

Impact Environnemental du Numérique

L'insoutenable Matérialité du Virtuel

Sylvain Bouveret

LIG, Ensimag-Grenoble INP, Ecoinfo

Version décembre 2024



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 (CentraleSupelec, mars 2021) : IA responsable
- Cours de Geremy Panthou (IGE) pour la partie environnement
- + plein d'autres ressources EcoInfo

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
- Plat de résistance : les impacts directs
- 4 Dessert: Effets rebonds et indirect
- 5 Conclusion



L'écosystème numérique

Numérique ?

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



L'écosystème numérique

Numérique ?

 $Num\'erique \approx$ 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/



Quiz

Une voiture électrique est-elle un objet numérique ?



Exprimez-vous ici :

http://quiz.noiraudes.net/



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



Source: ROUSSILHE, 2022



- 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...



- 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 ?

















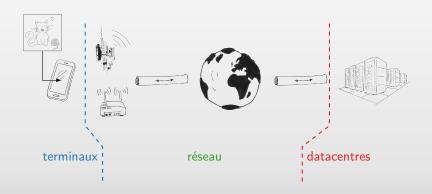














Numérique = virtuel ?

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



Numérique = virtuel ?

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

Le numérique vous semble-t-il si virtuel que ça ?



Le numérique mondial

Chiffres-clefs pour le monde 1

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

1. Frédéric BORDAGE, 2019.



Le numérique mondial

Chiffres-clefs pour le monde 1

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

Terminaux	Smartphones autres téléphones disp. affichage objets connectés	3,5 milliards3,8 milliards3,1 milliards19 milliards [3-30 milliards]
Réseaux	box DSL/fibre Antennes relais autres équip. actifs	1,1 milliard 10 millions 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 :

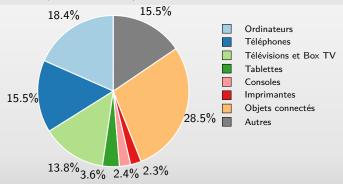
http://quiz.noiraudes.net/



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 2024 3 :

- 10,3 éq. par foyer (\approx 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 2024 3 :

- 10,3 éq. par foyer (\approx 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.



- 5. Statista Research Department, 2016.
- 6. Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.



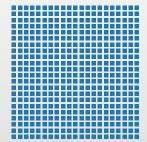
Usage des réseaux ⁶

- 2019, trafic IP mondial gd public 5 (proj.) : 1,66 Zo (= 1,66 \times 10 21 o)
- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 Zo (= 1.5×10^{21} o)
- 2002 : 3,2 Eo (\approx 500 \times moins)

- 5. Statista Research Department, 2016.
- 6. Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.



- 2019, trafic IP mondial gd public 5 (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)

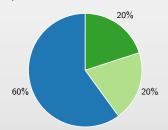


- 5. Statista Research Department, 2016.
- 6. Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.



- 2019, trafic IP mondial gd public 5 (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 :

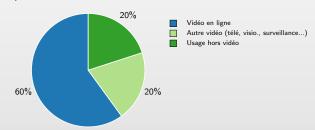


- 5. Statista Research Department, 2016.
- 6. Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.



- 2019, trafic IP mondial gd public 5 (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 :

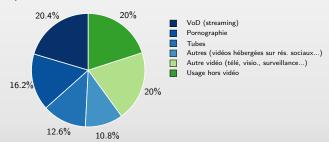


- 5. Statista Research Department, 2016.
- 6. Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.



- 2019, trafic IP mondial gd public 5 (proj.) : 1,66 Zo (= 1,66 imes 10 21 o)
- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 Zo (= 1.5×10^{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.



Quelques chiffres pour le Web 7

7. HTTP Archive, 2021.



Quelques chiffres pour le Web 7

- environ 1.9×10^9 sites web (2021)
- dont environ 200×10^6 actifs

7. HTTP Archive, 2021.



Focus sur le temps de chargement moyen d'une page Web 8 :



^{8.} Internet Live Stats, 2021.



Focus sur le temps de chargement moyen d'une page Web 8 :



Question à emporter

Pensez-vous que les dispositifs ont eu une puissance de calcul constante sur cette période ?

8. Internet Live Stats, 2021.



Derrière les réseaux...

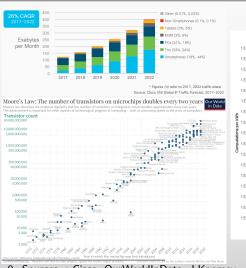
Et encore une fois, tout ceci n'a rien de virtuel...

