



Impacts environnementaux du Numérique

L'insoutenable Matérialité du Virtuel

Sylvain Bouveret

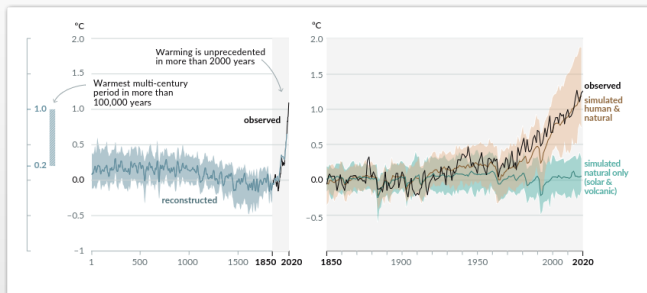
LIG, Ensimag-Grenoble INP, Ecoinfo

Conférence des Amis du Museum de Grenoble, 29 avril 2026

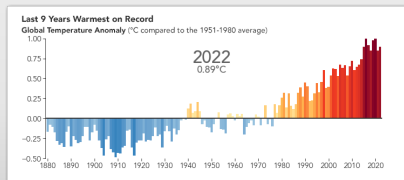




L'anthropocène



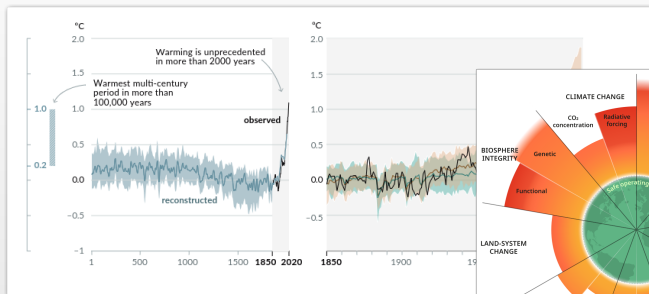
Source : IPCC WG1, 2021



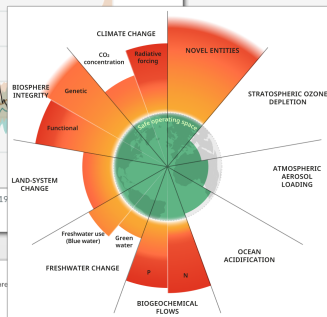
Source : <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>



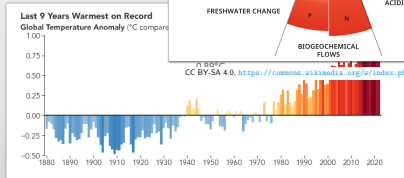
L'anthropocène



Source : IPCC WG1, 2021



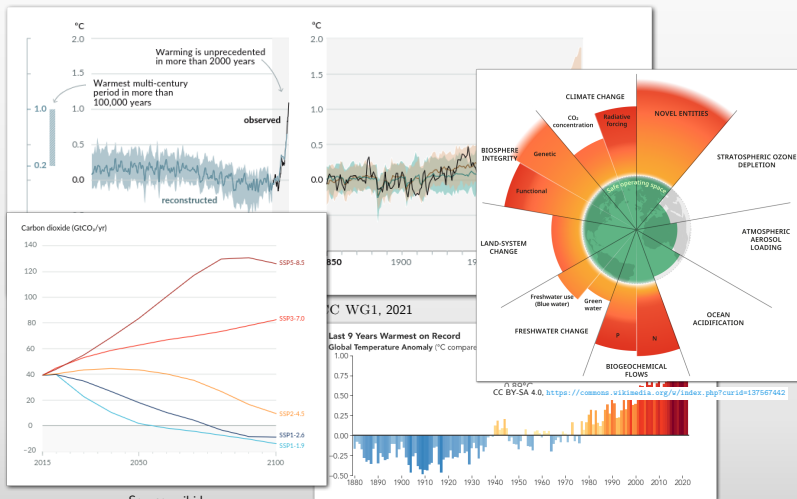
CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=137567442>



Source : <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>



L'anthropocène



Source : ibid.

Source : <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>



Le numérique

- **Stratégies** : atténuation et adaptation



Le numérique

- **Stratégies** : atténuation et adaptation
- Dans les deux cas : **place du numérique** ?



Le numérique

- **Stratégies** : atténuation et adaptation
- Dans les deux cas : **place du numérique** ?

« Digitalisation can enable emission reductions, but can have adverse side effects unless appropriately governed. (high confidence) » IPCC WG2, 2022, p11



Le numérique

- **Stratégies** : atténuation et adaptation
- Dans les deux cas : **place du numérique** ?

« Digitalisation can enable emission reductions, but can have adverse side effects unless appropriately governed. (high confidence) » IPCC WG2, 2022, p11

Existe-t-il un numérique compatible avec les enjeux de soutenabilité ? Si oui, quelle forme ce numérique peut-il prendre et dans quelles trajectoires soutenables peut-il s'inscrire ?



Pour s'échauffer un peu...

Question interactive

À votre avis, quelle part approximative des émissions de Gaz à Effets de Serre (GES) mondiales le numérique représente-t-il ?



Pour s'échauffer un peu...

Question interactive

À votre avis, quelle part approximative des émissions de Gaz à Effets de Serre (GES) mondiales le numérique représente-t-il ?

Numérique et environnement : quelles trajectoires pour demain ?

À mesure que le numérique s'impose dans nos vies, son impact environnemental devient une question de société. Depuis les équipements personnels jusqu'aux réseaux et centres informatiques, chaque brique de cette infrastructure numérique contribue aux émissions de gaz à effet de serre (GES). Et cette contribution est loin d'être négligeable : on estime aujourd'hui que la **part du numérique dans les émissions mondiales de gaz à effet de serre avoisine les 4 %, et pourrait atteindre 6 à 8 % d'ici 2030** si aucune action n'est mise en place.

Source <https://les-economistes.fr/numerique-gaz-effet-serre/> (2025)

3,7 %

c'est la part du numérique dans les émissions mondiales

Publication: Measuring the Emissions and Energy Footprint Implications for Climate Action



views
2,015



Abstract

Digitalization is increasing and resulting in growth in greenhouse gas emissions. International Telecommunication Union (ITU) population are now online. Information and communication technology (ICT) sector's share of global carbon emissions vary across the literature ranging from 1.5 to 4 percent. Based on the data and estimates in this report at least 1.7 percent of global emissions stem from the ICT sector. Meanwhile, one-third of the world's population, or 2.8 billion people, remain unconnected to the internet. The large

Source <https://theshiftproject.org/publications/pour-une-sobriete-numerique/> (2018)

Source <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/a8feecdd-5f79-412a-834f-6f45903e18a5> (2024)



Menu du jour

Dans cette présentation :

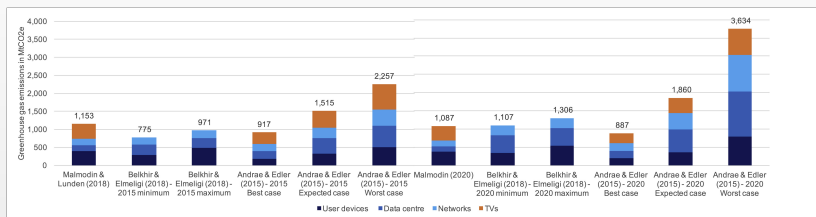
- 1 | Les impacts environnementaux globaux du numérique
 - Quelques chiffres
 - Pourquoi l'évaluation est compliquée
- 2 | La matérialité derrière le numérique, par phase du cycle de vie
 - Extraction
 - Fabrication
 - Usage
 - Fin de vie (un peu)
- 3 | Numérique et soutenabilité : discussion

Impacts globaux

Le numérique, ça pollue combien ?



Numérique dans le monde

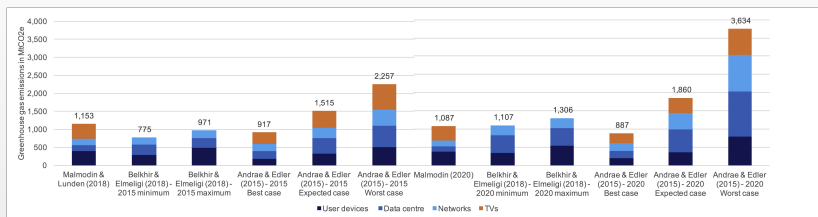


Source : FREITAG et al., 2021

Note : Émissions mondiales (2021) \approx 52 Gt CO₂e / an



Numérique dans le monde



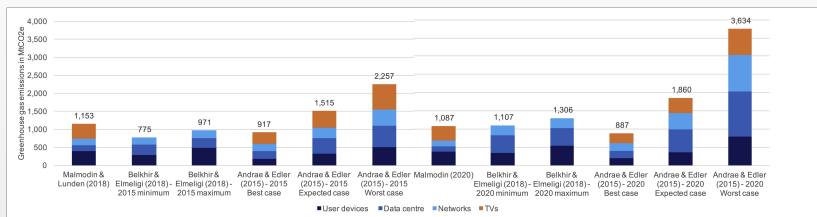
Source : FREITAG et al., 2021

Note : Émissions mondiales (2021) \approx 52 Gt CO₂e / an

« [We estimate] the carbon footprint for ICT, including TVs and other consumer electronics, at 1,2 – 2,2 Gt CO₂e (2.1 % – 3.9 %) of global GHG emission in 2020 with ca. 30 % coming from embodied emissions and 70 % from use phase emissions. We stress once more that these are **rough estimates** with a **significant degree of uncertainty**. »



Numérique dans le monde



Source : FREITAG et al., 2021

Note : Émissions mondiales (2021) \approx 52 Gt CO₂e / an

- \approx contribution de l'aviation au forçage radiatif (3,8 %)
- \approx 2-3 \times la France



Le numérique...

Pourquoi tant d'incertitudes ?



Le numérique...

Pourquoi tant d'incertitudes ?

Attendez... Le numérique, c'est quoi au fait ?



Le numérique...

Pourquoi tant d'incertitudes ?

Attendez... Le numérique, c'est quoi au fait ?

Question interactive

Une voiture électrique est-elle un objet numérique ?



Le numérique, c'est quoi ?

- La plupart des études s'appuient sur une définition de l'OCDE (ISIC Rev. 4, 2007)

Section C - Manufacturing

- Manufacturing of electronic components and boards
- Manufacture of computers and peripheral equipment
- Manufacture of communication equipment
- Manufacture of consumer electronics
- Manufacture of magnetic and optical media

La fabrication des produits utilisés dans la section J est intégrée

Section J - Information & Communication

- Publishing of books, periodicals and other publishing activities
- Software publishing
- Motion picture, video and television programme activities
- Sound recording and music publishing activities
- Radio broadcasting
- Television programming and broadcasting activities
- Telecommunications
- Computer programming, consultancy and related activities
- Data processing, hosting and related activities; Web portals
- News agency activities
- Other information service activities n.e.c.

