Impacts environnementaux du numérique : que change l'IA ?

Anne-Laure Ligozat

Assemblée Générale MathNum 2026

ensIIE
Ecole Nationale Supérieure d'Informatique pour l'Industrie et l'Entreprise

LISN
LABORATOIRE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES DU NUMÉRIQUE

Pourquoi l’IA ?

IA?

Artificial Intelligence

Machine Learning

Deep Learning

Generative AI

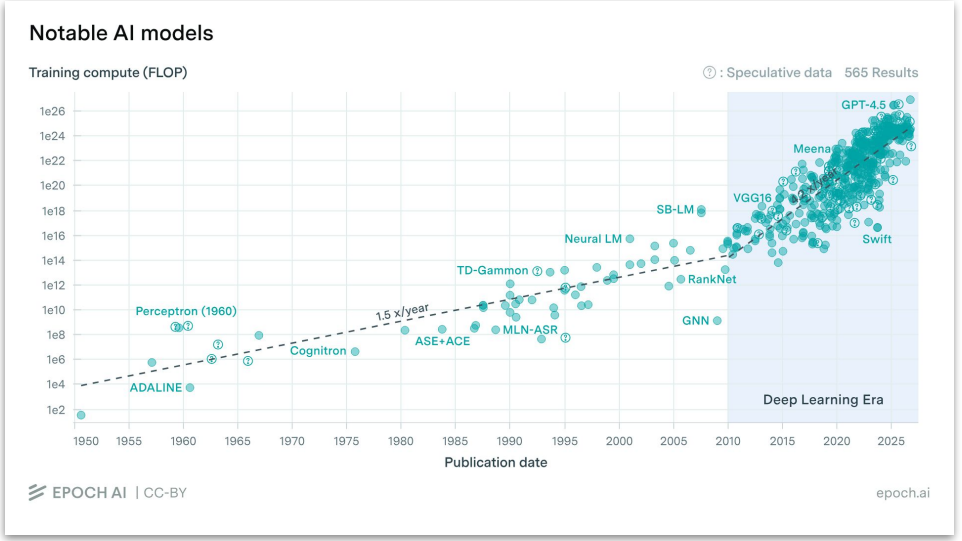
Pourquoi s’intéresser aux impacts de l’IA ?

impacts environnementaux des infrastructures :

- grande quantité de **données**
- ressources de **calcul**

souvent présentée comme **solution**

… sans prendre en compte ses impacts négatifs



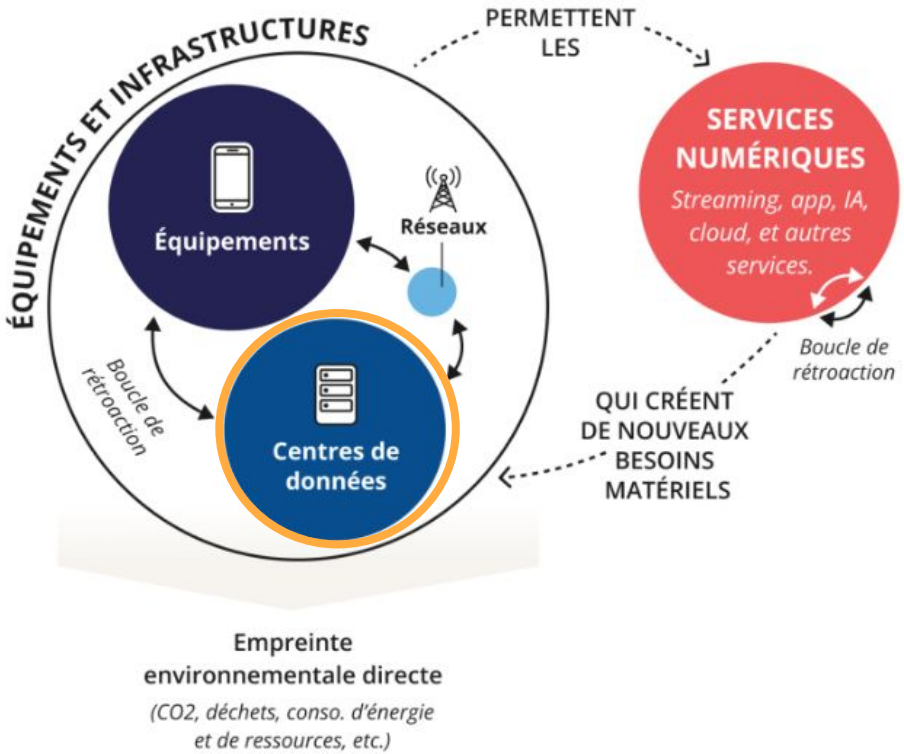
Source: EpochAI

Les infrastructures de l’IA

ou

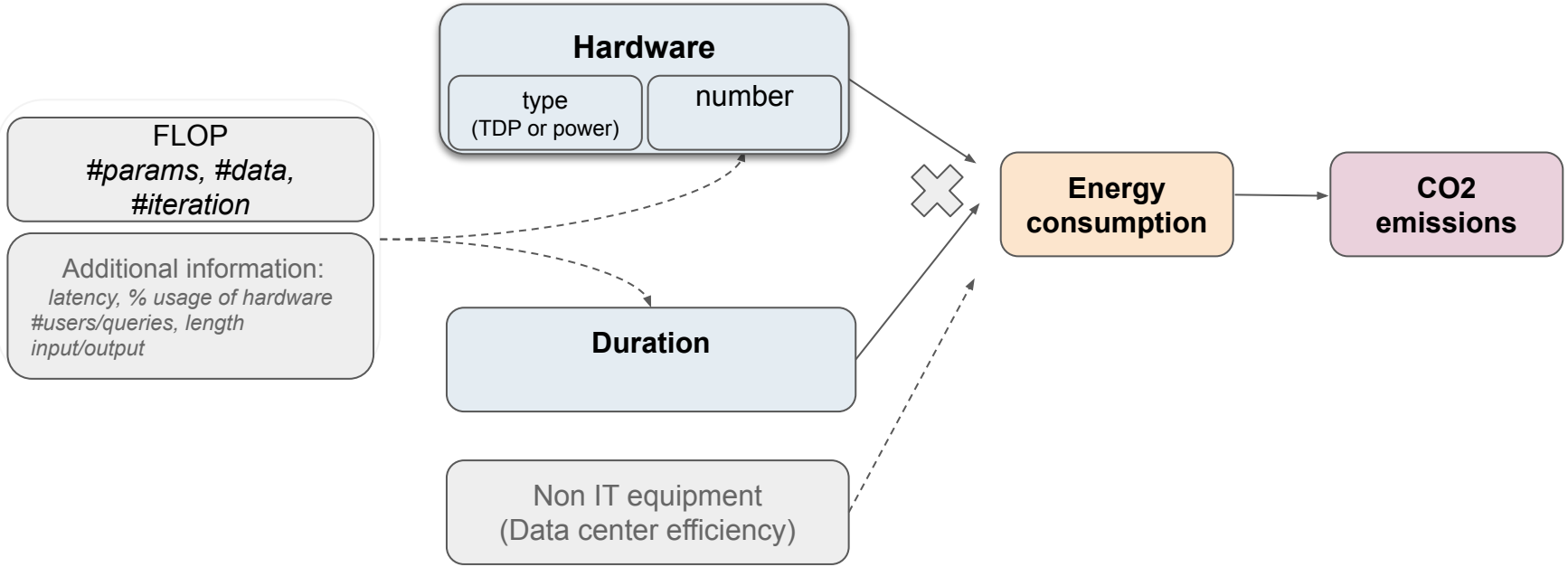
L’IA elle-même est-elle sur une trajectoire soutenable ?

Quelles infrastructures pour l'IA ?



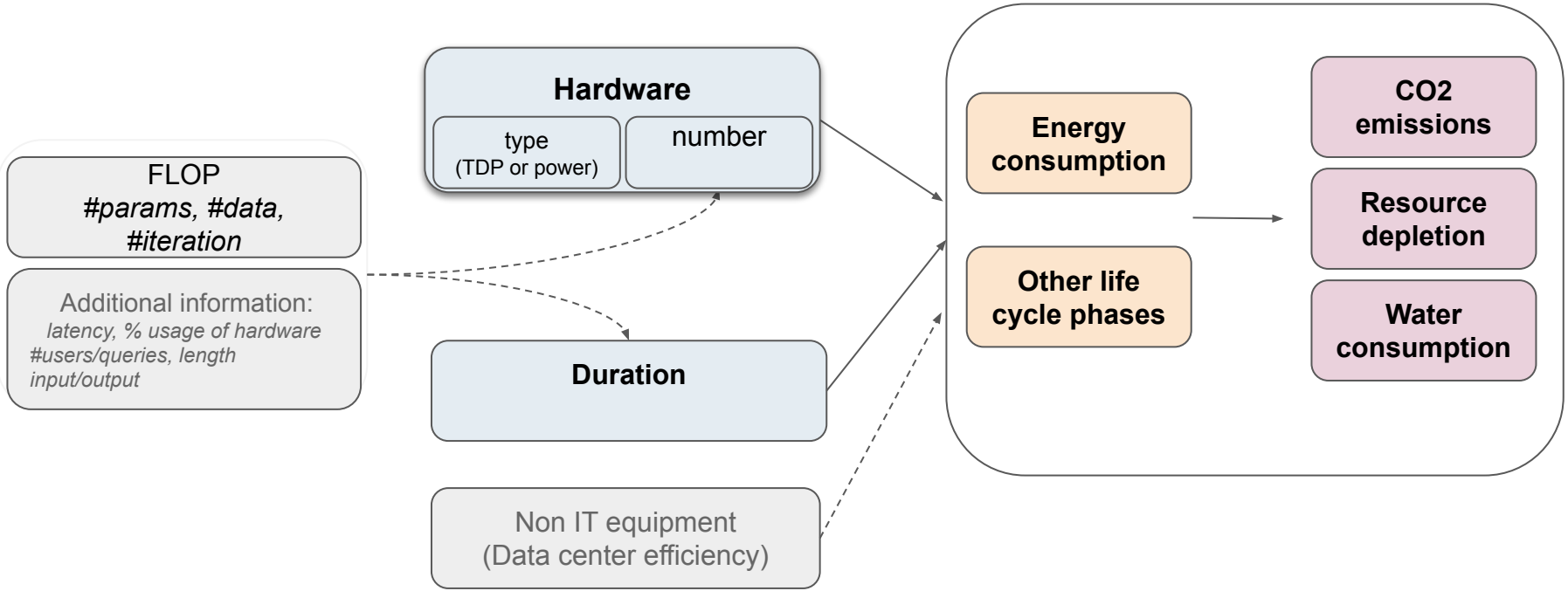
Source: Arcep

Estimer la consommation d'énergie



source: A. Bugeau & A.-L. Ligozat

Comment mesurer l'empreinte d'un service d'IA ?



source: A. Bugeau & A.-L. Ligozat

Approche basique

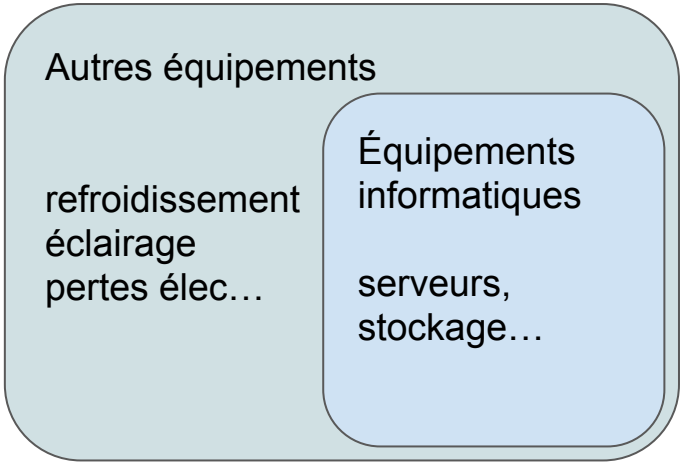
kWh → kg CO_2e

électricité → empreinte carbone

électricité = (CPU + GPU + RAM) x PUE

Efficacité énergétique du centre de calcul

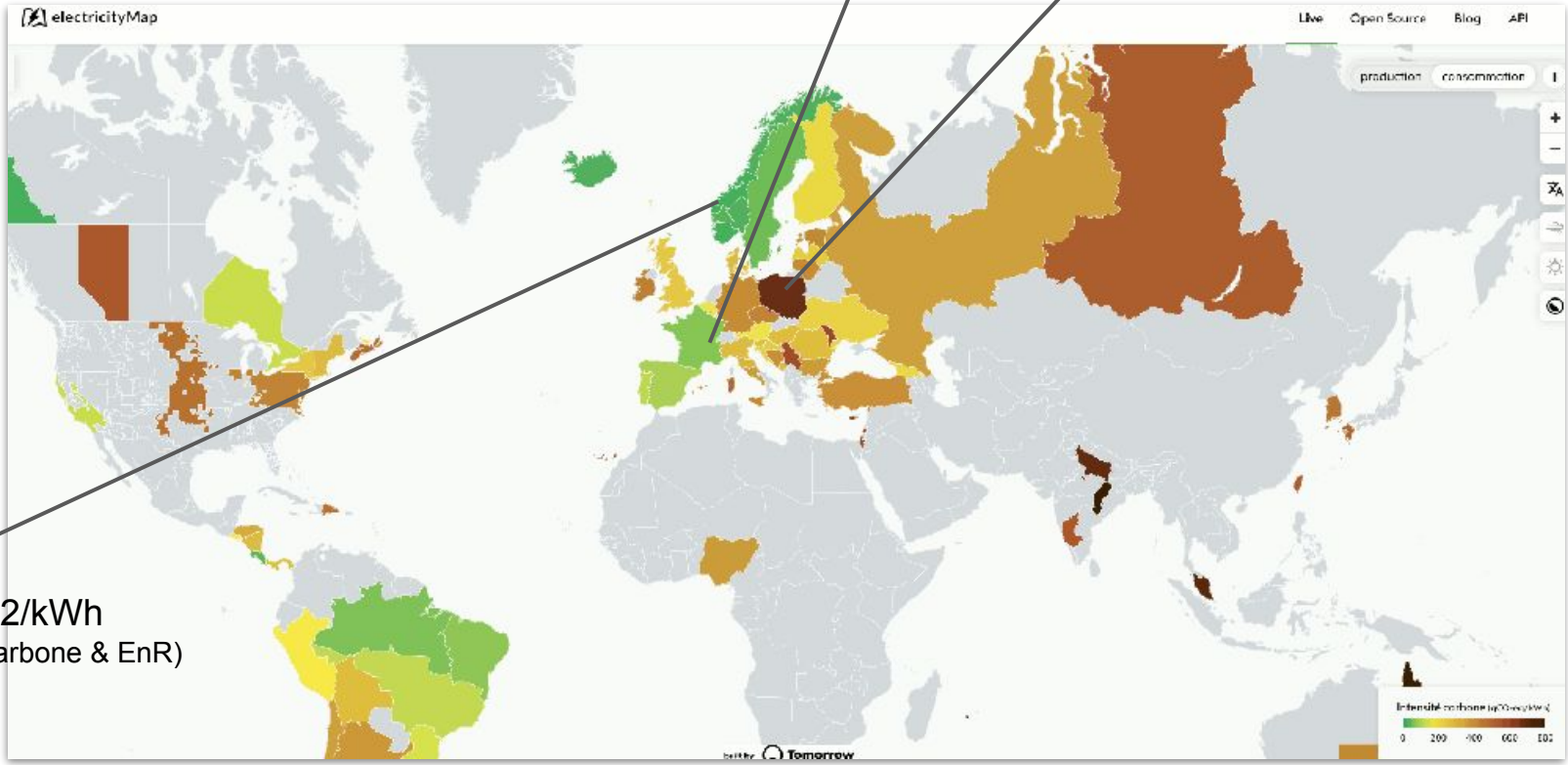
$$PUE = \frac{\text{consommation d'énergie du centre}}{\text{consommation des équipements informatiques}}$$



