



Impact Environnemental du Numérique

L'insoutenable matérialité du virtuel

Sylvain Bouveret

LIG, Ensimag-Grenoble INP, Ecoinfo

Version décembre 2025





Caveat emptor



- Le sujet est profondément pluridisciplinaire
- Il s'agit de savoir **non stabilisé**
- Il y a beaucoup d'incertitudes, et plus de questions que de réponses
- Je ne suis expert d'aucun des sujets dont je parle aujourd'hui
- Je ne reconnais pas les gens





Sources

Ce cours est plus ou moins inspiré des sources suivantes :

- Mooc Impacts environnementaux du numérique de l'Inria : <https://learninglab.gitlabpages.inria.fr...>
- Séminaire de Jacques Combaz (Toulouse, 7 novembre 2019) : *TIC : effets directs, rebond et indirects*
- Cours de Julien Lefèvre (Aix-Marseille Université, 28 may 2021) : *Introduction to the major environmental issues... and what we can do !*
- Cours d'Anne-Laure Ligozat (CentraleSupélec, mars 2021) : *IA responsable*
- Cours de Jeremy Panthou (IGE) pour la partie environnement
- + plein d'autres ressources (que je n'ai pas eu le temps de lister)

Merci également aux nombreuses personnes m'ayant fait des retours et commentaires.



Menu du jour

- 1 | **Amuse-bouche : le numérique**
- 2 | **Entrée : l'état du monde**
- 3 | **Plat de résistance : les impacts directs**
- 4 | **Dessert : Effets rebonds et indirects**
- 5 | **Conclusion**



Menu du jour

- 1 | **Amuse-bouche : le numérique**
- 2 | Entrée : l'état du monde
- 3 | Plat de résistance : les impacts directs
- 4 | Dessert : Effets rebonds et indirects
- 5 | Conclusion



L'écosystème numérique

Numérique ?

Numérique $\approx$ écosystème formé par l'ensemble des dispositifs qui permettent de manipuler de l'information sous forme électronique.



L'écosystème numérique

Numérique ?

Numérique $\approx$ écosystème formé par l'ensemble des dispositifs qui permettent de manipuler de l'information sous forme électronique.

Quiz

Pouvez-vous citer des dispositifs physiques qui font partie du monde numérique ?



Exprimez-vous ici :
<http://quiz.noiraudes.net/>



Le numérique, c'est quoi ?

Quiz

Une voiture électrique est-elle un objet numérique ?



Exprimez-vous ici :

<http://quiz.noiraudes.net/>



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 Malmoud et Lunden 2018

Networks

Data centers

Source : ROUSSILHE, 2022



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...

Question à emporter

Est-ce que ça a encore du sens de parler du secteur numérique ?





Des dispositifs numériques connectés

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



Des dispositifs numériques connectés

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





Des dispositifs numériques connectés

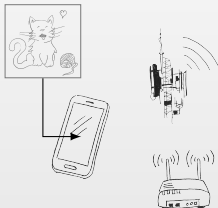
La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Des dispositifs numériques connectés

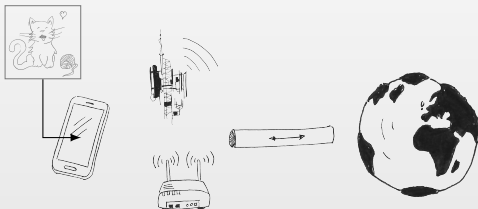
La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Des dispositifs numériques connectés

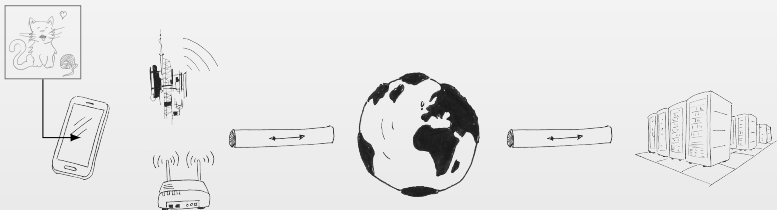
La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Des dispositifs numériques connectés

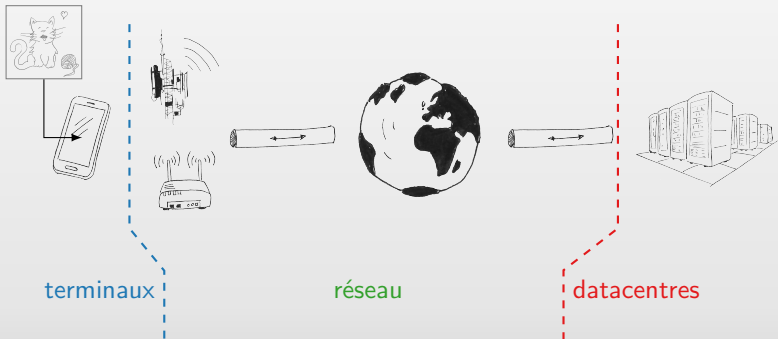
La plupart de nos dispositifs n'ont de raison d'être que parce qu'ils *communiquent* entre eux.





Des dispositifs numériques connectés

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



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 vous semble-t-il si virtuel que ça ?



Le numérique mondial

Chiffres-clefs pour le monde¹

34 milliards d'équipements, 4.1 milliards d'utilisateurs.

1. Frédéric BORDAGE, 2019.



Le numérique mondial

Chiffres-clefs pour le monde¹

34 milliards d'équipements, 4.1 milliards d'utilisateurs.

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

Quiz

Combien de dispositifs électroniques connectés possédez-vous ?



Exprimez-vous ici :

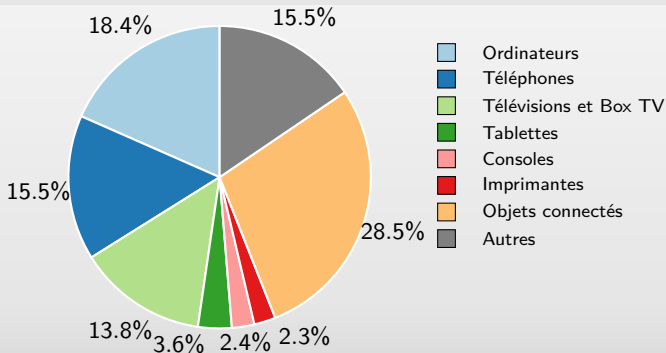
<http://quiz.noiraudes.net/>



Équipements numériques en France

Chiffres-clefs pour la France²

631 millions d'équipements, 58 millions d'utilisateur-ices (environ 11 appareils / utilisateur-ice)



2. F. BORDAGE et al., 2021.



Usages du numérique en France

Regardons le Baromètre du Numérique 2024³ :

- 10,3 éq. par foyer (≈ 4.7 / pers.)⁴
- 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)

3. ARCEP – ARCOM, 2024.

4. OBSERVATOIRE DES TERRITOIRES, 2020.



Usages du numérique en France

Regardons le Baromètre du Numérique 2024³ :

- 10,3 éq. par foyer (≈ 4.7 / pers.)⁴
- 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)

En résumé : une population française ultra-équipée, ultra connectée, et avec un usage surtout mobile des réseaux (NB : attention aux disparités que ces chiffres cachent).

3. ARCEP – ARCOM, 2024.

4. OBSERVATOIRE DES TERRITOIRES, 2020.



Usage des réseaux⁶

5. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.

6. CISCO, 2019 ; THE SHIFT PROJECT, 2019.



Usage des réseaux⁶

- 2019, trafic IP mondial gd public⁵ (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)

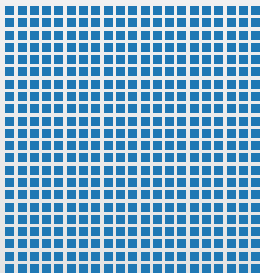
5. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.

6. CISCO, 2019 ; THE SHIFT PROJECT, 2019.



Usage des réseaux⁶

- 2019, trafic IP mondial gd public⁵ (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)



5. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.

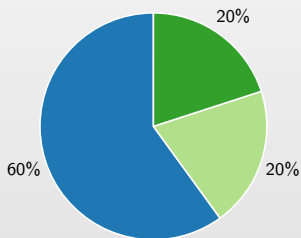
6. CISCO, 2019 ; THE SHIFT PROJECT, 2019.



Usage des réseaux⁶

- 2019, trafic IP mondial gd public⁵ (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)

Répartition du trafic :



5. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.

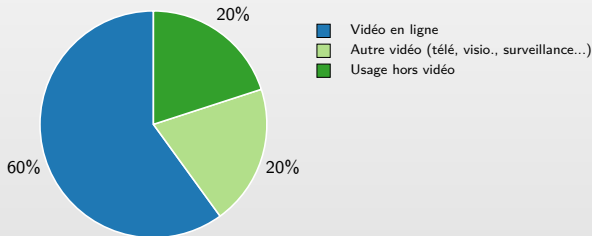
6. CISCO, 2019 ; THE SHIFT PROJECT, 2019.



Usage des réseaux⁶

- 2019, trafic IP mondial gd public⁵ (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)

Répartition du trafic :



5. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.

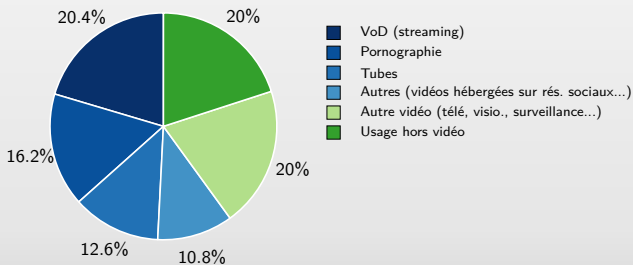
6. CISCO, 2019 ; THE SHIFT PROJECT, 2019.



Usage des réseaux⁶

- 2019, trafic IP mondial gd public⁵ (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)

Répartition du trafic :



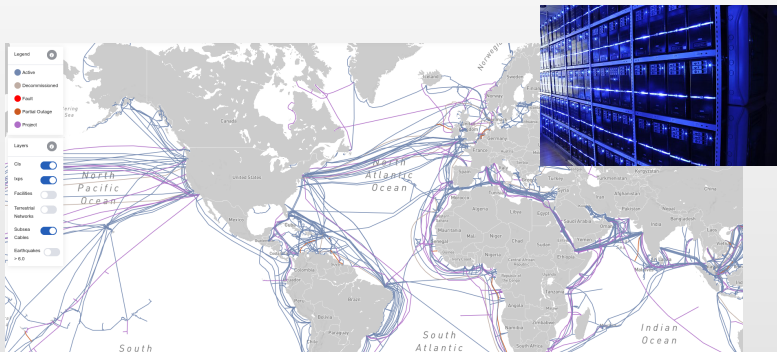
5. STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2016.

6. CISCO, 2019 ; THE SHIFT PROJECT, 2019.

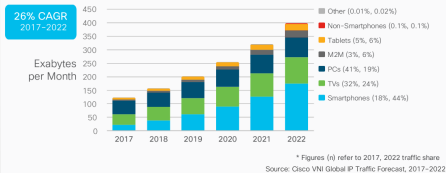


Derrière les réseaux...

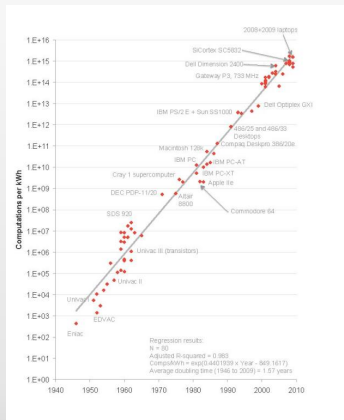
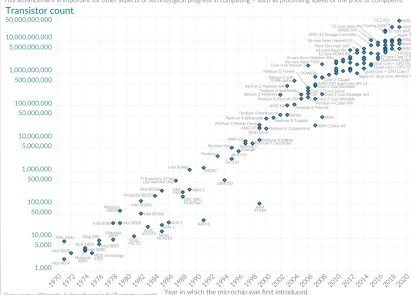
Et encore une fois, tout ceci n'a rien de virtuel...



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



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.



7. Sources : Cisco, OurWorldInData, J.Koomey



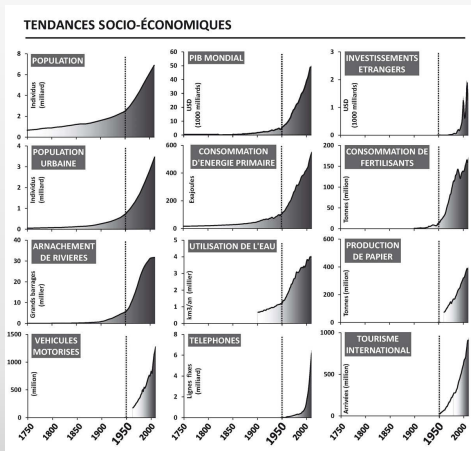
La grande accélération : les usages

Des tendances exponentielles... Cela vous rappelle quelque chose ?



La grande accélération : les usages

Des tendances exponentielles... Cela vous rappelle quelque chose ?



SERVIGNE et
STEVENS, 2015 ;
W. STEFFEN et al.,
2015



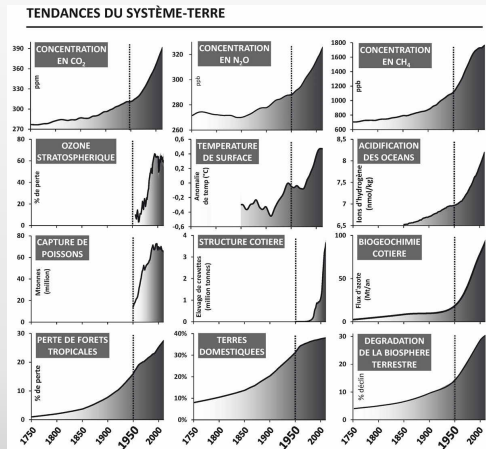
La grande accélération : les impacts

Tendances socio-économiques → impacts sur le système-Terre ?



La grande accélération : les impacts

Tendances socio-économiques → impacts sur le système-Terre ?



SERVIGNE et
STEVENS, 2015 ;
W. STEFFEN et al.,
2015



Message à emporter

Message à emporter

- Secteur numérique : mal défini et à frontières très floues
- Numérique $\neq$ virtuel / immatériel
- Nous sommes envahis d'objets numériques bien réels
- L'efficacité connaît une croissance exponentielle
- L'usage du numérique connaît une croissance exponentielle





Menu du jour

- 1 | Amuse-bouche : le numérique
- 2 | **Entrée : l'état du monde**
- 3 | Plat de résistance : les impacts directs
- 4 | Dessert : Effets rebonds et indirects
- 5 | Conclusion



Limites planétaires

Quiz

Pouvez-vous citer quelques-unes des grandes limites planétaires ?



Exprimez-vous ici :

<http://quiz.noiraudes.net/>



C'est quoi les limites planétaires ?

« The planetary boundaries framework defines a safe operating space for humanity based on the intrinsic biophysical processes that regulate the stability of the Earth system. » Will STEFFEN, RICHARDSON et al., 2015
réactualisé par RICHARDSON et al., 2023



C'est quoi les limites planétaires ?

« The planetary boundaries framework defines a safe operating space for humanity based on the intrinsic biophysical processes that regulate the stability of the Earth system. » Will STEFFEN, RICHARDSON et al., 2015
réactualisé par RICHARDSON et al., 2023

- 9 processus biophysiques **non indépendants** qui déterminent la capacité d'autorégulation du système-Terre
- Pour chaque processus, 1 ou 2 variables de contrôle à échelle globale ou régionale agrégée
- Notion de zones et seuils pour chaque processus :
 - Fonctionnement sûr (valeur holocène → limite planétaire)
 - Zone de risque croissant (limite planétaire → seuil de risque fort)
 - Zone de risque fort
- Première mention en 2009, régulièrement actualisé depuis



Les 9 limites planétaires

1 | **Changement climatique :**

- Concentration CO₂ dans l'atm. : 425ppm en 2023
- Limite dépassée (350ppm)
- Risques : ↗ températures, extrêmes climatiques...