Section G - Wholesale and retail trade

- Wholesale of computers, computer peripheral equipment and software
- Wholesale of electronic and telecommunications equipment and parts

Section S - Other service activities

- Repair of computers and communication equipment



Secteur des TIC



Secteur des contenus

} Économie de l'information



Périmètre type de Malmudin et Lunden 2018

Networks

Data centers



Le numérique, c'est quoi ?

- Mais... Cela n'inclut pas la fabrication de tous les composants électroniques **dont la finalité n'est pas le secteur des TIC**
- Pour une voiture : en 2010, env. 35 % du coût lié à l'électronique embarquée (estimation : 50 % en 2030)
- Quasiment plus aucun secteur *économique* ne fonctionne encore sans le numérique...



Le numérique, c'est quoi ?

- Mais... Cela n'inclut pas la fabrication de tous les composants électroniques **dont la finalité n'est pas le secteur des TIC**
- Pour une voiture : en 2010, env. 35 % du coût lié à l'électronique embarquée (estimation : 50 % en 2030)
- Quasiment plus aucun secteur *économique* ne fonctionne encore sans le numérique...

→ Limites des évaluations environnementales :

- un secteur numérique aux frontières floues
- un secteur (donc des émissions) qu'on ne peut pas faire « disparaître » indépendamment du reste de l'économie

Impacts globaux

Le secteur numérique...



Panorama du numérique

La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.



Panorama du numérique

La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Panorama du numérique

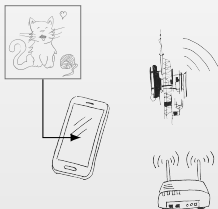
La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Panorama du numérique

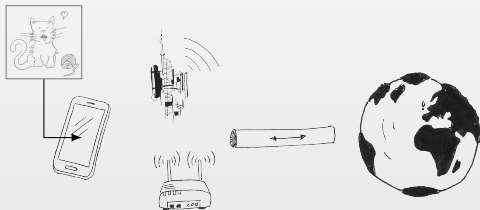
La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Panorama du numérique

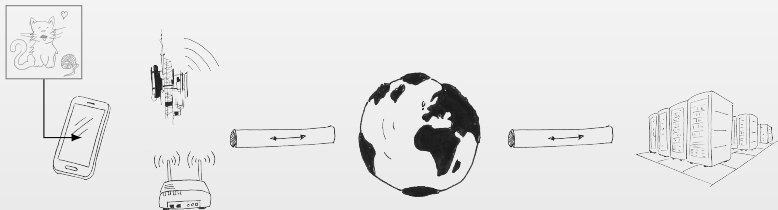
La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Panorama du numérique

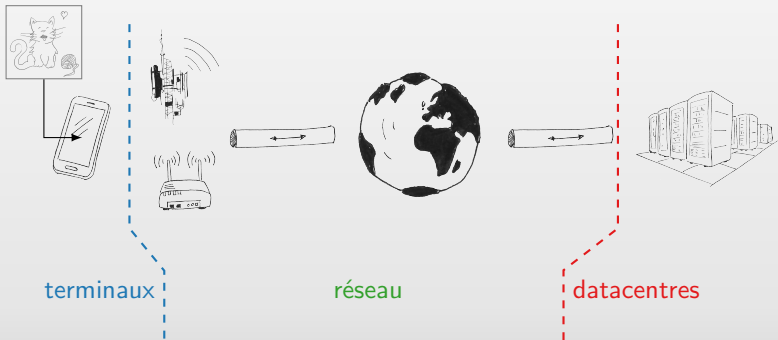
La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Panorama du numérique

La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Numérique = virtuel ?

Terminaux	Réseaux	Datacentres
Smartphones Téléphones mobiles Téléphones filaires Tablettes Ordinateurs portables Ordinateurs de bureau Écrans Vidéo-projecteurs Boitiers TV (décodeur) TVs Consoles de jeu Imprimantes Objets connectés	Box particuliers Box entreprises Point d'accès WIFI Equipements actifs réseau (routeurs) Cœur de réseau boitiers CPL	Serveurs Autres équipements réseaux



Le numérique mondial

Chiffres-clefs pour le monde¹

34 milliards d'équipements, 4.1 milliards d'utilisateur·ices.

1. Frédéric BORDAGE, 2019.



Le numérique mondial

Chiffres-clefs pour le monde ¹

34 milliards d'équipements, 4.1 milliards d'utilisateur·ices.

Terminaux	Smartphones	3,5 milliards
	autres téléphones	3,8 milliards
	disp. affichage	3,1 milliards
	objets connectés	19 milliards [3-30 milliards]
Réseaux	box DSL/fibre	1,1 milliard
	Antennes relais	10 millions
	autres équip. actifs	200 millions
Datacentres	serveurs	67 millions de serveurs

1. Frédéric BORDAGE, 2019.



Le numérique en France

En France ARCEP – ARCOM, 2024...

- 10,3 éq. par foyer (≈ 4.7 / pers.)²
- 87 % des Français-es possédant smartphone ou ordinateur.
- Taux d'équipement : téléphones 95 %, dont smartphones 87 %
- Le numérique facilite la vie de 63 % des Français-es en moyenne, mais seulement de 30 % des non diplômé-es (contre 74 % des diplômé-es du supérieur)

2. OBSERVATOIRE DES TERRITOIRES, 2020.



Les réseaux⁴

3. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.
4. CISCO, 2019.



Les réseaux⁴

- 2019, trafic IP mondial gd public³ (proj.) : 1,66 Zo ($= 1,66 \times 10^{21}$ o)
- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 Zo ($= 1,5 \times 10^{21}$ o)
- 2002 : 3,2 Eo ($\approx 500 \times$ moins)

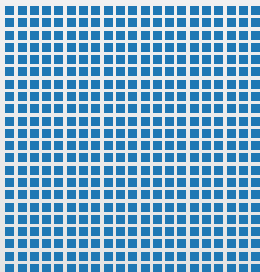
3. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.

4. CISCO, 2019.



Les réseaux⁴

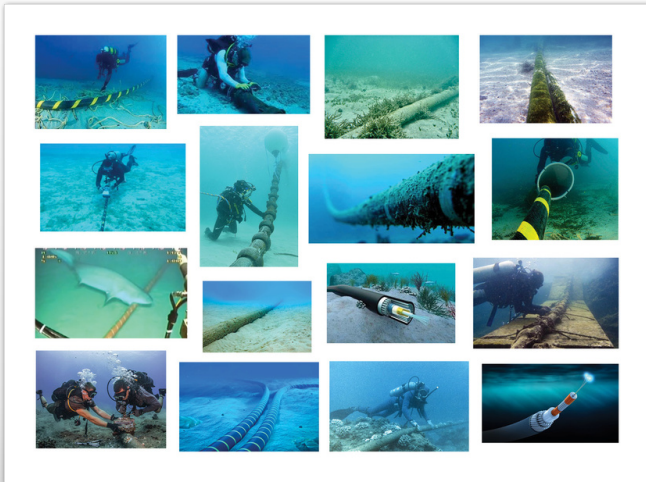
- 2019, trafic IP mondial gd public³ (proj.) : 1,66 Zo ($= 1,66 \times 10^{21}$ o)
- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 Zo ($= 1,5 \times 10^{21}$ o)
- 2002 : 3,2 Eo ($\approx 500 \times$ moins)



3. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.
4. CISCO, 2019.

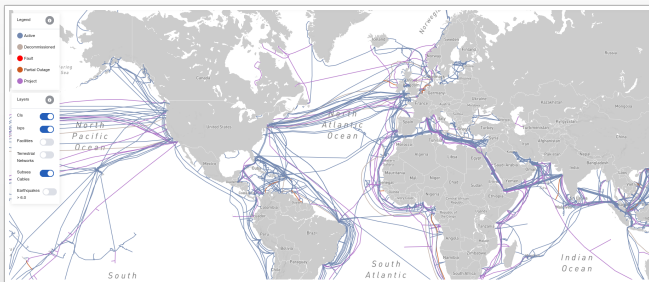


Derrière les réseaux...





Derrière les réseaux...



(source <https://www.infrapedia.com/app>)



Les datacentres



(Source Google Maps)



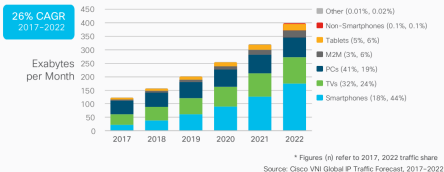
Les datacentres



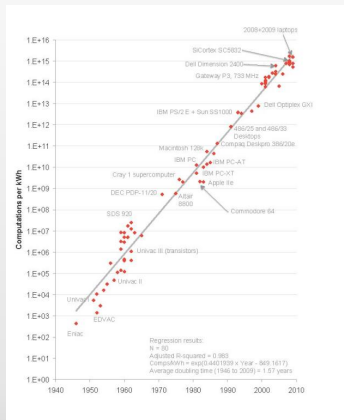
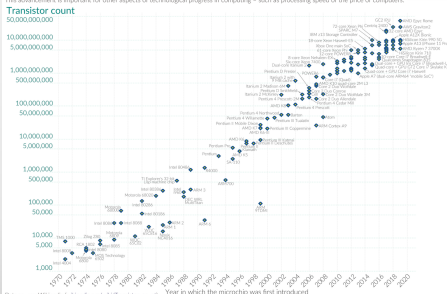
(Source Google Maps)



Une très forte croissance⁵



Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years. Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.



5. Sources : Cisco, OurWorldInData, J.Koomey

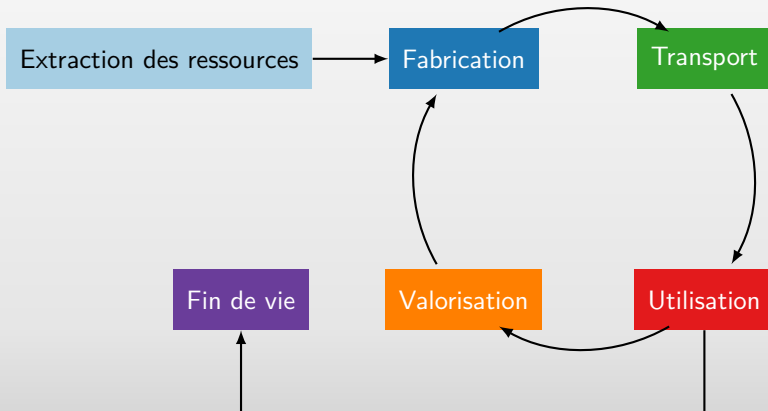
Le cycle de vie

Les impacts derrière les étapes du cycle de vie



Cycle de vie et impacts

Pour bien comprendre les impacts du numérique, il faut revenir aux différentes étapes du **cycle de vie**.