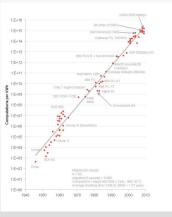


(source https://www.infrapedia.com/app)



Une très forte croissance 9





9. Sources: Cisco, OurWorldInData, J.Koomey



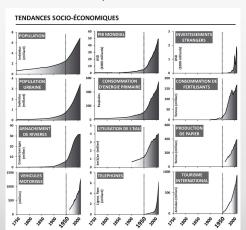
La grande accélération : les usages

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



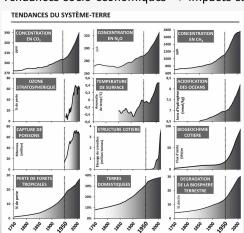
La grande accélération : les impacts

Tendances socio-économiques \rightarrow impacts sur le système-Terre ?



La grande accélération : les impacts

Tendances socio-économiques \rightarrow 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 ≠ 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/



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 :

Δ

- ullet Extinctions d'espèces : pprox 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

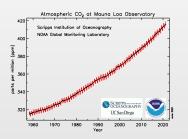


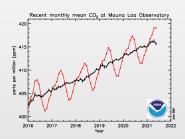
Will Steffen, Richardson et al., 2015 réactualisé par Richardson et al., 2023



Zoom: parlons un peu climat

Voici les données de juin 2021 sur la concentration de ${\rm CO}_2$ dans l'atmosphère :





(Source : https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/)



CO₂ et changement climatique

Bon, pourquoi parler de CO₂ dans l'atmosphère ?

- Le lien de causalité entre cette concentration et le réchauffement climatique est bien compris
- 2 L'origine anthropique est avéré
- 3 Tout ceci est extrêmement bien documenté (cf GIEC G1)



Empreinte carbone nationale

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).



Empreinte carbone nationale

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 carbones

- 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)
- ightarrow ightarrow 6 ans de budget pour 1.5°C et pprox 16 ans pour 2°C
- Trajectoires de réduction : \approx 2 teqCO $_2$ / an / Français·e en 2050

Source : BAUDE et al., 2023



Budgets carbones

- 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)
- ightarrow ightarrow 6 ans de budget pour 1.5°C et pprox 16 ans pour 2°C
- Trajectoires de réduction : \approx 2 teqCO $_2$ / 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
- Certains modèles tendent à montrer que nous allons connaître à court terme d'énormes changements (en fait, les changements sont déjà là)



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 ?

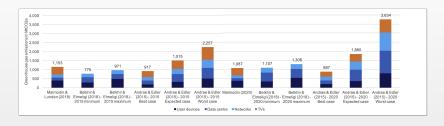


Exprimez-vous ici :

http://quiz.noiraudes.net/



Numérique dans le monde

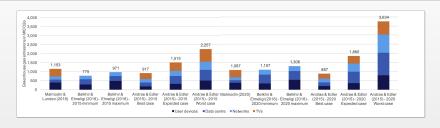


Source : FREITAG et al., 2021

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



Numérique dans le monde

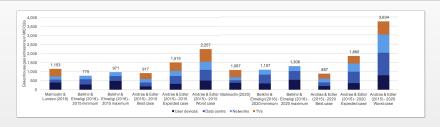


Source: Freitag et al., 2021

Note: Émissions mondiales (2021) $\approx 52\,\mathrm{Gt\,CO_2e}$ / 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) $\approx 52 \, \text{Gt CO}_2 \text{e}$ / an

- \approx contribution de l'aviation au forçage radiatif (3,8 %)
- $_{ullet} pprox 2-3 imes$ 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/