2 | **Érosion de la biodiversité :**

- Extinctions d'espèces : $\approx$ 100-1000 / million / an
- Limite dépassée (10 / million)
- Risques : santé des écosystèmes, systèmes alimentaires, santé humaine

3 | **Perturbation des cycles biogéochimiques (N et P) :**

- Azote : 150 Mt/an rejetées (limite haute dépassée)
- Phosphore : 22 Mt/an des systèmes d'eau douce vers les océans (limite basse dépassée)
- Risques : eutrophisation des rivières et anoxie des océans



Les 9 limites planétaires (suite)

4 | **Changement d'usage des sols :**

- 38 % de réduction de la surface de forêts depuis 1700 (limite basse dépassée)
- Risques : diminution des puits de carbone, biodiversité

5 | **Utilisation d'eau douce :**

- Eau bleue : 2600 km³/an prélevés (seuil 4000-5000)
- Eau verte : 18 % d'anomalie d'humidité
- Risques : affectation des écosystèmes et activités humaines

6 | **Acidification des océans :**

- Saturation de l'eau en aragonite : 81 % par rapport à l'ère préindustrielle (limite 80 %)
- Risques : diminution des carbonates nécessaires à la formation des coquillages → perturbation des écosystèmes marins



Les 9 limites planétaires (suite)

7 | Appauvrissement de l'ozone stratosphérique :

- Concentration 285 Unités Dobson (limite 275 DU)
- Risques : destruction de l'effet protecteur face aux UVs.

8 | Aérosols dans l'atmosphère :

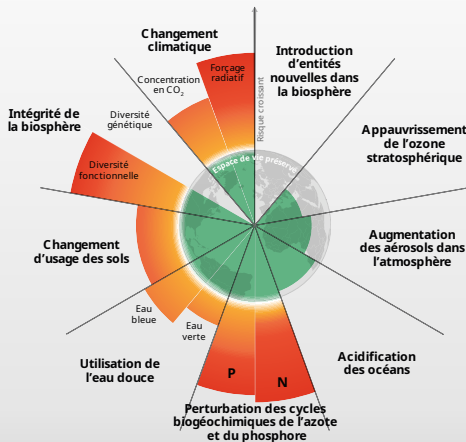
- Limite incertaine
- Risques : perturbation climatique et effets sur la santé humaine

9 | Entités nouvelles dans la biosphère :

- Produits chimiques : $\times 50$ depuis 1950. Produits plastiques : $+79\%$ entre 2000 et 2015
- Évaluation des risques pour l'homme et la biosphère dépassée...



Limites planétaires, synthèse



Will STEFFEN, RICHARDSON et al., 2015 réactualisé par RICHARDSON et al., 2023



Zoom : le climat

Bon, OK pour les limites planétaires. Mais plus précisément, où en est-on sur le sujet carbonoclimatique ?



Zoom : le climat

Bon, OK pour les limites planétaires. Mais plus précisément, où en est-on sur le sujet carbono-climatique ?

Demandons à **Jeremy Panthou**, hydroclimatologue à l'IGE (UGA), ce qu'il en pense¹...

¹ Toutes les planches de cette partie ont été directement tirées d'une présentation de Jeremy Panthou <geremy.panthou@univ-grenoble-alpes.fr> avec son autorisation.

Grand merci à lui !



Petite question préliminaire

Quel(s) point(s) commun(s) entre :

- Gouttières autour de nous
- Produits maraîchers locaux
- Digues et ponts de l'Isère
- Bâti de la région
- Activités quotidiennes
- Vêtements que nous possédons
- Système grenoblois eau potable/usée



Météo/climat/changement climatique

Météo, climat et réchauffement climatique s'intéressent aux mêmes variables atmosphériques :

- Température,
- Précipitation,
- Nébulosité,
- Vent,
- Rayonnement,
- ...



Météo/climat/changement climatique

Météo, climat et réchauffement climatique s'intéressent aux mêmes variables atmosphériques :

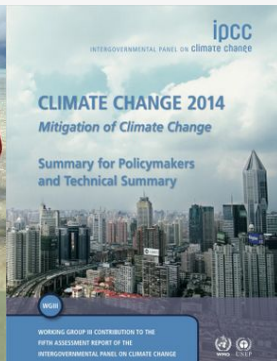
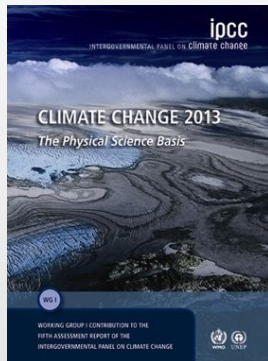
- Température,
- Précipitation,
- Nébulosité,
- Vent,
- Rayonnement,
- ...

Quelle différence ?



Le GIEC (IPCC), c'est quoi ?

Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat





Le GIEC (IPCC), c'est quoi ?

Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

- Organisme scientifico-politique onusien
- Expertise la littérature et rend compte des consensus/dissensus scientifiques
- 1000+ scientifiques
- 10000+ études scientifiques analysées
- 3 groupes de travail



Le GIEC (IPCC), c'est quoi ?

Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

- Organisme scientifico-politique onusien
- Expertise la littérature et rend compte des consensus/dissensus scientifiques
- 1000+ scientifiques
- 10000+ études scientifiques analysées
- 3 groupes de travail

Rapports approuvés en assemblée plénière du GIEC par les pays représentés dans l'assemblée du GIEC (y compris les USA, ou l'Arabie Saoudite).

Groupe de Travail #1 :
Bases physiques du changement climatique



GT1 : bases physiques



- **Observations** : Combien de degrés depuis l'ère pré-industrielle ? Évolution des forçages climatiques ?
- **Attribution** : Pourquoi ça chauffe ? Quelle(s) cause(s) ?
- **Projections** : Combien en plus d'ici 2050 ? 2100 ?
- **Déclinaisons** : disparités régionales ? saisonnalité ? extrêmes ?



GT1 : bases physiques



- **Observations** : Combien de degrés depuis l'ère pré-industrielle ? Évolution des forçages climatiques ?
- **Attribution** : Pourquoi ça chauffe ? Quelle(s) cause(s) ?
- **Projections** : Combien en plus d'ici 2050 ? 2100 ?
- **Déclinaisons** : disparités régionales ? saisonnalité ? extrêmes ?

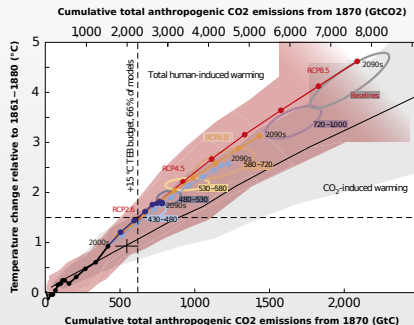
Disciplines engagées

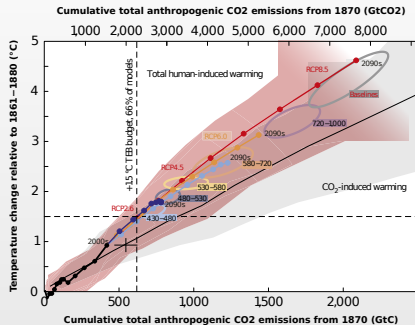
Essentiellement physique⁺⁺⁺, chimie⁺⁺, biologie⁺.

Consensus total : “virtually certain”



GT1, synthèse(Millar et al., 2017)

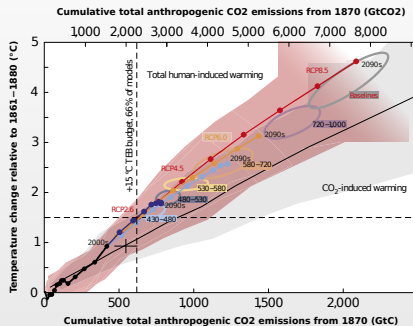




- Réponse simple d'un système complexe :

$$\Delta \overline{T_{global}} \propto \sum CO2_{ANT}$$

1

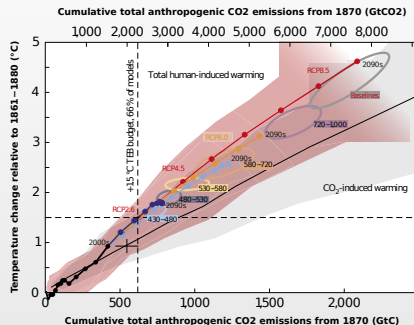


- Réponse simple d'un système complexe :

$$\Delta \overline{T_{global}} \propto pCO_2 \propto \sum CO_{2_{ANT}}$$



GT1, synthèse(Millar et al., 2017)



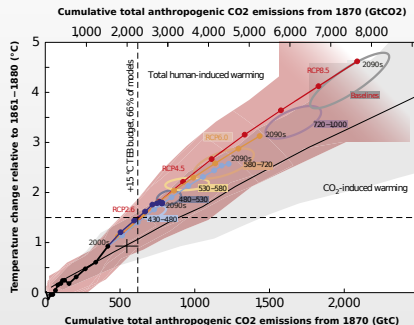
- Réponse simple d'un système complexe :

$$\Delta \overline{T_{global}} \propto pCO_2 \propto \sum CO_{2ANT}$$

- $\Delta \overline{T_{global}} \Rightarrow$ impacts (GT2)
- $\sum CO_{2ANT} \Rightarrow$ causes (GT3)



GT1, synthèse(Millar et al., 2017)



- Réponse simple d'un système complexe :

$$\Delta \overline{T_{global}} \propto pCO_2 \propto \sum CO_{2ANT}$$

- $\Delta \overline{T_{global}} \Rightarrow$ impacts (GT2)
- $\sum CO_{2ANT} \Rightarrow$ causes (GT3)

Groupe de Travail #2 :
Impact, adaptation, vulnérabilité



GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité



- Ça chauffe et alors ?
- Quels impacts (positifs/négatifs) prévisibles ?
- Peut-on s'adapter à tout ?
- Injustice & Équité ?



GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité



- Ça chauffe et alors ?
- Quels impacts (positifs/négatifs) prévisibles ?
- Peut-on s'adapter à tout ?
- Injustice & Équité ?

Disciplines engagées

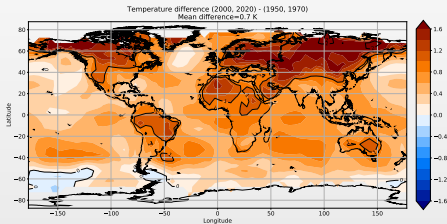
Idem GT1 + tous les modèles d'impacts : hydrologie, agronomie, sociologie, écologie, médecine

Chaines causales + longues : un consensus qui oscille selon les cas entre "likely" et "virtually certain"

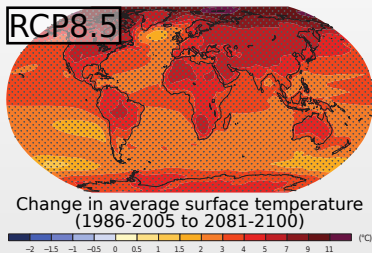


GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

Observations :



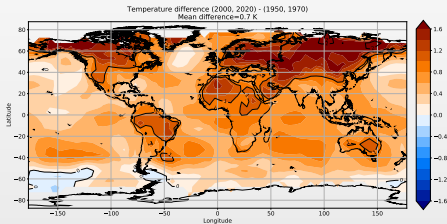
Projections :



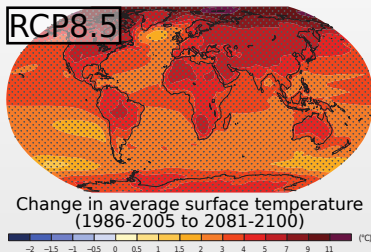


GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

Observations :



Projections :



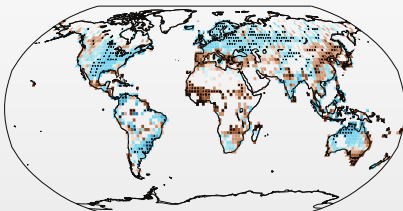
Réchauffement partout **mais fortes disparités régionales** :

- Contraste Terres/Océans
- Zones polaires et semi-arides se réchauffent plus fortement

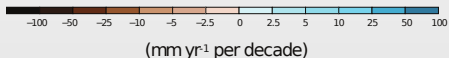


GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

Observations : 1951–2010

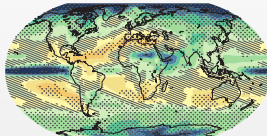


Observed change in annual precipitation over land



Projections :

RCP 8.5



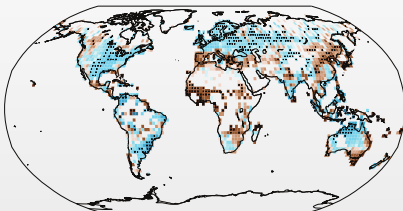
Change in average precipitation (1986–2005 to 2081–2100)



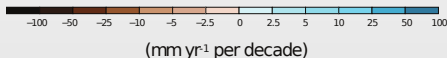


GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

Observations : 1951–2010

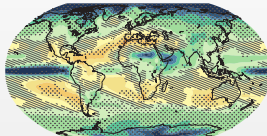


Observed change in annual precipitation over land



Projections :

RCP 8.5



Change in average precipitation (1986–2005 to 2081–2100) (%)

Précipitations : tendance globale à l'augmentation
Signal beaucoup moins clair (forte variabilité temporelle) et fortes disparités régionales observées et attendues



Et pour la France ?

- **Températures (Ribes et al., 2022) :**
 - Annuelle : $1.5 \times \Delta \overline{T_{global}}$
 - JJA (été climatique) : $2 \times \Delta \overline{T_{global}}$
- **Précipitations (à gros traits) :**
 - $\neq$ Nord/Sud
 - Hivers + humides & étés + secs
 - ↗ événements extrêmes (secs et humides)



En résumé...

Quel(s) point(s) commun(s) entre :

- Gouttières autour de nous
- Produits maraîchers locaux
- Digues et ponts de l'Isère
- Bâti de la région
- Activités quotidiennes
- Vêtements que nous possédons
- Système grenoblois eau potable/usée



En résumé...

Quel(s) point(s) commun(s) entre :

- Gouttières autour de nous
- Produits maraîchers locaux
- Digues et ponts de l'Isère
- Bâti de la région
- Activités quotidiennes
- Vêtements que nous possédons
- Système grenoblois eau potable/usée

GT2 : dépendent $\pm$ du climat local

Façonnés dans le temps long pour y être adaptés $\Rightarrow$ permis par la stabilité du climat global.



Les extrêmes climatiques

Climat moyen vs extrêmes climatiques

Plus d'extrêmes : vagues de chaleur, sécheresses, pluies fortes, crues, ...
(IPCC, 2022)

Extrêmes : 3 cas prévisibles

- 1 | On peut imaginer s'en protéger → crues
- 2 | Certains enchaînement difficilement anticipables
→ cyclone + vague de chaleur humide
- 3 | Pour d'autres les adaptations seront quasi-impossibles
→ température létales



GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

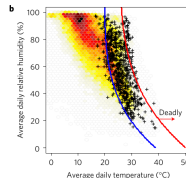
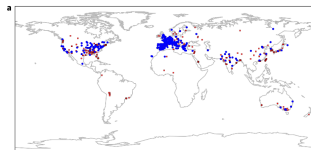
nature
climate change

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 19 JUNE 2017 | DOI: 10.1038/NCLIMATE3322

Global risk of deadly heat

Camilo Mora^{1*}, Bénédicte Dousset², Iain R. Caldwell³, Farrah E. Powell¹, Rollan C. Geronimo¹, Coral R. Bielecki⁴, Chelsie W. W. Counsell³, Bonnie S. Dietrich⁵, Emily T. Johnston⁴, Leo V. Louis⁴, Matthew P. Lucas⁶, Marie M. McKenzie¹, Alessandra G. Shea¹, Han Tseng¹, Thomas W. Giambelluca¹, Lisa R. Leon⁷, Ed Hawkins⁸ and Clay Trauernicht⁶





GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

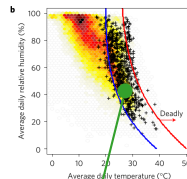
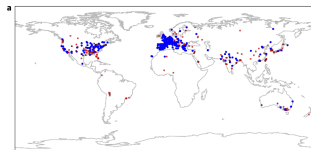
nature
climate change

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 19 JUNE 2017 | DOI: 10.1038/NCLIMATE3322

Global risk of deadly heat

Camilo Mora^{1*}, Bénédicte Dousset², Iain R. Caldwell³, Farrah E. Powell¹, Rollan C. Geronimo¹, Coral R. Bielecki⁴, Chelsie W. W. Counsell³, Bonnie S. Dietrich⁵, Emily T. Johnston⁴, Leo V. Louis⁴, Matthew P. Lucas⁶, Marie M. McKenzie¹, Alessandra G. Shea¹, Han Tseng¹, Thomas W. Giambelluca¹, Lisa R. Leon⁷, Ed Hawkins⁸ and Clay Trauernicht⁶





GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

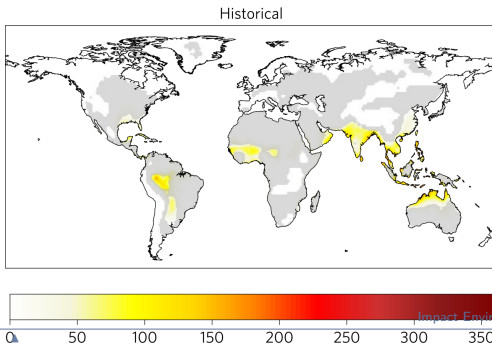
nature
climate change

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 19 JUNE 2017 | DOI: 10.1038/NCLIMATE3322