Impacts par phase

Question interactive

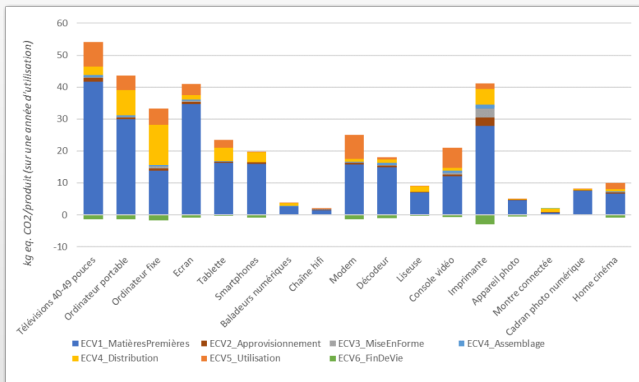
À votre avis, parmi différentes phases du cycle de vie simplifié :

- extraction,
- fabrication,
- transport,
- utilisation,
- fin de vie,

laquelle est la plus impactante pour un dispositif numérique ?



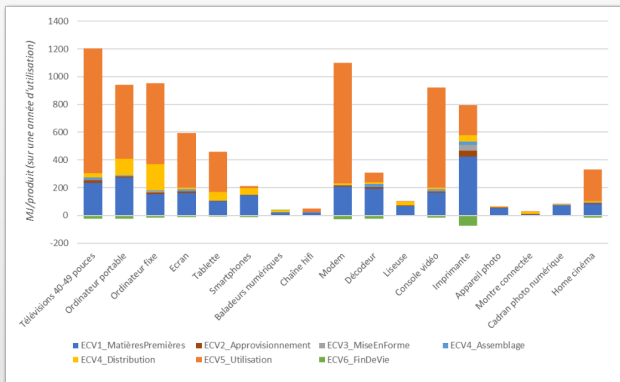
Émissions GES : chiffres de l'ADEME ⁶



6. LHOTELLIER et al., 2018.



Et l'énergie ?⁷

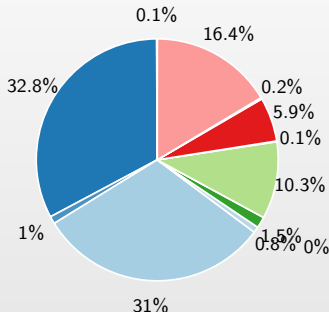


7. LHOTELLIER et al., 2018.



Et au niveau européen⁸ ?

- Fabrication terminaux
- Distribution terminaux
- Utilisation terminaux
- Fin de vie terminaux
- Fabrication Eq. Réseau
- Distribution Eq. Réseau
- Utilisation Eq. Réseau
- Fin de vie Eq. Réseau
- Fabrication datacenters
- Distribution datacenters
- Utilisation datacenters
- Fin de vie datacenters

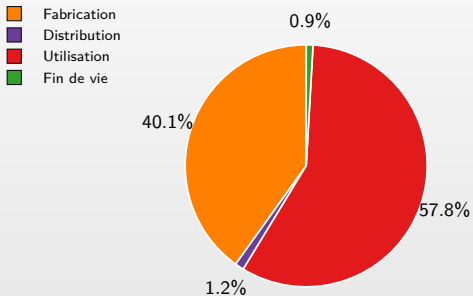


NB : Durée de vie variable selon les équipements (e.g 4 ans pour les laptops)

8. F. BORDAGE et al., 2021.



Et au niveau européen⁹ ?



NB : Durée de vie variable selon les équipements (e.g 4 ans pour les laptops)

9. F. BORDAGE et al., 2021.



Impacts par phase

Impacts par phase du cycle de vie : que conclure de tout ça ?



Impacts par phase

Impacts par phase du cycle de vie : que conclure de tout ça ?

- Il est très difficile de donner une réponse définitive à la question
- Dépend des hypothèses utilisées par les études :
 - Indicateur utilisé (GES, eau, épuisement des ressources, toxicité...)
 - Périmètre géographique des équipements utilisés
 - Modèle production (émissions territoriales) vs consommation (empreinte)
- Cependant...
 - Les deux phases les plus émissives sont la fabrication (incl. extraction) et l'usage
 - Entre ces deux phases, c'est difficile de conclure car cela dépend des paramètres étudiés et de l'attribution des impacts
 - L'impact principal vient des **terminaux** et **datacentres**
 - En consommation d'énergie, c'est l'usage qui gagne
 - En émissions de GES, c'est dépendant du mix énergétique

Extraction des matériaux





Qu'y a-t-il dans votre smartphone ?

Question interactive

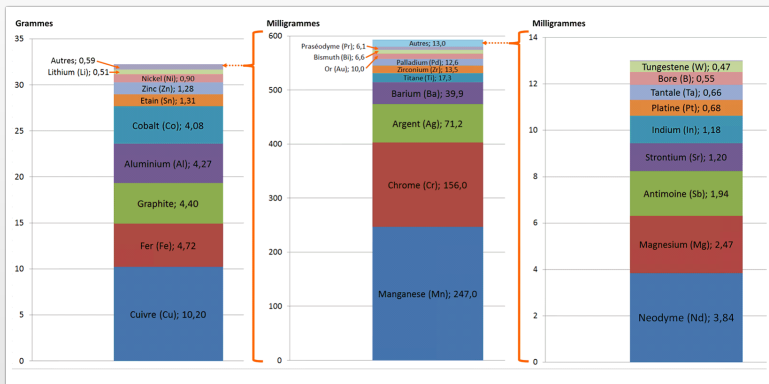
Parmi les éléments chimiques, on compte 86 métaux et 7 métalloïdes.

En 1950, un téléphone fixe contenait environ 12 métaux différents.

Combien y en a-t-il environ dans un Smartphone de 2022 ?



Les matériaux des Smartphones



Source : SÉNAT, 2016, d'après Orange.



Les matériaux des Smartphones

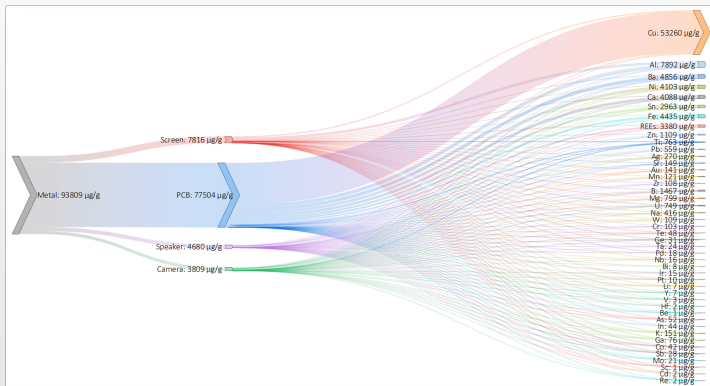
« Un recensement exhaustif des matières fait apparaître plus d'une cinquantaine d'éléments du tableau périodique de Mendeleïev dans la composition d'un téléphone portable. »

(NB : je compte 51 éléments métalliques et métalloïdes dans le tableau indiqué dans la référence)

Source : SÉNAT, 2016, d'après Orange.



Les matériaux des Smartphones



Source : GÓMEZ et al., 2023



Les matériaux des Smartphones

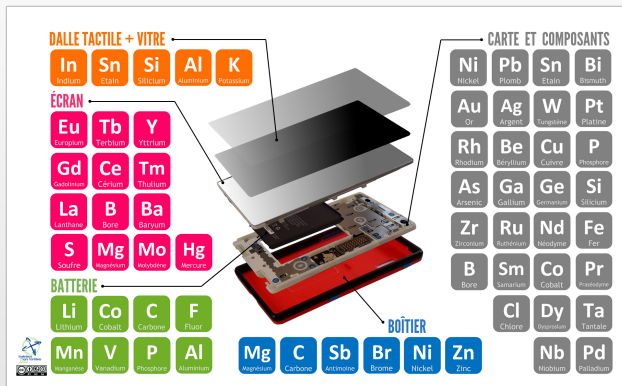
« The major mass fractions of a mobile phone are metals, plastics, ceramic and other trace materials, with production utilising up to 64 elements. »

« Copper is the metal found with the highest concentration in all the components of EoL-MPs, accounting for approximately 58 % of the total metal content in a mobile phone »

Source : GÓMEZ et al., 2023



Les matériaux des Smartphones



Source : SYSTEXT, 2017



Les matériaux des Smartphones

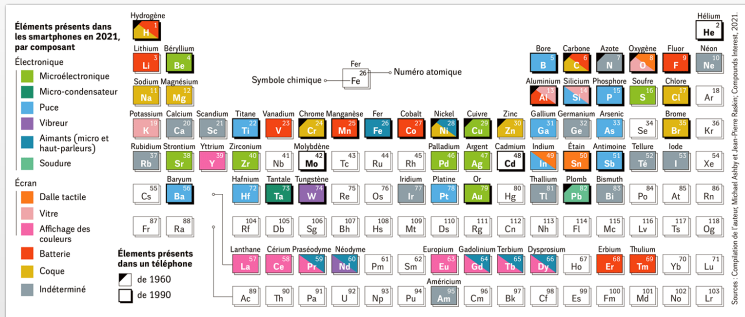
« Il est impossible de disposer d'une information précise sur les métaux contenus dans un appareil, que ce soit pour un modèle en particulier, ou pour une gamme d'appareils. »

« Le portrait que SystExt a dressé n'est pas celui d'un modèle de téléphone particulier mais bien celui d'un "smartphone moyen", qui contient probablement la majorité des 52 substances identifiées et décrites. »

Source : SYSTEXT, 2017



Les matériaux des Smartphones



(64 éléments recensés dans le tableau)

Source : *Le Monde Diplomatique*, octobre 2021.



Les métaux des Smartphones

Pourquoi tant de métaux ? Quelques exemples :

- Indium + étain : écrans capacitifs (tactiles)
- Gallium + autre composé (couleur) : LEDS
- Néodyme, praséodyme, terbium et dysprosium + tungstène : vibreurs
- Lithium + cobalt : batteries
- ...