Facteur d'émission électricité

France : 101g éqCO2/kWh
(86% bas carbone, 13% EnR)

Pologne : 927g éqCO2/kWh
(13% bas carbone, 13% EnR)



Norvège :
22g éqCO2/kWh
(100% bas carbone & EnR)

source: [electricityMap]

Influence du facteur d'émission

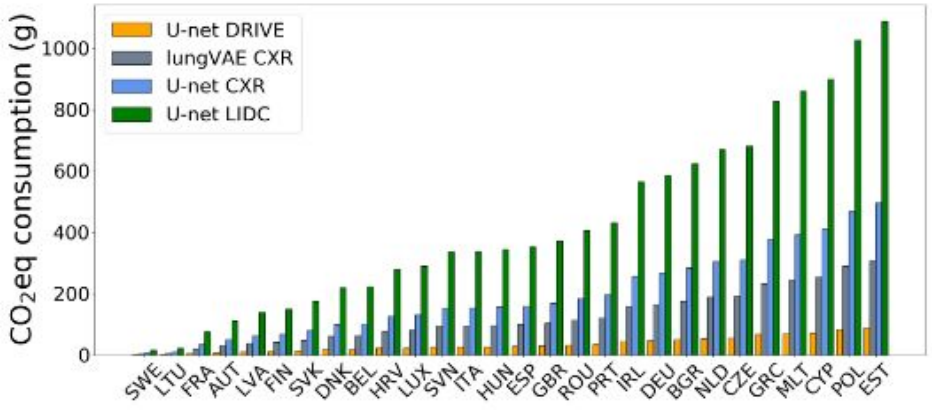
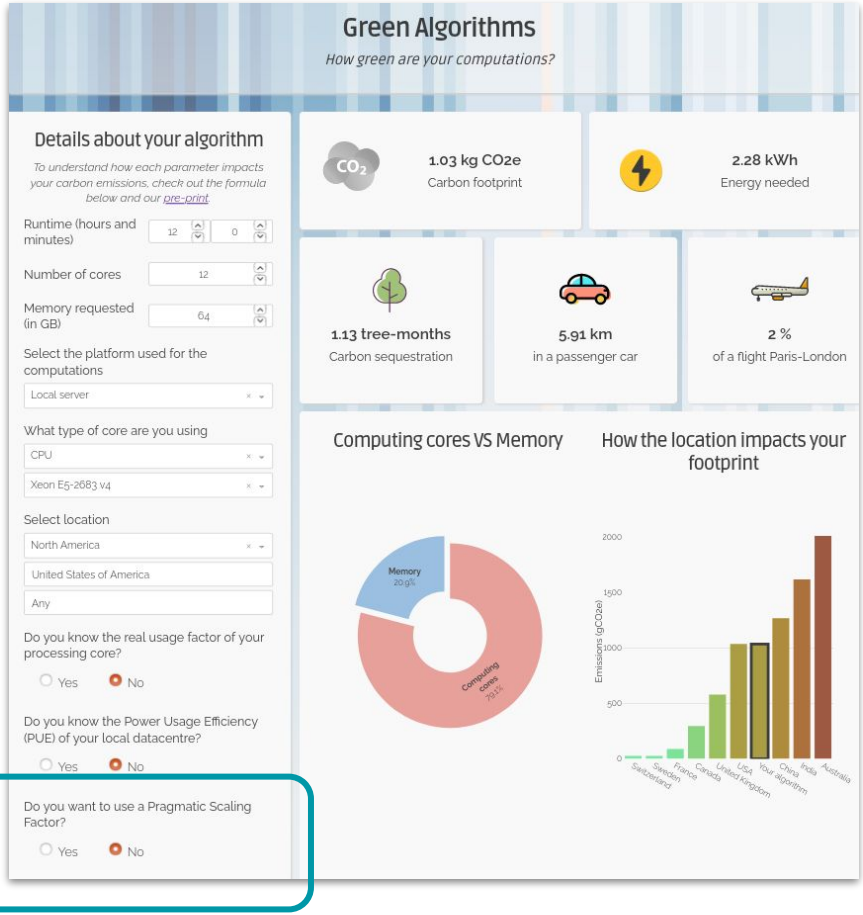


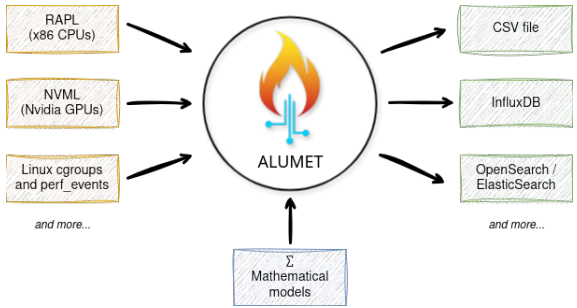
Figure 4. Estimated carbon emissions (gCO_2eq) of training our models (see Appendix B) in different EU-28 countries. The calculations are based on the average carbon intensities from 2016 (see Figure 8 in Appendix).

Source : (Anthony et al., 2020)



CODE CARBON

experiment-impact-tracker



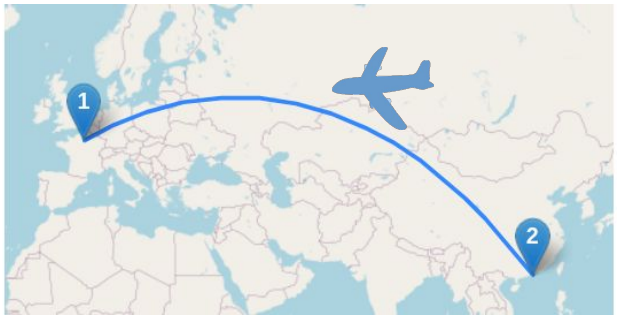
Exemple d’empreinte carbone (Strubell et al, 2019)

4 modèles de TAL/NLP état de l’art

mesure logicielle de la consommation

Résultats des entraînements

- quelques jours à quelques semaines
- émissions: entre 18kg CO2e et 284 000 kg CO2e
- modèle le plus utilisé : 652 kg CO2e, soit
  - un aller Paris-Hong Kong en avion
  - ou 2 500km en voiture



environ 58 GPU pendant 172 jours pour entraîner le modèle…

Cycle de vie d’un équipement

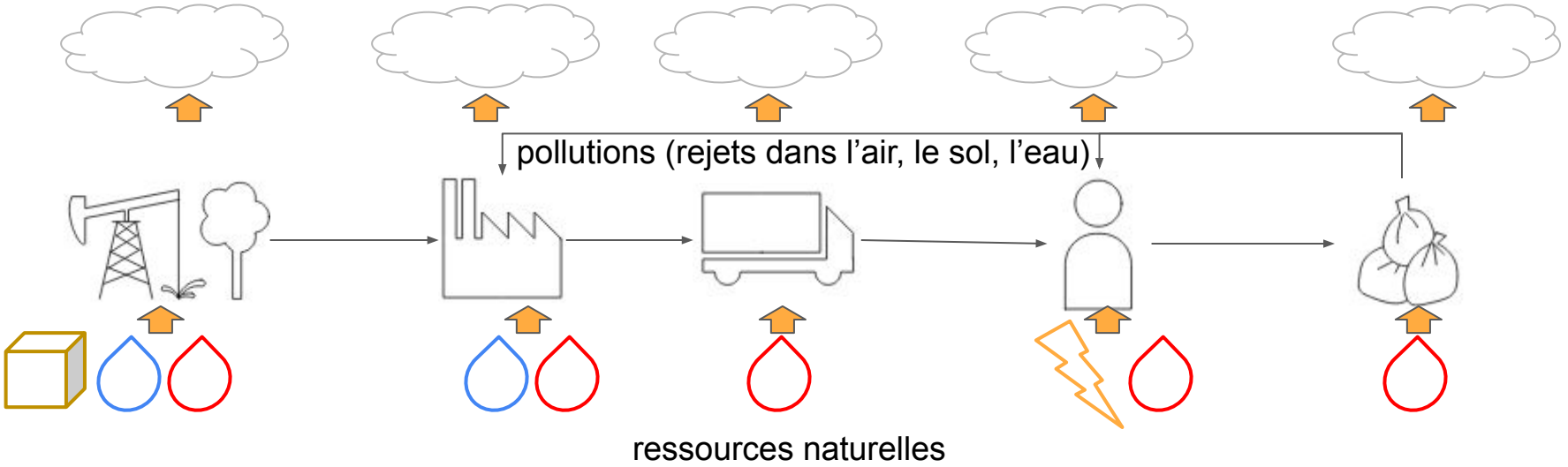


schéma repris de Jacques Combaz

Intégrer d’autres indicateurs environnementaux

	ADP	GWP	PE	Human toxicity	Water Consumption	...
Extraction	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Manufacturing	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Transport	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Usage	✓	✓	✓	✗	✗	✗
End of Life	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Modeling graphics card

Manufacturing impacts attribution

Infrastructure consumption

Putting impacts in perspective

source: (Morand, 2023)

Exemple : entraînement du modèle BLOOM

(Luccioni et al, 2023)

Empreinte carbone

- 59 t éq CO2
  - émissions annuelles de 59 personnes

Épuisement des ressources minérales

- 1,2 kg éq Sb
  - empreinte annuelle de 38 personnes

Équivalences = modèle des limites planétaires de (Sala et al, 2020)

Exemple : Stable Diffusion

Table 2: Environmental impact of Stable Diffusion for FU1 and FU2

FU	Abiotic Depletion Potential (kgSb eq)	Warming Potential ($kgCO^2$ eq)	Primary energy (MJ)
FU1 - Single use of service	$6.72e^{-08}$	$7.84e^{-03}$	$2.02e^{-01}$
FU2 - A year of service	$4.64e^{+00}$	$3.60e^{+05}$	$8.93e^{+06}$

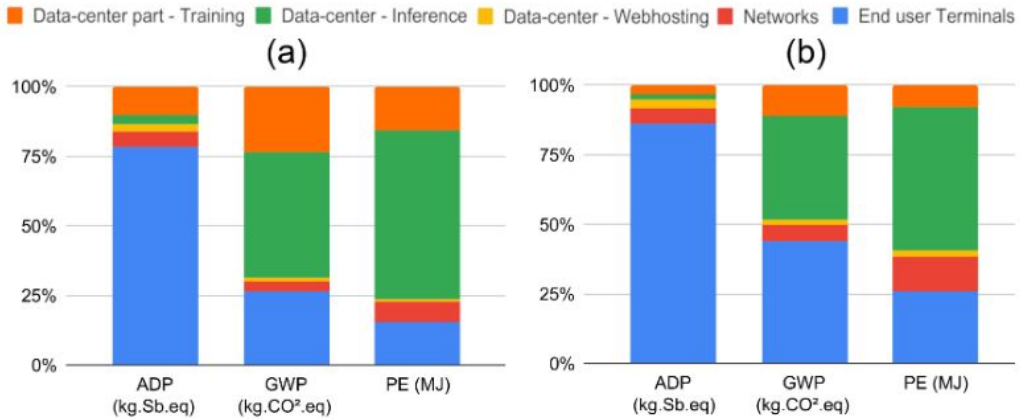
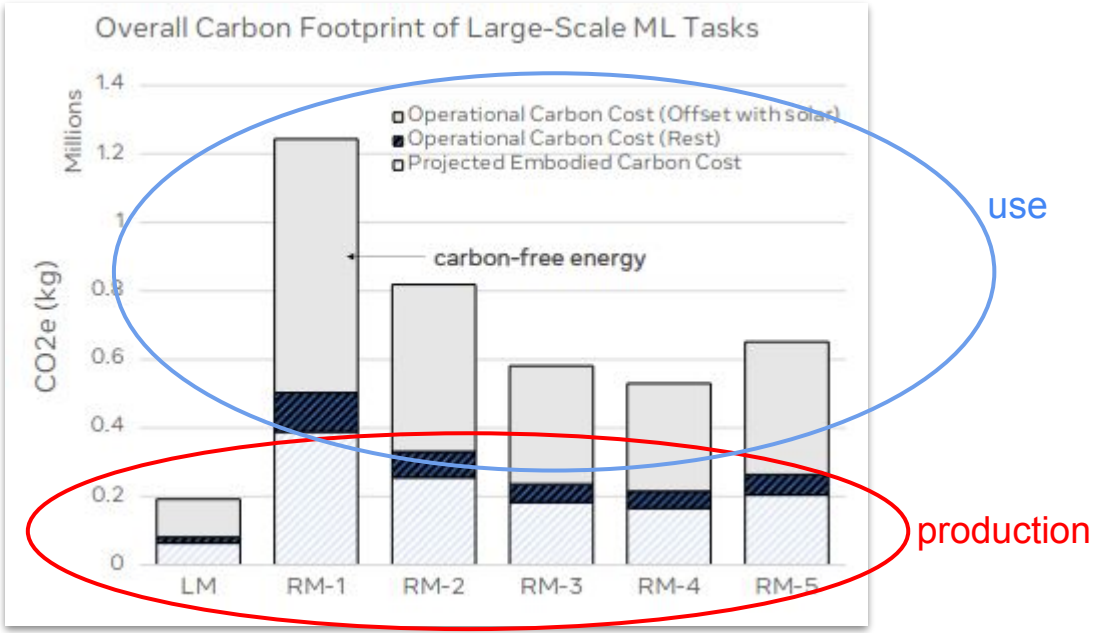


