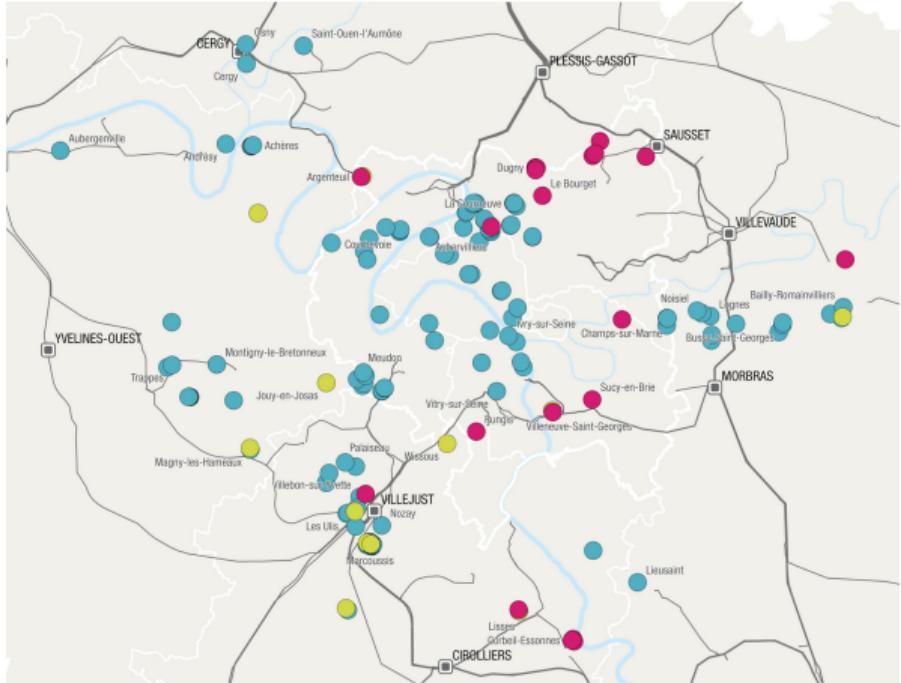
Impacts environnementaux du numérique  
13 février 2026 / Hugo Gangloff

# ► Datacenters en France

<https://www.institutparisregion.fr/> :

- ~ 330 datacenters en France
- ~ 160 en Ile-de-France

## Data centers et réseaux électriques



### Statut du Data Center

- en exploitation
- en construction
- en projet

### Poste RTE 400kV

Lignes RTE 400 KV / 225 KV

## ► Datacenters monde et USA

[datacentermap.com](http://datacentermap.com) :

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

**Figure 1.13 ▷ Global map of large data centre clusters, 2024**



IEA. CC BY 4.0.

## ➤ 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/>

# >Datacenters monde et USA

Meta	<b>Hyperion</b> Meta is planning a \$10 billion, <u>2+ GW data center</u> in Louisiana to be supported by <u>three new gas plants</u> . Construction is planned through <u>2030</u> .
OpenAI	<b>Stargate Abilene (w/ Oracle)</b> Planned 1.2-GW data center campus in Abilene, Texas that will be part of OpenAI's broader " <u>Stargate</u> " project.
	<b>UAE Stargate</b> OpenAI <u>announced</u> a 1-GW cluster in the United Arab Emirates with 200 MW expected to come online by 2026. This may eventually expand to a <u>5 GW</u> campus. (Note: this is the only non-US project on this list)
	<b>Wisconsin (w/ Microsoft)</b> Microsoft is planning a Wisconsin data center campus for OpenAI with a capacity of 1.5 GW by 2027, according to an <u>industry analyst</u> . This project will tentatively open in <u>2026</u> . [In January 2025, Microsoft <u>paused</u> construction on the later phases of this project, perhaps temporarily.]
	<b>Stargate (w/ Oracle, SoftBank)</b> This was a planned \$100 billion OpenAI-Microsoft collaboration for a data center campus that would <u>open in 2028</u> and scale up to 5 GW by 2030. Microsoft may have since <u>pulled out</u> of this project, and the "Stargate" name has been adopted by a \$500 billion <u>collaboration</u> between OpenAI, Oracle, and SoftBank involving numerous data centers.



Source : [EPRI and epoch.ai, 2025]

1. État des lieux de l'IA
2. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
3. Datacenters et GPUs
4. Impacts environnementaux négatifs
  - Retour à l'énergie
  - Impacts environnementaux à l'usage
  - Impacts environnementaux à la fabrication
  - Impacts environnementaux en fin de vie
  - Artificialisation des sols
  - Impact indirect à l'usage : effet rebond
5. Conclusion

# Retour à l'énergie

## ► Énergie : ordres de grandeurs et rappels

- ▶ Puissance instantanée disponible (W)
- ▶ Énergie consommée sur une période donnée (Wh)
- ▶ Intensité carbone de l'électricité (gCO<sub>2</sub>eq/kWh)

(RTE, Bilan électrique 2025, 2026) :

- ▶ La consommation électrique française en 2025 ≈ 449 TWh
- ▶ La production électrique française en 2025 ≈ 554 TWh
- ▶ Intensité carbone de l'électricité française en 2024 ≈ 21 gCO<sub>2</sub>eq/kWh
- ▶ Réseau HT a une disponibilité de 99,9995%



# Énergie : ordres de grandeurs et rappels

## Déchiffrer les ordres de grandeur de l'énergie

Consommation annuelle et puissance électrique en France

### La consommation annuelle moyenne d'électricité

Source : CRE rapport 2023–2024 sur le fonctionnement des marchés de détail (publié en octobre 2025)