Les métaux des Smartphones

Pourquoi tant de métaux ? Quelques exemples :

- Indium + étain : écrans capacitifs (tactiles)
- Gallium + autre composé (couleur) : LEDS
- Néodyme, praséodyme, terbium et dysprosium + tungstène : vibreurs
- Lithium + cobalt : batteries
- ...

En outre, les métaux ne représentent que 40 % à 60 % de la masse des éléments d'un smartphone (autres éléments : plastiques et matières synthétiques 30 % à 50 %, verre et céramique 10 % à 20 %)



Les matériaux des smartphones

Que peut-on conclure sur les matériaux ?

- Il est difficile de trouver une information précise
- En première approximation : un smartphone contient une grande partie des 80 éléments chimiques stables connus dans la nature
- La plupart des métaux sont présents en très petite quantité et mélangés
- Le métal le plus présent est le cuivre (mais en valeur économique, c'est l'or)
- C'est la carte électronique qui concentre le plus d'éléments (en nombre)



Le matériel derrière l'IA

Parce qu'il n'y a pas que les smartphones dans la vie...

- La composition des cartes électroniques implique plus d'une trentaine de métaux (FALK et al., 2025 ; SYSTEXT, 2017)
- Futur centre de données d'OpenAI en Norvège (Stargate Norway) : entre 100 000 et 250 000 cartes GPU prévues¹⁰
- Jean Zay : 90000 cœurs CPU, et plus de 3000 cartes GPU¹¹

10. <https://openai.com/fr-FR/index/introducing-stargate-norway/>

11. <http://www.idris.fr/media/jean-zay/orap-2021-12-09.pdf>



Le matériel derrière l'IA

Parce qu'il n'y a pas que les smartphones dans la vie...

- La composition des cartes électroniques implique plus d'une trentaine de métaux (FALK et al., 2025 ; SYSTEXT, 2017)
- Futur centre de données d'OpenAI en Norvège (Stargate Norway) : entre 100 000 et 250 000 cartes GPU prévues¹⁰
- Jean Zay : 90000 cœurs CPU, et plus de 3000 cartes GPU¹¹

- Des enjeux majeurs d'**extraction** et de **fabrication**

10. <https://openai.com/fr-FR/index/introducing-stargate-norway/>

11. <https://www.idris.fr/media/jean-zay/orap-2021-12-09.pdf>



Extraction...



Chino Copper Mine (Nouveau mexique)

diamètre 2,8km

profondeur 410m

(source : Marshman sur Wikipedia – CC-BY-SA)



À propos d'extraction

La réalité de l'industrie minière :



À propos d'extraction

La réalité de l'industrie minière :

- **Un élément ne se trouve jamais à l'état pur dans la nature :**
 - Concentration infime (ex : 1g/T pour l'or)
 - Cortège d'éléments associés (ex : mercure, arsenic, baryum... pour l'or)



À propos d'extraction

La réalité de l'industrie minière :

- **Un élément ne se trouve jamais à l'état pur dans la nature** :
 - Concentration infime (ex : 1g/T pour l'or)
 - Cortège d'éléments associés (ex : mercure, arsenic, baryum... pour l'or)
- **Le processus de récupération du métal est très laborieux et ne se résume pas à l'extraction** :
 - Concentration, puis extraction chimique, puis raffinage
 - Chacune de ces étapes est extrêmement **énergivore**
 - Chacune de ces étapes demande énormément d'**eau**
 - Chacune de ces étapes est extrêmement **polluante**



À propos d'extraction

La réalité de l'industrie minière (suite) :

- **L'industrie minière produit une quantité hallucinante de déchets**
 - La plupart de ces déchets sont extrêmement toxiques
 - Il est impossible de dépolluer un site minier



À propos d'extraction

La réalité de l'industrie minérale (suite) :

- **L'industrie minérale produit une quantité hallucinante de déchets**
 - La plupart de ces déchets sont extrêmement toxiques
 - Il est impossible de dépolluer un site minier
- **Les impacts unitaires sont de plus en plus importants**
 - La concentration des gisements baisse
 - l'énergie + l'eau + les produits toxiques à utiliser sont de plus en plus importants

...Et ça, c'est sans compter les catastrophes entraînées par les accidents...

[https:](https://phoneimpact.inria.fr/Ressources/Sources/Sources_malus.html#malus-catastrophe)

[//phoneimpact.inria.fr/Ressources/Sources/Sources_malus.html#malus-catastrophe](https://phoneimpact.inria.fr/Ressources/Sources/Sources_malus.html#malus-catastrophe)



À propos d'extraction

« Depuis l'antiquité, l'activité minière n'a été rentable que parce qu'on ne tient pas compte de son coût réel. »

« Il est clair aux yeux de tous que les dommages causés par les mines sont plus grands que la valeur des métaux produits par les mines » (Georgius Agricola, 1555)

(2 citations extraites de CRAWFORD, 2022)



À propos d'extraction

« Depuis l'antiquité, l'activité minière n'a été rentable que parce qu'on ne tient pas compte de son coût réel. »

« Il est clair aux yeux de tous que les dommages causés par les mines sont plus grands que la valeur des métaux produits par les mines » (Georgius Agricola, 1555)

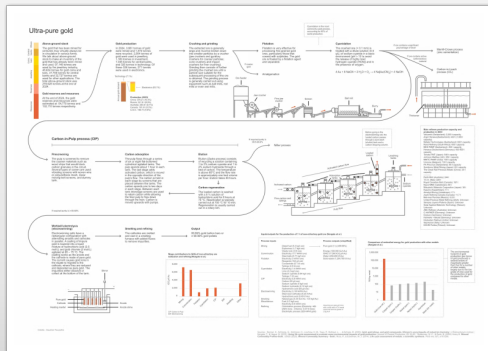
(2 citations extraites de CRAWFORD, 2022)

- Sur la question minière : Aurore Stéphant
(<https://www.youtube.com/watch?v=xx3PsG2mr-Y>,
<https://www.youtube.com/watch?v=i8RMX80DWQs>)
- Sur les matériaux de la transition énergétique : Olivier Vidal
<https://www.youtube.com/watch?v=TxT7HD4rzP4>



Au-delà des métaux...

- ...d'énormes enjeux de **pureté**
- cf le cas de l'or
- <https://gauthierroussilhe.com/ressources/l-or-ultra-pur>

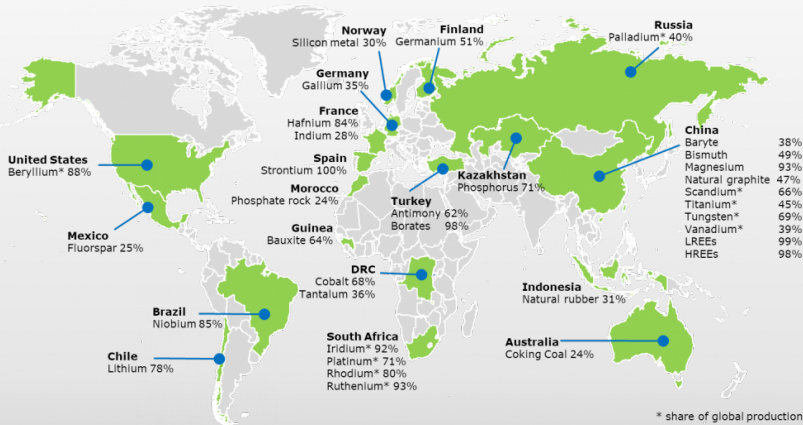


Source Gauthier Roussilhe



Géographie de l'extraction...

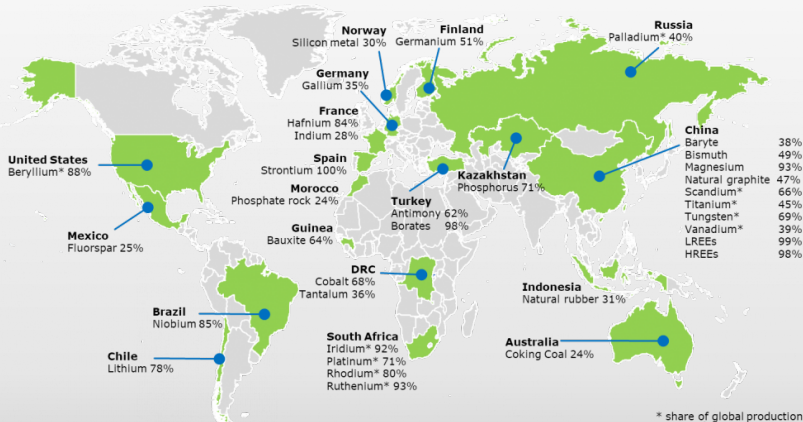
Des origines géographiques diverses (EUROPEAN COMMISSION, 2018).





Géographie de l'extraction...

Des origines géographiques diverses (EUROPEAN COMMISSION, 2018).



Avec de nombreux problèmes géopolitiques et humains à la clef...

Fabrication





Focus : les semi-conducteurs

- Très petit nombre d'acteurs (Samsung / TSMC pour le 7nm)
- Processus d'extrême précision → matériaux ultra-purs
- → utilisation massive de produits chimiques et d'eau

12. TSMC, 2019.

13. DUTERME, 2021.



Focus : les semi-conducteurs

- Très petit nombre d'acteurs (Samsung / TSMC pour le 7nm)
- Processus d'extrême précision → matériaux ultra-purs
- → utilisation massive de produits chimiques et d'eau

Focus sur l'eau :

- TSMC (chiffres 2019¹²) – 3 sites principaux à Taiwan :
 - Eau prélevée : $\approx 2\,957\,000$ t par jour
 - Eau consommée : $\approx 150\,000$ t par jour
- Comment l'eau est-elle perdue ? Dans quel état l'eau est-elle rejetée dans l'environnement ?
- → Problème majeur pour Taiwan en 2021¹³

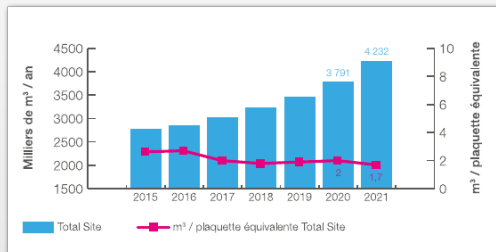
12. TSMC, 2019.

13. DUTERME, 2021.



Semi-conducteurs toujours

Plus proche de nous : ST site de Crolles...