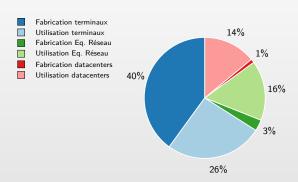
Émissions GES par source 10

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

10. Frédéric BORDAGE, 2019.



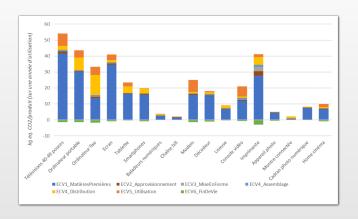
Émissions GES par source 10



10. Frédéric BORDAGE, 2019.



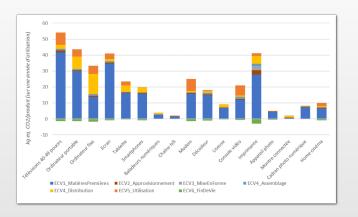
Émissions GES: chiffres de l'ADEME 11



11. LHOTELLIER et al., 2018.



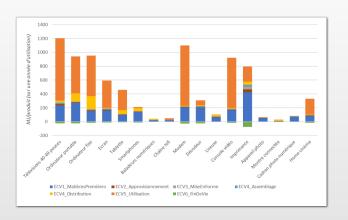
Émissions GES: chiffres de l'ADEME 11



- → C'est toujours la production / l'extraction qui gagnent...
- 11. LHOTELLIER et al., 2018.



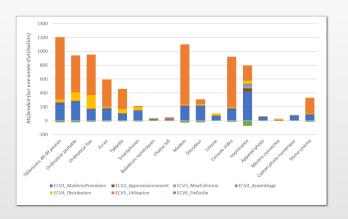
Et l'énergie ? 12



12. LHOTELLIER et al., 2018.



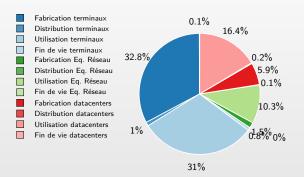
Et l'énergie ? 12



- → Merci le mix énergétique français peu carboné...
- 12. LHOTELLIER et al., 2018.



Et au niveau européen 13 ?

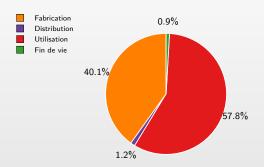


NB: Durée de vie variable selon les équipements (e.g 4 ans pour les laptops)

13. F. BORDAGE et al., 2021.



Et au niveau européen 14 ?



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

14. F. BORDAGE et al., 2021.



Émissions de GES : conclusion ?

Que conclure de tout ça ?



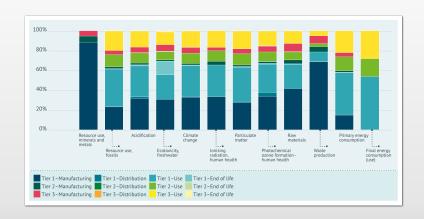
Émissions de GES : conclusion ?

Que conclure de tout ça ?

- · Quelques divergences dans les études, mais...
- Les deux phases les plus émissives sont la fabrication (incl. extraction) et l'usage
- L'impact principal vient des terminaux
- En consommation d'énergie, c'est l'usage qui gagne
- En émissions de GES, c'est dépendant du mix énergétique



Et les autres impacts ¹⁵ ?

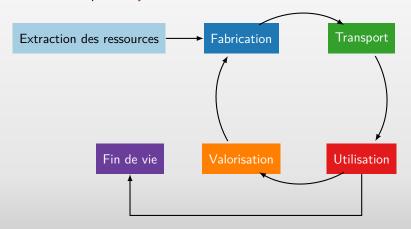


15. F. BORDAGE et al., 2021.



Cycle de vie et impacts

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





Quelques mots sur l'ACV

- Méthodologie de quantification des impacts environnementaux
- Multi-étapes, multicritère
- Produit ou service (unité fonctionnelle)
- Deux grandes familles d'ACV :
 - attributionnelle : quelle part peut-être attribuée à X ?
 - conséquentielle : comment X affecte-t-il les impacts environnementaux ?



Quelques mots sur l'ACV

- Méthodologie de quantification des impacts environnementaux
- Multi-étapes, multicritère
- Produit ou service (unité fonctionnelle)
- Deux grandes familles d'ACV :
 - attributionnelle : quelle part peut-être attribuée à X ?
 - conséquentielle : comment X affecte-t-il les impacts environnementaux ?

Dans la suite de l'exposé, nous allons donner quelques clefs pour comprendre les impacts du numérique selon les 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 ?

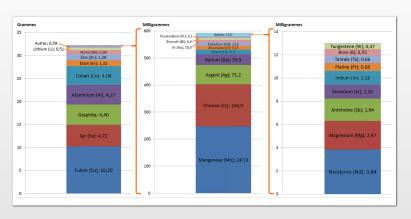


Exprimez-vous ici :

http://quiz.noiraudes.net/







Source: SÉNAT, 2016, d'après Orange.