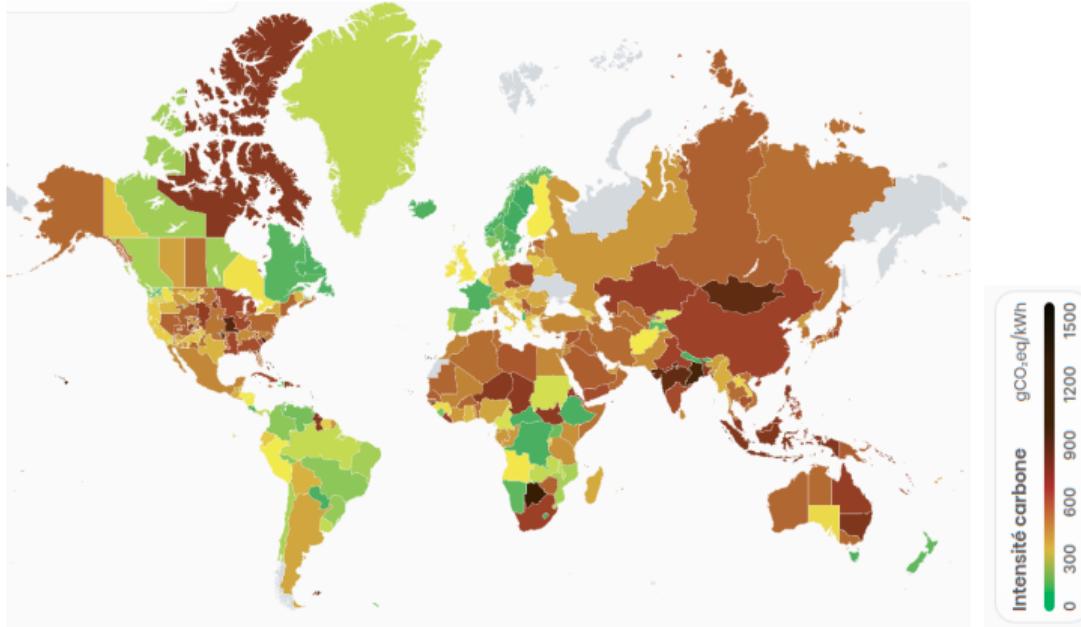
### La puissance de production

Source : EDF



Autorité  
de la concurrence

## ► Énergie : ordres de grandeurs et rappels



[https://app.electricitymaps.com/map/live/fifteen\\_minutes](https://app.electricitymaps.com/map/live/fifteen_minutes)

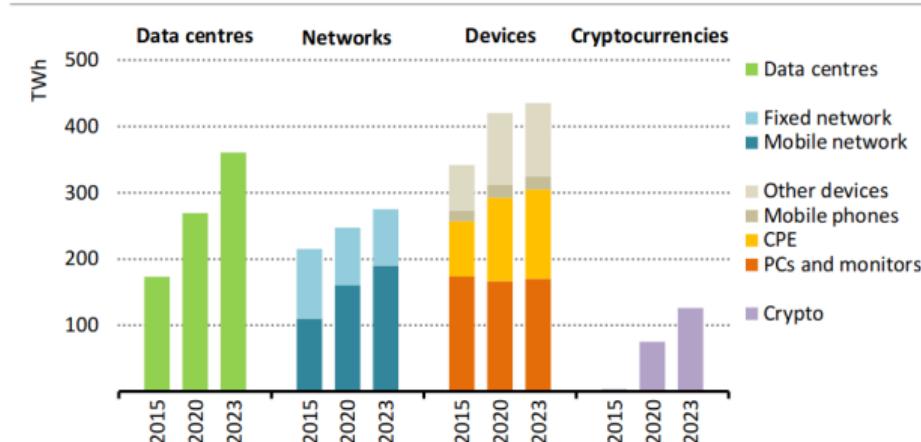
→ Produire de l'électricité ne pollue pas de la même manière partout !

# Impacts environnementaux à l'usage

## Consommation d'énergie du numérique dans le monde

- Le numérique c'est  $\approx 1000\text{TWh}$  d'énergie électrique en 2023 soit 4% de la consommation mondiale [IEA, 2025]<sup>2</sup>

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



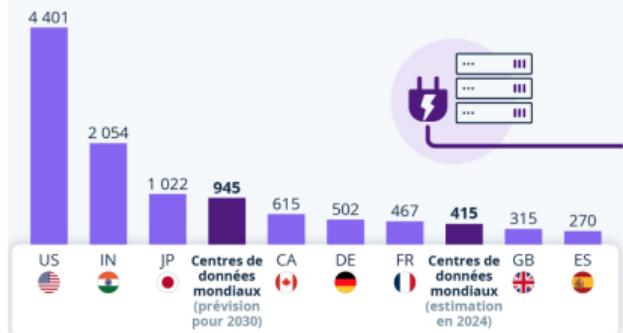
IEA, CC BY 4.0.

2. 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

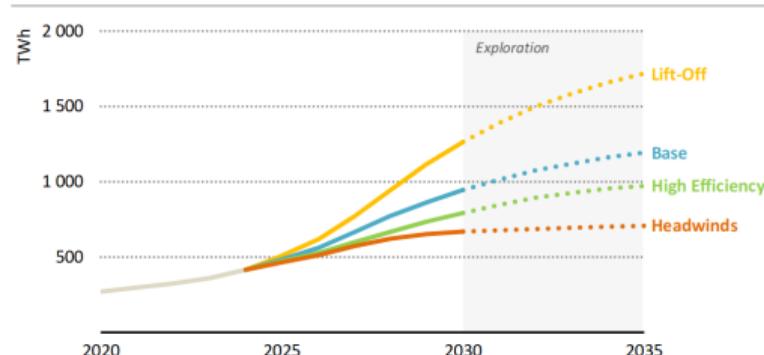
- ▶ 415 TWh  $\approx$  1.5% de la conso électrique globale en 2024 [IEA, 2025]
- ▶ → Au moins x2 d'ici 2030 dans 3 scénarios sur 4 [IEA, 2025]

Estimation de la consommation d'électricité des centres de données dans le monde et d'une sélection de pays (en TWh)



Consommation des pays : estimation en 2024 ; data centers : estimation en 2024 et prévision pour 2030  
Sources : Agence internationale de l'énergie (AIE), Ember

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



IEA, CC BY 4.0.