Global risk of deadly heat

Camilo Mora^{1*}, Bénédicte Dousset², Iain R. Caldwell³, Farrah E. Powell¹, Rollan C. Geronimo¹, Coral R. Bielecki⁴, Chelsie W. W. Counsell³, Bonnie S. Dietrich⁵, Emily T. Johnston⁴, Leo V. Louis⁴, Matthew P. Lucas⁶, Marie M. McKenzie¹, Alessandra G. Shea¹, Han Tseng¹, Thomas W. Giambelluca¹, Lisa R. Leon⁷, Ed Hawkins⁸ and Clay Trauernicht⁶





GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

nature
climate change

PUBLISHED ONLINE: 1

LETTERS

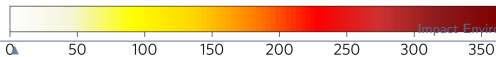
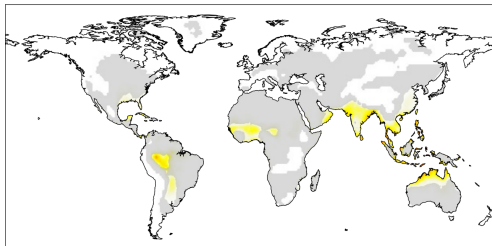
30%

pop. mondiale

Global risk of deadly heat

Camilo Mora^{1*}, Bénédicte Dousset², Iain R. Caldwell³, Farrah E. Powell¹, Rollan C. Geronimo¹, Coral R. Bielecki⁴, Chelsie W. W. Counsell³, Bonnie S. Dietrich⁵, Emily T. Johnston⁴, Leo V. Louis⁴, Matthew P. Lucas⁶, Marie M. McKenzie¹, Alessandra G. Shea¹, Han Tseng¹, Thomas W. Giambelluca¹, Lisa R. Leon⁷, Ed Hawkins⁸ and Clay Trauernicht⁶

Historical



Impact Environnemental du Numérique



GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

nature
climate change

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 1

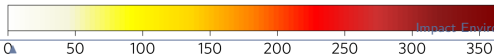
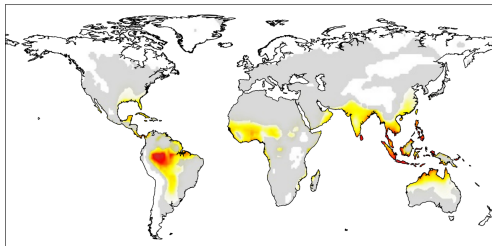
50%

pop. mondiale

Global risk of deadly heat

Camilo Mora^{1*}, Bénédicte Dousset², Iain R. Caldwell³, Farrah E. Powell¹, Rollan C. Geronimo¹, Coral R. Bielecki⁴, Chelsie W. W. Counsell³, Bonnie S. Dietrich⁵, Emily T. Johnston⁴, Leo V. Louis⁴, Matthew P. Lucas⁶, Marie M. McKenzie¹, Alessandra G. Shea¹, Han Tseng¹, Thomas W. Giambelluca¹, Lisa R. Leon⁷, Ed Hawkins⁸ and Clay Trauernicht⁶

RCP 2.6





GT2 : impact, adaptation, vulnérabilité

nature
climate change

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 1

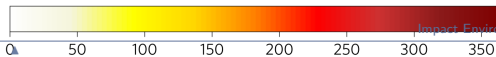
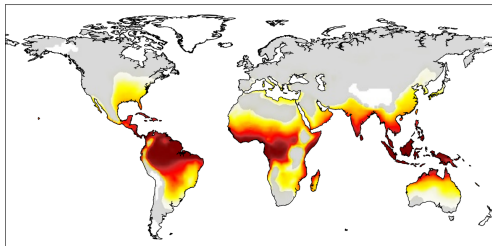
75%

pop. mondiale

Global risk of deadly heat

Camilo Mora^{1*}, Bénédicte Dousset², Iain R. Caldwell³, Farrah E. Powell¹, Rollan C. Geronimo¹, Coral R. Bielecki⁴, Chelsie W. W. Counsell³, Bonnie S. Dietrich⁵, Emily T. Johnston⁴, Leo V. Louis⁴, Matthew P. Lucas⁶, Marie M. McKenzie¹, Alessandra G. Shea¹, Han Tseng¹, Thomas W. Giambelluca¹, Lisa R. Leon⁷, Ed Hawkins⁸ and Clay Trauernicht⁶

RCP 8.5



Groupe de Travail #3 :
Atténuation du changement climatique

ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

CLIMATE CHANGE 2014
Mitigation of Climate Change

**Summary for Policymakers
and Technical Summary**

Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the
Intergovernmental Panel on Climate Change

- Peut-t-on « régler » le thermostat à la « bonne » température?
- Évaluer les coûts et bénéfices de l'atténuation
- Intervention humaine pour réduire les sources ou augmenter les puits de GES.

ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

CLIMATE CHANGE 2014
Mitigation of Climate Change

**Summary for Policymakers
and Technical Summary**

Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the
Intergovernmental Panel on Climate Change

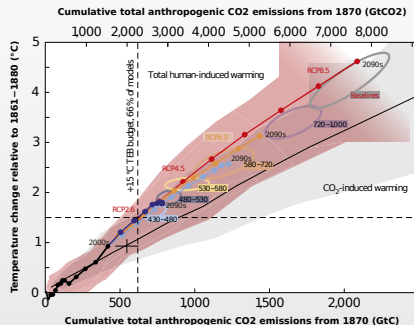
- Peut-t-on « régler » le thermostat à la « bonne » température?
- Évaluer les coûts et bénéfices de l'atténuation
- Intervention humaine pour réduire les sources ou augmenter les puits de GES.

Idem GT1 + tous les modèles d'impacts du GT2 + modèles d'évolution socio-éco

**Chaînes causales très longues et « valeurs » non épistémiques
incluses dans les analyses : consensus plus faible et moins robuste**



GT1, synthèse(Millar et al., 2017)



- Réponse simple d'un système complexe :

$$\Delta \overline{T_{global}} \propto pCO_2 \propto \sum CO_{2ANT}$$

- $\Delta \overline{T_{global}} \Rightarrow$ impacts (GT2)
- $\sum CO_{2ANT} \Rightarrow$ causes (GT3)



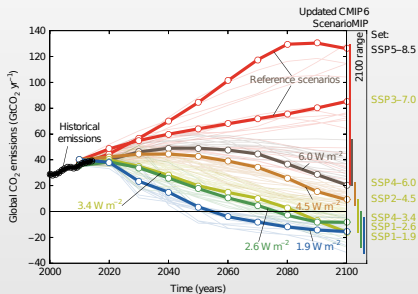
GT3 : atténuation

$\Delta \overline{T_{global}} = 1.5 \text{ à } 2^{\circ} \rightarrow \text{quelles trajectoires ?}$



GT3 : atténuation

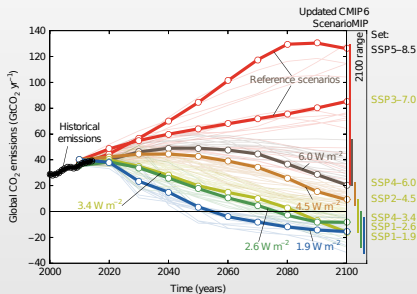
$\Delta \overline{T_{global}} = 1.5 \text{ à } 2^\circ \rightarrow \text{quelles trajectoires ?}$





GT3 : atténuation

$$\Delta \overline{T_{global}} = 1.5 \text{ à } 2^{\circ} \rightarrow \text{quelles trajectoires ?}$$



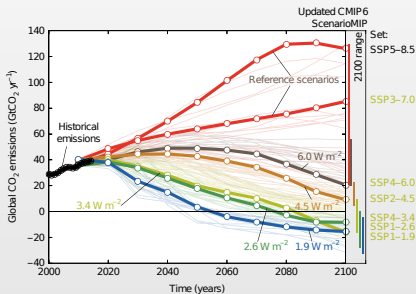
Descente énergétique pentue :

- Découplage PIB/CO₂ insuffisant
- Implique + que l'échelle individuelle



GT3 : atténuation

$$\Delta \overline{T_{global}} = 1.5 \text{ à } 2^{\circ} \rightarrow \text{quelles trajectoires ?}$$



Descente énergétique pentue :

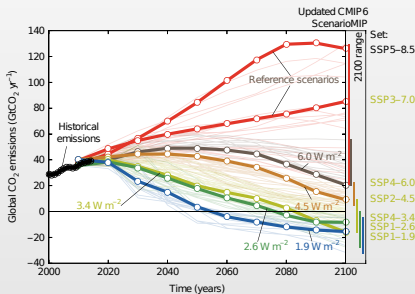
- Découplage PIB/CO2 insuffisant
- Implique + que l'échelle individuelle

Et la techno ?



GT3 : atténuation

$$\Delta \overline{T_{global}} = 1.5 \text{ à } 2^{\circ} \rightarrow \text{quelles trajectoires ?}$$



Descente énergétique pentue :

- Découplage PIB/CO₂ insuffisant
- Implique + que l'échelle individuelle

Et la techno ? ...Elle a sa place dans la décarbonation, mais

- ni le levier majeur
- ni le facteur limitant



En résumé...

Quel(s) point(s) commun(s) entre :

- Gouttières autour de nous
- Produits maraîchers locaux
- Digues et ponts de l'Isère
- Bâti de la région
- Activités quotidiennes
- Vêtements que nous possédons
- Système grenoblois eau potable/usée

GT2 : dépendent $\pm$ du climat local

Façonnés dans le temps long pour y être adaptés $\Rightarrow$ permis par la stabilité du climat global.



En résumé...

Quel(s) point(s) commun(s) entre :

- Gouttières autour de nous
- Produits maraîchers locaux
- Digues et ponts de l'Isère
- Bâti de la région
- Activités quotidiennes
- Vêtements que nous possédons
- Système grenoblois eau potable/usée

GT2 : dépendent $\pm$ du climat local

Façonnés dans le temps long pour y être adaptés $\Rightarrow$ permis par la stabilité du climat global.

GT3 : dépendent $\pm$ de l'énergie abondante

issue des fossiles (pétrole, gaz, charbon) $\Rightarrow$ la descente énergétique pourrait être rude.



En résumé...

Quel(s) point(s) commun(s) entre :

- Gouttières autour de nous
- Produits maraîchers locaux
- Digues et ponts de l'Isère
- Bâti de la région
- Activités quotidiennes
- Vêtements que nous possédons
- Système grenoblois eau potable/usée

GT2 : dépendent $\pm$ du climat local

Façonnés dans le temps long pour y être adaptés $\Rightarrow$ permis par la stabilité du climat global.

GT3 : dépendent $\pm$ de l'énergie abondante

issue des fossiles (pétrole, gaz, charbon) $\Rightarrow$ la descente énergétique pourrait être rude.



En résumé...

Quel(s) point(s) commun(s) entre :

- Gouttières autour de nous
- Produits maraîchers locaux
- Dignes et ponts de l'Isère
- Bâti de la région
- Activités quotidiennes
- Vêtements que nous possédons
- Système grenoblois eau potable/usée

GT2 : dépendent $\pm$ du climat local

Façonnés dans le temps long pour y être adaptés $\Rightarrow$ permis par la stabilité du climat global. **Et la techno ?**

GT3 : dépendent $\pm$ de l'énergie abondante

issue des fossiles (pétrole, gaz, charbon) $\Rightarrow$ la descente énergétique pourrait être rude. **Et la techno ?**



GT1

$$\Delta \overline{T}_{global} \propto \sum CO_{2ANT}$$



Un problème épineux...

Nous sommes face à un problème passionnant, passionné (affect), avec de l'enjeu, difficile, intriqué...



Un problème épineux...

Nous sommes face à un problème passionnant, passionné (affect), avec de l'enjeu, difficile, intriqué...

Wicked problem

In planning and policy, a wicked problem is a problem that is difficult or impossible to solve because of incomplete, contradictory, and changing requirements that are often difficult to recognize. It refers to an idea or problem that cannot be fixed, where there is no single solution to the problem. [...]

Moreover, because of complex interdependencies, the effort to solve one aspect of a wicked problem may reveal or create other problems. Due to their complexity, wicked problems are often characterized by organized irresponsibility.

Source : Wikipedia, article Wicked problem



Bon, on fait quoi ?

Le GIEC a défini, sur la base de la littérature scientifique disponible, un certain budget carbone à ne pas dépasser afin de maintenir le réchauffement moyen en-dessous de 1.5°C (resp. 2°C).



Bon, on fait quoi ?

Le GIEC a défini, sur la base de la littérature scientifique disponible, un certain budget carbone à ne pas dépasser afin de maintenir le réchauffement moyen en-dessous de 1.5°C (resp. 2°C).

Quiz

Si nous répartissons de manière **égale** à tou-es les humain-es de la Terre le budget carbone disponible depuis 2021 pour ne pas dépasser 1.5°C (resp. 2°C) de réchauffement, combien d'années d'émissions reste-t-il en moyenne à chaque Français-e (depuis 2021) au rythme actuel ?



Exprimez-vous ici :

<http://quiz.noiraudes.net/>



Budgets carbone

- Budgets carbone mondiaux (base 2021) :
 - 400 GteqCO₂ pour 1.5°C (= 51 teqCO₂ / humain)
 - 1150 GteqCO₂ pour 2°C (= 148 teqCO₂ / humain)
- Émissions françaises :
 - 4,1 teqCO₂ (émissions)
 - 8,9 teqCO₂ (empreinte carbone)
- → ≈ 6 ans de budget pour 1.5°C et ≈ 16 ans pour 2°C
- Trajectoires de réduction : ≈ 2 teqCO₂ / an / Français·e en 2050

Source : BAUDE et al., 2023



Budgets carbone

- Budgets carbone mondiaux (base 2021) :
 - 400 GteqCO₂ pour 1.5°C (= 51 teqCO₂ / humain)
 - 1150 GteqCO₂ pour 2°C (= 148 teqCO₂ / humain)
- Émissions françaises :
 - 4,1 teqCO₂ (émissions)
 - 8,9 teqCO₂ (empreinte carbone)
- → ≈ 6 ans de budget pour 1.5°C et ≈ 16 ans pour 2°C
- Trajectoires de réduction : ≈ 2 teqCO₂ / an / Français·e en 2050

Source : BAUDE et al., 2023

Question à emporter

Trouvez-vous ça juste ?



Message à emporter

Message à emporter

- Nous avons quelques problèmes avec l'environnement
- Le climat n'est que l'un des problèmes (cf limites planétaires)
- Ces problèmes sont très complexes car systémiques (impliquent beaucoup de variables en interaction)
- L'origine anthropique est avérée
- Nous connaissons déjà d'énormes changements (climat, biodiversité, etc.) qui risquent de compromettre notre capacité à maintenir des conditions vivables sur Terre
- On ne peut pas aborder ces problèmes uniquement sous l'angle technique (il faut sortir du paradigme problème-solution)





Menu du jour

- 1 | Amuse-bouche : le numérique
- 2 | Entrée : l'état du monde
- 3 | **Plat de résistance : les impacts directs**
- 4 | Dessert : Effets rebonds et indirects
- 5 | Conclusion



Numérique et environnement

Bon. Maintenant quel est le lien entre numérique et environnement ?



Numérique et environnement

Bon. Maintenant quel est le lien entre numérique et environnement ?

D'abord quelques chiffres globaux...

Quiz

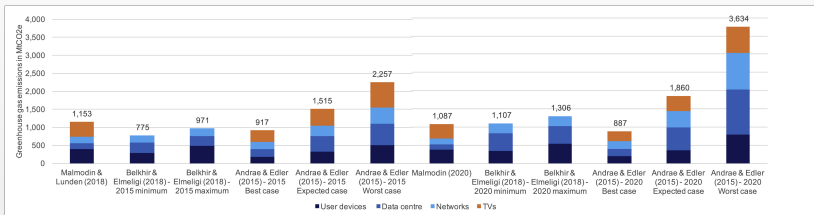
À votre avis, quelle part approximative des émissions de GES mondiales le numérique représente-t-il ?