Source : STMICROELECTRONICS, 2021



Semi-conducteurs toujours

Plus proche de nous : ST site de Crolles...

- 4 232 000 m³ d'eau en 2021 ^a
- ≈ 78370 français-es pendant 1 an ^b
- ≈ 7 172 881 kg de blé ^c

« L'eau est principalement utilisée pour les besoins industriels : production d'eau ultra pure pour le rinçage des plaquettes de silicium ; alimentation des laveurs de gaz »

a. STMICROELECTRONICS, 2021.

b. LAO et PORTELA, 2022.

c. source : Office International de l'Eau



Semi-conducteurs toujours

Plus proche de nous : ST site de Crolles...

Questions en suspens :

- S'agit-il de l'eau consommée ou prélevée ? (le rapport stipule : « *Environ 28 % de l'eau consommée est recyclée et réutilisée en interne.* »)
- Comment l'eau disparaît-elle dans le processus ?
- Dans quel état est-elle rejetée ?
- D'où vient l'eau ? (selon le rapport global ST^a : 13 % eaux souterraines ; 87 % réseau d'eau municipal)
- Quels sont les conflits d'usage potentiels ?

a. STMICROELECTRONICS, 2022.

Usage





Phase d'usage d'un équipement

Premiers impacts de la phase d'usage : **consommation d'électricité** et d'**eau**



Phase d'usage d'un équipement

Premiers impacts de la phase d'usage : **consommation d'électricité** et d'**eau**

(c'est en particulier particulièrement saillant dans les datacentres)



Les datacentres...



(Source Google Maps)



Les datacentres...





Consommation des datacentres

Un datacentre, ça consomme, donc...

- ...De l'électricité (pour alimenter les équipements et refroidir)
- ...De l'eau (pour refroidir)
- ...Des équipements électroniques



Consommation des datacentres

Un datacentre, ça consomme, donc...

- ...De l'électricité (pour alimenter les équipements et refroidir)
- ...De l'eau (pour refroidir)
- ...Des équipements électroniques

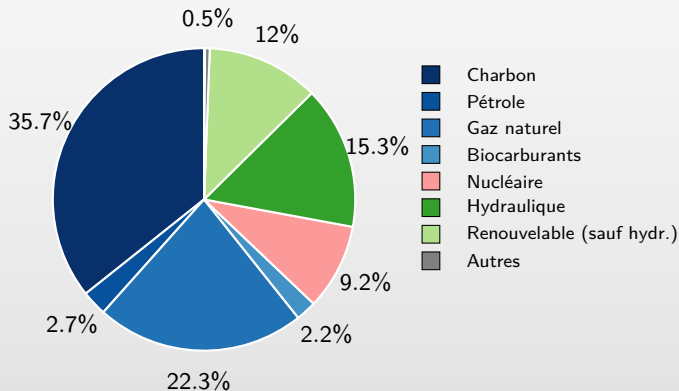
Question interactive

À propos d'électricité : quelle est la source d'énergie la plus utilisée dans le monde pour produire de l'électricité ?



Sources de l'énergie électrique

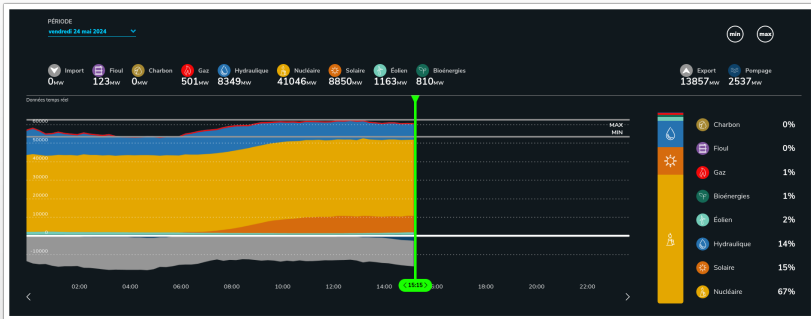
Énergie électrique totale produite en 2022 : 29270 TWh



(source INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022)



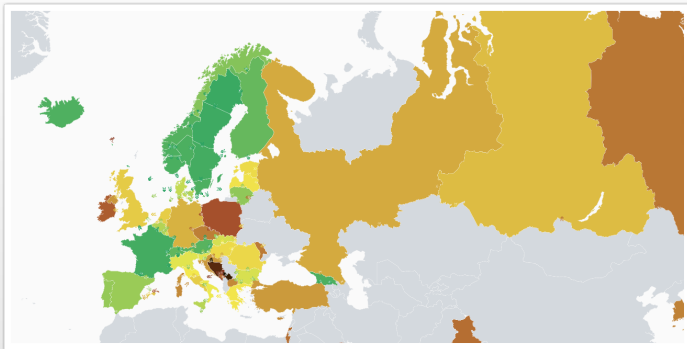
Et en France...



Source <https://www.rte-france.com/eco2mix/> (24 mai 2024)



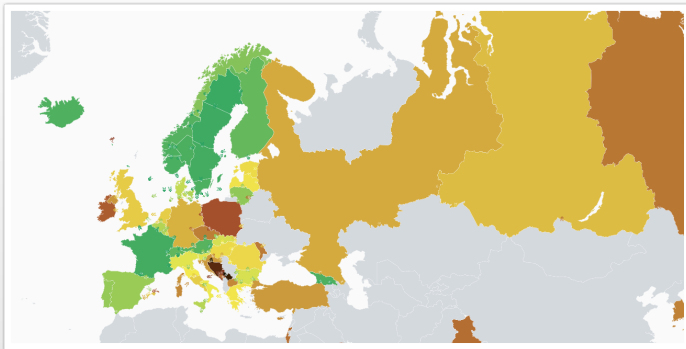
Et en France...



Source <https://app.electricitymaps.com/map> (24 mai 2024)



Et en France...



Source <https://app.electricitymaps.com/map> (24 mai 2024)

- **France** : ≈ 80 g/kWh (chiffre ADEME) ;
- **Monde** : entre 2 g/kWh et 1,9 kg/kWh

→ La **région d'usage** est primordiale !



Consommation des datacentres





Consommation des datacentres



- Monde, en 2022 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022 ; SHIFT PROJECT, 2025) :
 - 530 TWh / 29270 TWh \approx 1,8 % de la consommation électrique mondiale
 - 250 MTeqCO₂ \approx 0,7 % des émissions mondiales



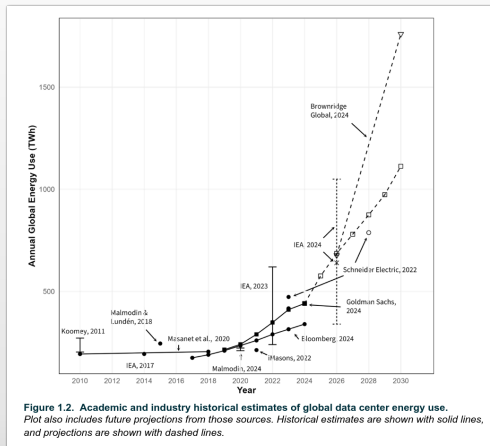
IA et datacentres : tendances

- Part de l'IAgen encore (relativement) faible dans les datacentres
- Mais agit clairement comme un moteur de la croissance
- Avec un rythme de croissance incompatible avec les exigences de décarbonation de la filière électricité

(source SHIFT PROJECT, 2025)



L'IA comme accélérateur



Source : A. SHEHABI et al., 2024



En France maintenant...

Données France, 2024 (ensemble des datacentres) :

- 10 TWh (chiffre RTE)
- \approx 2% de la consommation électrique totale
- 800 MTeqCO₂ (au facteur d'impact moyen ADEME)
- \approx 0,3% des émissions nationales

14. <https://www.rte-france.com/bases-electricite/consommation-electricite/essor-data-centers-france>



En France maintenant...

Données France, 2024 (ensemble des datacentres) :

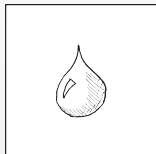
- 10 TWh (chiffre RTE)
- $\approx 2\%$ de la consommation électrique totale
- 800 MTeqCO₂ (au facteur d'impact moyen ADEME)
- $\approx 0,3\%$ des émissions nationales

- Demandes regroupées dans 3 régions essentiellement (IDF, Hauts de France, Marseille), mais l'IA tend à changer la donne
- 4,5 GW d'offres de raccordement par RTE en 2024¹⁴
- au moins autant en cours d'instruction
- NB : 4,5 GW $\approx 10\%$ du pic de consommation d'hier (lundi 27 avril 2026, ≈ 48 GW vers 12h30), $\approx 45 \times$ la puissance électrique de Grenoble

14. <https://www.rte-france.com/bases-electricite/consommation-electricite/essor-data-centers-france>

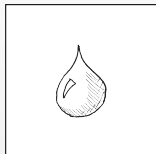


L'eau dans les datacentres





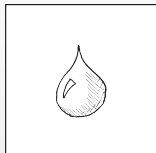
L'eau dans les datacentres



- Evaporative cooling :
 - entre 1L et 9L / kWh
 - 80 % de l'eau « perdue » par évaporation
- entre 300 et 420 millions de m³ consommés dans le monde pour les datacentres
- France (2023) : 681000 m³ (source ARCEP) \approx 13000 Français.es pendant 1 an




L'eau dans les datacentres



- Evaporative cooling :
 - entre 1L et 9L / kWh
 - 80 % de l'eau « perdue » par évaporation
- entre 300 et 420 millions de m³ consommés dans le monde pour les datacentres
- France (2023) : 681000 m³ (source ARCEP) \approx 13000 Français.es pendant 1 an
- Eau en provenance du réseau potable essentiellement
- Des enjeux très différents selon les conditions locales



À Marseille...

Menu  Recherche Lire l'édition du jour Se connecter S'abonner

Politique International Idées et Débats Culture CheckNews Société Enquêtes Environnement Economie Lifestyle Témoignages Ça va m...

Accueil / Environnement

Reportage

Un cinquième data center géant s'installe à Marseille sous un feu de critiques

Craignant une appropriation du réseau électrique, de nombreux habitants et peu d'emplois à la clef, des riverains s'opposent à l'installation d'un nouveau data center dans le port de la cité phocéenne, devenue en quelques années le cœur de l'internet mondial, irrigué par une forêt de câbles sous-marins.

Nos newsletters >

ALERTE LIBÉ Alerte Libé
Les alertes, infos et enquêtes Libé à ne pas manquer

Dimanche 15 juin
Fête des Germaines

ici Télévision Radio

En ce moment : Alerte météo • Surveillance de collège tuée Thématiques Services Radio musicale Partir en week-end

Marseille

Autour du port de Marseille, les data centers poussent vite et leur consommation énergivore inquiète des habitants





Les datacentres, pour résumer...