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

## ➤ Consommation d'énergie des datacenters en France

- ▶ Le numérique  $\approx$  50 TWh ( $\approx$ 10% de la conso. elec.)  
**dont datacenters  $\approx$  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  $\approx 50$  TWh ( $\approx 10\%$  de la conso. elec.)  
**dont datacenters  $\approx 10$  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

- 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).

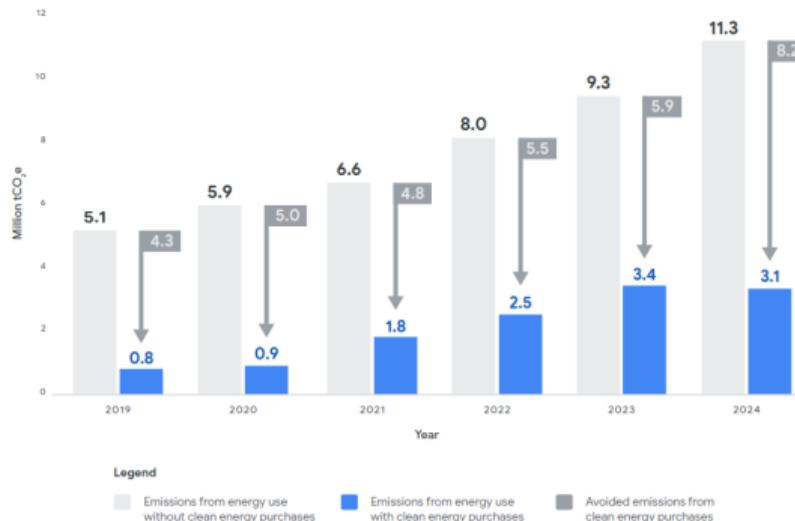
- Les datacenters ne sont pas, *a priori*, flexibles et fonctionnent 24/7  
→ **incompatibilité énergies renouvelables**
- Certaines entreprises vont produire leur propre énergie !
- IA n'est pas la seule cause de l'explosion de la demande électrique (industrie lourde, autres équipements IT, électrification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

<https://www.resources.org/common-resources/the-hype-on-hyperscalers-data-centers-and-growing-electricity-demand/>

## ➤ Consommation d'énergie des *hyperscalers*

- ▶ Très peu de données divulguées par les entreprises
- ▶ Dans les rapports annuels, on retrouve les émissions CO2eq
  - ▶ *location-based* : émissions via les infrastructures énergétiques réellement utilisées
  - ▶ *market-based* : après déduction des certificats d'électricité propre achetés

Figure 3. Avoided emissions from clean energy purchases



Source : Google Environmental Report 2025

## ➤ 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* =

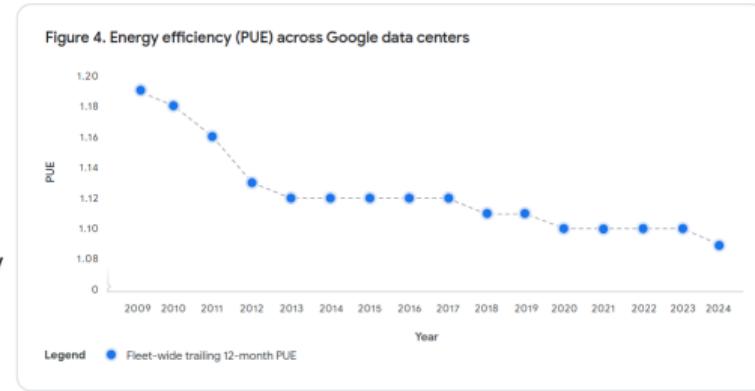
- ▶ Serveurs (stockage, calcul)
- ▶ Équipements réseaux

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

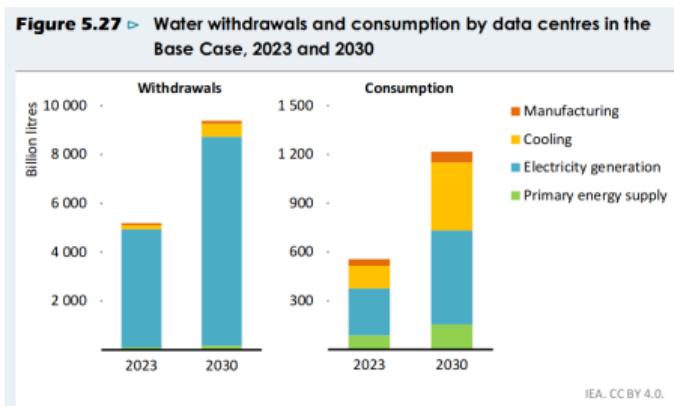


Sources : <https://dgtlinfra.com/pue-power-usage-effectiveness/> et Google Environmental Report 2025

**Note :** Le mode oisif (*idle*) représente une part non négligeable de la consommation d'un datacenter [Luccioni et al., 2023]

## Consommation d'eau des datacenters

- ▶ Eau consommée<sup>3</sup> par les datacenters dans le monde ≈ 560 milliards L en 2023  
→ x2 en 2030 [IEA, 2025]
- ▶ Pour comparer, Paris consomme ≈ 155 milliards de litres d'eau par an<sup>4</sup>



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

- 
3. eau prélevée qui n'est pas retornée à la source (ex : évaporation)
  4. <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)

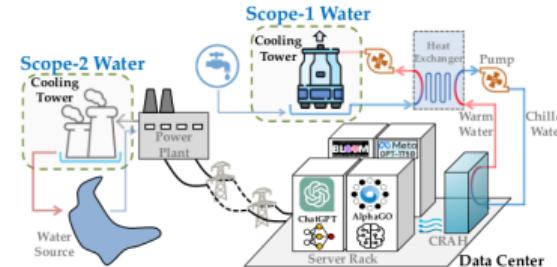


Figure 1: An example of data center's operational water usage: on-site scope-1 water usage for data center cooling (via cooling towers in the example), and off-site scope-2 water usage for electricity generation. The icons for AI models are only for illustration purposes.