Exprimez-vous ici :
<http://quiz.noiraudes.net/>



Numérique dans le monde

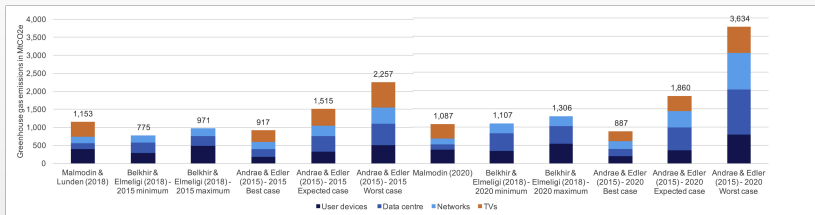


Source : FREITAG et al., 2021

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



Numérique dans le monde



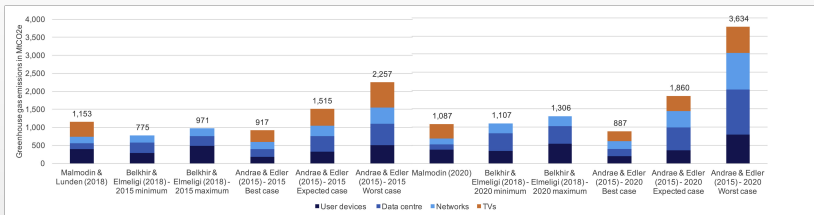
Source : FREITAG et al., 2021

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) $\approx 52 \text{ Gt CO}_2\text{e} / \text{an}$

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



Émissions GES par source

Quiz

À votre avis, quelle est la source principale des émissions de GES du numérique ? (En France)

- ☐ Fabrication terminaux
- ☐ Utilisation terminaux
- ☐ Fabrication Eq. Réseau
- ☐ Utilisation Eq. Réseau
- ☐ Fabrication datacenters
- ☐ Utilisation datacenters



Exprimez-vous ici :
<http://quiz.noiraudes.net/>



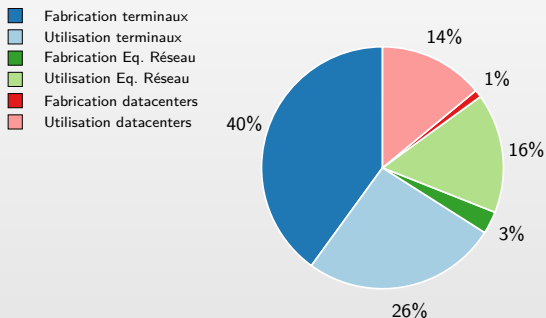
Émissions GES par source⁸

-  Fabrication terminaux
-  Utilisation terminaux
-  Fabrication Eq. Réseau
-  Utilisation Eq. Réseau
-  Fabrication datacenters
-  Utilisation datacenters

8. Frédéric BORDAGE, 2019.



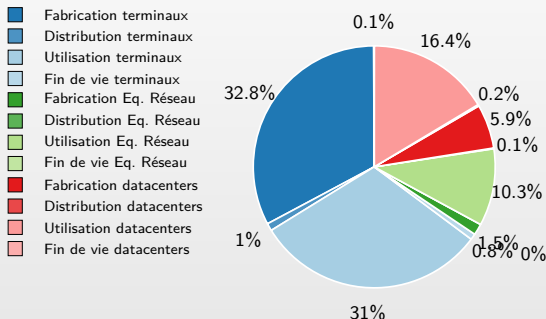
Émissions GES par source ⁸



8. Frédéric BORDAGE, 2019.



Et au niveau européen⁹ ?

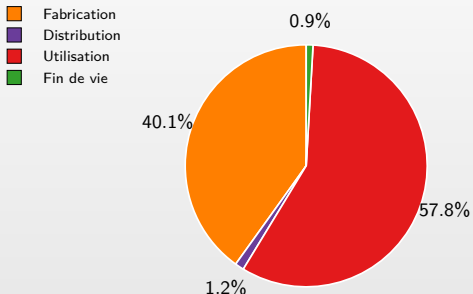


NB : Durée de vie variable selon les équipements (e.g 4 ans pour les laptops)

9. F. BORDAGE et al., 2021.



Et au niveau européen¹⁰ ?

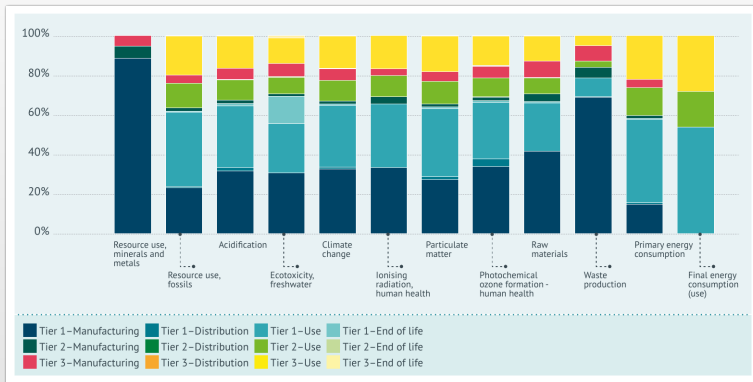


NB : Durée de vie variable selon les équipements (e.g 4 ans pour les laptops)

10. F. BORDAGE et al., 2021.



Et les autres impacts¹¹ ?

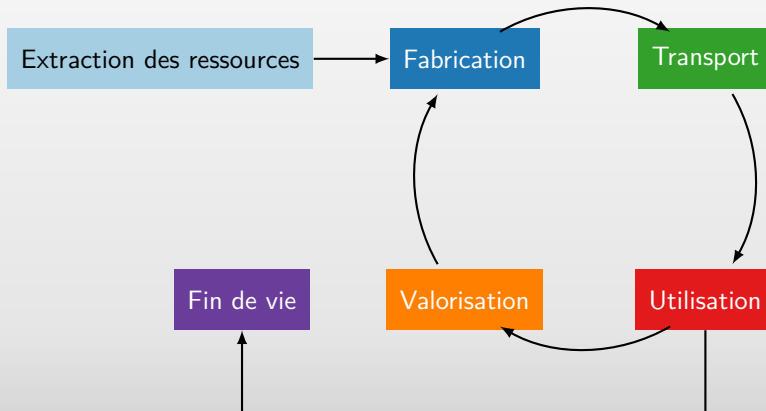


11. F. BORDAGE et al., 2021.



Cycle de vie et impacts

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



Matériaux et Fabrication





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

Quiz

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 ?

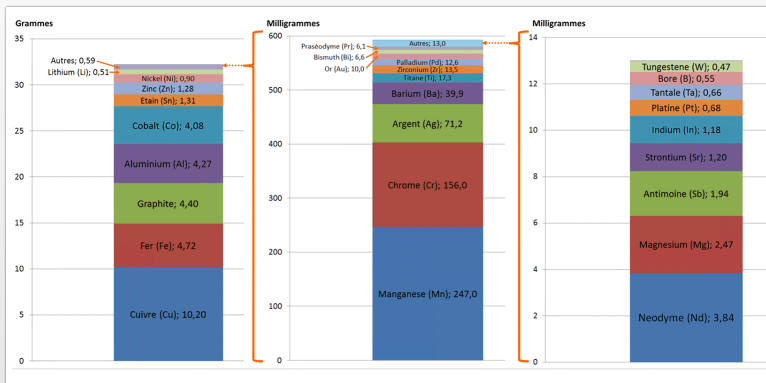


Exprimez-vous ici :

<http://quiz.noiraudes.net/>



Les matériaux des Smartphones



Source : SÉNAT, 2016, d'après Orange.



Les matériaux des Smartphones

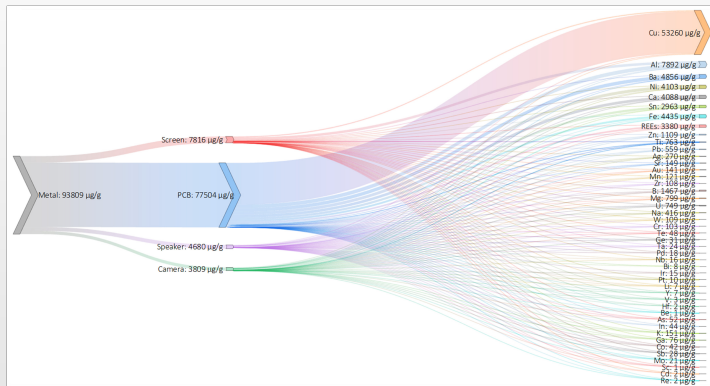
« Un recensement exhaustif des matières fait apparaître plus d'une cinquantaine d'éléments du tableau périodique de Mendeleïev dans la composition d'un téléphone portable. »

(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



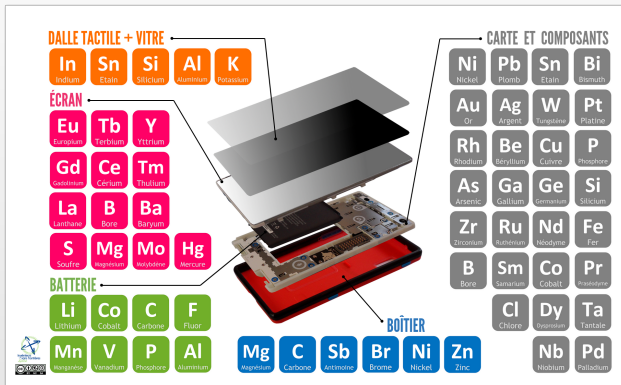
Les matériaux des Smartphones

« 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

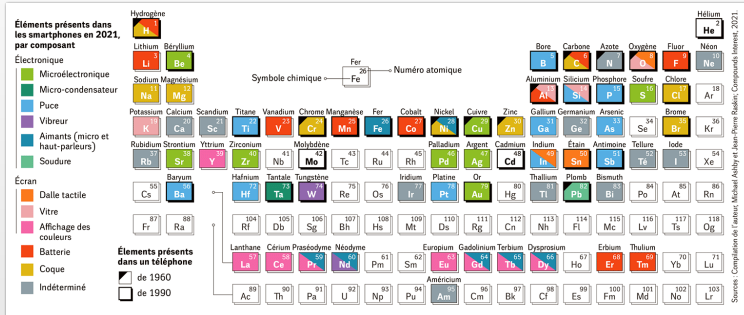
« Il est impossible de disposer d'une information précise sur les métaux contenus dans un appareil, que ce soit pour un modèle en particulier, ou pour une gamme d'appareils. »

« 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 ?



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)



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)

Bon, ces matériaux (en particuliers métaux), il va falloir les trouver...



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 minérale :



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 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
- **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)

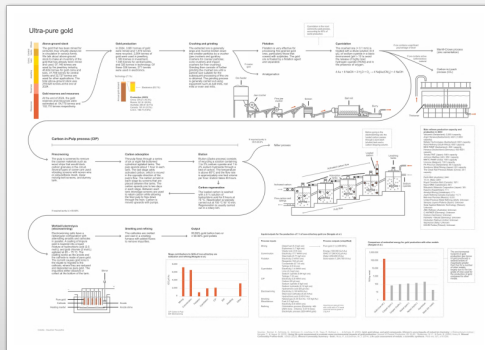
(2 citations extraites de CRAWFORD, 2022)

- 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>

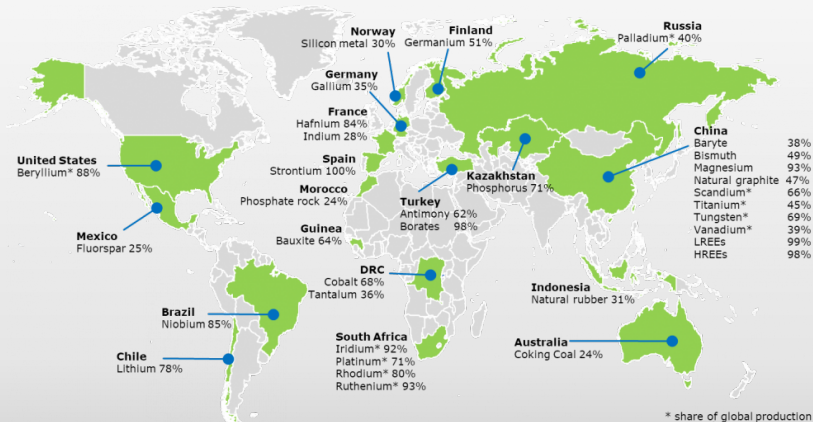


Source Gauthier Roussilhe



À propos d'extraction...

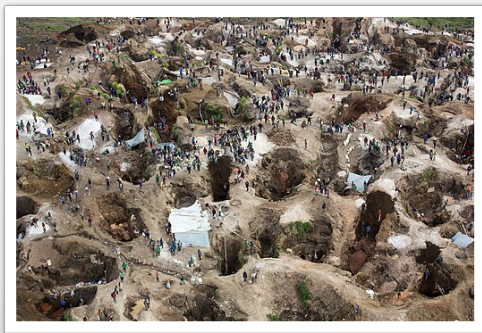
Des origines géographiques diverses (EUROPEAN COMMISSION, 2018).





L'extraction au cœur des conflits

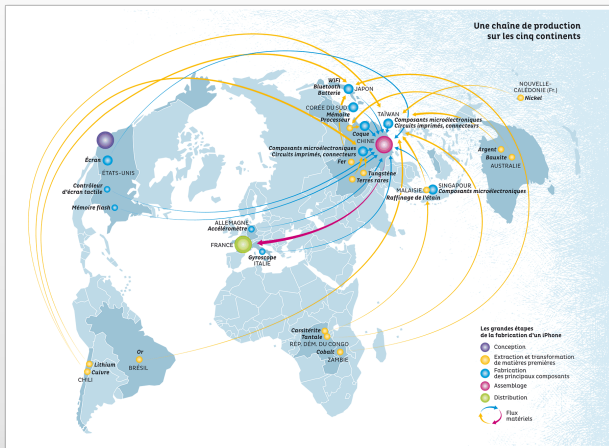
- Les **minerais de sang** : étain, tantale, or et tungstène
- Au cœur de conflits (notamment RDC)
- Cf <https://generationlumiere.fr/>



MONUSCO Photos, CC BY-SA 2.0, via Wikimedia Commons



La fabrication...



Source : *Le Monde Diplomatique*, juin 2015



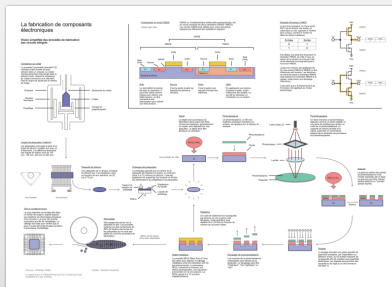
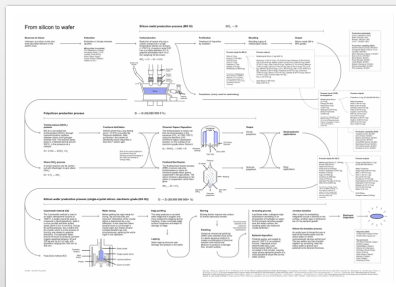
Focus : les semi-conducteurs

- 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 : 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



Source Gauthier Roussilhe



Semi-conducteurs, 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

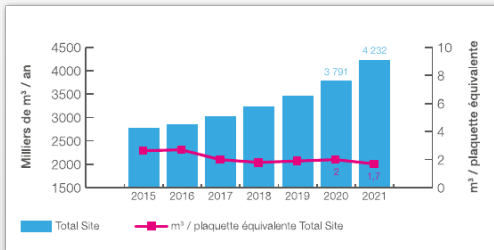
12. TSMC, 2019.

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
- $\approx$ 78370 français-es pendant 1 an ^b
- $\approx$ 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

- Impact principal de la phase d'usage : *consommation d'électricité*
- (mais pas que : cf équipements réseaux ou datacenters utilisés pendant la phase d'usage...)



Phase d'usage d'un équipement

- Impact principal de la phase d'usage : *consommation d'électricité*
- (mais pas que : cf équipements réseaux ou datacenters utilisés pendant la phase d'usage...)

Tiens, d'ailleurs, comment mesure-t-on l'énergie électrique ?

Quiz

Mon PC a une puissance moyenne de 50 W environ. Si je l'utilise 8h aujourd'hui, quelle quantité d'énergie aurai-je consommé ?



Exprimez-vous ici :
<http://quiz.noiraudes.net/>



Mesure de la consommation électrique

Rappels :

- On mesure la *puissance* (électrique par ex.) en *Watts* (rappel : $P = U \times I$)
- On mesure l'*énergie consommée* en *Joules* ou *Wattheures* (1 kWh = 3,6 MJ)
- 1 Wh = consommation d'un appareil d'1 W pendant 1 h



Mesure de la consommation électrique

Rappels :

- On mesure la *puissance* (électrique par ex.) en *Watts* (rappel : $P = U \times I$)
- On mesure l'*énergie consommée* en *Joules* ou *Wattheures* (1 kWh = 3,6 MJ)
- 1 Wh = consommation d'un appareil d'1 W pendant 1 h

Pour les datacentres, on utilise en outre le *Power Usage Effectiveness* (PUE) comme mesure d'efficacité :

$$PUE = \frac{P_{IT} + P_F}{P_{IT}},$$

P_{IT} = Consommation des équipements infos

P_F = Consommation des autres équipements (refroidissement, onduleurs, générateurs...)