Figure 2: Impact distributions for (a) FU1 and (b) FU2

Source : (Berthelot et al., 2024)

Empreintes carbone de production vs usage en Machine Learning (Wu et al., 2021)



Consommation d’eau

Sources de consommation d’eau (Li et al., 2023) :

- circuits ouverts de refroidissement à l’eau
- production d’électricité
- fabrication des équipements

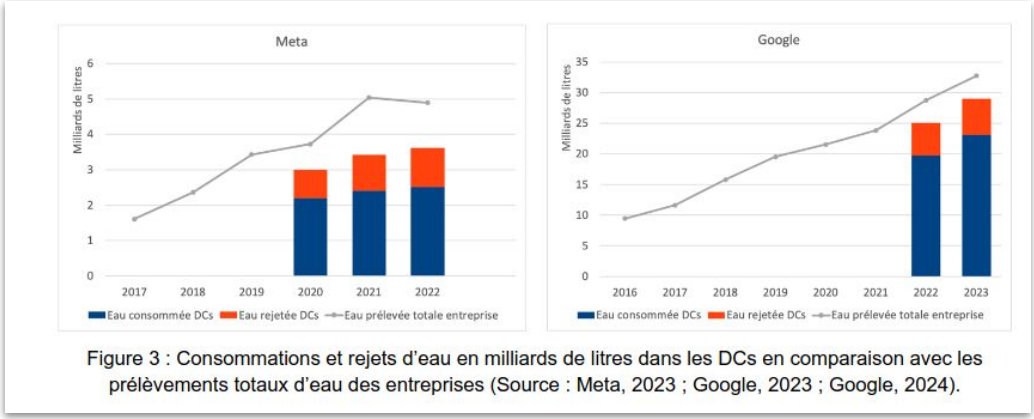
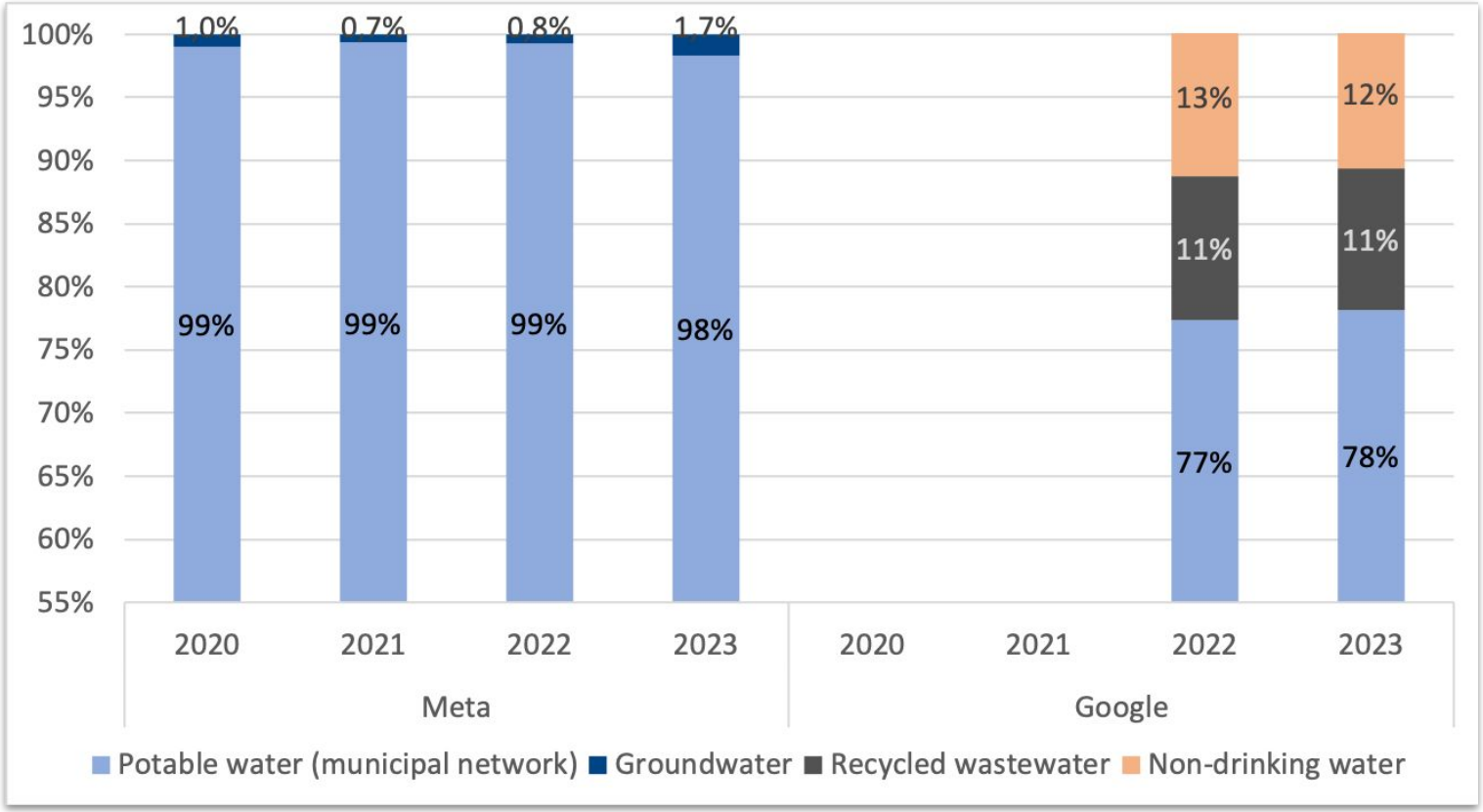


Figure 3 : Consommations et rejets d’eau en milliards de litres dans les DCs en comparaison avec les prélèvements totaux d’eau des entreprises (Source : Meta, 2023 ; Google, 2023 ; Google, 2024).

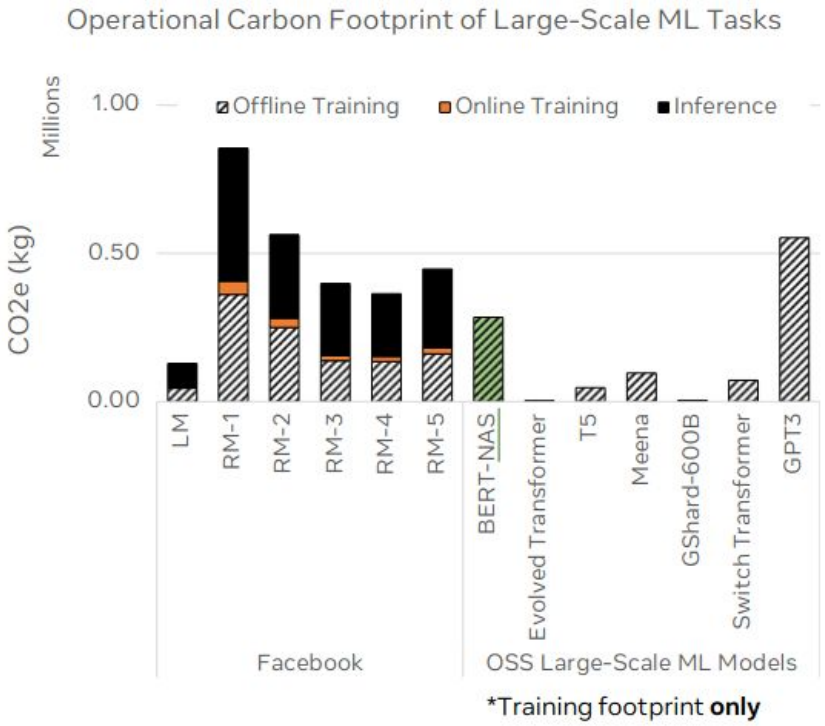
Source : (Bouveret et al., 2024)

Consommation d’eau

source : rapports environnementaux de Meta et Google, données compilées par Aurélie Bugeau



Entraînement vs inférence



Source : (Wu et al., 2021)

Inférence

Source : (Luccioni et Strubell, 2024)

88 modèles, 10 tâches ML; 1,000 inférences, 3 jeux de données, expériences x10

Matériel: 1 noeud avec 8 NVIDIA A100-SXM4-80GB GPUs sur AWS

Estimation avec Code Carbon:

mesure puissance de RAM, CPU, GPU

Image => impacts ↗

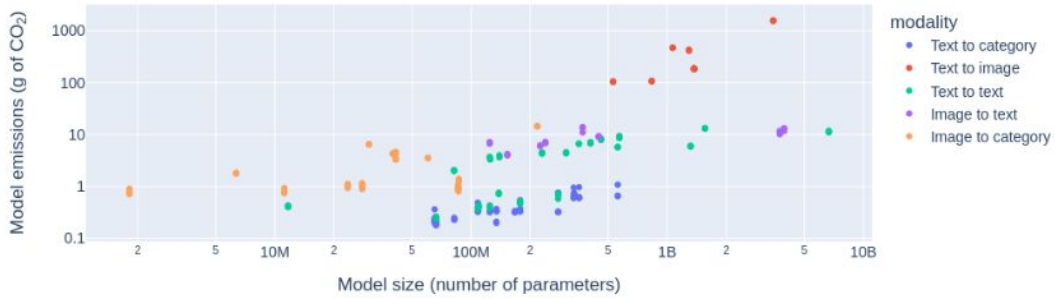
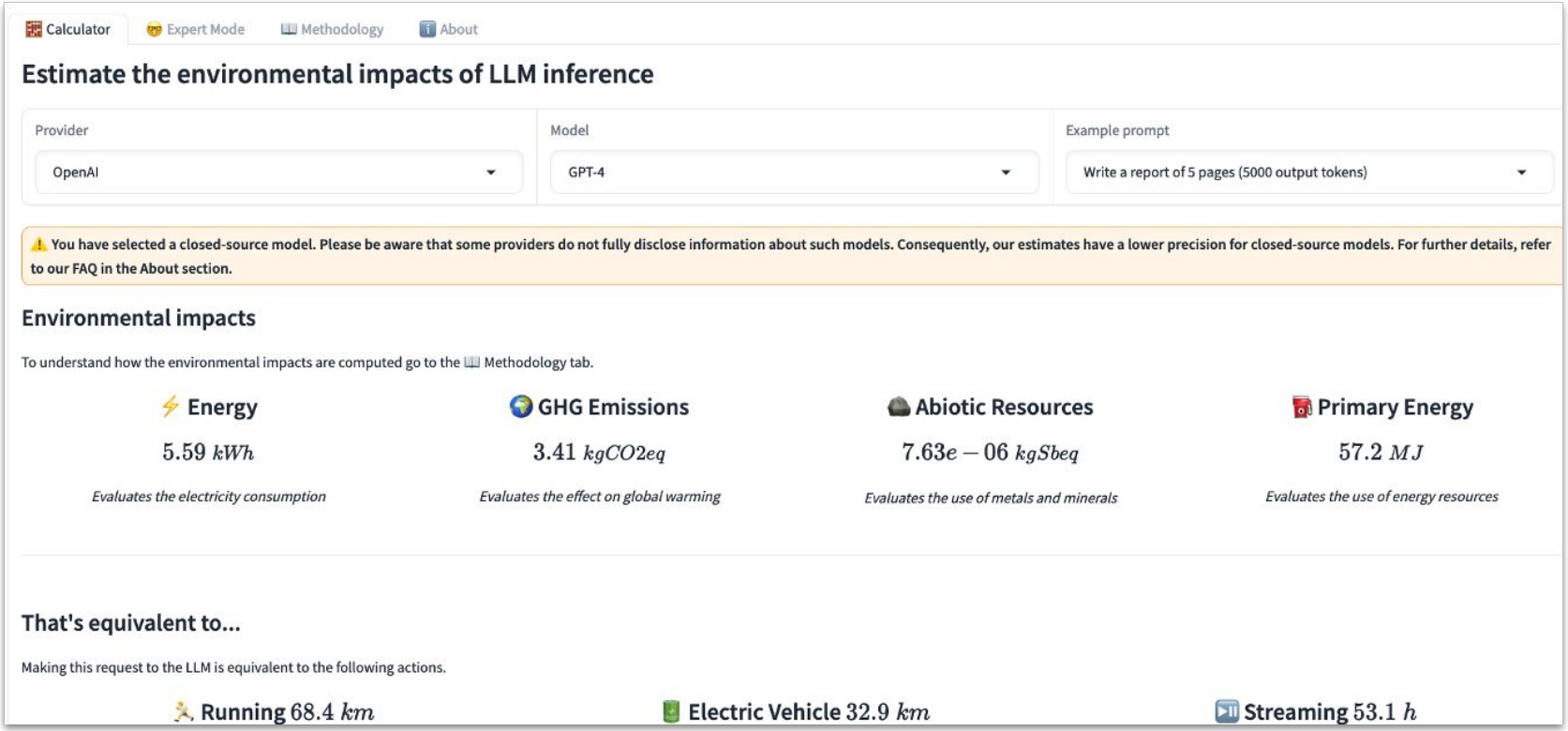


Figure 2: The 5 modalities examined in our study, with the number of parameters of each model on the x axis and the average amount of carbon emitted for 1000 inferences on the y axis. NB: Both axes are in logarithmic scale.

Calculer les impacts de l'inférence



Gen AI Impact, ecologits, https://huggingface.co/spaces/genai-impact/ecologits-calculator

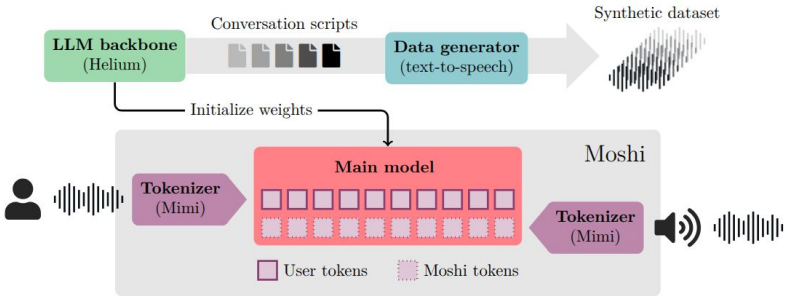
Prendre en compte toutes les phases d'un modèle ?