De [Li et al., 2025]

## Coûts à l'entraînement vs à l'inférence

### Entrainement

- ▶ 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**<sup>3</sup>  
→  $49*1,18 \approx 58\text{GWh}$  d'énergie électrique pour les datacenters à l'entraînement<sup>4</sup>  
→ (énergie produite par 1 réacteur nucléaire pendant 3j)

---

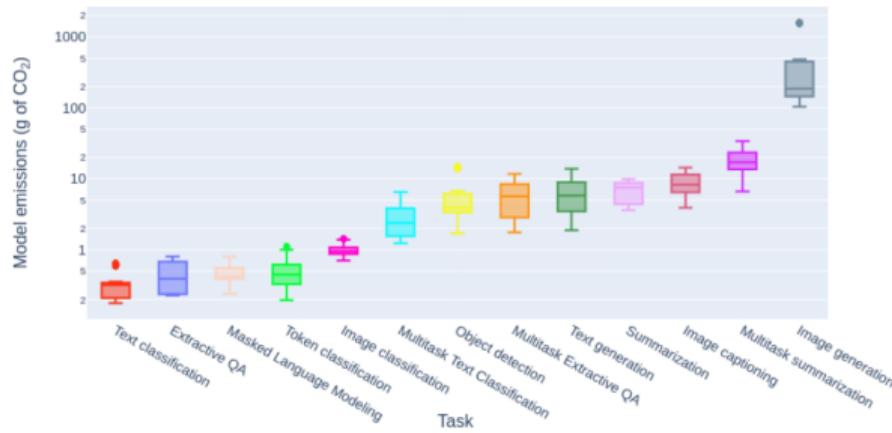
3. <https://medium.com/data-science/the-carbon-footprint-of-gpt-4-d6c676eb21ae>  
4. Voir les calculs

## 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 inference [[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](#)]

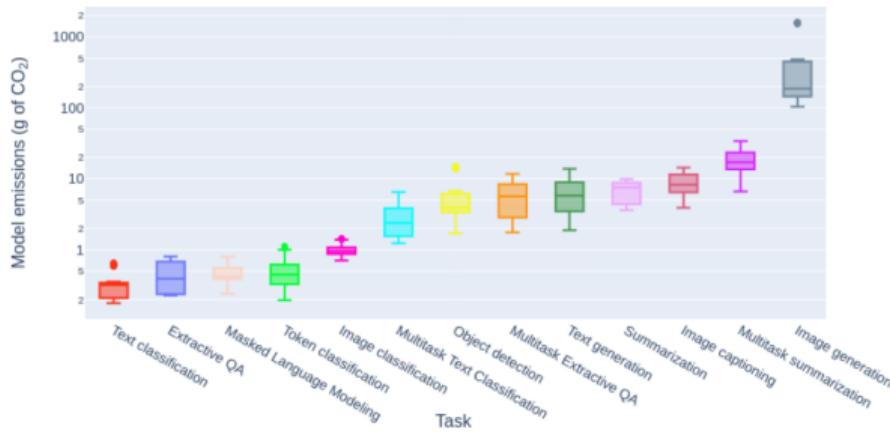
# Coûts différents selon modèles / applications



gCO<sub>2</sub>e pour 1000 inférences [Luccioni et al., 2024]

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

## Coûts différents selon modèles / applications



gCO<sub>2</sub>e pour 1000 inférences [Luccioni et al., 2024]



Text-to-video ?

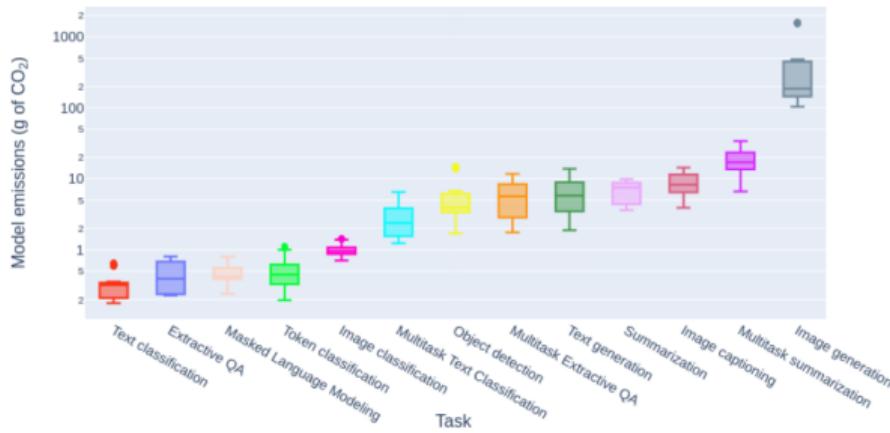
→ 30× plus coûteux en énergie que text-to-image

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

[Delavande et al., 2025]

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

# Coûts différents selon modèles / applications



gCO<sub>2</sub>e 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 ?!?!<sup>3</sup>

3. <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 (minérais, ...), etc.
- ▶ Exemples d'impacts : potentiel changement climatique, destruction couche d'ozone, etc.