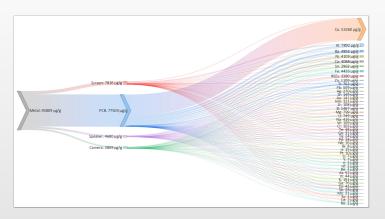


« Un recensement exhaustif des matières fait apparaître plus d'une cinquantaine d'éléments du tableau périodique de Mendeleïev dans la composition d'un téléphone portable. »

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

Source: SÉNAT, 2016, d'après Orange.





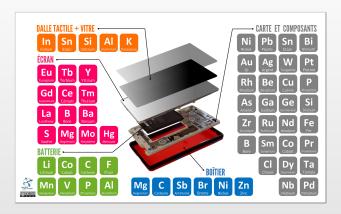
Source: GÓMEZ et al., 2023



« 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





Source : SYTEXT, 2017

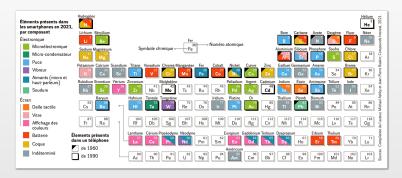


« Il est impossible de disposer d'une information précise sur les métaux contenus dans un appareil, que ce soit pour un modèle en particulier, ou pour une gamme d'appareils. »

« 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: SYTEXT, 2017





(64 éléments recensés dans le tableau)

Source: Le Monde Diplomatique, octobre 2021.