Case study

- **Moshi**, a novel speech-text foundation model
- Developed from scratch by **Kyutai**, an open-science AI lab
- Trained on a cluster of **1000 GPUs**

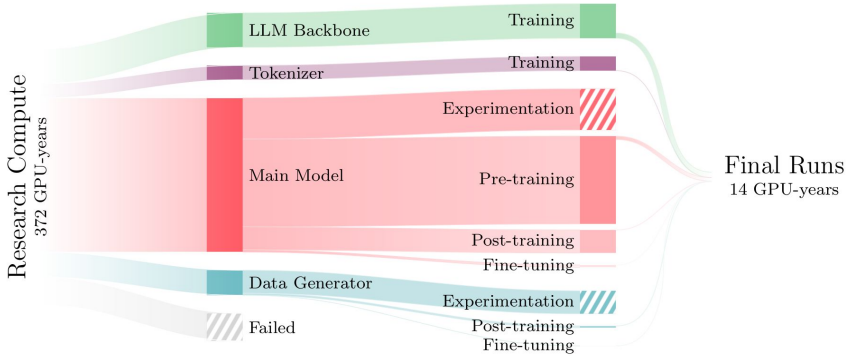
Data

- Logs of **3534 training runs**: name, duration, #GPUs...
- **Paper**: *Défossez et al. "Moshi: A speech-text foundation model for real-time dialogue", 2024*



Moshi modules: LLM backbone, main model, tokenizer, data generator

Compute = run duration × #GPUs, measured in *GPU time*



From research to final compute

Source: (López-Rauhut et al., 2026)

Prendre en compte toutes les phases d'un modèle ?

Environmental assessment

The full research and development of Moshi was equivalent to:

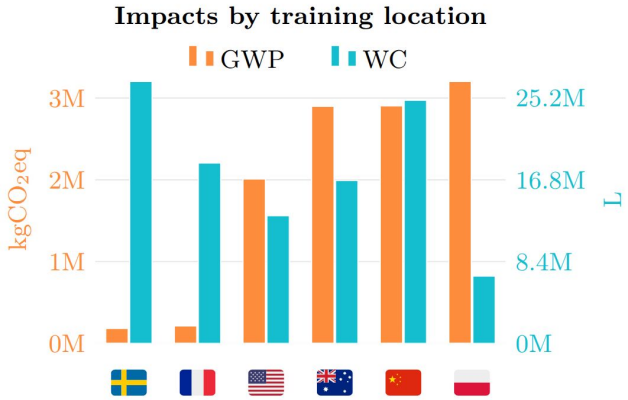
- The energy consumption of **727** people in a year in France
- The carbon emissions of **39** people in a year in France
- The water consumption of **342** people in a year in France
- The mineral and metal depletion potential of **483** laptops

Assessment scope

Impact indicator	Life cycle phase			
	Production	Transport	Use	End of life
Primary energy (PE)	✓	(✓)	✓	
Global warming potential (GWP)	✓	(✓)	✓	
Water consumption (WC)			✓	
Abiotic depletion potential (ADP)	✓	✓	✓	

Use phase impacts

-in hypothetical locations-



Carbon and water depend on **data center location**

Quelle évolution de l’empreinte ?

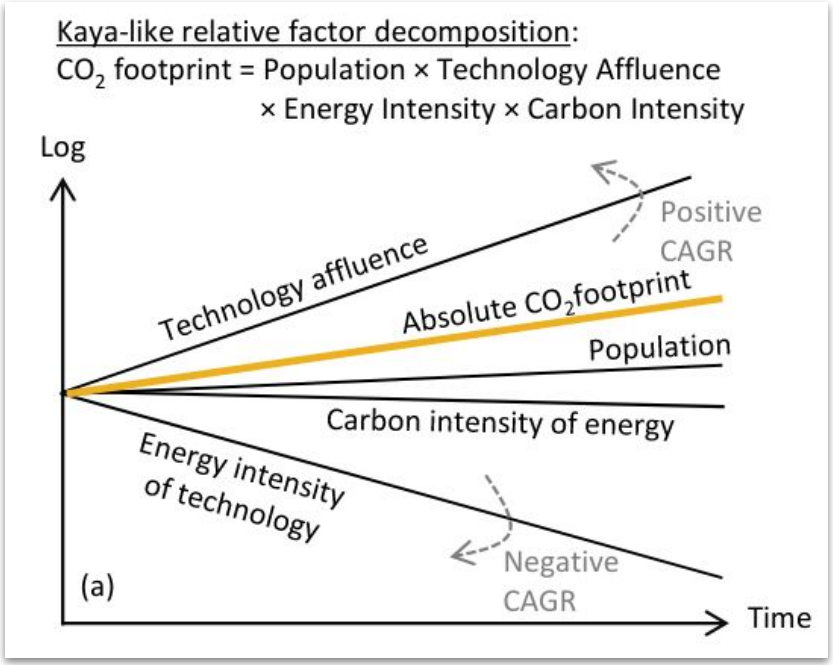
Les optimisations permettent-elles de réduire les impacts ?

Optimisations:

- matérielles
- algorithmiques
- carbone

Réduction des impacts ? *(Patterson et al, 2022)*

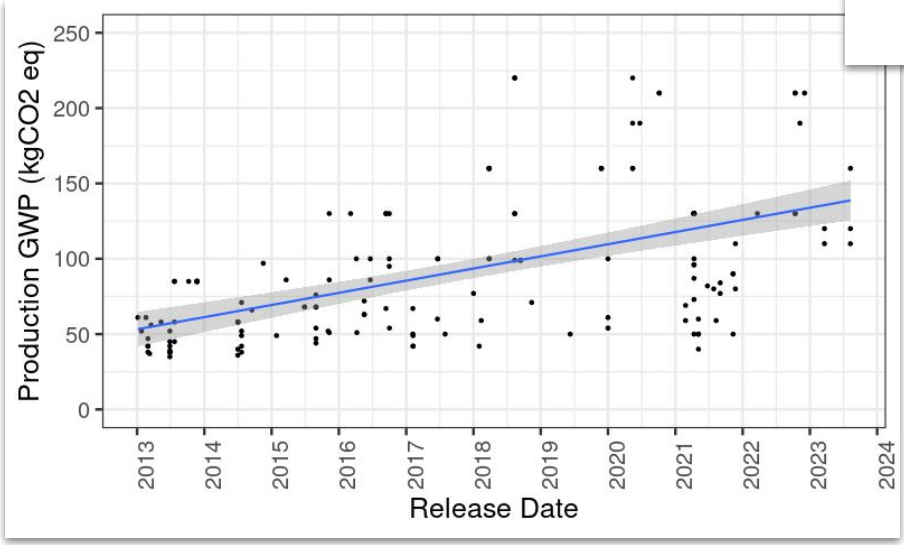
Augmentation de l'utilisation du numérique absorbe les optimisations *(Bol et al, 2021)*

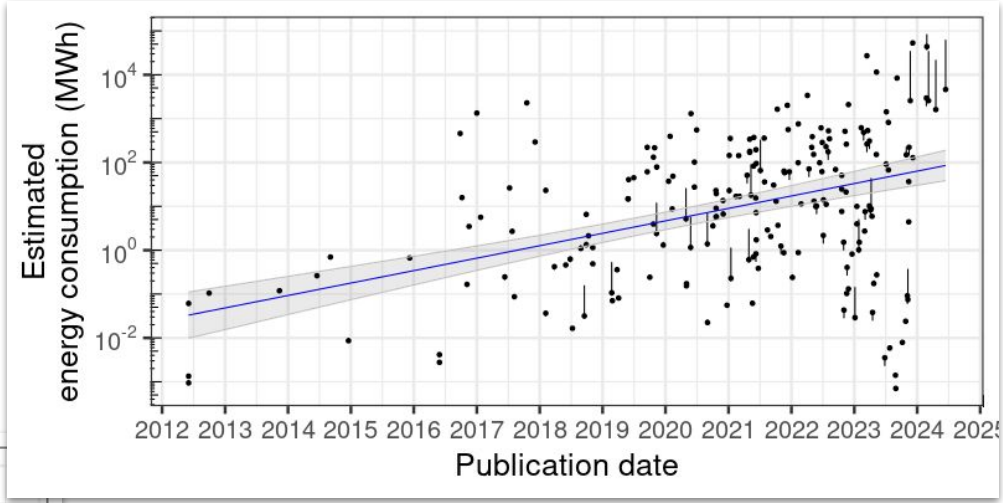


Évolution de l'IA

(Morand et al, 2026)

empreinte carbone de production des cartes graphiques

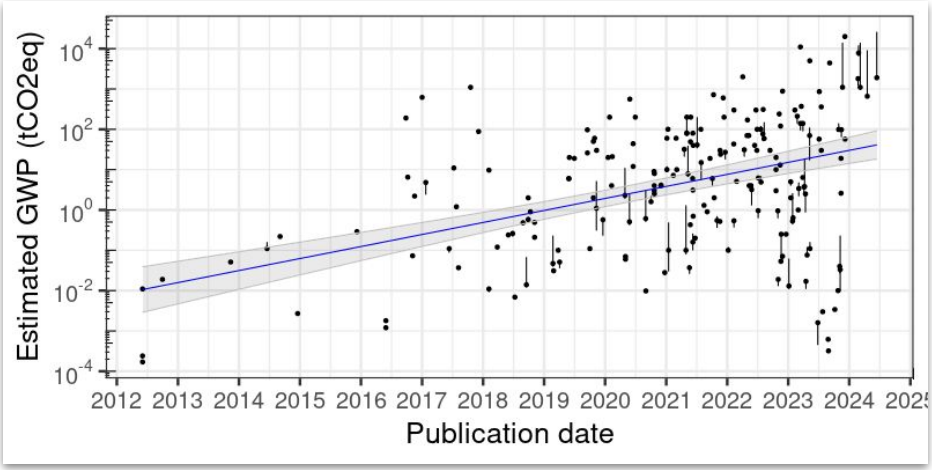




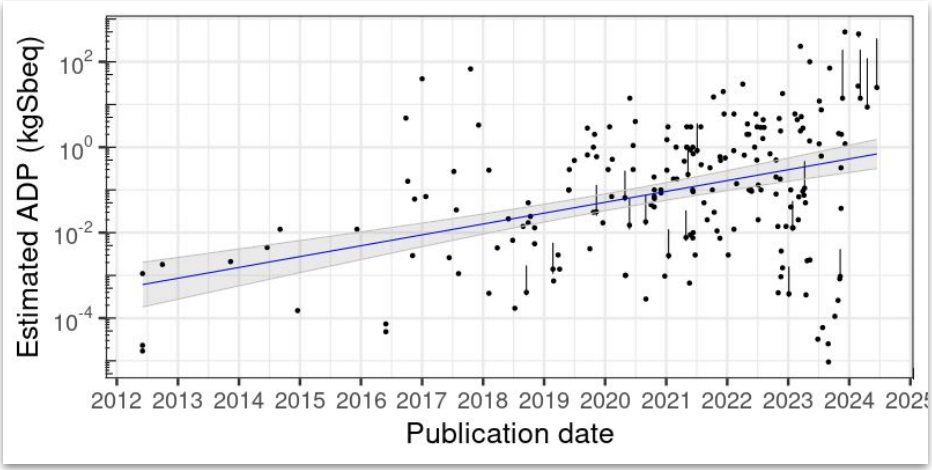
consommation électrique des modèles d'IA