# Analys 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.

	Epuisement des ressources abiotiques - kg	Epuisement des ressources naturelles - fossiles - MJ	Acidification - mol H <sup>+</sup> eq.	Ecotoxicité - CTUe	Changement climatique - kg CO <sub>2</sub> 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 comparables<sup>4</sup>
  - ▶ 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)<sup>5</sup>*

*1 Gemini prompt = 5 waterdrops (in terms of water)<sup>6</sup>*

---

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

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

[why-saying-ai-uses-the-energy-of-nine-seconds-of-television-is-like-spraying-dispersant-over-an-f0d0cf67d68](https://medium.com/@dnafus/why-saying-ai-uses-the-energy-of-nine-seconds-of-television-is-like-spraying-dispersant-over-an-f0d0cf67d68) : TLDR : the smaller the number, the more you should be worried

6. <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

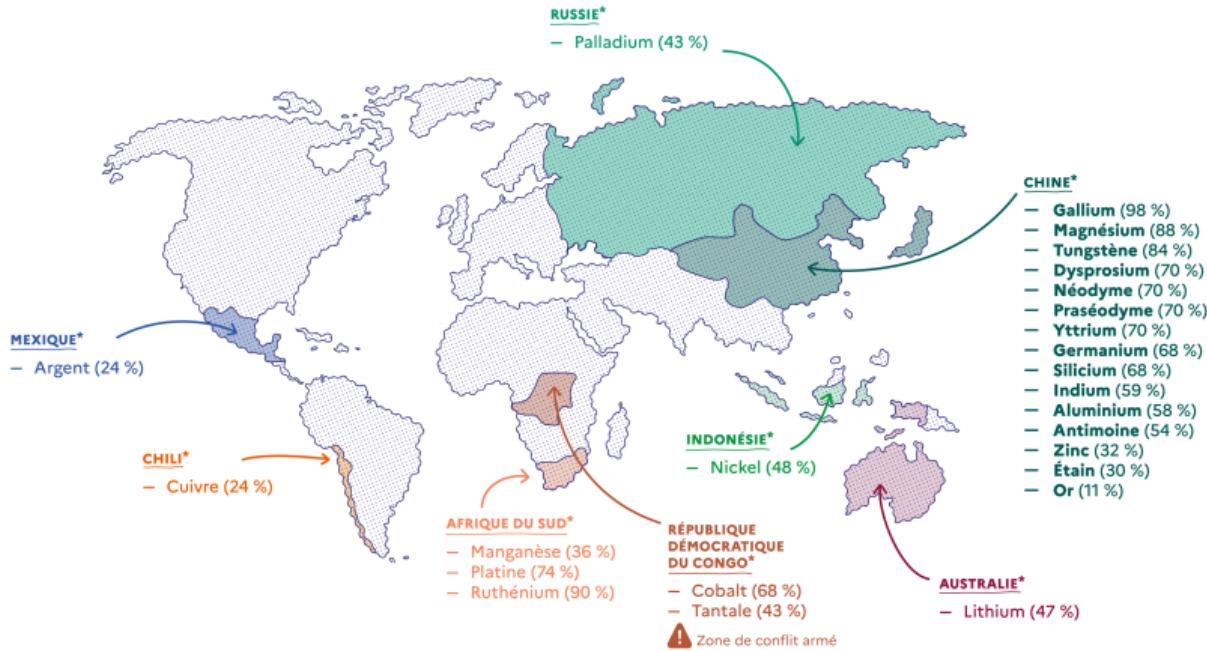
# Impacts environnementaux à la fabrication

## ▶ Impacts environnementaux à la fabrication

- ▶ Les procédés de fabrication des composants du numérique sont à nouveau source d'une grande consommation [ADEME, 2024] :
  - ▶ 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]



# 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, 2024]

## ▶ Impacts environnementaux à la fabrication

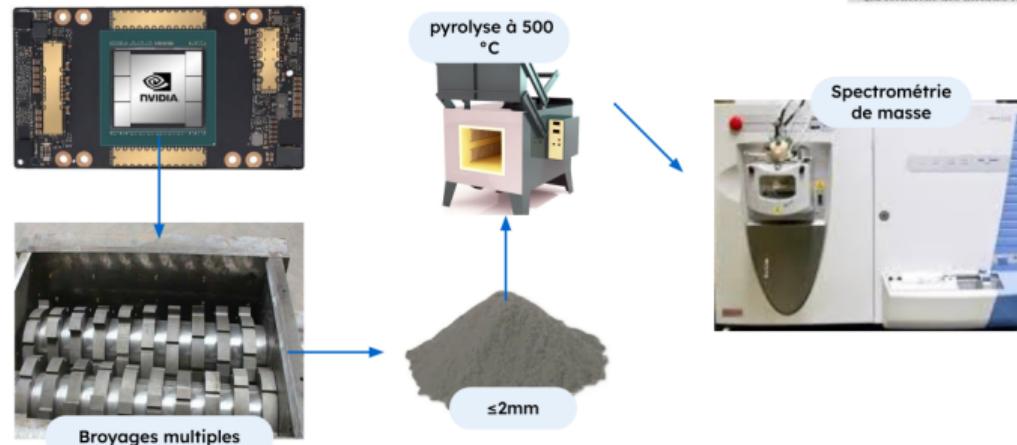


Rampura Agucha (India), the largest zinc mine in the world by volume (2018), <https://www.mining.com/top-ten-zinc-producing-mines-world/>