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
```

•



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 $20\,\%$)



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)



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)



La réalité de l'industrie minérale :



La réalité de l'industrie minérale :

- 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)



La réalité de l'industrie minérale :

- 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



La réalité de l'industrie minérale (suite) :

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



La réalité de l'industrie minérale (suite) :

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



- « 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)



- « 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)

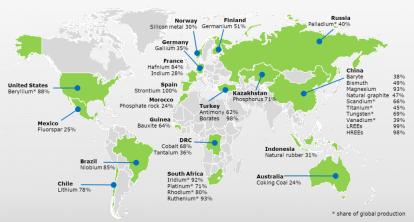
(2 citations extraites de CRAWFORD, 2022)

- 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



De l'extraction...

Des origines géographiques diverses (EUROPEAN COMMISSION, 2018).





De l'extraction...

Des origines géographiques diverses (EUROPEAN COMMISSION, 2018).



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



...À la fabrication



Source: Le Monde Diplomatique, juin 2015



Focus: les semi-conducteurs

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

- 16. TSMC, 2019.
- 17. Duterme, 2021.



Focus: les semi-conducteurs

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

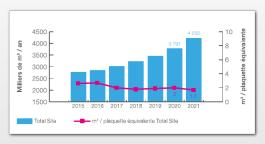
Focus sur l'eau :

- TSMC (chiffres 2019¹⁶) 3 sites principaux à Taiwan :
 - Eau prélevée : $\approx 2957000 \, t$ par jour
 - Eau consommée : $\approx 150\,000\,\mathrm{t}$ par jour
- Comment l'eau est-elle perdue ? Dans quel état l'eau est-elle rejetée dans l'environnement ?
- ullet ightarrow Problème majeur pour Taiwan en 2021 17
- 16. TSMC, 2019.
- 17. 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 »

c. source : Office International de l'Eau

a. STMICROELECTRONICS, 2021.

b. Lao et Portela, 2022.



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. Microelectronics, 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)
- 1Wh = consommation d'un appareil d'1W pendant 1h



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)
- 1Wh = consommation d'un appareil d'1W pendant 1h

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 ?

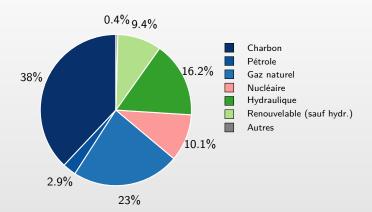


Exprimez-vous ici :

http://quiz.noiraudes.net/



Sources de l'énergie électrique



(Source Agence Internationale de l'Énergie, 2018)



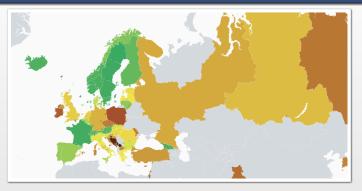
Et en France...



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 : $\approx 80 \, g/kWh$ (chiffre ADEME) ;
- Monde : entre 2 g/kWh et 1,9 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 ?

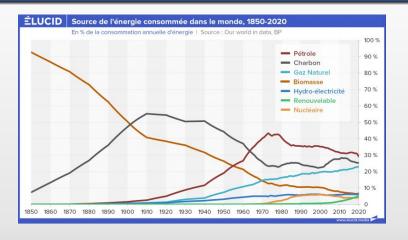


Exprimez-vous ici :

http://quiz.noiraudes.net/





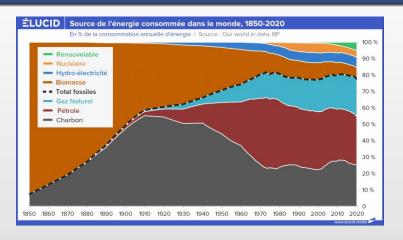


 $Source \ (ce \ graphe \ et \ les \ suivants) \ : \ https://elucid.media/environnement/$

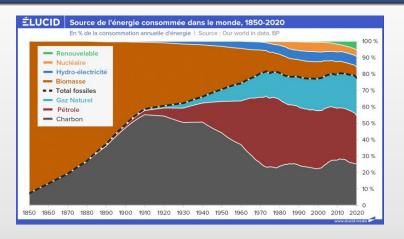
crise-climatique-et-energetique-regarder-la-verite-en-face-fressoz





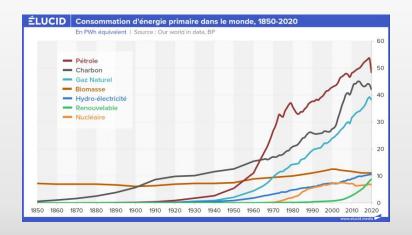






Il s'agit de répartition par pourcentages... Si nous regardions les valeurs absolues?







Les datacentres : énergie

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



Les datacentres : énergie

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

- L'implantation des datacentres crée une vraie pression sur les fournisseurs d'énergie
- Les opérateurs préréservent une certaine puissance auprès d'Enedis 18
- Problèmes de conflits d'usage à la clef
- (NB : d'autres conflits que l'accès à l'énergie interviennent également, comme l'accès au foncier)



Les datacentres : eau

Le fonctionnement d'un datacentre exige une grande quantité d'énergie, mais également de l'eau ¹⁹...

^{19.} 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'eau ¹⁹...

- ...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)

^{19.} 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'eau ¹⁹...

- ...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)
- Consommation directe :
 - refroidissement (notamment evaporative cooling)
 - traitement de l'air (humidification)
 - rechargement des circuits fermés
 - nettoyage et l'arrosage des équipements techniques
- Consommation indirecte :
 - Essentiellement production électrique
- 19. Planches suivantes issues d'une discussion avec Aurélie Bugeau et Sophie Quinton



Datacentres et eau, quelques chiffres

- France, 2022 : 482 000 m³ prélevés (pour 2,1 TW h d'électricité) ²⁰
- Google, 2021 :
 - $\approx 25\,000\,000\,\text{m}^3$ prélevés (refroidissement scope 1 datacentres),
 - $\approx 20\,000\,000\,\mathrm{m}^3$ consommés 21
- Impact indirect de l'eau (production électrique) : 4,21 L kW⁻¹ h selon LOHRMANN, CHILD et BREYER, 2021 ; 0,83 L kW⁻¹ h selon EDF²²

^{20.} ARCEP, 2022.

^{21.} Google, 2023.

^{22.} https://edf.publispeak.com/document-enregistrement-universel-2022/article/176/



Water Usage Effectiveness

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

$$\begin{aligned} \text{WUE}_{\textit{onsite}} &= \frac{\text{Onsite Water Usage}}{\text{IT equipment energy}} \\ \text{WUE}_{\textit{source}} &= \frac{\text{Onsite Water Usage} + \text{Water used for energy gen.}}{\text{IT equipment energy}} \end{aligned}$$