L’entraînement d’un modèle a une empreinte croissante

Empreinte carbone

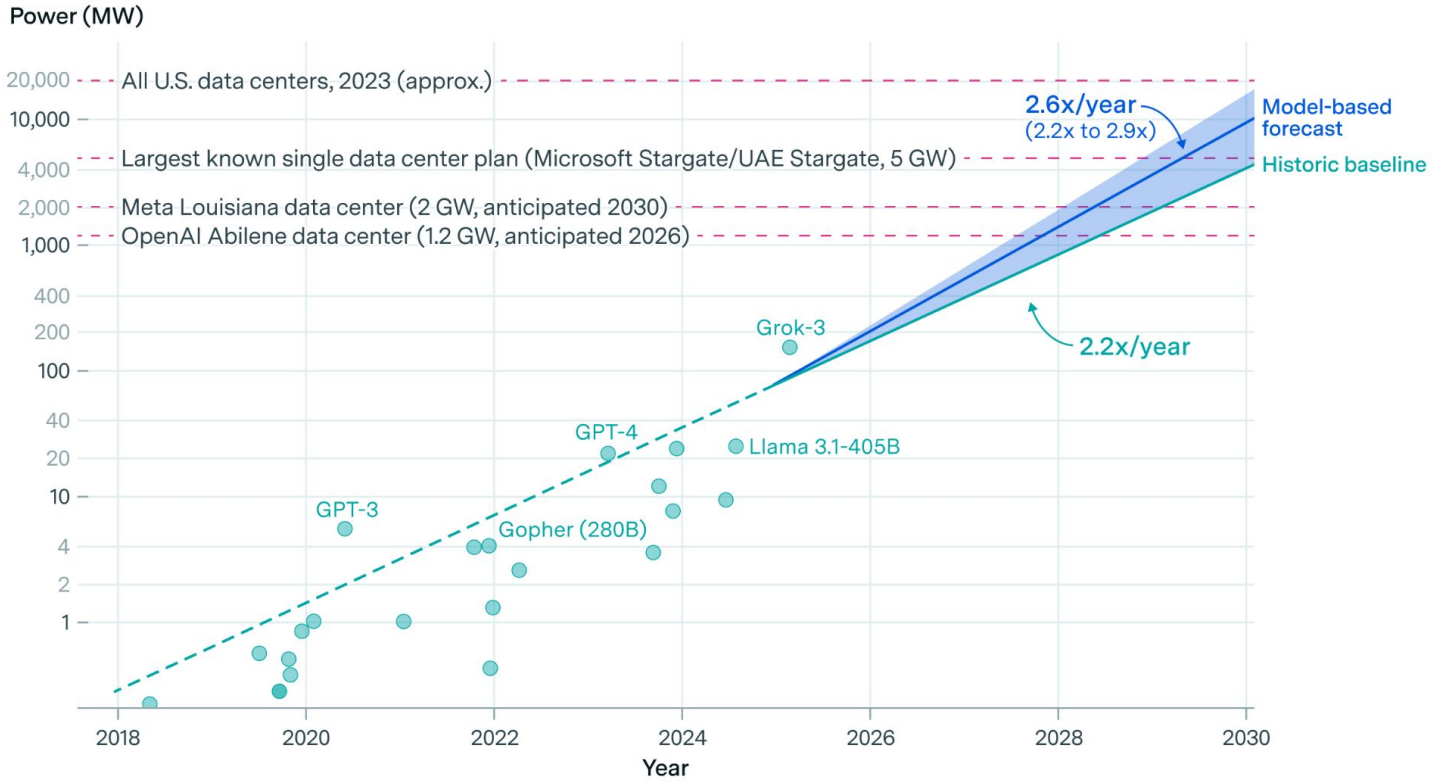


Consommation de ressources



Projected power growth for frontier AI training

EPOCH AI



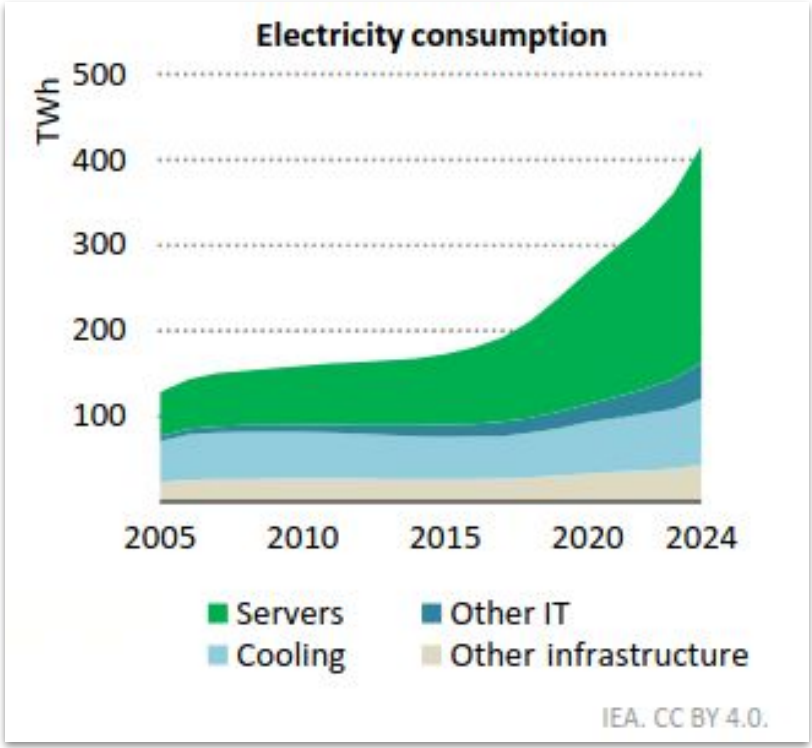
CC-BY

epoch.ai

Data centers - consommation d’électricité

La consommation des data centers a augmenté

(pour comparaison: consommation électrique en France en 2024 = 440 TWh)

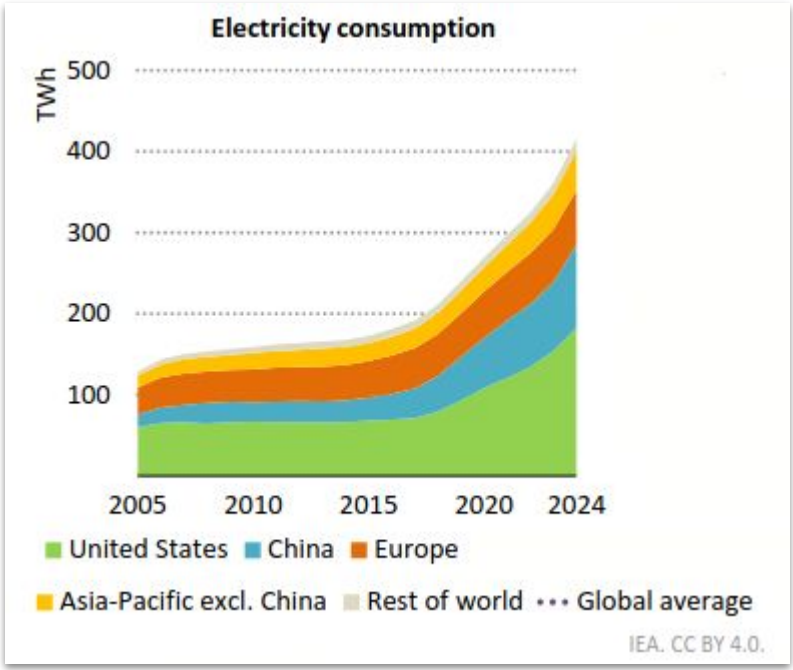


Source : IEA 2025, Energy and AI

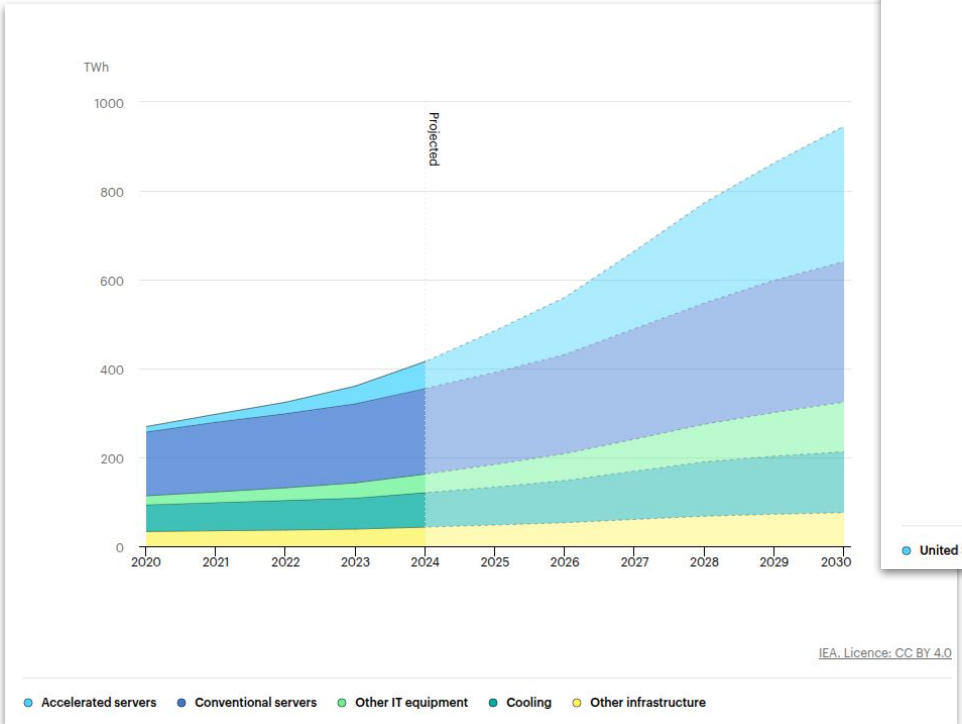
Data centers - consommation d’électricité

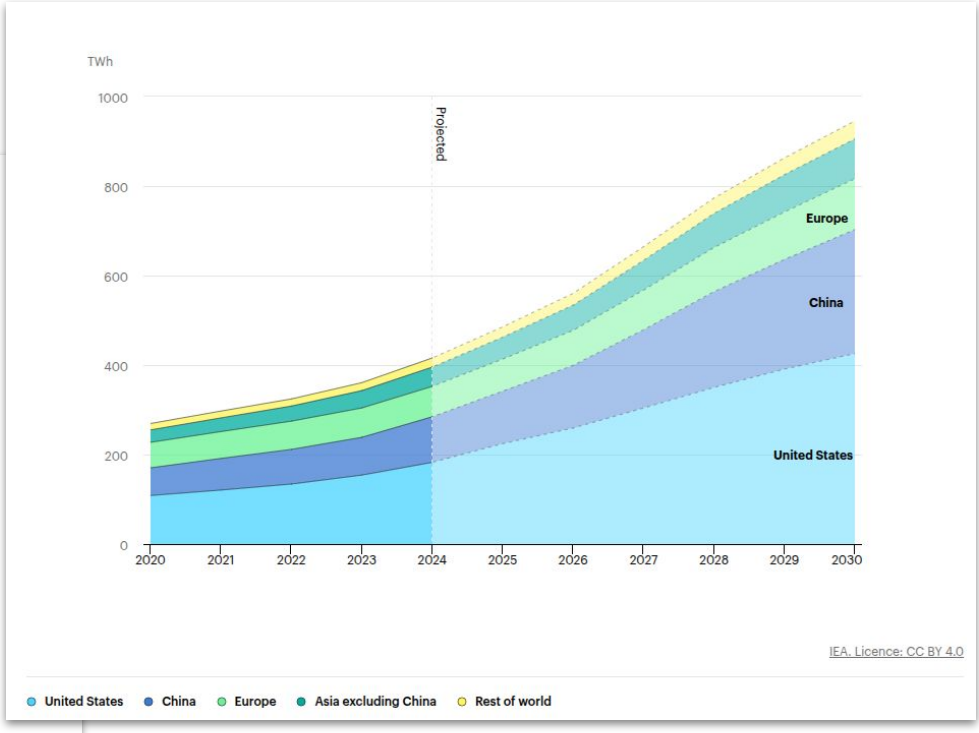
Tendance largement poussée par les US

Aux US, 4,5% de l’électricité = data centers



Data centers - consommation d’électricité



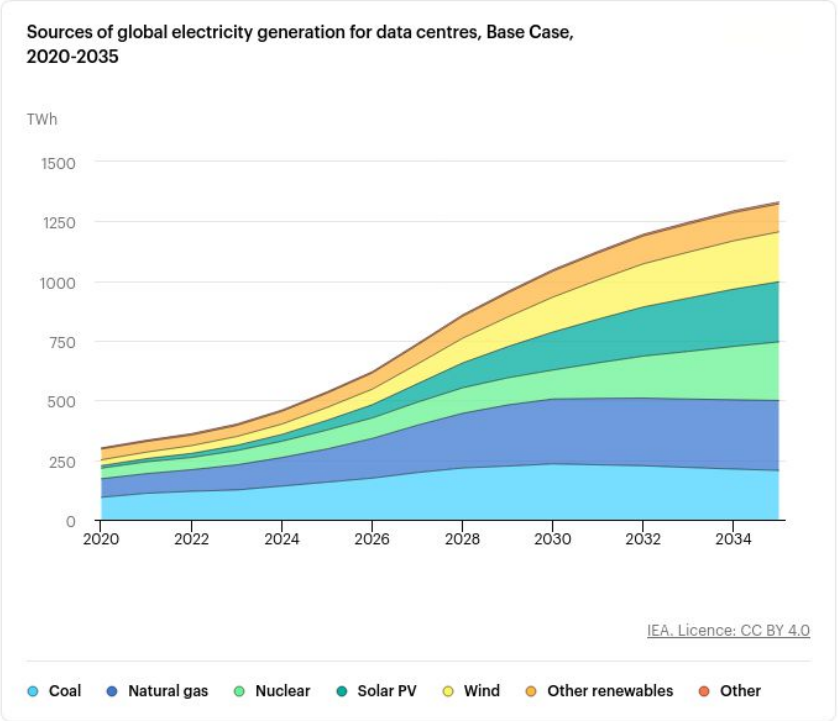


Data centers

- perpetuate dependence on fossil fuel infrastructure
- exert pressure
- destabilize the energy sector

Commitment to low-carbon supply

but > 50% of the electricity in DCs comes from fossil fuels in 2024



Data centers - AI: a driver of electricity demand

2025 Google announces the restart of the Duane Arnold nuclear power plant (U.S.) in early 2029 to support the development of its AI infrastructure

2024 Microsoft signs a 20-year agreement to restart the Three Mile Island nuclear power plant (US)—the site of a 1979 nuclear accident—in 2028 to power its additional data centers

2025 The Homer City coal-fired power plant announces its intention to use existing infrastructure to build a natural gas plant and a data center campus.

Several U.S. states have postponed the closure of their coal-fired power plants to avoid risking supply shortages for data centers

Off-Grid Power Plants

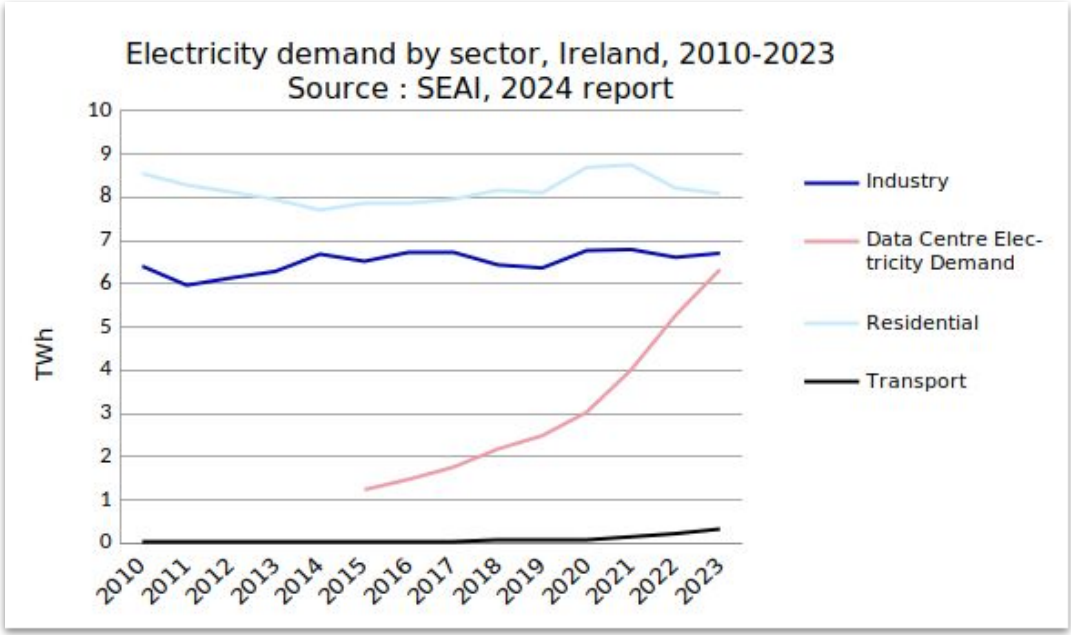
30% of U.S. data center projects for 2025 and 2026 plan to use off-grid power supplied by ad hoc systems:

> mobile gas generators mounted on semi-trailers, turbines originally designed for aircraft and warships, or refurbished turbines from industrial facilities...