# ➤ Destruction d'une NVIDIA GPU A100

**Besoin en matière 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 matière premières : exemple de NVIDIA GPU A100

Elemental Composition of Nvidia A100 SXM GPU

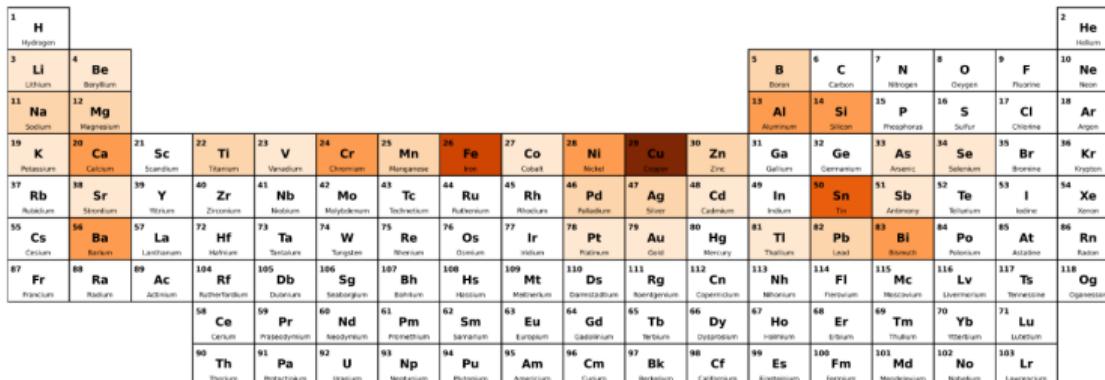
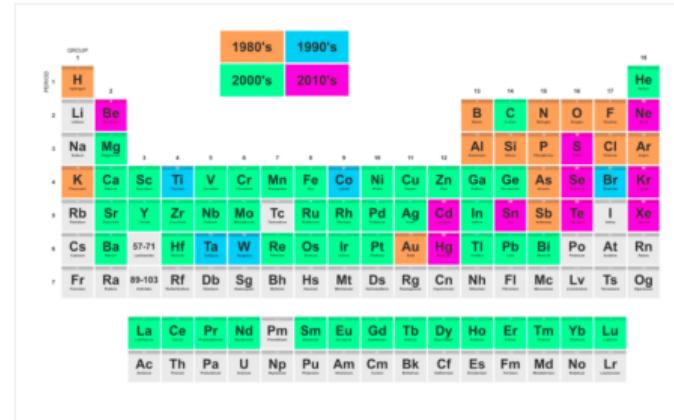
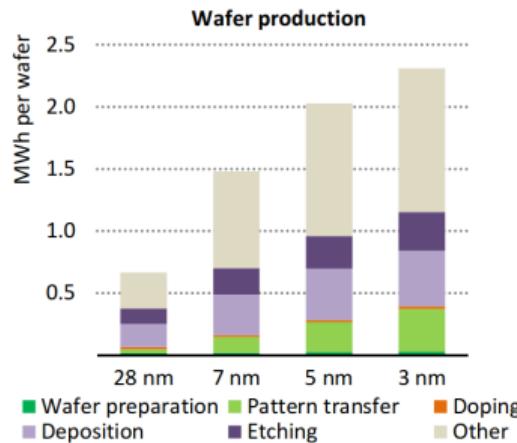


Figure 2. Proportion of elements in the Nvidia A100 SXM 40GB GPU (author illustration).

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]

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

## Impacts environnementaux en fin de vie

## ▶ Impacts environnementaux en fin de vie

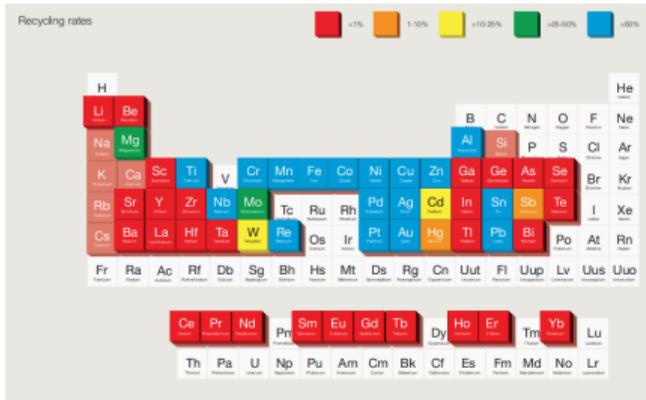
- ▶ **Des déchets (cause de pollution et toxicité)** sont présents à **chaque phase** de la vie d'un équipement électronique (extraction, design, fabrication, ...) <sup>7</sup>

---

7. 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, ...) <sup>7</sup>



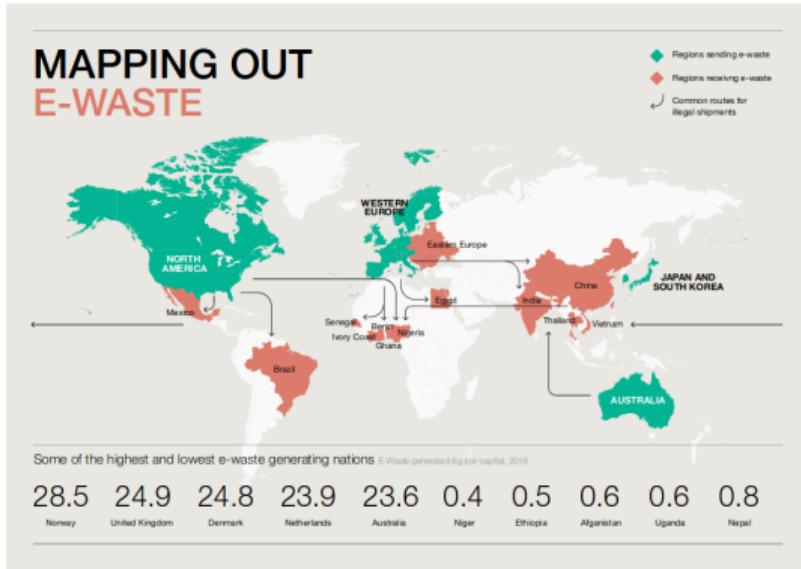
- Le recyclage des métaux issus des DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) est encore très limité et ne cible que les métaux les plus chers [ADEME, 2024]
- Si le processus de recyclage existe, il peut être très coûteux (eau, énergie, ...)