Water Usage Effectiveness

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

$$\begin{aligned} \text{WUE}_{\textit{onsite}} &= \frac{\text{Onsite Water Usage}}{\text{IT equipment energy}} \\ \text{WUE}_{\textit{source}} &= \frac{\text{Onsite Water Usage} + \text{Water used for energy gen.}}{\text{IT equipment energy}} \end{aligned}$$

- 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 ⊂ 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 ⊂ 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 CO₂; avec une pièce jointe volumineuse, il produit jusqu'à 50 g de CO₂ » ²³
- \circ « $19~{
 m g}~:$ émission ${
 m CO}_2$ d'un mail avec une pièce-jointe d'un méga octet » 24
- « l'envoi d'un courriel consomme autant qu'une ampoule laissée allumée 24 heures d'affilée » 25 [\approx 19geqCO $_2$ pour une ampoule de 10 W en France, NdT]
- « En 2014 [...] 1 Mo envoyé correspondait à 15 g de CO₂ » ²⁶

^{23.} https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/

eco-consommation-empreinte-carbone-e-mail-10840/

^{24.} https://cleanfox.io/blog/foxyactus-fr/chiffres-effrayants-pollution-digitale/

^{25.} https://www.legeekmoderne.fr/quel-impact-environnemental-mail/

^{26.} 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 $\rm CO_2$; avec une pièce jointe volumineuse, il produit jusqu'à 50 g de $\rm CO_2$ » 23
- \circ « $19~{
 m g}~:$ émission ${
 m CO}_2$ d'un mail avec une pièce-jointe d'un méga octet » 24
- « l'envoi d'un courriel consomme autant qu'une ampoule laissée allumée 24 heures d'affilée » 25 [\approx 19geqCO $_2$ pour une ampoule de 10 W en France, NdT]
- $_{\rm \bullet}$ « En 2014 [...] 1 Mo envoyé correspondait à 15 g de CO $_{\rm 2}$ » $^{\rm 26}$

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

- 23. https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/
- eco-consommation-empreinte-carbone-e-mail-10840/
- 24. https://cleanfox.io/blog/foxyactus-fr/chiffres-effrayants-pollution-digitale/
- 25. https://www.legeekmoderne.fr/quel-impact-environnemental-mail/
- 26. 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'impact ²⁷

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

^{27.} FICHER et al., 2021.



Exemple d'une étude d'impact 27

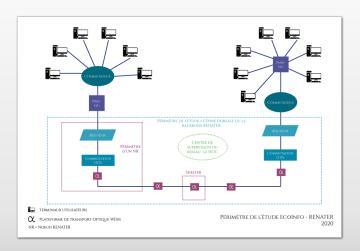
Impact GES d'1 Go sur le réseau Renater entre Orsay et Montpellier (étude Ecoinfo)

- 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

^{27.} 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 gCO₂e/kWh)



Impact des équipements

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

- 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 transport ²⁸
 - La durée de vie moyenne (en années)
 - Le trafic moyen sur 1 an (en Go), avec hypothèse de trafic constant

^{28.} Fin de vie ignorée par manque de données



Quelques conclusions

- Impact CO_2 sur jour moyenné : $1.5 \,\mathrm{g}\, CO_2 \mathrm{e}$
- Environ 59 % dus à la phase d'usage des équipements
- 2ème contributeur : fabrication et transport des équipements



Quelques conclusions

- Impact CO_2 sur jour moyenné : $\boxed{1,5 \, \mathrm{g} \, \mathrm{CO}_2 \mathrm{e}}$
- Environ 59 % dus à la phase d'usage des équipements
- 2ème contributeur : fabrication et transport des équipements

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)
- 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.)



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



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



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



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



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



- utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés
- 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 ≥ SandyBridge)
 - ullet nécessite une autorisation ou un accès superutilisateur (Linux \geq 5.4.77)



- utilisation d'une grosse infrastructure de calcul (e.g Grid5000) déjà instrumentée ou utiliser les outils des fournisseurs de cloud privés
- 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...
 - ullet nécessite une architecture particulière (Intel \geq SandyBridge)
 - ullet 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)



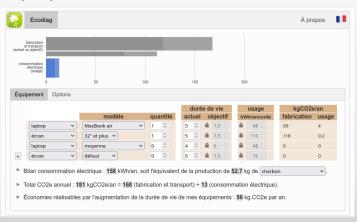
Énergie grise

- 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 profond ²⁹
- Pourtant, selon l'étude GRICAD d'empreinte d'une heure.cœur de calcul 30 : 40 % dues à la phase de fabrication
- Les données sur la fin de vie sont également lacunaires...

^{29.} LIGOZAT et al., 2022.

^{30.} 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 profond ²⁹
- Pourtant, selon l'étude GRICAD d'empreinte d'une heure.cœur de calcul ³⁰ : 40 % dues à la phase de fabrication
- Les données sur la fin de vie sont également lacunaires...

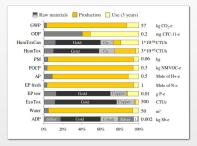
Bon, et si on essaie avec un système plus « simple » (e.g machine seule) et des bases de données complètes ?

^{29.} LIGOZAT et al., 2022.

^{30.} Berthoud et al., 2020.



À propos de chiffres (ACV) 31

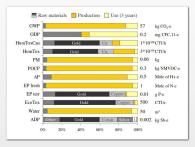


Z5 avec accessoires, BD Ecoinvent

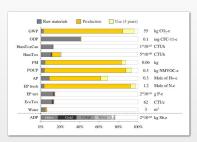
^{31.} Source : ERCAN et al., 2016, cité par Sophie Quinton



À propos de chiffres (ACV) 31



Z5 avec accessoires, BD Ecoinvent

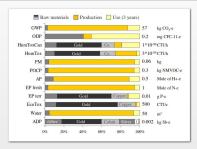