Source : Cleanview

Data centers - Le cas de l’Irlande

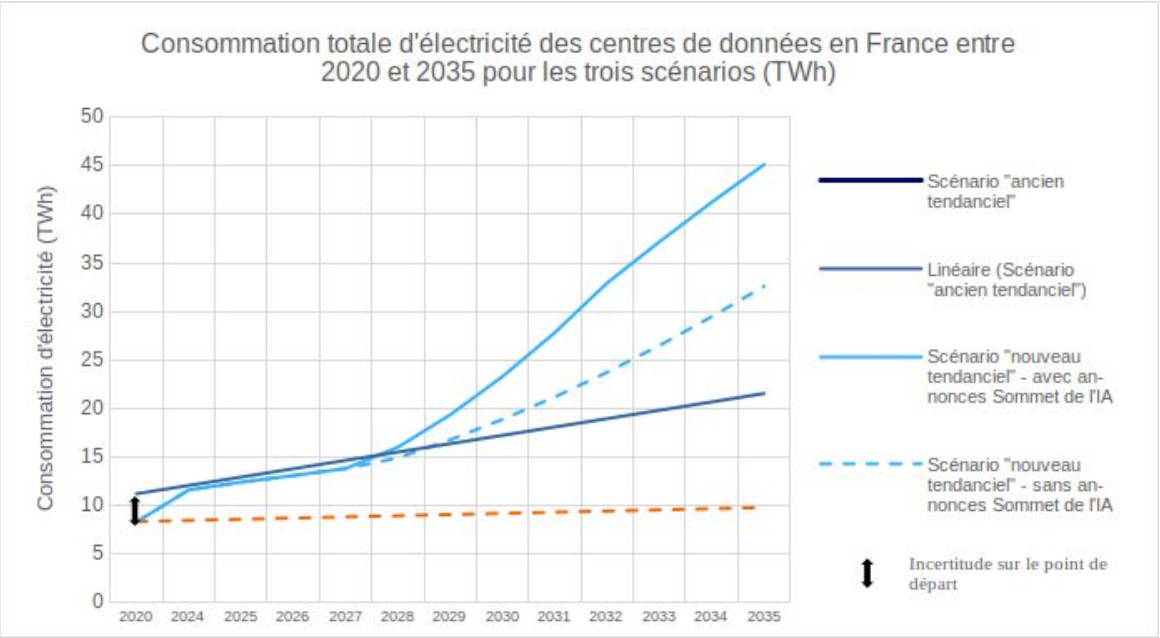
Data centers ~ 20% de la demande d’électricité en 2023



Data centers - Et en France ?

- D’ici 2035, les data centers pourraient consommer 4x plus qu’aujourd’hui
- Les tendances actuelles rendent impossible d’atteindre les objectifs de décarbonisation du secteurs pour 2030 et 2050
- Manque de données => difficile de prévoir l’évolution

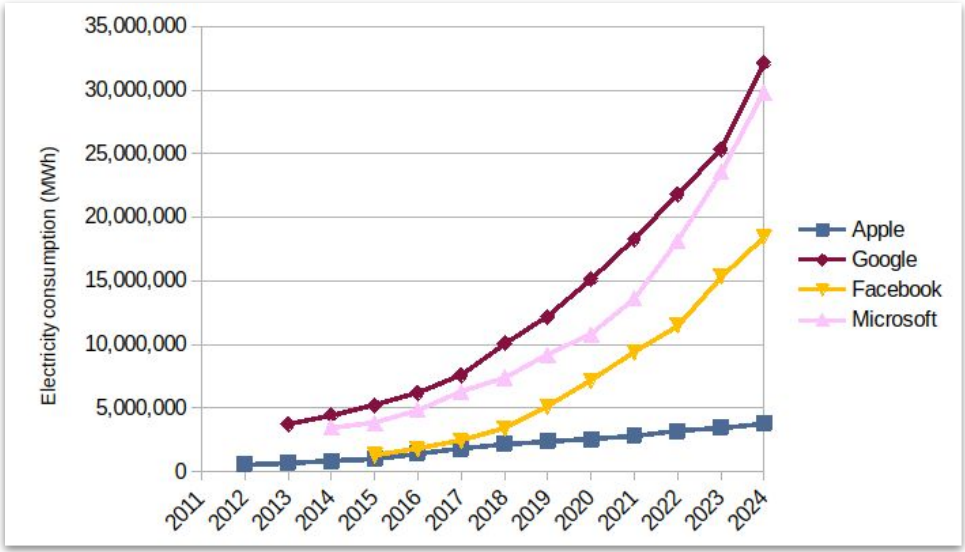
et nouvelles annonces régulièrement...

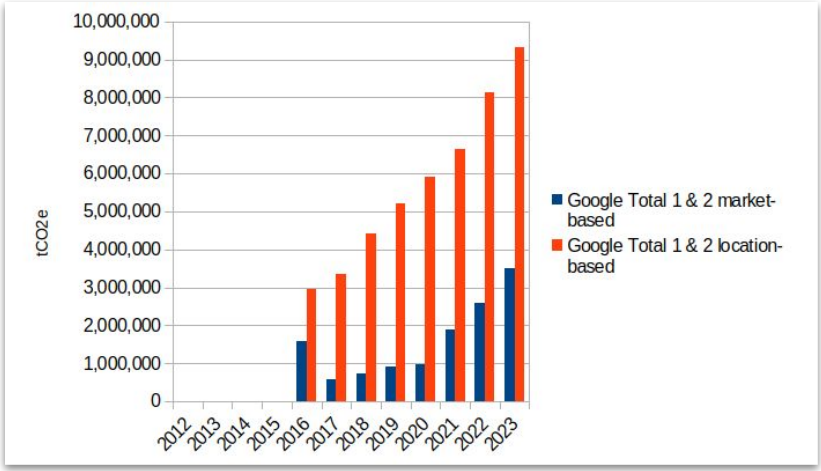


Source: [The Shift Project]

Influence de l'IA dans les empreintes carbone des GAFAM

Google : «As we further integrate AI into our products, **reducing emissions may be challenging** due to increasing energy demands from the **greater intensity of AI compute**, and the emissions associated with the expected increases in our technical infrastructure investment.»





source : rapports environnementaux, données compilées par Anne-Laure Ligozat

Europe must choose between AI and climate goals, data center lobby says

Tech sector says only carbon-emitting gas plants are reliable enough today to power the EU's AI goals.

LISTEN COPY LINK

POLITICO PRO Free article usually reserved for subscribers

That leaves Europe facing the sensitive question of whether it should temporarily rely on gas-fired power to support AI growth while waiting for grids, nuclear reactors and renewable energy storage to catch up. | Nicolas Tucat/AFP via Getty Images

Source: Politico

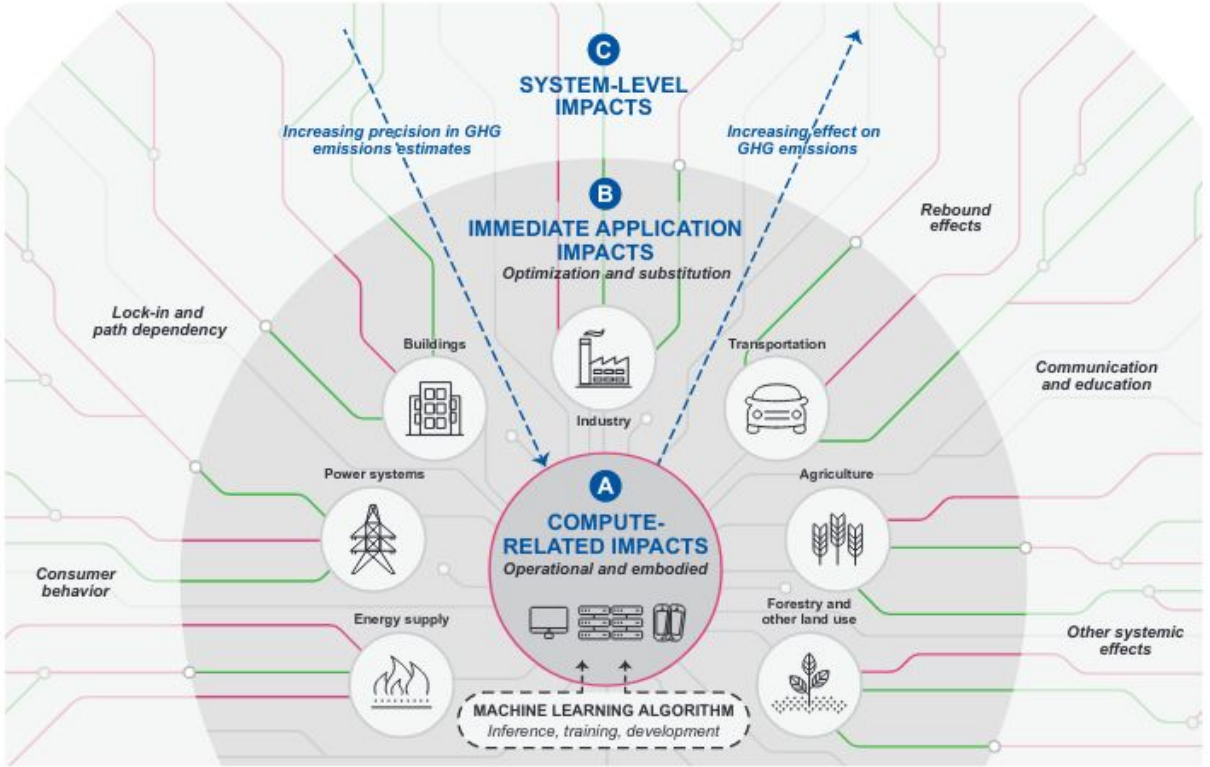
L’empreinte environnementale de l’IA est croissante

AI for green

ou

L’IA permet-elle de réduire
les impacts d’autres secteurs ?

Impacts de 1er, 2e et 3e ordre de l'IA



Source : (Kaack et al., 2021)

Impacts indirects

impacts directs

impacts indirects

optimiser le trafic automobile ?

moins de consommation de carburant

utilisation de nouveaux objets connectés, capteurs…

effet rebond
trafic plus fluide => gain de temps => éloignement du domicile => étalement urbain

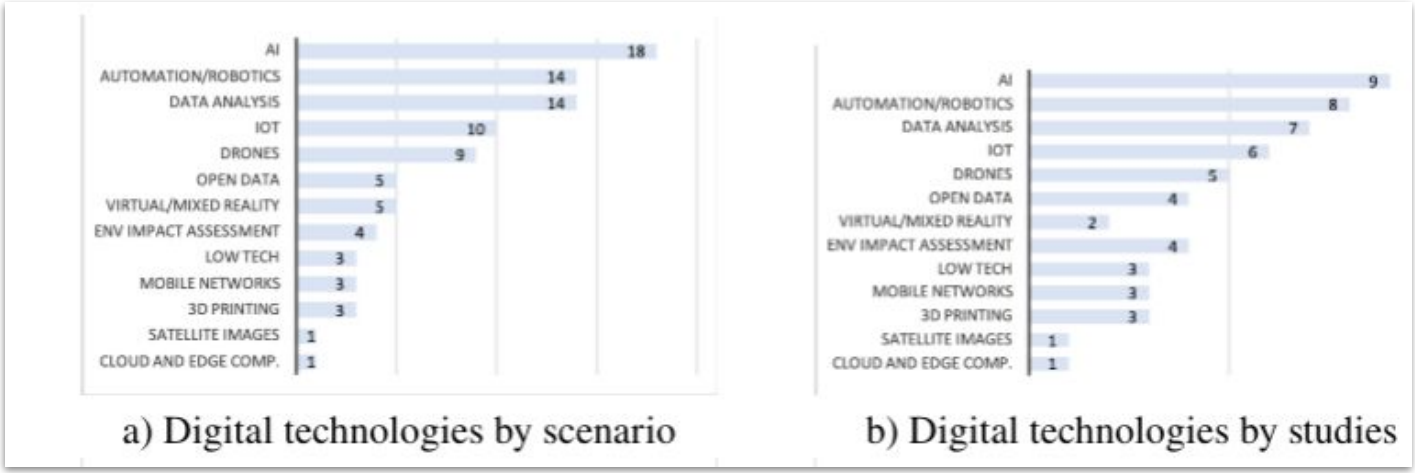
dépendance de chemin
prolonge système actuel, vs transports en commun, mobilités actives…

priorité aux systèmes avec impacts significatifs ?

Source : déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'intelligence artificielle

L'IA comme solution aux problèmes environnementaux ?