Source : [PACE, 2019]

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



# Impacts environnementaux en fin de vie



- ▶ Les déchets qui échappent à la filière légale (25% en 2019) sont souvent exportés illégalement sans certitude sur le recyclage [[Sofies, 2021](#)]

- ▶ 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](#)])

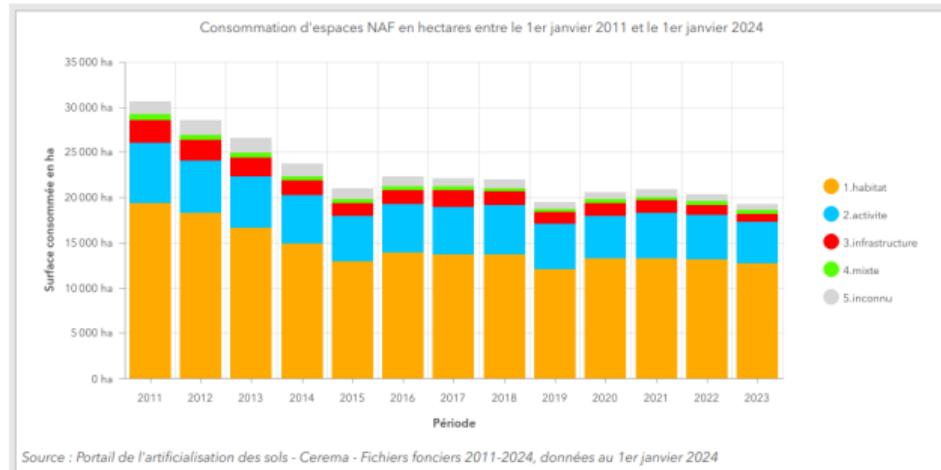
# Artificialisation des sols

# Artificialisation des sols

Surface consommée 1er janvier 2011-1er janvier 2024

**297 236,7 ha**

≈ 1/2 département  
français [CEREMA, 2025]



## ► Artificialisation des sols

- ▶ Les datacenters font peser un risque d'augmentation de l'artificialisation des sols<sup>7</sup>
- ▶ Pour l'instant, implantation privilégiée sur d'anciennes friches industrielles pour les nouveaux gros projets de type *hyperscale* [[Comité IA, 2025](#)]
- ▶ En milieu urbain : pollution air, bruit, îlots de chaleur, risque d'incendie etc. [[Diguet et al., 2019](#)]

---

7. mesurée en Espaces Naturels, Agricoles et Forestiers consommés

## Artificialisation des sols

- ▶ Sommet de l'IA 2025 : 35 projets annoncés pour 1200ha [Comité IA, 2025]
- ▶ Ces nouveaux datacenters sont souvent contestés vivement (localement)<sup>7</sup>
  - toute l'économie numérique va être boostée
  - entrepôts logistiques, centrales production et acheminement énergie, etc.



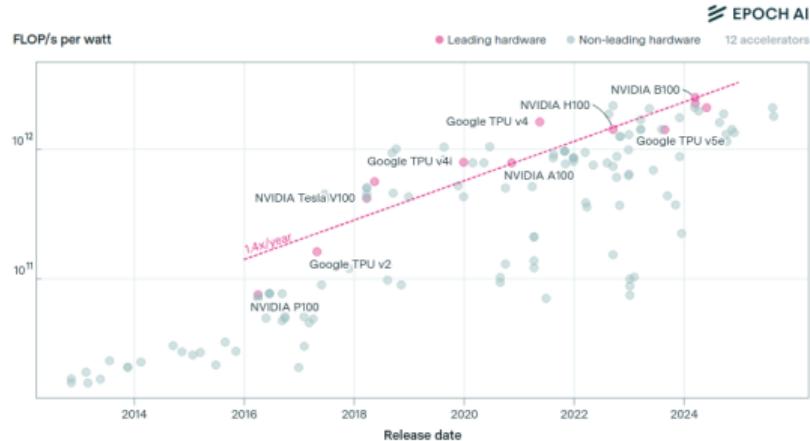
Source : [www.aboutamazon.fr](http://www.aboutamazon.fr), *Amazon poursuit le développement de son réseau logistique en France, 2025*

7. <https://nondatacenterboucblair.fr/>, <https://www.alterpresse68.info/2025/07/02/a-petit-landau-pres-de-mulhouse-un-projet-de-data-center-qui-rapporte-du-ble-mais-parait-indigeste-a-beaucoup/>, <https://www.concertation-campus-ia.fr/fr/actualites/publication-du-bilan-de-la-concertation>

## Impact indirect à l'usage : effet rebond

## Effet rebond

- ▶ Historiquement (~ 2010s) on a cru à un découplage possible entre capacités de calculs et consommation d'énergie [The Shift Project, 2025]
- ▶ Les gains d'efficacité sont réels [Morand et al., 2025a]



## Effet rebond

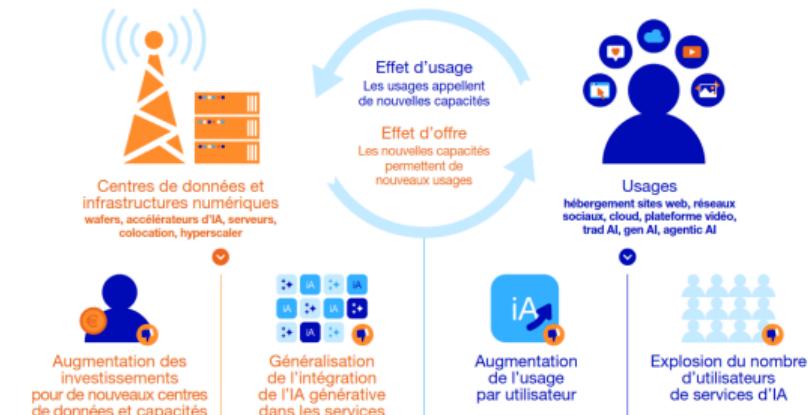
- ▶ Mais en valeur absolue la consommation explose → **Effet rebond**
- ▶ Et la demande et l'offre ne cessent d'augmenter, c'est d'ailleurs le modèle actuel de l'IA :