Z5 avec accessoires, BD GaBi pour la prod d'or et. d'énergie

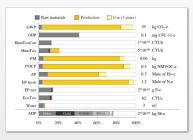
^{31.} Source : ERCAN et al., 2016, cité par Sophie Quinton



À propos de chiffres (ACV) 31



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 »
- 31. 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 $10\,\mathrm{g\,CO_2e}$ est un meilleur ordre de grandeur que $0.1\,\mathrm{g\,CO_2e}$ ou que $10\,\mathrm{kg\,CO_2e}$
- 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 $10\,\mathrm{g\,CO_2e}$ est un meilleur ordre de grandeur que $0.1\,\mathrm{g\,CO_2e}$ ou que $10\,\mathrm{kg\,CO_2e}$
- 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 $10 \, \text{CO}_2$ e?



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 ?)



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. »



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 !



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



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, gourmants 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
- Estimer les impacts pour un service / matériel donné nécessite de faire une ACV, et est également entaché d'une forte 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'efficience 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'efficience 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



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 montagne ³²...



Source: https://pxhere.com/en/photo/1543053 (CCO Public Domain).

32. 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!



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



- 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 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 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

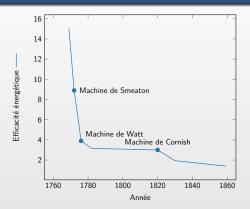


- Situation 1 : le réseau de distribution d'eau est de mauvaise qualité et a de nombreuses fuites
- (une réparation a lieu et le réseau est modernisé)
- Situation 2 : le réseau de distribution d'eau ne possède plus de fuite et est beaucoup plus efficace
- Situation finale : la réserve d'eau du village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

Que s'est-il passé ?



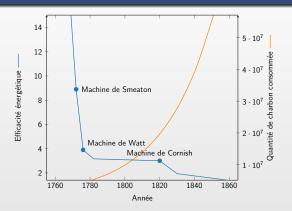
La question du charbon



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



La question du charbon

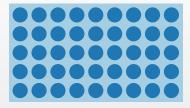


- Efficacité énergétique exprimée en nombre de livres de charbon nécessaires pour élever 1×10^6 livres d'eau d'un pied (cf JEVONS, 1866 page 128)
- Quantité de charbon consommée (UK) exprimée en tonnes (cf ibid. page 238) Impact Environnemental du Numérique



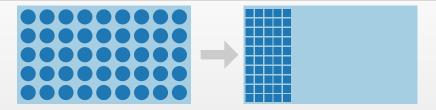
Ressource: matériaux, énergie, temps, argent...





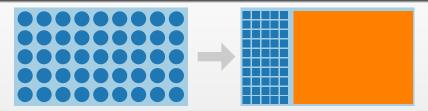
- Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...
 - Machin qui consomme de la ressource





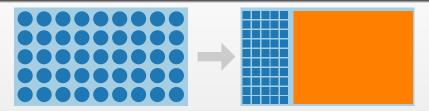
- Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...
 - Machin qui consomme de la ressource
 - Truc plus efficace qui consomme de la ressource





- Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...
- Machin qui consomme de la ressource
- Truc plus efficace qui consomme de la ressource
- Ressource libérée

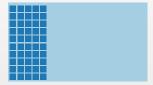




- Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...
- Machin qui consomme de la ressource
- Truc plus efficace qui consomme de la ressource
- Ressource libérée

Que fait-on de cette ressource libérée ?

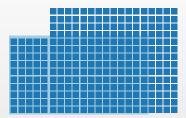






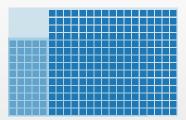






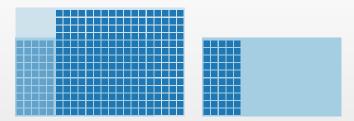
Backfire!





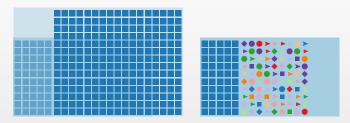
Backfire!





Backfire!

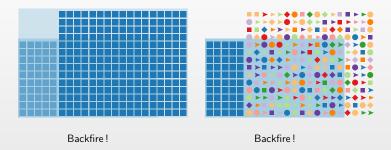




Backfire!

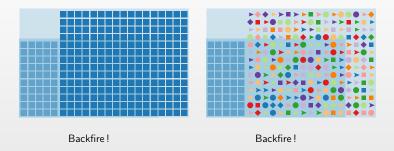
- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)





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

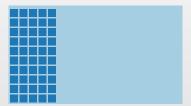




- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)

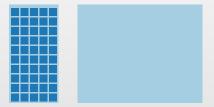


Ce qu'il faudrait (probablement) faire :





Ce qu'il faudrait (probablement) faire :





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 hon 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



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

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

• Remplacement des cartes papier



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



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



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



type	périmètre	effet
1er ordre		impact fabrication
	direct	impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre		optimisation substitution
	Indirect : service unique	
3ème ordre		rebond direct
	Indirect : services complé- mentaires	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 Impact Environnemental du Numérique



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



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



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



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

^{34.} 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 Ademe 34) :

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

^{34.} 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 Ademe <sup>34</sup>) :
```