Analyse d'études prospectives (Bugeau & Ligozat, 2023)



IPCC 2022

Ademe 2022

negaWatt 2021

EU green deal 2019

Eionet 2022

Arup 2019

DDC 2020

SNBC 2020

RTE 2022

Shift 2020

France 2072 2018

D&A 2022

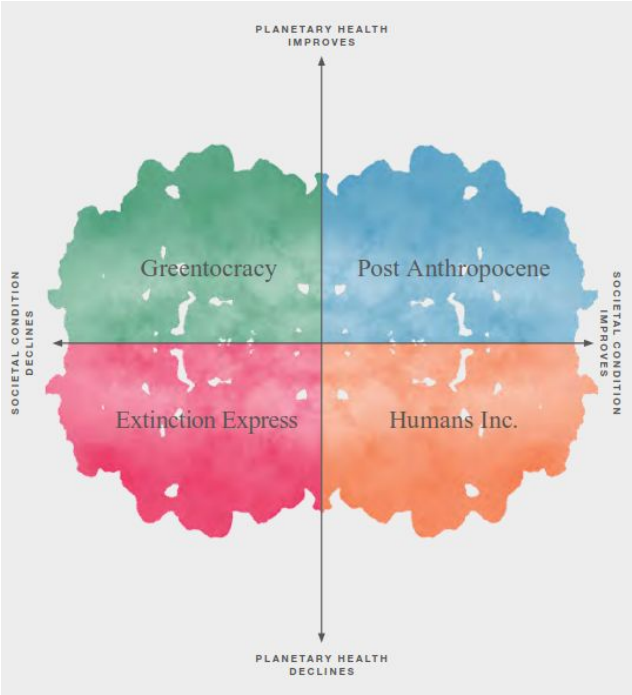
CNIL 2021

Digit. Challenge 2022

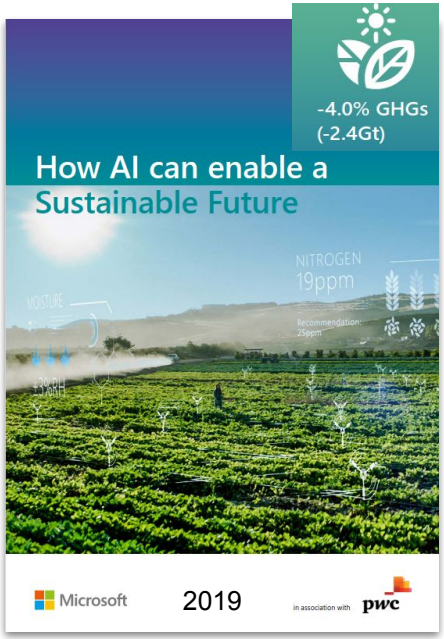
L’IA comme solution aux problèmes environnementaux ?

«Everyone has, and knows, their **carbon quota** and daily spend; **AI provides daily updates** , and state governments penalise overspend», «Cross-fertilising innovations in sensing and AI have led to major breakthroughs in **planetary health monitoring** .» – *Arup, Post Anthropocene scenario*

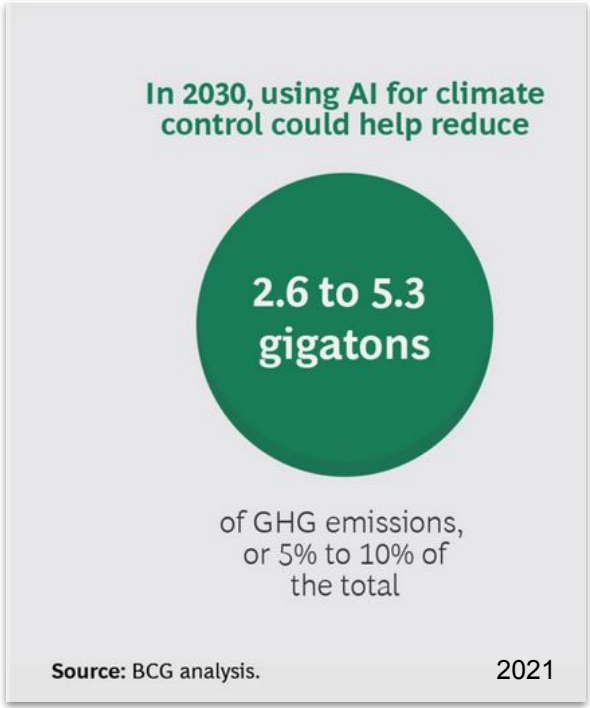
AI agents for **personal finance** – *Arup, Extinction Express*



L’IA vue comme une solution ?

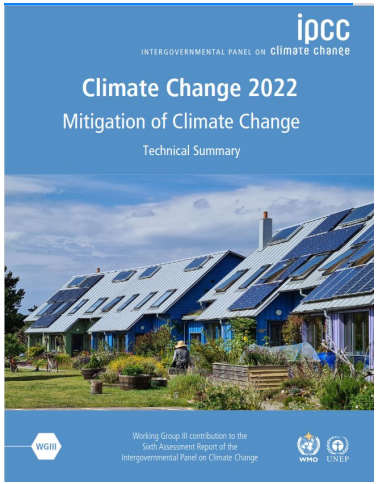


«AI can enable our future systems to be more productive for the economy and for nature. This supports the proposition that we can use AI to help ‘decouple’ economic growth from GHG emissions.»



L’IA vue comme une solution ?

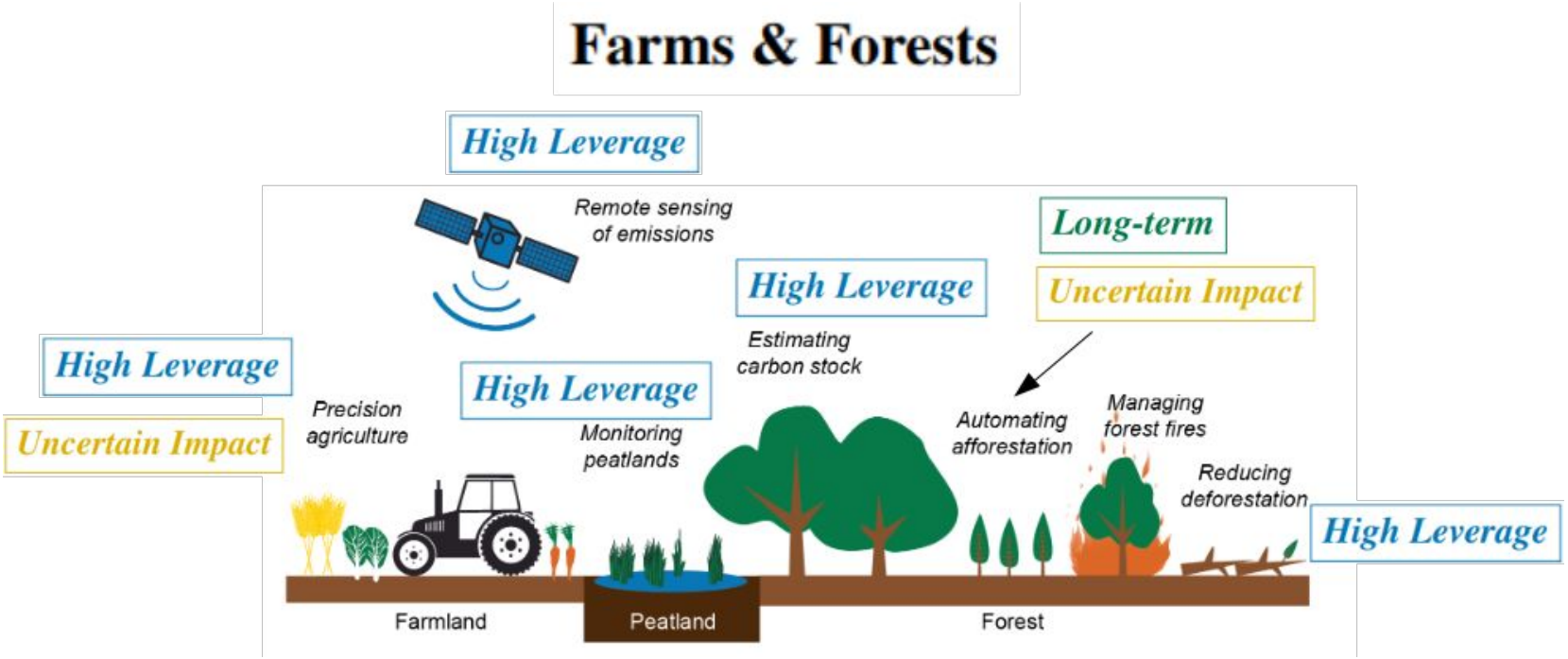
«Artificial Intelligence (AI) can be deployed for a wide range of applications to promote the goals of the European Green Deal. However, adverse environmental impacts of AI could jeopardise the attainment of these goals.»



(....) artificial intelligence can improve energy management in all sectors, increase energy efficiency, and promote the adoption of many low-emission technologies, including decentralised renewable energy, while creating economic opportunities. However, some of these climate change mitigation gains can be reduced or counterbalanced by growth in demand for goods and services due to the use of digital devices.

Applications de l'IA à des problématiques environnementales

«Tackling Climate Change with Machine Learning» (Rolnick et al., 2019)



«Tackling Climate Change with Machine Learning» (Rolnick et al., 2019)

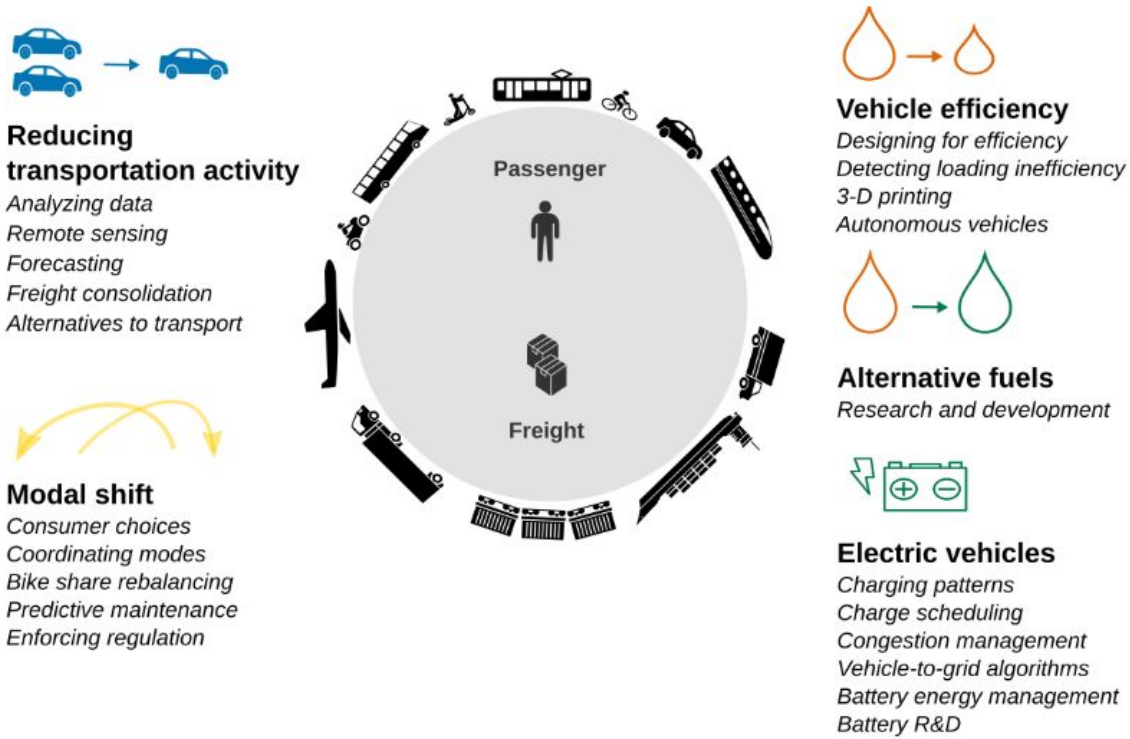
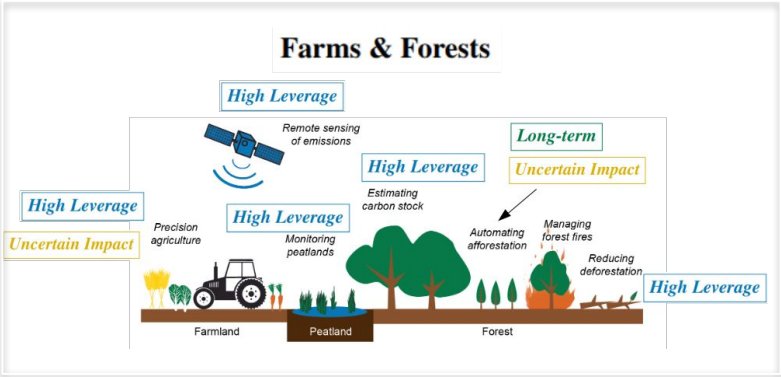


Figure 2: Selected strategies to mitigate GHG emissions from transportation using machine learning.

(Brooks,Thorslund &Biørn-Hansen, 2023)

AI4Green ou AI4Good vs AI4Bad ?



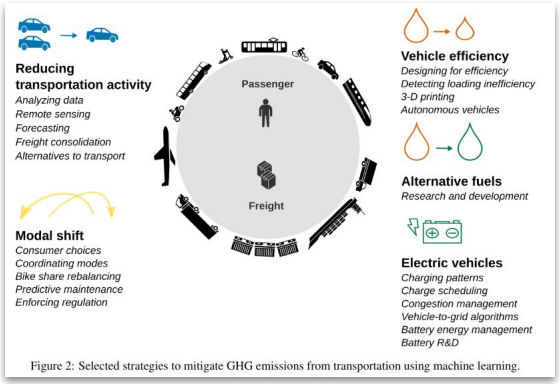
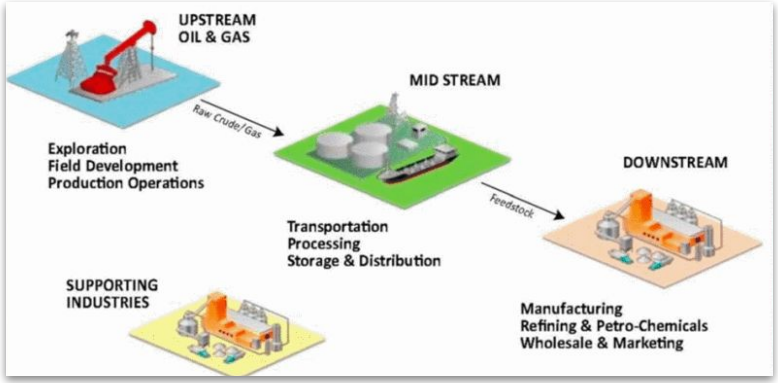
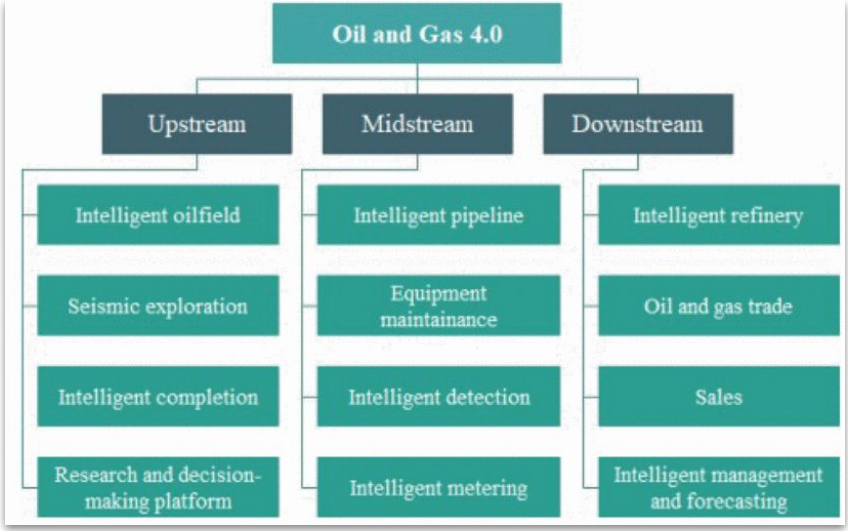
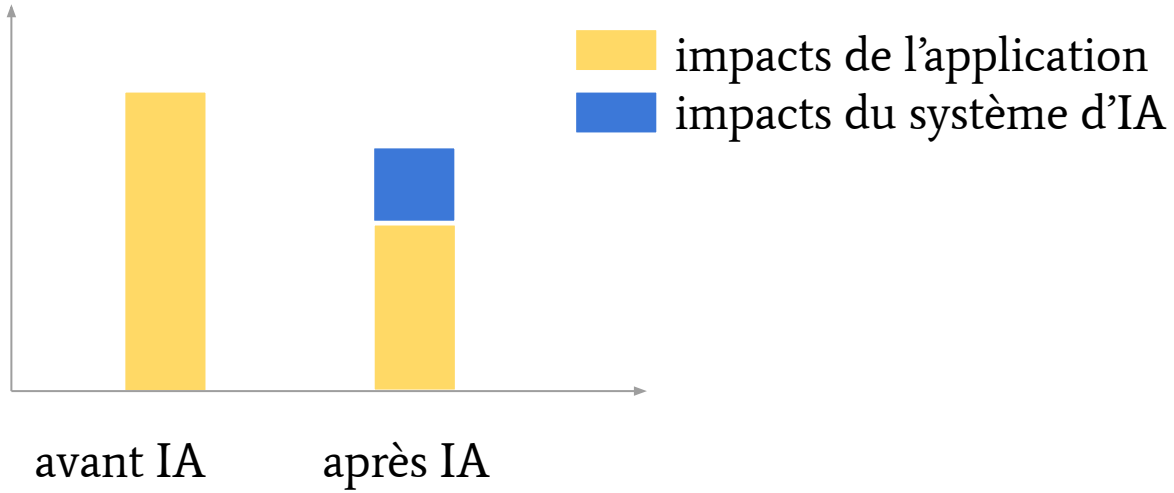