Électricité en phase d'usage

La consommation électrique n'est pas un indicateur environnemental pertinent. Comment le traduire en impact ?



Électricité en phase d'usage

La consommation électrique n'est pas un indicateur environnemental pertinent. Comment le traduire en impact ?

Traduction en impact (carbone) très dépendant de la région du monde !



Électricité en phase d'usage

La consommation électrique n'est pas un indicateur environnemental pertinent. Comment le traduire en impact ?

Traduction en impact (carbone) très dépendant de la région du monde !

Quiz

Quelle est la source d'énergie la plus utilisée pour produire de l'électricité dans le monde ?



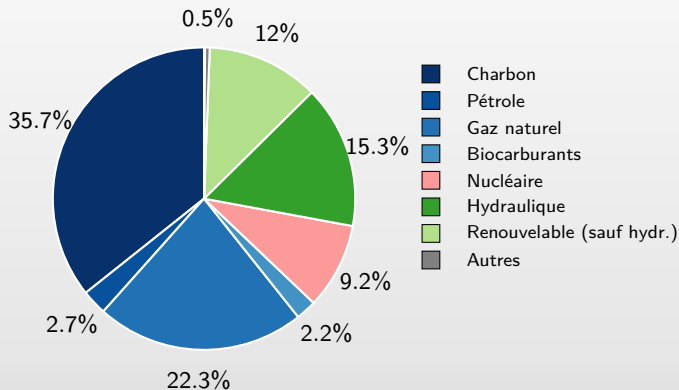
Exprimez-vous ici :

<http://quiz.noiraudes.net/>



Sources de l'énergie électrique

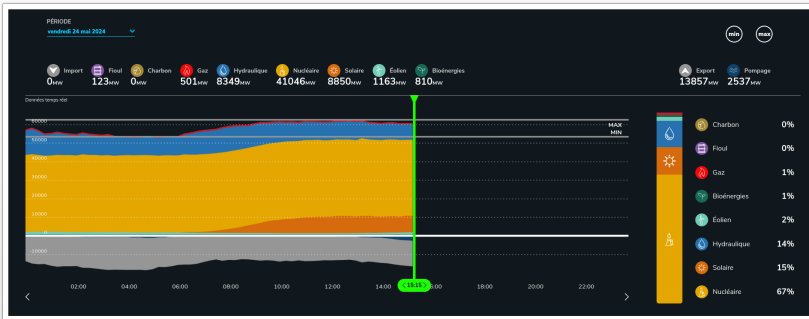
Énergie électrique totale produite (2022) : 29270 TWh



Source : INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022



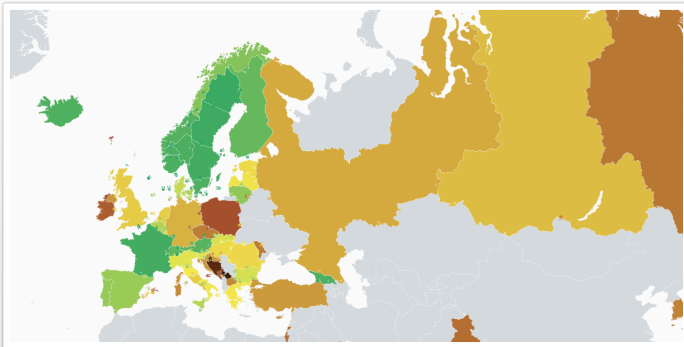
Et en France...



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



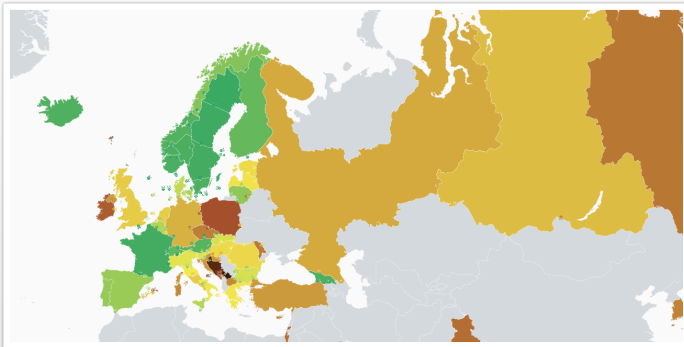
Et en France...



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



Et en France...



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

- **France** : $\approx 80 \text{ g/kWh}$ (chiffre ADEME) ;
- **Monde** : entre 2 g/kWh et $1,9 \text{ kg/kWh}$

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



Une petite digression sur l'énergie...

Petite digression : nous avons parlé de production d'électricité, mais quid de la production d'énergie globale ?



Une petite digression sur l'énergie...

Petite digression : nous avons parlé de production d'électricité, mais quid de la production d'énergie globale ?

Quiz

Quelle est la source d'énergie la plus utilisée dans le monde ?

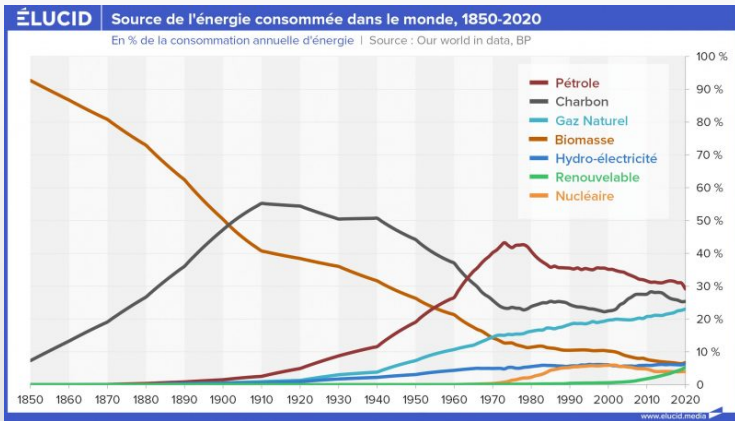


Exprimez-vous ici :

<http://quiz.noiraudes.net/>



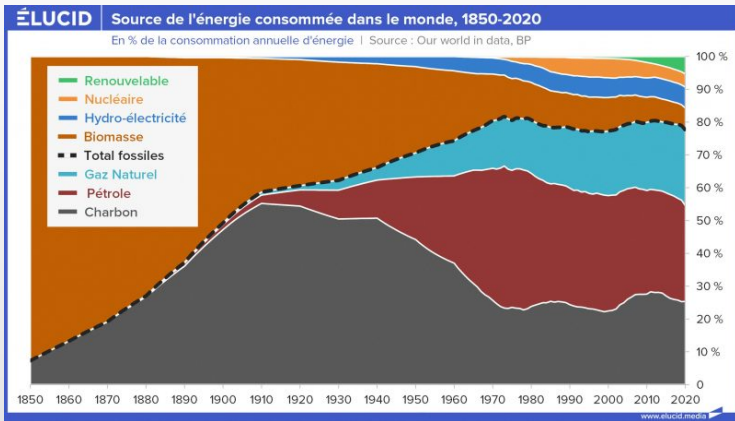
Le mix énergétique mondial



Source (ce graphe et les suivants) : <https://elucid.media/environnement/crise-climatique-et-energetique-regarder-la-verite-en-face-fressoz>

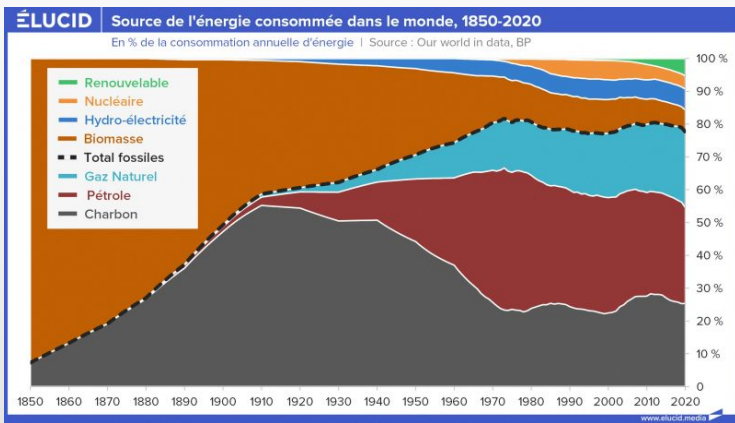


Le mix énergétique mondial





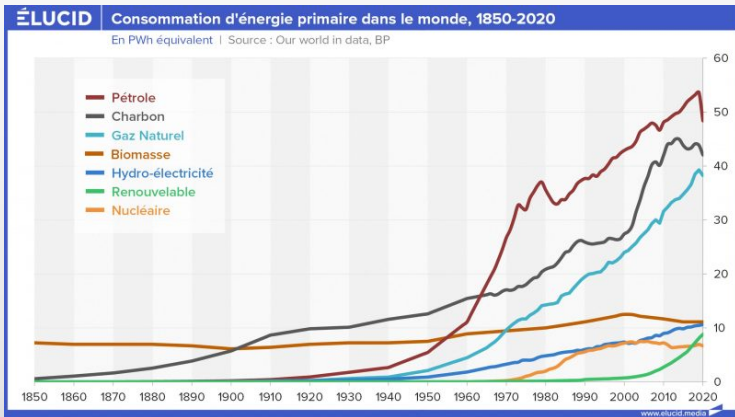
Le mix énergétique mondial



Il s'agit de répartition par pourcentages... Si nous regardions les valeurs absolues ?



Le mix énergétique mondial





Les datacentres : énergie

Revenons au numérique, avec un focus sur les *datacentres*...



Les datacentres : énergie

Revenons au numérique, avec un focus sur les *datacentres*...

Données US, 2023 :

- 176 TWh
- 61 millions de TeqCO_2
- $\approx 1\%$ des émissions nationales



Consommation des datacentres

Données France, 2024 :

- 10 TWh (chiffre RTE)
- $\approx 2\%$ de la consommation électrique totale
- 800000 T_{eq}CO₂ (au facteur d'impact moyen ADEME)
- $\approx 0,3\%$ des émissions nationales



Consommation des datacentres

Données France, 2024 :

- 10 TWh (chiffre RTE)
- $\approx 2\%$ de la consommation électrique totale
- 800000 T_{eq}CO₂ (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 2024
- au moins autant en cours d'instruction
- NB : 4,5 GW $\approx 10\%$ du pic de consommation du samedi 14 juin, $\approx 45 \times$ la puissance électrique de Grenoble



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 moins en moins d'emplois à la clé, 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 Alertes Libé Les alertes, infos et enquêtes Libé à ne pas manquer

ici Télévision Radio L'actu chez moi

Dimanche 15 juin Fête des Germines

En ce moment : Alerte météo • Surveillance de collage tuile 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 : eau

Le fonctionnement d'un datacentre exige une grande quantité d'énergie, mais également de l'eau¹⁴...

14. Planches suivantes issues d'une discussion avec Aurélie Bugeau et Sophie Quinton



Les datacentres : eau

Le fonctionnement d'un datacentre exige une grande quantité d'énergie, mais également de l'eau¹⁴...

- ...pour refroidir (fonctionnement des équipements entre 18 °C et 27 °C)
- ...pour humidifier (taux d'humidité entre 40 % et 60 % pour éviter les décharges électrostatiques)

14. Planches suivantes issues d'une discussion avec Aurélie Bugeau et Sophie Quinton



Refroidir des datacentres





Refroidissement des DC : les chiffres

- 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



Refroidissement des DC : les chiffres

- 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



Google et le Chili

AP WORLD ~ U.S. ~ POLITICS ~ SPORTS ~ ENTERTAINMENT ~ BUSINESS ~ SCIENCE ~ FACT CHECK ~ ODDITIES ~ MORE ~

Minnesota shooting Israel-Iran 'No Kings' protests Desmond Bane Power banks recall

WORLD NEWS

Google says it will rethink its plans for a big data center in Chile over water worries

R.E. Google looks over the Andes Mountains in Santiago, Chile, June 26, 2024. (AP Photo/Josue Pineda, File)

Updated 8:24 PM UTC+2, September 17, 2024

Share

SANTIAGO, Chile (AP) — Google on Tuesday said it would halt plans to develop a major \$200 million data center in Chile to address environmental concerns, a decision reflecting growing worries about the impact of power-thirsty projects around the world.

The U.S. technology company first obtained permits in 2020 to construct the vast project in Chile's capital, Santiago, as demand for the server farms skyrocketed across the globe, fueled by a surge in cloud-based technologies and a [craze for generative AI](#).

But months after a Chilean court partially reversed the center's authorization over water usage concerns, Google announced Tuesday that it would revise the project to comply with more stringent environmental requirements and change its water-intensive cooling system.

Source : [https://apnews.com/article/](https://apnews.com/article/chile-google-data-center-water-drought-environment-d1c6a7a8e8e6e45257ac84fb750b2162)

[chile-google-data-center-water-drought-environment-d1c6a7a8e8e6e45257ac84fb750b2162](https://apnews.com/article/chile-google-data-center-water-drought-environment-d1c6a7a8e8e6e45257ac84fb750b2162)



Water Usage Effectiveness

Pour les datacentres, à l'instar du PUE, on peut utiliser le WUE comme indicateur d'efficacité :

$$WUE_{\text{onsite}} = \frac{\text{Onsite Water Usage}}{\text{IT equipment energy}}$$

$$WUE_{\text{source}} = \frac{\text{Onsite Water Usage} + \text{Water used for energy gen.}}{\text{IT equipment energy}}$$



Water Usage Effectiveness

Pour les datacentres, à l'instar du PUE, on peut utiliser le WUE comme indicateur d'efficacité :

$$WUE_{\text{onsite}} = \frac{\text{Onsite Water Usage}}{\text{IT equipment energy}}$$

$$WUE_{\text{source}} = \frac{\text{Onsite Water Usage} + \text{Water used for energy gen.}}{\text{IT equipment energy}}$$

- Indicateur d'efficacité (non de sobriété)
- Traduit une forme de compromis entre utilisation d'électricité et consommation d'eau

Fin de vie





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)



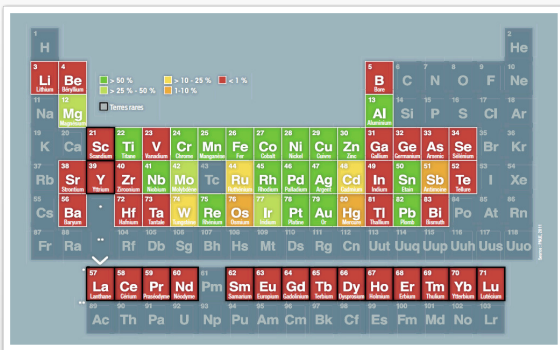
De la vie au déchet

- 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...

Discussions sur l'analyse d'impact





Des services numériques...

La question à 1 000 000 €...

En vrai, combien ça consomme un mail ?



L'envoi d'un mail

Cherchons sur le Web...

- « un e-mail standard génère environ 4 g de CO_2 ; avec une pièce jointe volumineuse, il produit jusqu'à 50 g de CO_2 »¹⁵
- « 19 g : émission CO_2 d'un mail avec une pièce-jointe d'un méga octet »¹⁶
- « l'envoi d'un courriel consomme autant qu'une ampoule laissée allumée 24 heures d'affilée »¹⁷ [$\approx 19\text{geqCO}_2$ pour une ampoule de 10 W en France, *NdT*]
- « En 2014 [...] 1 Mo envoyé correspondait à 15 g de CO_2 »¹⁸

15. <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/eco-consommation-empreinte-carbone-e-mail-10840/>

16. <https://cleanfox.io/blog/foxyactus-fr/chiffres-effrayants-pollution-digitale/>

17. <https://www.legeekmoderne.fr/quel-impact-environnemental-mail/>

18. <https://www.quelleenergie.fr/magazine/impact-environnemental-mail>



L'envoi d'un mail

Cherchons sur le Web...

- « un e-mail standard génère environ 4 g de CO_2 ; avec une pièce jointe volumineuse, il produit jusqu'à 50 g de CO_2 »¹⁵
- « 19 g : émission CO_2 d'un mail avec une pièce-jointe d'un méga octet »¹⁶
- « l'envoi d'un courriel consomme autant qu'une ampoule laissée allumée 24 heures d'affilée »¹⁷ [$\approx 19\text{geqCO}_2$ pour une ampoule de 10 W en France, *NdT*]
- « En 2014 [...] 1 Mo envoyé correspondait à 15 g de CO_2 »¹⁸

Où est la vérité ? Pas simple de répondre...