- Des enjeux globaux (consommation électrique → émissions GES)
- Des enjeux très locaux avec des conflits d'usage :
 - électricité
 - eau
 - mais aussi... foncier et réseau

Usage





De la vie au déchet

- Équipement qui n'est plus utilisé → déchet
- Équipements numériques \subset Déchets d'Équipement Électriques et Électroniques (DEEE)
- Monde (2019) : collecte \approx 17 % (en masse)
- France (2019) : collecte \approx 50 % (en masse)



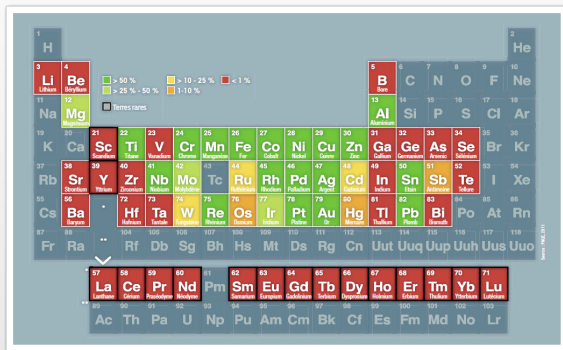
De la vie au déchet

- Équipement qui n'est plus utilisé → déchet
- Équipements numériques \subset Déchets d'Équipement Électriques et Électroniques (DEEE)
- Monde (2019) : collecte \approx 17 % (en masse)
- France (2019) : collecte \approx 50 % (en masse)

Mais pour les dispositifs numériques...



Recyclabilité des matériaux



Source : <https://www.alternatives-economiques.fr/taux-de-recyclage-metaux-monde-0110201662952.html>

+ matériaux en quantité infime + mélangés (métaphore de la ratatouille de Ph. Bihouix)



Les DEEE hors filière

Et quand ce n'est pas collecté ?



Les DEEE hors filière

Et quand ce n'est pas collecté ?

- stocké chez les particuliers
- mis en décharge
- brûlé
- commerce ou traitement illégal...

Discussion

Numérique et soutenabilité, quels enjeux ?



Impacts directs / indirects

- OK, donc le numérique :
 - pollue au niveau global (par ex. émissions de GES, eau, épuisement des ressources abiotiques, etc.)
 - crée des conflits d'intérêt forts au niveau local



Impacts directs / indirects

- OK, donc le numérique :
 - pollue au niveau global (par ex. émissions de GES, eau, épuisement des ressources abiotiques, etc.)
 - crée des conflits d'intérêt forts au niveau local
- Des solutions évidentes :
 - diminuer l'impact de la fabrication
 - augmenter l'efficacité énergétique des dispositifs
 - augmenter le réemploi des dispositifs en fin de vie
 - augmenter la durée de vie des dispositifs
 - ...



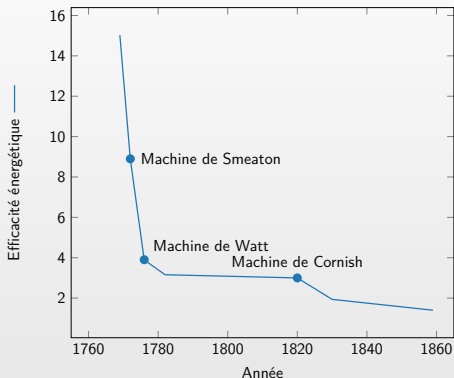
Effet rebond

Question interactive

Avez-vous déjà entendu parler de l'effet rebond et du paradoxe de Jevons ?



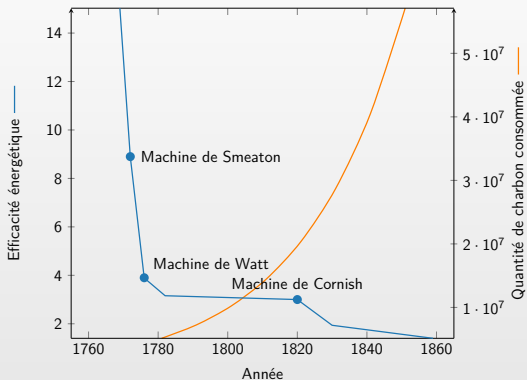
La question du charbon



- Efficacité énergétique exprimée en nombre de livres de charbon nécessaires pour élever 1×10^6 livres d'eau d'un pied (cf JEVONS, 1866 page 128)



La question du charbon



- Efficacité énergétique exprimée en nombre de livres de charbon nécessaires pour élever 1×10^6 livres d'eau d'un pied (cf JEVONS, 1866 page 128)
- Quantité de charbon consommée (UK) exprimée en tonnes (cf ibid. page 238)



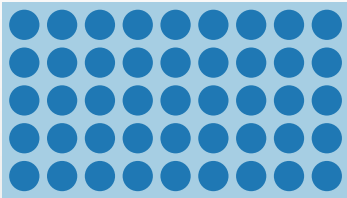
L'effet rebond



Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



L'effet rebond



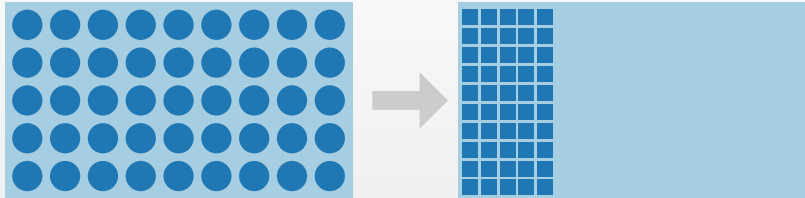
Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



Machin qui consomme de la ressource



L'effet rebond



Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



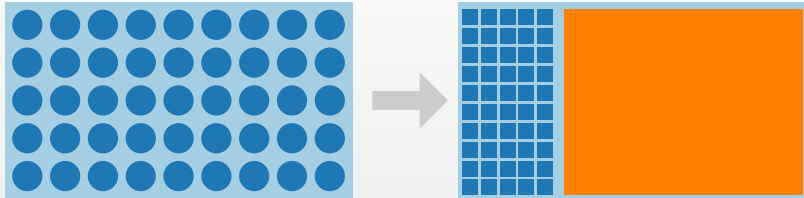
Machin qui consomme de la ressource



Truc plus efficace qui consomme de la ressource



L'effet rebond



Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



Machin qui consomme de la ressource



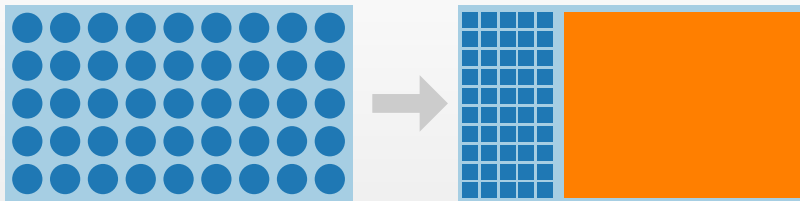
Truc plus efficace qui consomme de la ressource



Ressource libérée



L'effet rebond



Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



Machin qui consomme de la ressource



Truc plus efficace qui consomme de la ressource

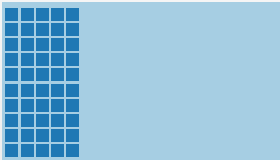


Ressource libérée

Que fait-on de cette ressource libérée ?

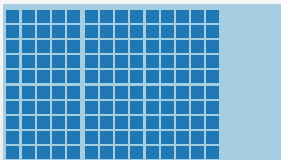


L'effet rebond





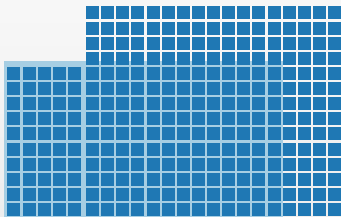
L'effet rebond



- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)



L'effet rebond

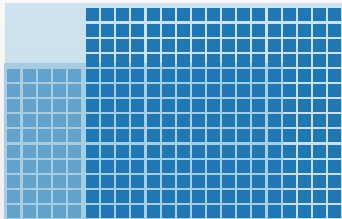


Backfire !

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)



L'effet rebond

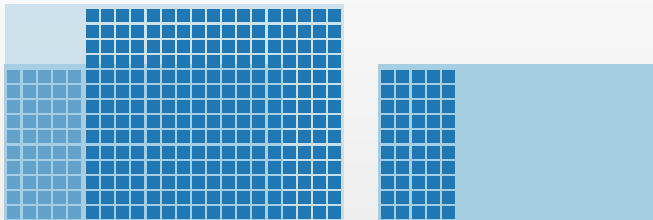


Backfire !

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)



L'effet rebond

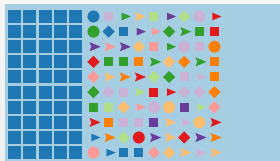
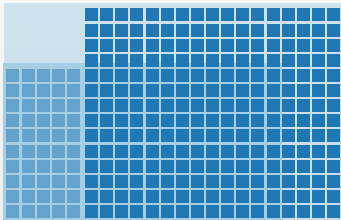


Backfire !

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)



L'effet rebond

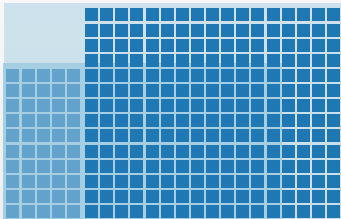


Backfire !

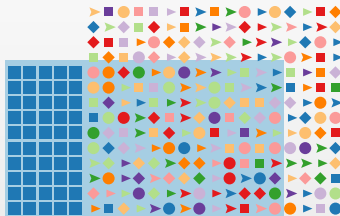
- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)



L'effet rebond



Backfire !

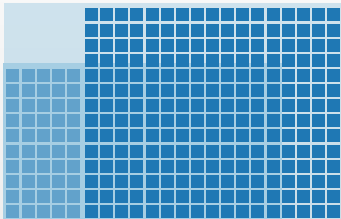


Backfire !

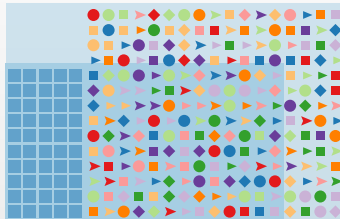
- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)



L'effet rebond



Backfire !



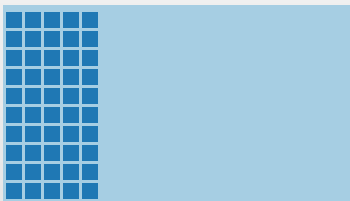
Backfire !