Figure 2: Selected strategies to mitigate GHG emissions from transportation using machine learning.





L’IA pour des applications environnementales

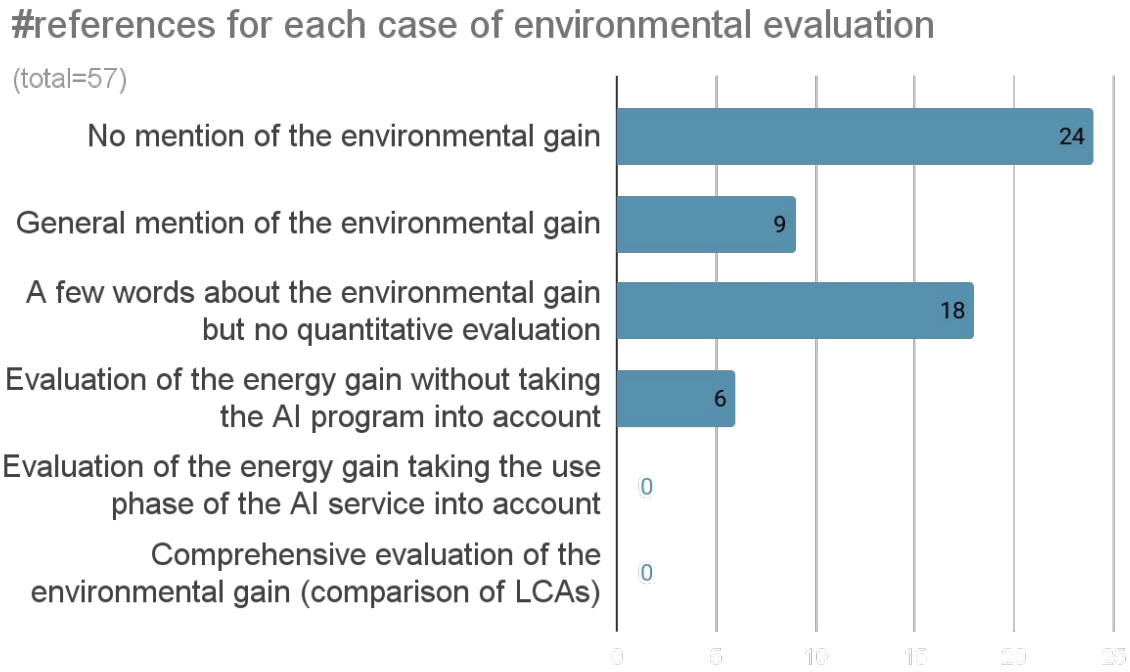


par exemple bâtiment avec et sans gestion intelligente de l’énergie

étude de cas : «Tackling Climate Change with Machine Learning» (Rolnick et al., 2019)

(Ligozat et al, 2021)

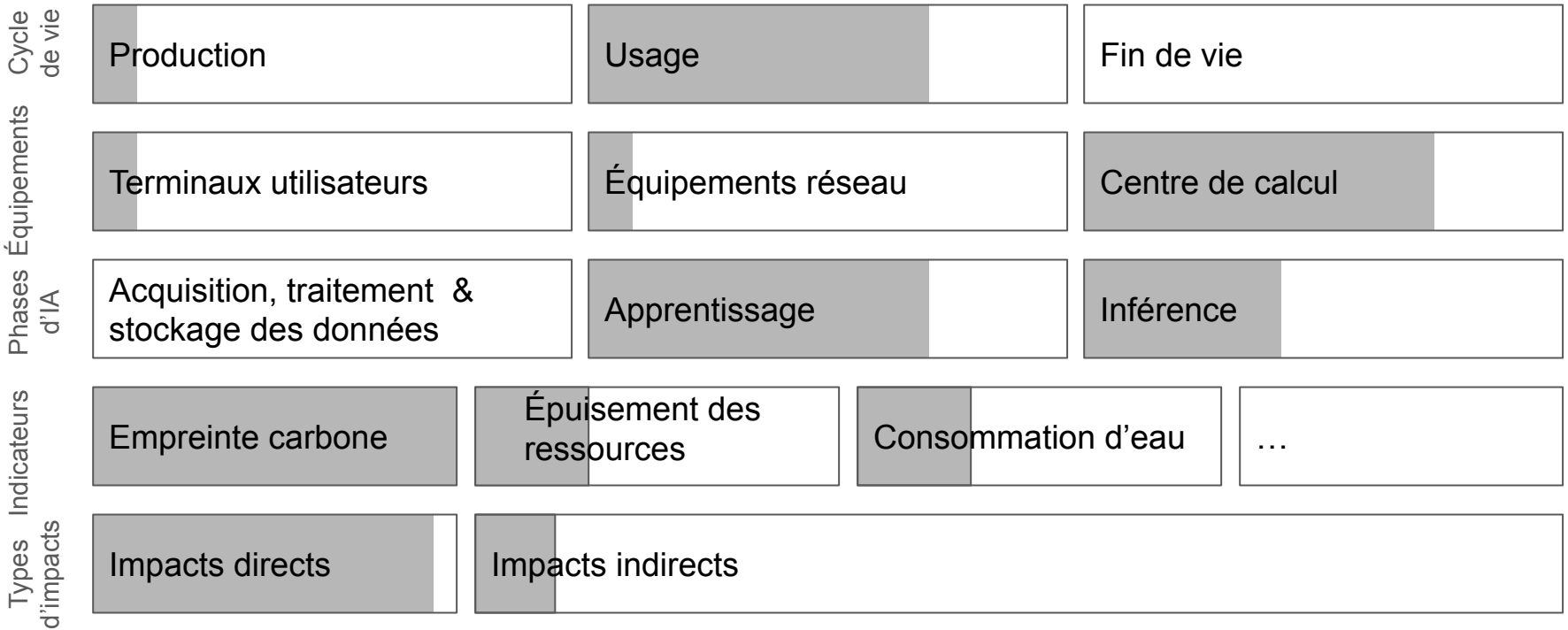
Évaluations dans applications de (Rolnick et al., 2019)



Source : (Ligozat et al., 2021)

Les bénéfices de l'IA pour les autres secteurs ne sont pas clairs

Ce qu’on calcule actuellement



IA responsable ?

- (Schwartz et al., 2020) proposent **Red** vs **Green** AI
-

(Dilhac et al., 2018)
  - les systèmes d'IA et équipements associés doivent viser la plus grande efficacité énergétique et minimiser l'empreinte carbone sur l'ensemble de leur cycle de vie, les impacts sur les écosystèmes et la biodiversité…
- Rapport Villani (2018)
  - (...) l'IA peut entraîner de nombreux effets rebonds. Ainsi, l'IA peut nous éviter de repenser nos modes de croissance, de consommation et de mesure des richesses produites, et nous amener à consommer tout autant, voire plus qu'auparavant

Spécification AFNOR 2024 IA frugale

Discussions sur :

- périmètre de la spécification (à qui s’adresse-t-elle)
- définition de frugalité (vs efficience): redéfinition des besoins et usages
    - service frugal : inclut IA nécessaire + usages et besoins questionnés et visent à rester dans limites planétaires

Évaluation : effets de 1er ordre (multi-indicateurs et multi-phases du cycle de vie) mais aussi 2e et 3e ordre

	Définition	Notions connexes	Raisonnement	Approche	Précisions
Efficience	Aptitude à optimiser les moyens alloués pour atteindre un résultat défini	Efficacité, optimisation	En relatif/par unité d'usage Le besoin prime : optimisation d'une solution jugée celle répondant le mieux au besoin	Recherche d'un optimum local ou d'un compromis sur un niveau de résultat fortement contraint	Prise en compte des effets de premier ordre pour les minimiser Prise en compte des parties prenantes de l'IA
Frugalité	Aptitude à se contenter d'un niveau de résultat jugé suffisant en redéfinissant les usages et les besoins	Sobriété (ou *Sufficiency* [10] en anglais)	En global La contrainte sur les ressources prime : recherche de la solution utilisant le moins de ressources possible et apportant une réponse satisfaisante au besoin	Recherche d'un optimum global ou d'un compromis large sur un niveau de résultat, ce qui nécessite d'élargir ou d'assouplir le besoin	Prise en compte des effets de premier ordre et de second ordre pour minimiser les impacts environnementaux négatifs Prise en compte de tous les acteurs au-delà des seules parties prenantes de l'IA

Spécification AFNOR 2024 IA frugale

Évaluation

- effets de 1er ordre (multi-indicateurs et multi-phases du cycle de vie)
  - suivant normes ACV ISO, recommandation ITU-T L.1410 et RCP (Référentiel par Catégorie de Produit) Services numériques
  - cf. outil MLCA (Morand et al., 2024)

- mais aussi 2e et 3e ordre
  - suivant recommandation ITU-T L .1480

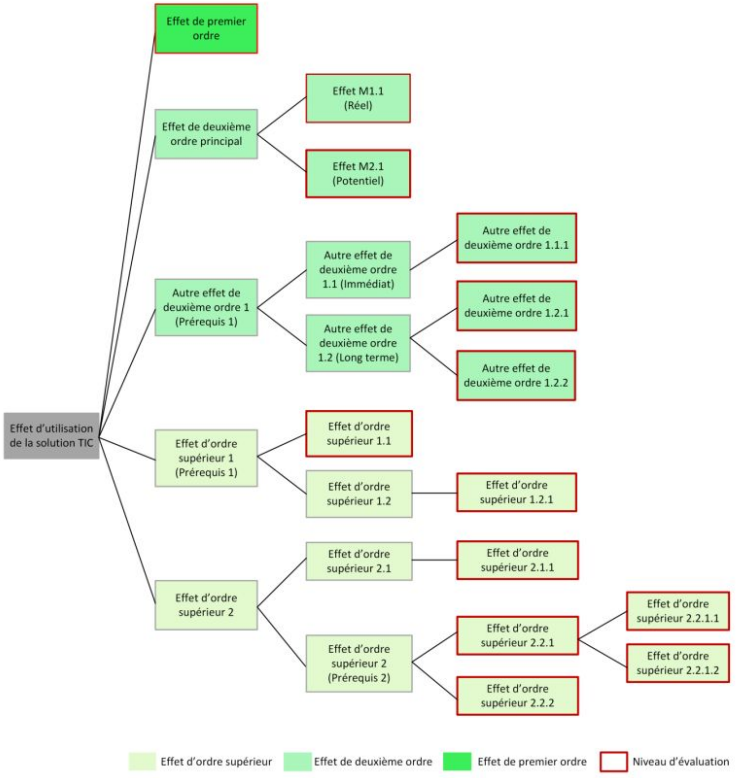


Figure 5 — Arbre de conséquences où l'utilisation du service d'IA entraine sur chaque effet une action ou événement qui a une incidence sur les impacts environnementaux

Quelle place pour l’IA dans un monde soutenable ?

Utilisation raisonnée de l’IA

Prendre en compte les impacts environnementaux impacts directs et indirects lors de déploiement de systèmes d’IA. Mais :

Complexité de l’évaluation

- difficultés méthodologiques, techniques, de mise à jour…

Limites de la quantification

- attention aux résultats hors contexte, aux “indicateurs d’efficacité”...

Réfléchir de façon systémique et interdisciplinaire

Nombreuses initiatives pour réfléchir à la place de l'IA et du numérique

Recherche

- Observatoire environnemental de l'IA, ENS
- Équipes dédiées comme ADN à Grenoble

Entreprises

- Coalition for Sustainable AI
- Hub France IA

Collectifs militants

- Collectif marseillais *Le Nuage était sous nos pieds* : analyse les impacts sociaux, écologiques et politiques des infrastructures du numérique à Marseille
- Opposition au supercalculateur pour l'IA dans la région de Grenoble

Institutionnelles

- Référentiel IA frugale de l'AFNOR
- Fiche pratique : « Achats responsables en intelligence artificielle » DINUM & Ecolab
- Standard européen en cours d'élaboration Sustainable AI