15. <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/eco-consommation-empreinte-carbone-e-mail-10840/>

16. <https://cleanfox.io/blog/foxyactus-fr/chiffres-effrayants-pollution-digitale/>

17. <https://www.legeekmoderne.fr/quel-impact-environnemental-mail/>

18. <https://www.quelleenergie.fr/magazine/impact-environnemental-mail>



Envoi d'un mail

Pour donner une réponse un peu plus sérieuse, il faut *a minima* :



Envoi d'un mail

Pour donner une réponse un peu plus sérieuse, il faut *a minima* :

1 | Préciser l'**unité fonctionnelle** :

- Quantité de données transmises (taille du mail)
- Nombre de destinataires
- Localisation des serveurs d'envoi / de réception
- ...



Envoi d'un mail

Pour donner une réponse un peu plus sérieuse, il faut *a minima* :

- 1 | Préciser l'**unité fonctionnelle** :
 - Quantité de données transmises (taille du mail)
 - Nombre de destinataires
 - Localisation des serveurs d'envoi / de réception
 - ...
- 2 | Prendre en compte les différentes **étapes du cycle de vie** :
 - Recensement du matériel utilisé (terminaux, réseaux, datacentres...)
 - Évaluation de l'impact sur leur cycle de vie
 - Attribution de cet impact à notre UF



Envoi d'un mail

Pour donner une réponse un peu plus sérieuse, il faut *a minima* :

- 1 | Préciser l'**unité fonctionnelle** :
 - Quantité de données transmises (taille du mail)
 - Nombre de destinataires
 - Localisation des serveurs d'envoi / de réception
 - ...
- 2 | Prendre en compte les différentes **étapes du cycle de vie** :
 - Recensement du matériel utilisé (terminaux, réseaux, datacentres...)
 - Évaluation de l'impact sur leur cycle de vie
 - Attribution de cet impact à notre UF
- 3 | Élargir le point de vue à d'autres critères que le potentiel de changement climatique



Exemple d'une étude d'impact¹⁹

Impact GES d'1 Go sur le réseau Renater entre Orsay et Montpellier
(étude Ecoinfo)

19. FICHER et al., 2021.



Exemple d'une étude d'impact¹⁹

Impact GES d'1 Go sur le réseau Renater entre Orsay et Montpellier
(étude Ecoinfo)

- Unité fonctionnelle

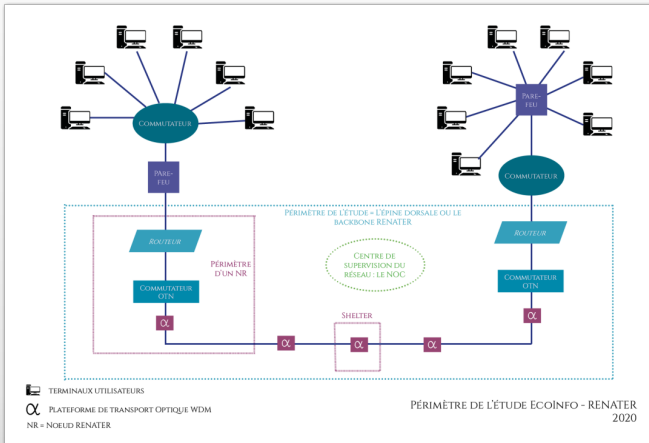
« Transmettre 1 Go de données entre Orsay et Montpellier par une liaison en fibre optique ».

- Limité au potentiel de changement climatique
- Périmètre physique de l'étude : backbone Renater (machines locales non prises en compte) – routeurs de transit identifiés avec traceroute

19. FICHER et al., 2021.



Périmètre physique de l'étude





Facteurs pris en compte

- 1 | Électricité en phase d'usage des équipements
- 2 | Production + transport équipements
- 3 | Utilisation et fabrication des équipements du centre de supervision des réseaux (NOC)
- 4 | Fabrication, installation et utilisation de la fibre optique du réseau



Impact des équipements

Comment l'impact des équipements (facteurs 1 et 2) a-t-il été calculé ?



Impact des équipements

Comment l'impact des équipements (facteurs 1 et 2) a-t-il été calculé ?

1 | Électricité en phase d'usage des équipements :

- Une mesure du trafic sur 24h (jour plein et jour creux)
- Une mesure de la conso électrique **sur la même période**
- Un PUE estimé (en l'occurrence, 1,8)
- Un facteur d'impact (en l'occurrence, $108 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$)



Impact des équipements

Comment l'impact des équipements (facteurs 1 et 2) a-t-il été calculé ?

1 | Électricité en phase d'usage des équipements :

- Une mesure du trafic sur 24h (jour plein et jour creux)
- Une mesure de la conso électrique **sur la même période**
- Un PUE estimé (en l'occurrence, 1,8)
- Un facteur d'impact (en l'occurrence, 108 gCO₂e/kWh)

2 | Production + transport équipements

- Une estimation de l'impact de la fabrication et du transport²⁰
- La durée de vie moyenne (en années)
- Le trafic moyen sur 1 an (en Go), avec hypothèse de trafic constant

20. Fin de vie ignorée par manque de données



Quelques conclusions

- Impact CO_2 sur jour moyenné : 1,5 g CO_2e
- Environ 59 % dus à la phase d'usage des équipements
- 2^{ème} contributeur : fabrication et transport des équipements
- ↗ trafic $\Rightarrow$ ↘ baisse de l'impact unitaire (car la consommation électrique des équipements réseaux est quasiment indépendante du trafic)



Quelques conclusions

- Impact CO₂ sur jour moyenné : 1,5 g CO₂e
- Environ 59 % dus à la phase d'usage des équipements
- 2^{ème} contributeur : fabrication et transport des équipements
- ↗ trafic ⇒ ↘ baisse de l'impact unitaire (car la consommation électrique des équipements réseaux est quasiment indépendante du trafic)

Paramètres influençant le résultat :

- Nombre de nœuds traversés
- PUE des équipements
- Durée de vie
- Facteur d'impact de l'électricité
- **Augmentation du trafic moyen**



Évaluer l'impact en phase d'usage

Revenons sur l'évaluation de l'impact des équipements numériques...
Comment fait-on en pratique ?



Évaluer l'impact en phase d'usage

Revenons sur l'évaluation de l'impact des équipements numériques...
Comment fait-on en pratique ?

Pour évaluer l'impact en phase d'usage, 2 solutions principales :

- 1 | Utiliser une sonde logicielle ou matérielle (outil de mesure intégré)



Évaluer l'impact en phase d'usage

Revenons sur l'évaluation de l'impact des équipements numériques...
Comment fait-on en pratique ?

Pour évaluer l'impact en phase d'usage, 2 solutions principales :

- 1 | Utiliser une sonde logicielle ou matérielle (outil de mesure intégré)
- 2 | Utiliser un outil d'évaluation (en ligne par exemple), comme Green Algorithms ou ML CO₂ impact qui s'appuie sur des estimations à base de quelques paramètres (durée d'entraînement, matériel, localisation, etc.)



Des outils de mesure

Pour mesurer, plusieurs solutions :

- 1 utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés



Des outils de mesure

Pour mesurer, plusieurs solutions :

- 1 utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés
- 2 wattmètres (accès à la machine physique nécessaire, ou instrumentation préalable d'un serveur local)



Des outils de mesure

Pour mesurer, plusieurs solutions :

- 1 utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés
- 2 wattmètres (accès à la machine physique nécessaire, ou instrumentation préalable d'un serveur local)
- 3 sondes logicielles (e.g compteurs RAPL) :



Des outils de mesure

Pour mesurer, plusieurs solutions :

- 1 utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés
- 2 wattmètres (accès à la machine physique nécessaire, ou instrumentation préalable d'un serveur local)
- 3 sondes logicielles (e.g compteurs RAPL) :
 - nombreux outils / bibliothèques disponibles : codecarbon, pyjoules, powerAPI, perf...



Des outils de mesure

Pour mesurer, plusieurs solutions :

- 1 utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés
- 2 wattmètres (accès à la machine physique nécessaire, ou instrumentation préalable d'un serveur local)
- 3 sondes logicielles (e.g compteurs RAPL) :
 - nombreux outils / bibliothèques disponibles : codecarbon, pyjoules, powerAPI, perf...
 - nécessite une architecture particulière (Intel $\geq$ SandyBridge)



Des outils de mesure

Pour mesurer, plusieurs solutions :

- 1 utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés
- 2 wattmètres (accès à la machine physique nécessaire, ou instrumentation préalable d'un serveur local)
- 3 sondes logicielles (e.g compteurs RAPL) :
 - nombreux outils / bibliothèques disponibles : codecarbon, pyjoules, powerAPI, perf...
 - nécessite une architecture particulière (Intel $\geq$ SandyBridge)
 - nécessite une autorisation ou un accès superutilisateur (Linux $\geq$ 5.4.77)



Des outils de mesure

Pour mesurer, plusieurs solutions :

- 1 utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés
- 2 wattmètres (accès à la machine physique nécessaire, ou instrumentation préalable d'un serveur local)
- 3 sondes logicielles (e.g compteurs RAPL) :
 - nombreux outils / bibliothèques disponibles : codecarbon, pyjoules, powerAPI, perf...
 - nécessite une architecture particulière (Intel $\geq$ SandyBridge)
 - nécessite une autorisation ou un accès superutilisateur (Linux $\geq$ 5.4.77)
 - ne donne qu'une vue partielle de la consommation (socket CPU + DRAM + éventuellement GPU intégrés)



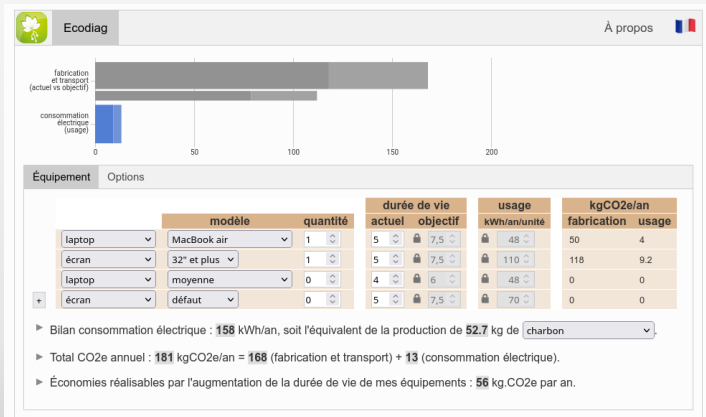
Énergie grise

- Type de matériel numérique
- Nombre d'équipements
- Durée d'utilisation estimée (années)
- Empreinte GES de la fabrication selon Ecodiag
- Fin de vie
 - Réemploi au sein de l'entreprise
 - Revente pour le réemploi
 - Revente pour recyclage
 - Filière de recyclage agréée (préciser)
 - Don pour le réemploi (préciser)
 - Autre (préciser)



À propos d'Ecodiag

L'outil Ecodiag, du GDS EcoInfo, permet de vous faire une idée de l'impact pour un ensemble de machines.





À propos de données...

- On se heurte très souvent au manque de données concernant la fabrication (données dépendantes des fabricants)
- En particulier pour les GPU et les TPU, utilisés dans l'apprentissage profond²¹
- Pourtant, selon l'étude GRICAD d'empreinte d'une heure.cœur de calcul²² : 40 % dues à la phase de fabrication
- Les données sur la fin de vie sont également lacunaires...

21. LIGOZAT et al., 2022.

22. BERTHOUD et al., 2020.



À propos de données...

- On se heurte très souvent au manque de données concernant la fabrication (données dépendantes des fabricants)
- En particulier pour les GPU et les TPU, utilisés dans l'apprentissage profond²¹
- Pourtant, selon l'étude GRICAD d'empreinte d'une heure.cœur de calcul²² : 40 % dues à la phase de fabrication
- Les données sur la fin de vie sont également lacunaires...

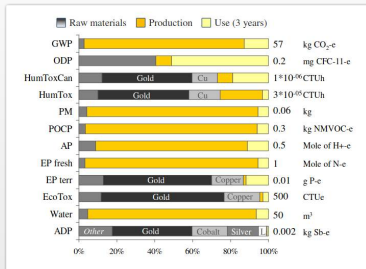
Bon, et si on essaie avec un système plus « simple » (e.g machine seule) et des bases de données complètes ?

21. LIGOZAT et al., 2022.

22. BERTHOUD et al., 2020.



À propos de chiffres (ACV)²³

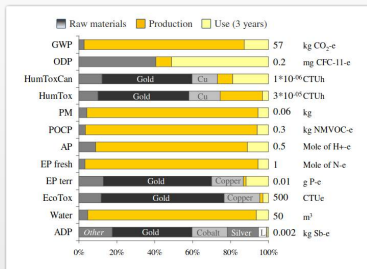


Z5 avec accessoires, BD Ecoinvent

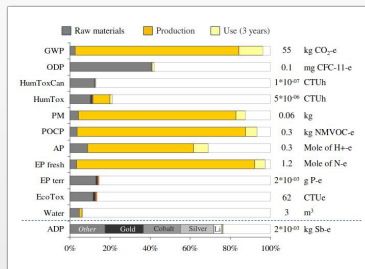
23. Source : ERCAN et al., 2016, cité par Sophie Quinton



À propos de chiffres (ACV)²³



Z5 avec accessoires, BD Ecoinvent

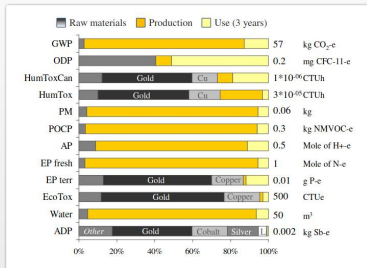


Z5 avec accessoires, BD GaBi
pour la prod d'or et. d'énergie

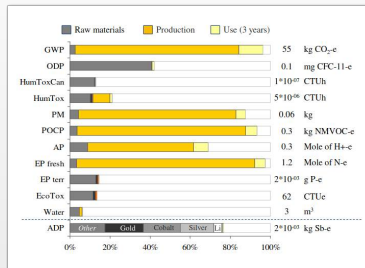
23. Source : ERCAN et al., 2016, cité par Sophie Quinton



À propos de chiffres (ACV)²³



Z5 avec accessoires, BD Ecoinvent



Z5 avec accessoires, BD GaBi
pour la prod d'or et. d'énergie

- Hypothèses extrêmements différentes sur les conditions d'extraction de l'or
- « *Neither of the two scenarios [...] could be described as the true one, rather they represent a range of possible outcomes* »

23. Source : ERCAN et al., 2016, cité par Sophie Quinton



L'impact du mail

Que faire si on vous demande « combien ça consomme un mail ? »



L'impact du mail

Que faire si on vous demande « combien ça consomme un mail ? »

- La meilleure réponse est en général « je ne sais pas », ou « ça dépend »
- Mais 10 g CO₂e est un meilleur ordre de grandeur que 0,1 g CO₂e ou que 10 kg CO₂e
- Si vous avez du courage, réalisez une ACV complète en définissant bien l'UF, mais ce n'est pas dit que vous obtiendrez mieux que cet ordre de grandeur (et en plus, méfiance sur les chiffres...)



L'impact du mail

Que faire si on vous demande « combien ça consomme un mail ? »

- La meilleure réponse est en général « je ne sais pas », ou « ça dépend »
- Mais 10 g CO₂e est un meilleur ordre de grandeur que 0,1 g CO₂e ou que 10 kg CO₂e
- Si vous avez du courage, réalisez une ACV complète en définissant bien l'UF, mais ce n'est pas dit que vous obtiendrez mieux que cet ordre de grandeur (et en plus, méfiance sur les chiffres...)

Question : doit-on en déduire que si l'on évite l'envoi d'un mail, on économise 10 CO₂e ?



De l'attribution des impacts

- La plupart des ACV (et des évaluations, de manière générale) sont :
 - attributionnelles
 - court-termistes
- Question sous-jacente : pourquoi réalise-t-on l'ACV ?
 - pour comparer des solutions ? (e.g solution de mail 1 vs solution de mail 2)
 - pour prendre une décision ? (e.g dois-je mettre sur le marché la solution de mail X ? Dois-je envoyer un mail Y ?)
 - pour comprendre une réalité physique ? (e.g quelle infrastructure matérielle permet l'envoi du mail Y ?)



Renater

cf étude Renater, avec solutions parfois contre-intuitives.

« Notre démarche vise à trouver des leviers d'actions pour réduire l'impact des données sur le réseau RENATER. »



Renater

cf étude Renater, avec solutions parfois contre-intuitives.

« Notre démarche vise à trouver des leviers d'actions pour réduire l'impact des données sur le réseau RENATER. »

- Solution évidente pour diminuer l'impact : augmenter le trafic !



Renater

cf étude Renater, avec solutions parfois contre-intuitives.

« Notre démarche vise à trouver des leviers d'actions pour réduire l'impact des données sur le réseau RENATER. »

- Solution évidente pour diminuer l'impact : augmenter le trafic !
- Attention à l'utilisation d'ACV attributionnelles pour raisonner sur des scénarios contrefactuels



Renater

cf étude Renater, avec solutions parfois contre-intuitives.