-271 kgeqCO₂ par an et par jour de travail hebdomadaire

Quid des effets indirects ?



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...



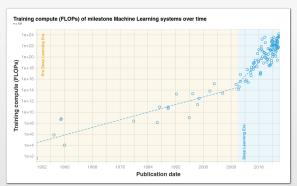
Discussion sur les effets

- 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



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



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 ?



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.



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 ${\rm GESI}$, 2015 ; ${\rm GSMA}$, 2019
- Les faiblesses méthodologiques de ces rapports ont été identifiées 35
- 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)

^{35.} Roussilhe, Ligozat et Quinton, 2023.



Message à emporter

Message à emporter

- 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

- Conclusion



· Nous avons un problème environnemental urgent



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



- 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



- 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



- 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



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

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



- 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 inpirées de G. Panthou (merci à lui !)



- 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 inpirées de G. Panthou (merci à lui !)



- 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 inpirées 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 inpirées 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 inpirées de G. Panthou (merci à lui !)

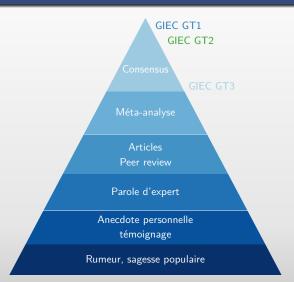


Niveau de preuve actuelle

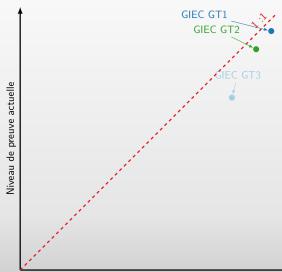




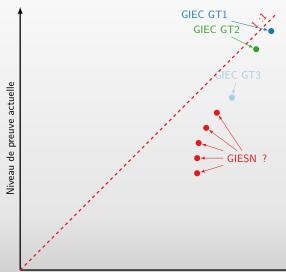
Niveau de preuve actuelle













Comment se présente l'avenir numérique ?



Comment se présente l'avenir numérique ?



Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

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



Comment se présente l'avenir numérique ?

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



Comment se présente l'avenir numérique ?

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



Comment se présente l'avenir numérique ?

- De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...
- Des changements sociétaux qui imposent des limites drastiques (contraintes choisies \rightarrow 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 mondiale³⁶ (Le Figaro, 21/04/21)
- La pénurie de nickel menace la transition énergétique ³⁷ (Les Échos, 06/10/20)

^{36.} https://www.lefigaro.fr/flash-eco/semi-c[...]

^{37.} 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 ?



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-annuellepour-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%A91%C3%A9charg%C3%A9e%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.
- 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).

- 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. Ecolnfo, 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 Al Solutions for Environment Life Cycle Assessment of Al 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.
- MICROELECTRONICS, ST (2022). 2022 Sustainability Report. Rapp. tech. ST Microelectronics.

- 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.
- 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-trafic-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.
- SYTEXT (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-csrreport/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.