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)



Effet rebond

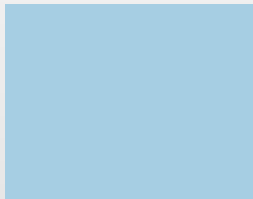
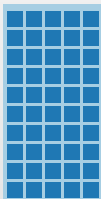
Ce qu'il faudrait (probablement) faire :





Effet rebond

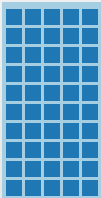
Ce qu'il faudrait (probablement) faire :





Effet rebond

Ce qu'il faudrait (probablement) faire :





Les leviers...

- Travailler sur l'efficacité...
- ...Mais aussi sur la limitation des usages
- (cf norme AFNOR sur l'IA frugale)



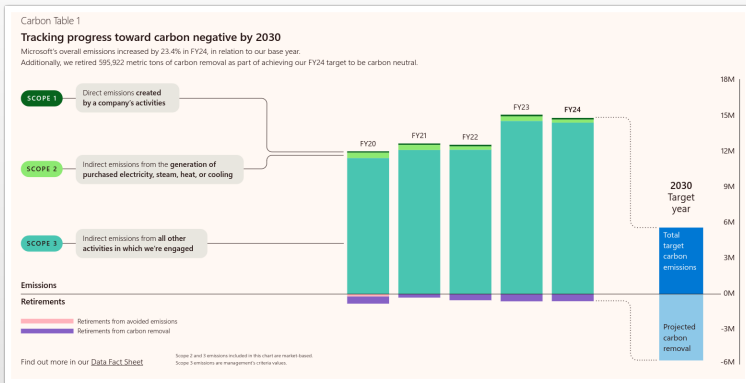
Les leviers...

- Travailler sur l'efficacité...
- ...Mais aussi sur la limitation des usages
- (cf norme AFNOR sur l'IA frugale)

Mais...



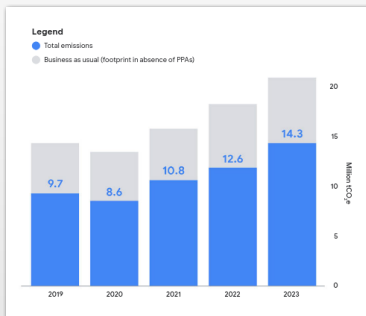
Microsoft



Source : Rapport environnemental Microsoft 2025



Google



Source : Rapport environnemental Google 2024



Pourquoi ces augmentations ?

« [Microsoft] is among those that have set a broad array of climate goals, including targets to become “carbon negative” and achieve “zero waste” by 2030.

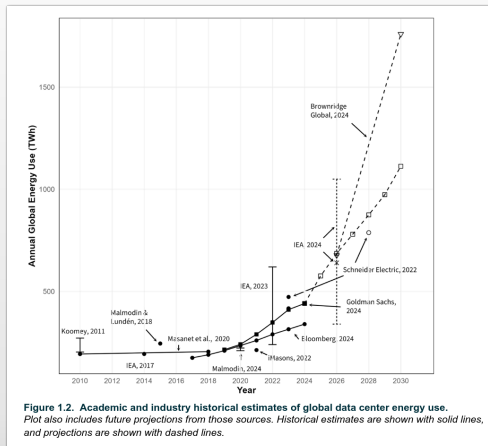
However, those goals have been imperilled by the race to build generative AI, which is power-intensive with large energy and water demands. »

Source : [https:](https://www.ft.com/content/61bd45d9-2c0f-479a-8b24-605d5e72f1ab)

[//www.ft.com/content/61bd45d9-2c0f-479a-8b24-605d5e72f1ab](https://www.ft.com/content/61bd45d9-2c0f-479a-8b24-605d5e72f1ab)



L'IA comme accélérateur



Source : A. SHEHABI et al., 2024



Numérique, limites planétaires

- D'un côté...
 - Des tendances lourdes d'augmentation et d'accélération de consommation dans le numérique
 - Difficile de séparer ce qui relève de l'IA du reste
 - Mais l'observation des tendances et les projections semblent parlantes (cf rapports environnementaux de Microsoft et Google)
 - Et l'IA agit clairement comme un accélérateur



Numérique, limites planétaires

- D'un côté...
 - Des tendances lourdes d'augmentation et d'accélération de consommation dans le numérique
 - Difficile de séparer ce qui relève de l'IA du reste
 - Mais l'observation des tendances et les projections semblent parlantes (cf rapports environnementaux de Microsoft et Google)
 - Et l'IA agit clairement comme un accélérateur
- En face...
 - Une crise environnementale systémique, bien documentée, et d'origine essentiellement humaine
 - Une nécessité absolue de diminuer les consommations et les pollutions



Numérique, limites planétaires

- D'un côté...
 - Des tendances lourdes d'augmentation et d'accélération de consommation dans le numérique
 - Difficile de séparer ce qui relève de l'IA du reste
 - Mais l'observation des tendances et les projections semblent parlantes (cf rapports environnementaux de Microsoft et Google)
 - Et l'IA agit clairement comme un accélérateur
- En face...
 - Une crise environnementale systémique, bien documentée, et d'origine essentiellement humaine
 - Une nécessité absolue de diminuer les consommations et les pollutions

Comment concilier ces deux aspects ?



Quelques propositions

- 1 | Un numérique (en particulier IA) alimenté avec des sources d'électricité renouvelables.



Quelques propositions

- 1 | Un numérique (en particulier IA) alimenté avec des sources d'électricité renouvelables.

Malheureusement les tendances montrent que :

- cela semble pour le moment incompatible avec le rythme de croissance (→ gros investissement dans les énergies fossiles et le nucléaire) ;
- les grands acteurs du numérique préemptent les sources renouvelables



Quelques propositions

- 1 | Un numérique (en particulier IA) alimenté avec des sources d'électricité renouvelables.

Malheureusement les tendances montrent que :

- cela semble pour le moment incompatible avec le rythme de croissance (→ gros investissement dans les énergies fossiles et le nucléaire) ;
- les grands acteurs du numérique préemptent les sources renouvelables

- 2 | Le numérique / l'IA comme moteur de la décarbonation.



Quelques propositions

- 1 | Un numérique (en particulier IA) alimenté avec des sources d'électricité renouvelables.

Malheureusement les tendances montrent que :

- cela semble pour le moment incompatible avec le rythme de croissance (→ gros investissement dans les énergies fossiles et le nucléaire) ;
- les grands acteurs du numérique préemptent les sources renouvelables

- 2 | Le numérique / l'IA comme moteur de la décarbonation.

Malheureusement :

- aucune étude solide ne montre le potentiel de décarbonation des technologies numériques
- les tendances historiques engagent à être sceptique sur cette hypothèse
- le GIEC est dubitatif IPCC WG2, 2022, p11



Quelques propositions

- 1 | Un numérique (en particulier IA) alimenté avec des sources d'électricité renouvelables.

Malheureusement les tendances montrent que :

- cela semble pour le moment incompatible avec le rythme de croissance (→ gros investissement dans les énergies fossiles et le nucléaire) ;
- les grands acteurs du numérique préemptent les sources renouvelables

- 2 | Le numérique / l'IA comme moteur de la décarbonation.

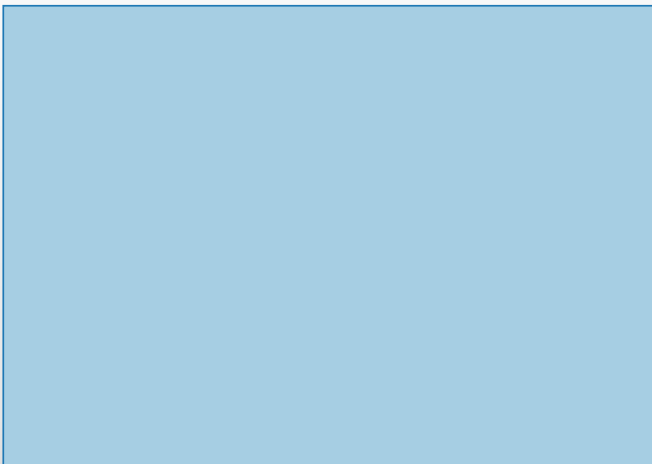
Malheureusement :

- aucune étude solide ne montre le potentiel de décarbonation des technologies numériques
- les tendances historiques engagent à être sceptique sur cette hypothèse
- le GIEC est dubitatif IPCC WG2, 2022, p11

- 3 | Le pari de la technologie pour diminuer nos impacts environnementaux (risqué)

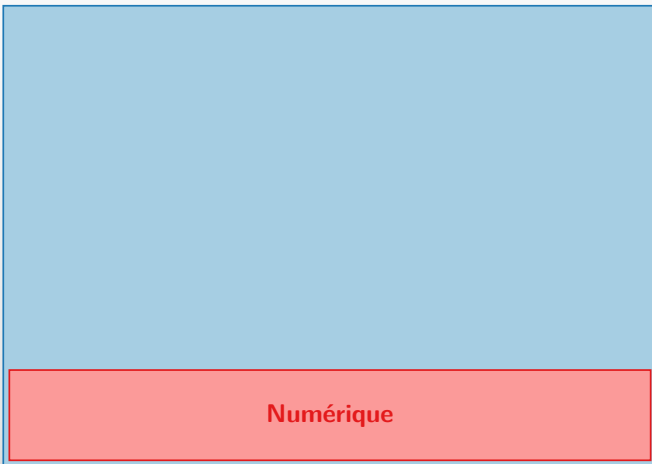


Sinon...





Sinon...



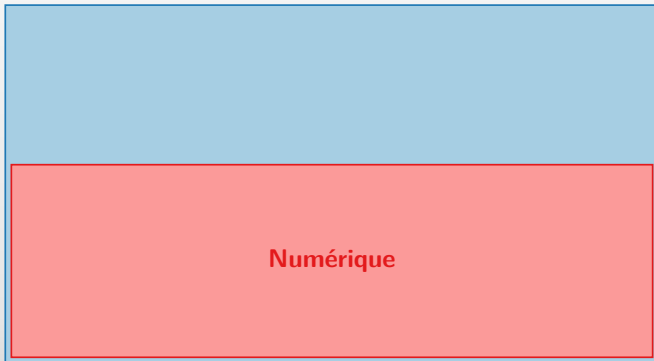


Sinon...

Numérique



Sinon...





Sinon...

Le reste
(nourriture, santé, transports, éducation...)