« Notre démarche vise à trouver des leviers d'actions pour réduire l'impact des données sur le réseau RENATER. »

- Solution évidente pour diminuer l'impact : augmenter le trafic !
- Attention à l'utilisation d'ACV attributionnelles pour raisonner sur des scénarios contrefactuels
- Et même la question de l'attribution est une question **politique** (attribution de responsabilités...)



Message à emporter

Message à emporter

- L'impact du numérique ne se limite pas à l'usage
- L'impact du numérique ne se limite pas à l'émission de GES
- Les dispositifs numériques actuels sont extrêmement complexes, gourmands en matériaux, et très mal recyclés
- Estimer les impacts globaux du numérique est très complexe et tout ordre de grandeur n'est valable qu'avec une marge importante d'incertitude
- Attention donc aux conclusions hâtives...





Menu du jour

- 1 | Amuse-bouche : le numérique
- 2 | Entrée : l'état du monde
- 3 | Plat de résistance : les impacts directs
- 4 | **Dessert : Effets rebonds et indirects**
- 5 | Conclusion



Comment agir ?

Question interactive

Quelles sont vos idées pour réduire l'impact du numérique, à l'aune de ce que nous avons vu jusqu'à présent ?





L'éléphant dans la pièce...

Solutions évidentes aux problèmes d'impact :

- augmenter l'efficacité énergétique des dispositifs
- diminuer l'impact de la fabrication
- augmenter le réemploi des dispositifs en fin de vie

Mais...



L'éléphant dans la pièce...

Solutions évidentes aux problèmes d'impact :

- augmenter l'efficacité énergétique des dispositifs
- diminuer l'impact de la fabrication
- augmenter le réemploi des dispositifs en fin de vie

Mais...

...L'éléphant dans la pièce : les effets rebonds et indirects



Effet rebond

Quiz

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



Exprimez-vous ici :

<http://quiz.noiraudes.net/>



Métaphore introductive

Un joli petit village de montagne²⁴ ...



Source : <https://pxhere.com/en/photo/1543053> (CC0 Public Domain).

24. Apparemment il s'agirait du village d'Hallstatt, en Autriche. Merci à l'étudiant de la session Kaléidoscope 2024 qui a été le premier à me donner l'information !



Métaphore introductive (suite)

- **Situation 1** : le réseau de distribution d'eau est de mauvaise qualité et a de nombreuses fuites



Métaphore introductive (suite)

- **Situation 1** : le réseau de distribution d'eau est de mauvaise qualité et a de nombreuses fuites
- (une réparation a lieu et le réseau est modernisé)



Métaphore introductive (suite)

- **Situation 1** : le réseau de distribution d'eau est de mauvaise qualité et a de nombreuses fuites
- (une réparation a lieu et le réseau est modernisé)
- **Situation 2** : le réseau de distribution d'eau ne possède plus de fuite et est beaucoup plus efficace



Métaphore introductive (suite)

- **Situation 1** : le réseau de distribution d'eau est de mauvaise qualité et a de nombreuses fuites
- (une réparation a lieu et le réseau est modernisé)
- **Situation 2** : le réseau de distribution d'eau ne possède plus de fuite et est beaucoup plus efficace
- **Situation finale** : la réserve d'eau du village se vide en une semaine



Métaphore introductive (suite)

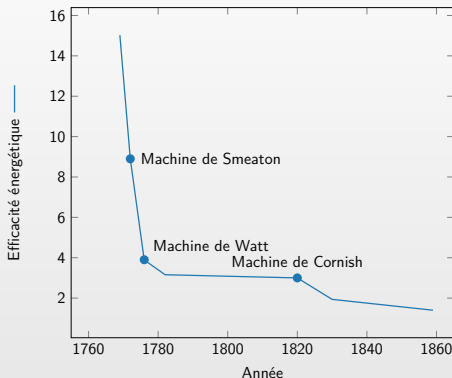
- **Situation 1** : le réseau de distribution d'eau est de mauvaise qualité et a de nombreuses fuites
- (une réparation a lieu et le réseau est modernisé)
- **Situation 2** : le réseau de distribution d'eau ne possède plus de fuite et est beaucoup plus efficace
- **Situation finale** : la réserve d'eau du village se vide en une semaine



Que s'est-il passé ?



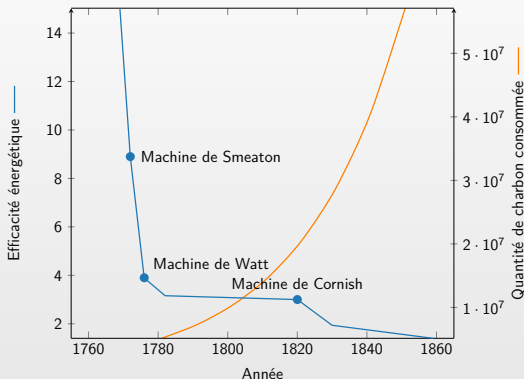
La question du charbon



- 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)



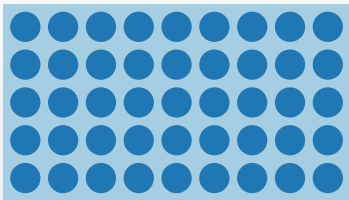
L'effet rebond²⁵



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



L'effet rebond ²⁵



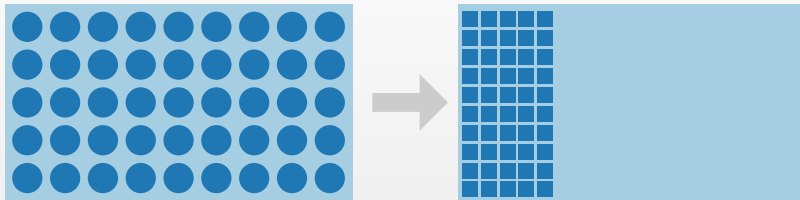
Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



Machin qui consomme de la ressource



L'effet rebond ²⁵



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



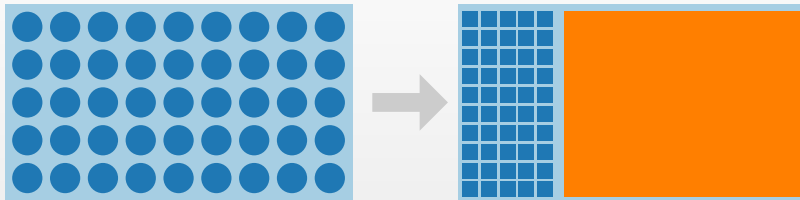
Machin qui consomme de la ressource



Truc plus efficace qui consomme de la ressource



L'effet rebond²⁵



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



Machin qui consomme de la ressource



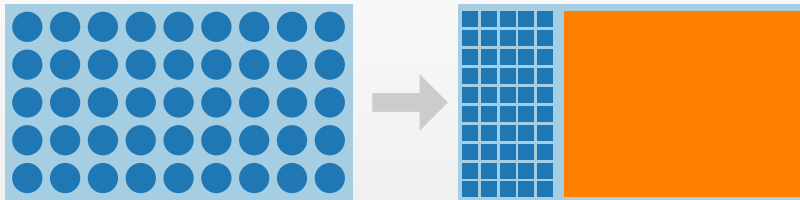
Truc plus efficace qui consomme de la ressource



Ressource libérée



L'effet rebond ²⁵



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



Machin qui consomme de la ressource



Truc plus efficace qui consomme de la ressource

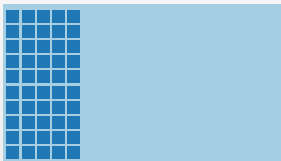


Ressource libérée

Que fait-on de cette ressource libérée ?

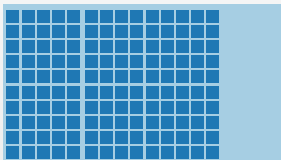


L'effet rebond





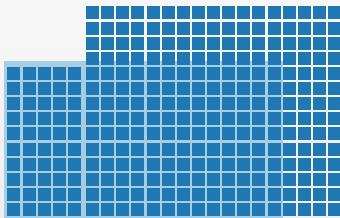
L'effet rebond



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



L'effet rebond

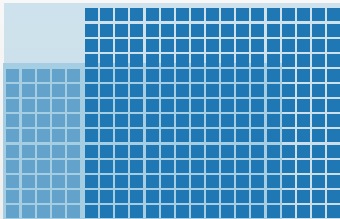


Backfire !

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



L'effet rebond

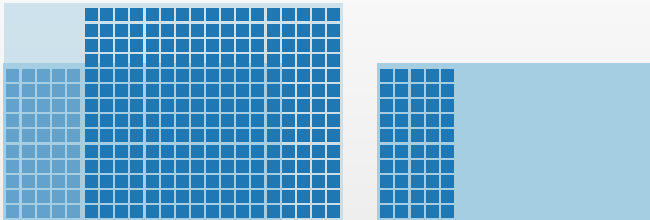


Backfire !

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



L'effet rebond

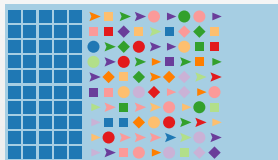
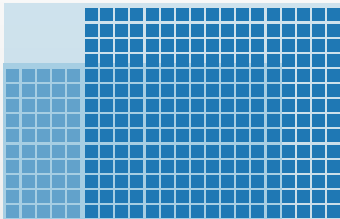


Backfire !

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



L'effet rebond

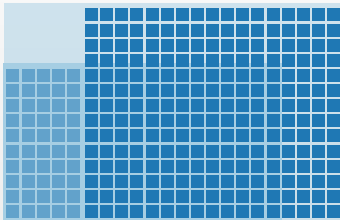


Backfire !

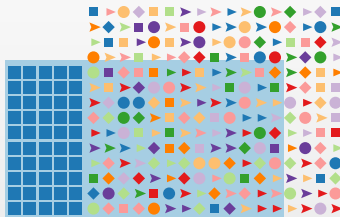
- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)



L'effet rebond



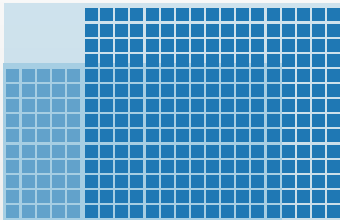
Backfire !



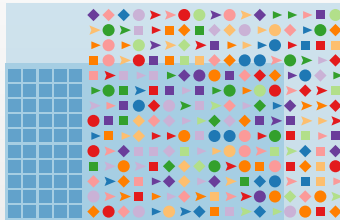
Backfire !

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

L'effet rebond



Backfire !



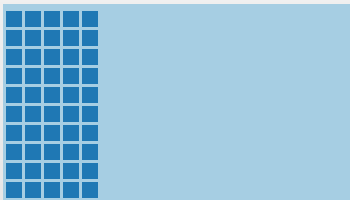
Backfire !

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



Effet rebond

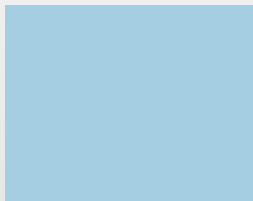
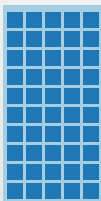
Ce qu'il faudrait (probablement) faire :





Effet rebond

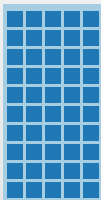
Ce qu'il faudrait (probablement) faire :





Effet rebond

Ce qu'il faudrait (probablement) faire :





Taxonomie des impacts

Il existe une taxonomie des impacts (directs et indirects), décrite par HORNER, SHEHABI et AZEVEDO, 2016

C'est bon, passons à la suite...



Taxonomie des impacts

Taxonomie et exemple inspirés de HORNER, SHEHABI et AZEVEDO, 2016

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie



Taxonomie des impacts

Taxonomie et exemple inspirés de HORNER, SHEHABI et AZEVEDO, 2016

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie

Exemple : déploiement d'un système GPS pour la navigation routière

- Impact de fabrication d'un système GPS
- Impact d'utilisation d'un système GPS
- Impact de traitement d'un système GPS à la fin de sa vie



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation

Exemple : déploiement d'un système GPS pour la navigation routière

- Fluidité du trafic accrue grâce au système de navigation



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution

Exemple : déploiement d'un système GPS pour la navigation routière

- Remplacement des cartes papier



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
3ème ordre		substitution
		rebond direct



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
3ème ordre		rebond direct

Exemple : déploiement d'un système GPS pour la navigation routière

- Davantage de déplacements à cause d'un coût unitaire de déplacement diminué (trafic plus fluide)



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
		rebond direct
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond indirect



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
		rebond direct
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond indirect

Exemple : Système GPS pour la navigation routière

- Le temps et le coût économisés avec des services plus efficaces sont réinvestis dans des trajets en avion par exemple



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
3ème ordre		rebond direct
	Indirect : services complémentaires	rebond indirect
	Indirect : économie	changement structurel



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
		rebond direct
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond indirect
	Indirect : économie	changement structurel

Exemple : Système GPS pour la navigation routière

- Le GPS permet le déploiement de véhicules autonomes, ce qui induit une production accrue de ces nouveaux systèmes



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
		rebond direct
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond indirect
	Indirect : économie	changement structurel
	Indirect : société	transformation systémique



Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
		rebond direct
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond indirect
	Indirect : économie	changement structurel
	Indirect : société	transformation systémique

- L'arrivée des véhicules autonomes modifie en profondeur le comportement des individus, qui vont choisir par exemple d'habiter plus loin de leur lieu de travail



Un exemple : le télétravail

Le télétravail, c'est bon pour l'environnement, non ?

26. [https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37\[...\]](https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37[...])



Un exemple : le télétravail

Le télétravail, c'est bon pour l'environnement, non ?

À la base, oui (cf Étude Ademe²⁶) :

- -271 kgeqCO₂ par an et par jour de travail hebdomadaire

26. [https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37\[...\]](https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37[...])



Un exemple : le télétravail

Le télétravail, c'est bon pour l'environnement, non ?

À la base, oui (cf Étude Ademe²⁶) :

- -271 kgeqCO₂ par an et par jour de travail hebdomadaire

Quid des effets indirects ?

26. [https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37\[...\]](https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37[...])



Télétravail : effets indirects

- (-) Augmentation des flux vidéo
- (-) Nouvelles consommations énergétiques au domicile
- (-) Étapes du trajet domicile-bureau (courses, enfants...) réalisées quand même
- (-) Nouvelles mobilités quotidiennes
- (+) Réduction des surfaces de bureaux en entreprise si flex office



Télétravail : effets indirects

- (-) Augmentation des flux vidéo
- (-) Nouvelles consommations énergétiques au domicile
- (-) Étapes du trajet domicile-bureau (courses, enfants...) réalisées quand même
- (-) Nouvelles mobilités quotidiennes
- (+) Réduction des surfaces de bureaux en entreprise si flex office

Conclusion de l'Ademe : entre -31 % et 52 % de minoration / majoration des effets selon mise en place du flex office.



Télétravail : effets indirects

- (-) Augmentation des flux vidéo
- (-) Nouvelles consommations énergétiques au domicile
- (-) Étapes du trajet domicile-bureau (courses, enfants...) réalisées quand même
- (-) Nouvelles mobilités quotidiennes
- (+) Réduction des surfaces de bureaux en entreprise si flex office

Conclusion de l'Ademe : entre -31 % et 52 % de minoration / majoration des effets selon mise en place du flex office.

C'est tout ?



Télétravail : effets systémiques

Des effets systémiques à suivre :

- (-) Accroissement de l'équipement numérique
- (-) Éloignement du domicile
- (+) Réduction des déplacements professionnels
- (+) Réduction de la congestion routière
- (-) Augmentation des week-ends de villégiature
- (-) Extension des domiciles privés



Télétravail : effets systémiques

Des effets systémiques à suivre :

- (-) Accroissement de l'équipement numérique
- (-) Éloignement du domicile
- (+) Réduction des déplacements professionnels
- (+) Réduction de la congestion routière
- (-) Augmentation des week-ends de villégiature
- (-) Extension des domiciles privés

Tout cela reste extrêmement difficile à évaluer...