*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]

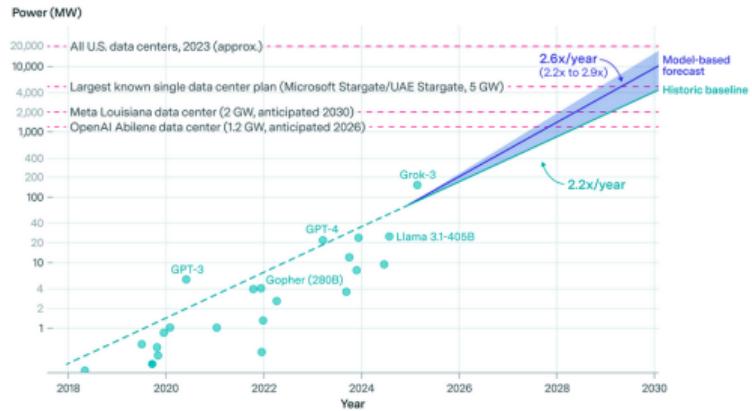
### ▶ [The Shift Project, 2025] :

L'insoutenable croissance de l'offre et des usages

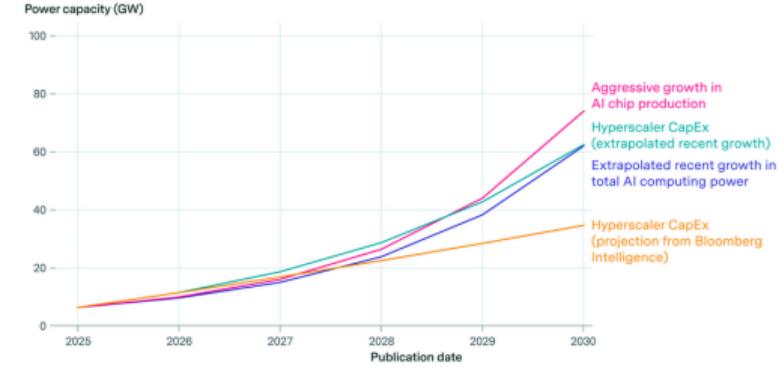


# Effet rebond

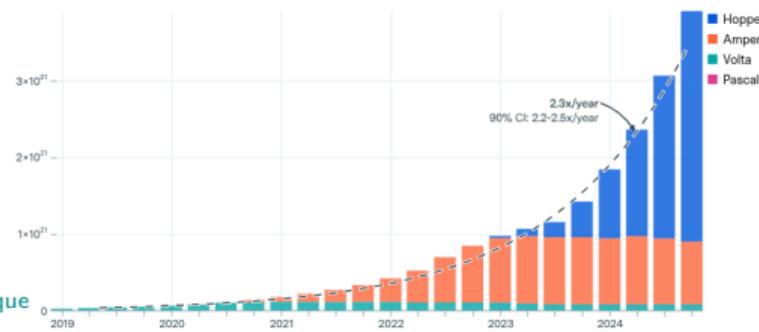
Projected power growth for frontier AI training



Forecasted total capacity of U.S. AI data centers



Total installed computing power (FLOP/s) ⓘ



1. État des lieux de l'IA
2. (Promesses d') Impacts environnementaux positifs
3. Datacenters et GPUs
4. Impacts environnementaux négatifs
  - Retour à l'énergie
  - Impacts environnementaux à l'usage
  - Impacts environnementaux à la fabrication
  - Impacts environnementaux en fin de vie
  - Artificialisation des sols
  - Impact indirect à l'usage : effet rebond
5. Conclusion

## Conclusion

- ▶ On a révélé la **matérialité du numérique** et ses impacts sur des domaines clés : énergie, eau, ressources abiotiques
- ▶ **L'IA et surtout l'IA générative** amplifient les impacts du numérique
- ▶ **Les datacenters et les GPUs** sont les éléments clés de cette vague

## 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 une vision systémique**

# References |



ADEME (2024).

Etude numérique et métaux.

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



ADEME and ARCEP (2025).

Impacts environnementaux du numérique.

<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/7880-evaluation-de-l-impact-environnemental-du-numerique-en-france.html>.



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.



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>.



INRAE

Impacts environnementaux du numérique

13 février 2026 / Hugo Gangloff

# References II

-  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>.
-  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.

# References III

-  EPRI and epoch.ai (2025).  
Scaling intelligence : The exponential growth of ai's power needs.  
<https://www.epri.com/research/products/000000003002033669>.
-  Falk, S., Ekchajzer, D., Pirson, T., Lees-Perasso, E., Wattiez, A., Biber-Freudenberger, L., Luccioni, S., and van Wijnsberghe, A. (2025).  
More than carbon : Cradle-to-grave environmental impacts of genai training on the nvidia a100 gpu.  
*arXiv preprint arXiv:2509.00093*.
-  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.
-  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.

# References IV

-  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.
-  Luccioni, A. S., Viguer, S., and Ligozat, A.-L. (2023).  
Estimating the carbon footprint of bloom, a 176b parameter language model.  
*Journal of machine learning research*, 24(253) :1–15.
-  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.
-  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*.

# References V

-  PACE (2019).  
A new circular vision for electronics.  
[https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_A\\_New\\_Circular\\_Vision\\_for\\_Electronics.pdf](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*.
-  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*.
-  Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., and Etzioni, O. (2020).  
Green ai.  
*Communications of the ACM*, 63(12) :54–63.

# References VI

-  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.

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

## ▶ 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 = 6500kW) → 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.