Numérique



Sinon...

Le reste
(nourriture, santé, transports, éducation...)

Numérique

Qui décide ? Comment ?

Merci de votre attention

Impacts environnementaux du numérique – L'insoutenable matérialité du virtuel



Alliot, J.-M. et al. (2002). *Intelligence Artificielle et Informatique Théorique*. Cépaduès.



Arcep (2022). *Enquête annuelle « Pour un numérique soutenable »*. Rapp. tech.

https://www.arcep.fr/fileadmin/user_upload/observatoire/enquete-pns/edition-2024/enquete-annuelle-pour-un-numerique-soutenable_edition2024.pdf. ARCEP.



Arcep – Arcom (2024). *Baromètre du Numérique 2024*. URL : <https://www.arcep.fr/actualites/actualites-et-communiques/detail/n/equipements-et-usages-du-numerique-140524.html> (visité le 01/05/2024).



Baude, Manuel et al. (oct. 2023). *La France face aux neuf limites planétaires*. Rapp. tech. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires.



Berthoud, Françoise et al. (avr. 2020). *Estimation de l'empreinte carbone d'une heure.coeur de calcul*. Research Report. UGA - Université Grenoble Alpes ; CNRS ; INP Grenoble ; INRIA.



Bol, David, Thibault Pirson et Rémi Dekimpe (2021). "Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene". In : *2021 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, p. 19-24. DOI : [10.23919/DATE51398.2021.9474110](https://doi.org/10.23919/DATE51398.2021.9474110).



Bordage, F. et al. (2021). *Digital technologies in Europe : an environmental life cycle approach*. Rapp. tech. GreenIT.fr.



Falk, Sophia et al. (2025). *More than Carbon : Cradle-to-Grave environmental impacts of GenAI training on the Nvidia A100 GPU.*



Ficher, Marion et al. (mars 2021). *Évaluation de l’empreinte carbone de la transmission d’un gigaoctet de données sur le réseau RENATER.* Rapp. tech.

<https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2020/12/Rapport-revise-1Go-VF02-2021.pdf>. Renater et Écoinfo.



Freitag, Charlotte et al. (2021). “The real climate and transformative impact of ICT : A critique of estimates, trends, and regulations”. In : *Patterns* 2.9, p. 100340. ISSN : 2666-3899. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340>.



GeSI (2015). *SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges.* Rapp. tech.

<https://gesi.org/research/smarter2030-ict-solutions-for-21st-century-challenges>, GeSI.



Gómez, Moisés et al. (2023). “Critical and strategic metals in mobile phones : A detailed characterisation of multigenerational waste mobile phones and the economic drivers for recovery of metal value”. In : *Journal of Cleaner Production* 419, p. 138099. ISSN : 0959-6526. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138099>.



Google (2023). *Google Environmental Report.* Rapp. tech.

<https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2023-environmental-report.pdf>. Google.



Graedel, T.E. et al. (2011). *Recycling Rates of Metals – A Status Report*, rapp. tech. UNEP.



GSMA (2019). *The Enablement Effect – The impact of mobile communications technologies on carbon emission*

reductions. Rapp. tech. https://www.gsma.com/betterfuture/wp-content/uploads/2019/12/GSMA_Enablement_Effect.pdf.

GSMA.



Horner, Nathaniel C, Arman Shehabi et Inês L Azevedo (2016). "Known unknowns : Indirect

energy effects of information and communication technology". In : *Environmental Research Letters* 11.10, p. 103001.



HTTP Archive (2021). *State of the Web*. URL : <https://www.httparchive.org/reports/state-of-the-web>

(visité le 02/11/2021).



International Energy Agency (2022). *World Energy Mix*. International Energy Agency. URL :

<https://www.iea.org/world/energy-mix> (visité le 09/05/2025).



Internet Live Stats (2021). *Total number of websites*. URL :

<https://www.internetlivestats.com/total-number-of-websites/> (visité le 02/11/2021).



IPCC (2022). "Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability". en. In.



IPCC WG1 (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis*. Rapp. tech. IPCC.



IPCC WG2 (2022). *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Rapp. tech. IPCC.



Jevons, William Stanley (1866). *The coal question : an inquiry concerning the progress of the nation, and the*

probable exhaustion of our coal-mines. Macmillan London.



Lao, Sophia et Sophie Portela (juill. 2022). *Panorama des services et de leur performance (rapport - données 2020)*. Rapp. tech. Office français de la biodiversité (OFB).



Lefèvre, Laurent et al. (2022). *Proposition de document de cadrage Évaluation environnementale de projets impliquant des méthodes d'IA*. Rapp. tech. EcoInfo, p. 1-8.



Lhotellier, J. et al. (2018). *Modélisation et évaluation ACV de produits de consommation et biens d'équipement*. Rapp. tech. ADEME.



Ligozat, Anne-Laure et al. (2022). "Unraveling the Hidden Environmental Impacts of AI Solutions for Environment Life Cycle Assessment of AI Solutions". In : *Sustainability* 14.9.



Lohrmann, Alena, Michael Child et Christian Breyer (2021). "Assessment of the water footprint for the European power sector during the transition towards a 100% renewable energy system". In : *Energy* 233, p. 121098.



Malhi, Yadvinder (oct. 2017). "The Concept of the Anthropocene". en. In : *Annual Review of Environment and Resources* 42.1, p. 77-104. ISSN : 1543-5938, 1545-2050. DOI : 10.1146/annurev-environ-102016-060854.



Meadows, D. H. et al. (1972). *The Limits to Growth*. New York : Universe Books.



Meadows, D.H., J. Randers et D.L. Meadows (2004). *The limits to growth : the 30-year update*. Chelsea Green Publishing.



Millar, R.J. et al. (2017). "Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 C". In : *Nature Geoscience* 10.10, p. 741-747.



O'Neill, Daniel W. et al. (2018). "A good life for all within planetary boundaries". In : *Nature Sustainability* 1, p. 88-95. DOI : 10.1038/s41893-018-0021-4.



Observatoire des Territoires (2020). *Taille moyenne des ménages*. URL :

<https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr/taille-moyenne-des-menages> (visité le 01/05/2024).



Patterson, David et al. (avr. 2021). "Carbon Emissions and Large Neural Network Training". In : *arXiv :2104.10350 [cs]*.



Ribes, Aurélien et al. (oct. 2022). "An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint". en. In : *Earth System Dynamics* 13.4, p. 1397-1415. ISSN : 2190-4987. DOI :

10.5194/esd-13-1397-2022.



Richardson, Katherine et al. (2023). "Earth beyond six of nine planetary boundaries". In : *Science Advances* 9.37. DOI : 10.1126/sciadv.adh2458.



Rockström, Johan et al. (2009). "A safe operating space for humanity". In : *Nature* 461, p. 472-475.



Roucy-Rochegonde, Laure de et Adrien Buffard (2025). *AI, Data Centers and Energy Demand : Reassessing and Exploring the Trends*. Rapp. tech. Ifri.



Roussilhe, Gauthier (2022). *Est-ce que le secteur numérique existe ? (d'un point de vue environnemental)*. URL : <https://gauthierroussilhe.com/articles/secteur-numerique> (visité le 30/01/2024).



Roussilhe, Gauthier, Anne-Laure Ligozat et Sophie Quinton (2023). "A long road ahead : a

review of the state of knowledge of the environmental effects of digitization". In : *Current Opinion in Environmental Sustainability* 62,

p. 101296. ISSN : 1877-3435.



Russell, Stuart J et Peter Norvig (2010). *Artificial intelligence : a modern approach*. 3rd edition. Pearson

Education.



Sénat (2016). *100 millions de téléphones portables usagés : l'urgence d'une stratégie*. URL :

<https://www.senat.fr/rap/r15-850/r15-8501.html> (visité le 02/11/2021).



Servigne, P. et R. Stevens (2015). *Comment tout peut s'effondrer*. Éditions du Seuil.



Seto, Karen C. et al. (nov. 2016). "Carbon Lock-In : Types, Causes, and Policy Implications". en. In : *Annual*

Review of Environment and Resources 41.1, p. 425-452. ISSN : 1543-5938, 1545-2050. DOI :

10.1146/annurev-environ-110615-085934.



Sevilla, Jaime et al. (mars 2022). "Compute Trends Across Three Eras of Machine Learning". In :

arXiv :2202.05924 [cs].



Shehabi, A. et al. (2024). *2024 United States Data Center Energy Usage Report*. Rapp. tech. Berkeley, California :

Lawrence Berkeley National Laboratory.



Shift Project (oct. 2025). *Intelligence artificielle, données, calculs : quelles infrastructures dans un monde*

décarboné ? Rapp. tech. The Shift Project.



Statista Research Department (2016). *Volume de données sur le trafic IP mondial grand public de 2014 à*

2019. URL :

<https://fr.statista.com/statistiques/570395/volume-de-donnees-sur-le-traffic-ip-grand-public-mondial-2019/>

(visité le 01/05/2024).



Steffen, W. et al. (2015). "The trajectory of the Anthropocene : The Great Acceleration". In : *The Anthropocene*

Review 2.1, p. 81-98.



Steffen, Will, Wendy Broadgate et al. (avr. 2015). "The trajectory of the Anthropocene : The Great

Acceleration". en. In : *The Anthropocene Review* 2.1, p. 81-98. ISSN : 2053-0196, 2053-020X. DOI : 10.1177/2053019614564785.



Steffen, Will, Katherine Richardson et al. (2015). "Planetary boundaries : Guiding human development

on a changing planet". In : *Science* 347.6223.



STMicroelectronics (2021). *Déclaration Environnementale 2021, site de Crolles*. Rapp. tech. ST Microelectronics.



— (2022). *2022 Sustainability Report*. Rapp. tech. ST Microelectronics.



SystemX (2017). *Animation en ligne | Des métaux dans mon smartphone ?* URL :

<https://www.systemx.org/node/1724> (visité le 24/05/2024).



The Shift Project (2019). *Climat : l'Insoutenable Usage de la Vidéo en Ligne*. Rapp. tech. The Shift Project.



TSMC (2019). *TSMC Corporate Social Responsibility Report*. URL :

<https://esg.tsmc.com/download/csr/2019-csr-report/english/pdf/e-all.pdf> (visité le 02/11/2021).



Turner, Graham M (2012). "On the cusp of global collapse? Updated comparison of The Limits to Growth with historical data". In : *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society* 21.2, p. 116-124.



Vitousek, Peter M et al. (1997). "Human domination of Earth's ecosystems". In : *Science* 277.5325, p. 494-499.