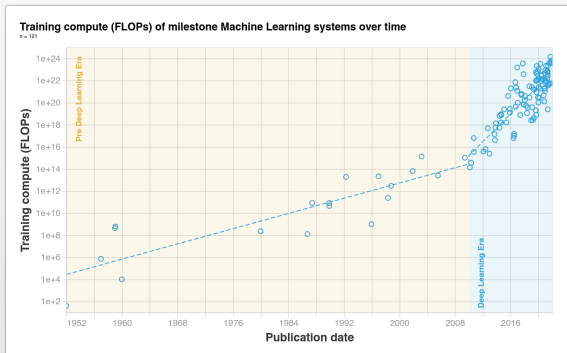
Discussion sur les effets

- Agir sur les effets directs = **efficacité**
- Travailler sur l'efficacité n'a d'effet réel sur l'impact que si **la demande reste constante** (ou au moins bornée)
- Dans de nombreux cas observés :
 - soit la demande augmente naturellement
 - soit l'augmentation d'efficacité induit une augmentation de la demande
 - soit l'augmentation d'efficacité induit une augmentation de la demande pour des produits ou services autres
- Mais cela reste très difficile à caractériser et à anticiper



Tendances observées dans le ML

Quelques éléments de réflexion (appliqués à l'IA)...



Période bleue : $\approx \times 2$ tous les 6 mois

Source : SEVILLA et al., 2022



Efficacité vs exponentielle

Un petit exercice de pensée :

- chaque FLOP consomme x joules
- à l'année N , le nombre moyen de FLOPS effectué par l'entraînement d'une machine est de C (donc consommation totale Cx joules)
- cette même année, une innovation de rupture permet de diviser par 10 la consommation unitaire d'une FLOP



Efficacité vs exponentielle

Un petit exercice de pensée :

- chaque FLOP consomme x joules
- à l'année N , le nombre moyen de FLOPS effectué par l'entraînement d'une machine est de C (donc consommation totale Cx joules)
- cette même année, une innovation de rupture permet de diviser par 10 la consommation unitaire d'une FLOP

Question : En combien de temps après l'année N aurai-je dépassé la consommation totale Cx joules si les tendances se poursuivent ?



Efficacité vs exponentielle

Un petit exercice de pensée :

- chaque FLOP consomme x joules
- à l'année N , le nombre moyen de FLOPS effectué par l'entraînement d'une machine est de C (donc consommation totale Cx joules)
- cette même année, une innovation de rupture permet de diviser par 10 la consommation unitaire d'une FLOP

Question : En combien de temps après l'année N aurai-je dépassé la consommation totale Cx joules si les tendances se poursuivent ?

Réponse : En 2 ans dans le meilleur des cas.



Efficacité vs exponentielle

Un petit exercice de pensée :

- chaque FLOP consomme x joules
- à l'année N , le nombre moyen de FLOPS effectué par l'entraînement d'une machine est de C (donc consommation totale Cx joules)
- cette même année, une innovation de rupture permet de diviser par 10 la consommation unitaire d'une FLOP

Question : En combien de temps après l'année N aurai-je dépassé la consommation totale Cx joules si les tendances se poursuivent ?

Réponse : En 2 ans dans le meilleur des cas.

Morale de l'histoire : l'augmentation d'efficacité ne fait que repousser des limites mais n'induit pas à moyen terme de diminution d'impact



À propos des *enabling effects*

- Lorsque les technologies induisent des effets indirects positifs, on parle d'*enabling effects*



À propos des *enabling effects*

- Lorsque les technologies induisent des effets indirects positifs, on parle d'*enabling effects*
- Deux rapports techniques mentionnent des *enabling effects* globaux des technologies numériques GESI, 2015 ; GSMA, 2019
- Les faiblesses méthodologiques de ces rapports ont été identifiées²⁷
- En outre, ces rapports ignorent les effets rebonds et indirects

« To the best of our knowledge, no scientific publication so far has provided an assessment of the global [...] enabling effects of digitalization for GHG emissions mitigation » (ROUSSILHE, LIGOZAT et QUINTON, 2023)

27. ROUSSILHE, LIGOZAT et QUINTON, 2023.



Message à emporter

Message à emporter

- Diminution locale d'impact $\nrightarrow$ Diminution globale d'impact
- Souvent, c'est même le contraire !
- Il n'existe actuellement aucune étude sérieuse qui montre que le numérique a un effet globalement positif sur l'environnement
- Effets indirects (surtout systémiques) difficiles à quantifier, mais il faut les avoir en tête
- Penser de façon systémique





Menu du jour

- 1 | Amuse-bouche : le numérique
- 2 | Entrée : l'état du monde
- 3 | Plat de résistance : les impacts directs
- 4 | Dessert : Effets rebonds et indirects
- 5 | **Conclusion**



Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent



Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent
- L'écosystème numérique a un impact considérable tout au long du cycle de vie



Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent
- L'écosystème numérique a un impact considérable tout au long du cycle de vie
- Le monde numérique connaît une croissance très importante



Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent
- L'écosystème numérique a un impact considérable tout au long du cycle de vie
- Le monde numérique connaît une croissance très importante
- Il contribue également à la grande accélération



Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent
- L'écosystème numérique a un impact considérable tout au long du cycle de vie
- Le monde numérique connaît une croissance très importante
- Il contribue également à la grande accélération
- Augmenter l'efficacité énergétique ne prémunit pas contre les effets rebonds et indirects



Et vous dans tout ça ?¹

- Ces sujets ne sont **ni hors-sol, ni hors-société** : mettent la société en tension

¹ Cette planche et la suivante fortement inspirées de G. Panthou (merci à lui !)



Et vous dans tout ça ?¹

- Ces sujets ne sont **ni hors-sol, ni hors-société** : mettent la société en tension
- Pour faire face collectivement, nous aurons probablement besoin de faire des **choix éclairés**, fondés sur des **bases scientifiques solides**

¹ Cette planche et la suivante fortement inspirées de G. Panthou (merci à lui !)



Et vous dans tout ça ?¹

- Ces sujets ne sont **ni hors-sol, ni hors-société** : mettent la société en tension
- Pour faire face collectivement, nous aurons probablement besoin de faire des **choix éclairés**, fondés sur des **bases scientifiques solides**
- En tant que (futur-es) ingénieur-es, vous êtes aux premières loges :

¹ Cette planche et la suivante fortement inspirées de G. Panthou (merci à lui !)



Et vous dans tout ça ?¹

- Ces sujets ne sont **ni hors-sol, ni hors-société** : mettent la société en tension
- Pour faire face collectivement, nous aurons probablement besoin de faire des **choix éclairés**, fondés sur des **bases scientifiques solides**
- En tant que (futur-es) ingénieur-es, vous êtes aux premières loges :
 - vos choix de développement modèlent la société

¹ Cette planche et la suivante fortement inspirées de G. Panthou (merci à lui !)



Et vous dans tout ça ?¹

- Ces sujets ne sont **ni hors-sol, ni hors-société** : mettent la société en tension
- Pour faire face collectivement, nous aurons probablement besoin de faire des **choix éclairés**, fondés sur des **bases scientifiques solides**
- En tant que (futur-es) ingénieur-es, vous êtes aux premières loges :
 - vos choix de développement modèlent la société
 - vous avez (ou êtes censés avoir) la connaissance permettant d'éclairer la société

¹ Cette planche et la suivante fortement inspirées de G. Panthou (merci à lui !)



Et vous dans tout ça ?¹

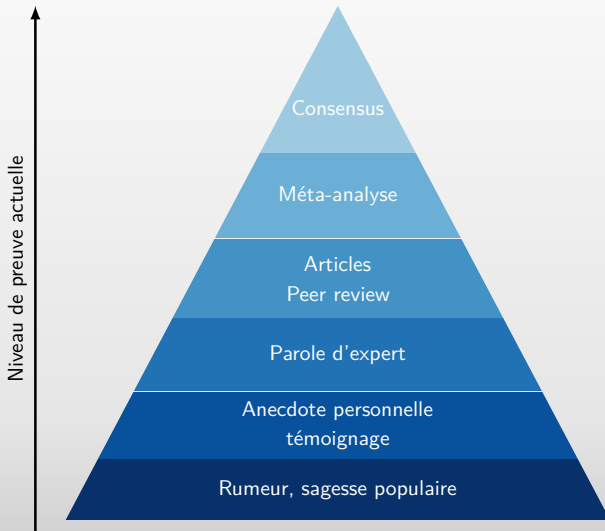
- Ces sujets ne sont **ni hors-sol, ni hors-société** : mettent la société en tension
- Pour faire face collectivement, nous aurons probablement besoin de faire des **choix éclairés**, fondés sur des **bases scientifiques solides**
- En tant que (futur-es) ingénieur-es, vous êtes aux premières loges :
 - vos choix de développement modèlent la société
 - vous avez (ou êtes censés avoir) la connaissance permettant d'éclairer la société

Qu'est-ce qu'une base scientifique solide ?

¹ Cette planche et la suivante fortement inspirées de G. Panthou (merci à lui !)

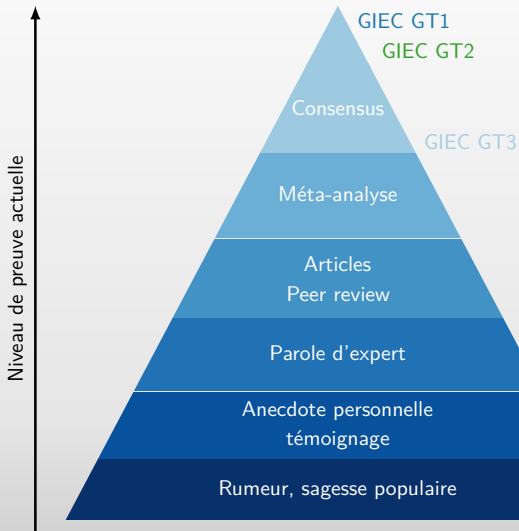


Niveau de preuve scientifique



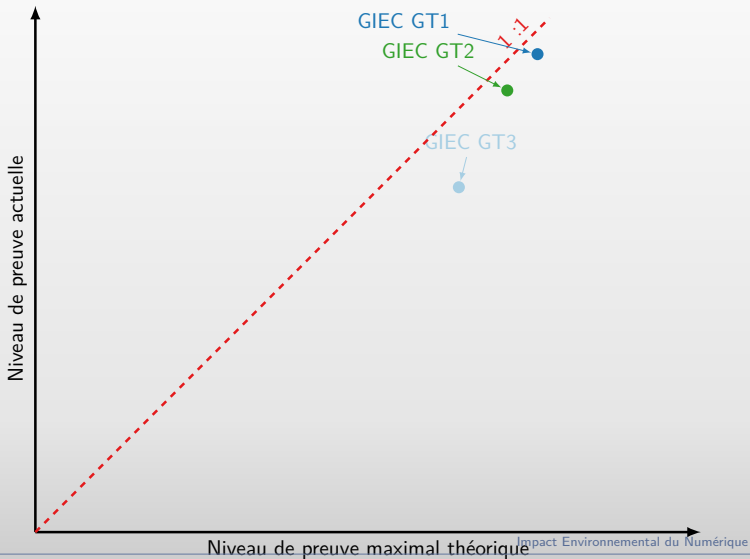


Niveau de preuve scientifique



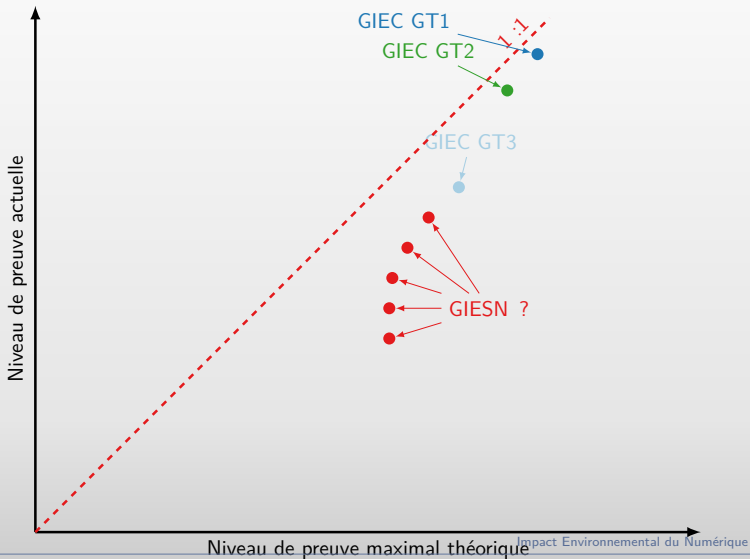


Niveau de preuve scientifique





Niveau de preuve scientifique





Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?



Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :



Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

- 1 | De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...



Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

- 1 | De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...
- 2 | Des changements sociétaux qui imposent des limites drastiques (contraintes choisies → objectif 0 émission)



Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

- 1 | De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...
- 2 | Des changements sociétaux qui imposent des limites drastiques (contraintes choisies → objectif 0 émission)
- 3 | Un miracle technologique qui nous permet de produire de l'énergie sans polluer



Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

- 1 | De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...
- 2 | Des changements sociétaux qui imposent des limites drastiques (contraintes choisies → objectif 0 émission)
- 3 | Un miracle technologique qui nous permet de produire de l'énergie sans polluer
- 4 | D'autres idées ?



Des signes avant-coureurs

De la science-fiction ?

- *Semi-conducteurs : la sécheresse à Taïwan risque d'amplifier la pénurie mondiale*²⁸ (Le Figaro, 21/04/21)
- *La pénurie de nickel menace la transition énergétique*²⁹ (Les Échos, 06/10/20)

28. [https://www.lefigaro.fr/flash-eco/semi-c\[...\]](https://www.lefigaro.fr/flash-eco/semi-c[...])

29. [https://www.lesechos.fr/idees-debats/editos-analyses/la-penu\[...\]](https://www.lesechos.fr/idees-debats/editos-analyses/la-penu[...])



Penser avec des limites

Message à emporter

L'informatique de demain est une informatique pensée *avec des limites*.



Penser avec des limites

Message à emporter

L'informatique de demain est une informatique pensée *avec des limites*.

Questions à emporter :

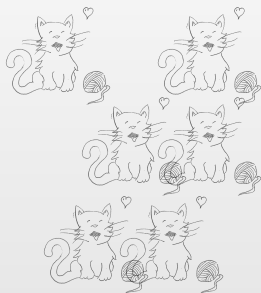
- Que fera-t-on lorsque l'on n'aura plus suffisamment de ressources pour faire fonctionner l'informatique telle qu'on la connaît aujourd'hui ?
- Quelles applications sont-elles fondamentales ? Quelles applications vous paraissent relever du luxe ?
- Si vous deviez parier sur l'informatique en 2030, dans quel genre d'applications investiriez-vous ?



Gaston est dubitatif...



Gaston est dubitatif...



Et ses amis également...



Une dernière question...

Quiz

Combien y avait-il de chats jouant avec une pelote de laine dans cette présentation ?



Exprimez-vous ici :

<http://quiz.noiraudes.net/>



Menu du jour

- 1 | Amuse-bouche : le numérique
- 2 | Entrée : l'état du monde
- 3 | Plat de résistance : les impacts directs
- 4 | Dessert : Effets rebonds et indirects
- 5 | Conclusion

-  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.
-  BORDAGE, F. et al. (2021). *Digital technologies in Europe : an environmental life cycle approach*. Rapp. tech. GreenIT.fr.
-  BORDAGE, Frédéric (2019). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. GreenIT.fr. URL : https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-rapport-accessible.VF_.pdf (visité le 01/10/2019).
-  CARNINO, Guillaume et Clément MARQUET (2018). “Les datacenters enfoncent le cloud : enjeux politiques et impacts environnementaux d’internet”. In : *Zilsel* 3.1. <https://www.cairn.info/revue-zilsel-2018-1-page-19.htm>.

-  CISCO (fév. 2019). *Cisco Visual Networking Index : Forecast and Trends, 2017–2022 White Paper*. Rapp. tech. Document ID :1551296909190103. Cisco.
-  CRAWFORD, K. (2022). *Contre-atlas de l'Intelligence Artificielle*. Zulma Essais.
-  CRÉDOC (2019). *Baromètre du Numérique 2019*. URL : [https://www.credoc.fr/publications/barometre-du-numerique-2019\)%20%5Bversion%20t%C3%A9%C3%A9charg%C3%A9%5D\(./ressources/BarometreNumerique2019.pdf](https://www.credoc.fr/publications/barometre-du-numerique-2019)%20%5Bversion%20t%C3%A9%C3%A9charg%C3%A9%5D(./ressources/BarometreNumerique2019.pdf) (visité le 01/11/2021).
-  DUTERME, Renaud (mai 2021). “L’industrie mondiale bientôt à sec ?” In : *Mediapart*.
-  ERCAN, Mine et al. (jan. 2016). “Life Cycle Assessment of a Smartphone”. In : *Proceedings of ICT4S 2016*. DOI : 10.2991/ict4s-16.2016.15.
-  EUROPEAN COMMISSION (mai 2018). *Report on critical raw materials and the circular economy*. Rapp. tech. European Commission.

-  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.
-  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. EcolInfo, 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]*.
-  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.
-  SYSTEXT (2017). *Animation en ligne | Des métaux dans mon smartphone* ? URL : <https://www.systext.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.