

Quelques éléments pour comprendre l'impact environnemental du numérique

Marceau Coupechoux

LTCI, Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris et EcolInfo

(merci à Anne-Cécile Orgerie (CNRS) et Gaël Guennebaud (INRIA) pour leurs
transparents)

21 juin 2024

Qui suis-je ?

Marceau Coupechoux

- Professeur à Telecom Paris
- Professeur chargé de cours à l'École Polytechnique
- Membre du groupe CNRS EcoInfo
- Membre du Comité d'experts en réseaux mobiles de l'ARCEP

Je travaille sur la modélisation, l'optimisation et les impacts environnementaux des réseaux mobiles.

Plan de la présentation

1 La crise environnementale

2 Les impacts du numérique

- Le numérique : un monde très matériel
- La part du numérique
- Les raisons de la croissance
- Qui a le plus d'impact ?
- La fabrication : focus sur les ressources
- La fin de vie : les déchets électroniques

3 Les fausses bonnes solutions

- L'économie "circulaire"
- L'efficacité énergétique et les effets rebonds
- Transition numérique et écologique

4 Vers la sobriété numérique

- Que faire ?
- Quelques scénarios prospectifs
- Efficacité ou sobriété ?

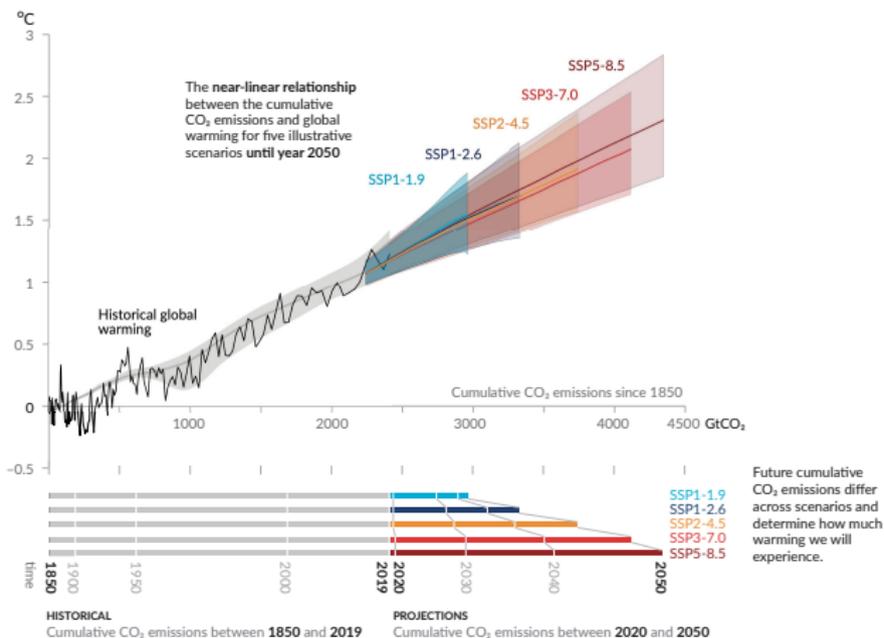
5 Conclusion

Plan de la présentation

- 1 La crise environnementale
- 2 Les impacts du numérique
- 3 Les fausses bonnes solutions
- 4 Vers la sobriété numérique
- 5 Conclusion

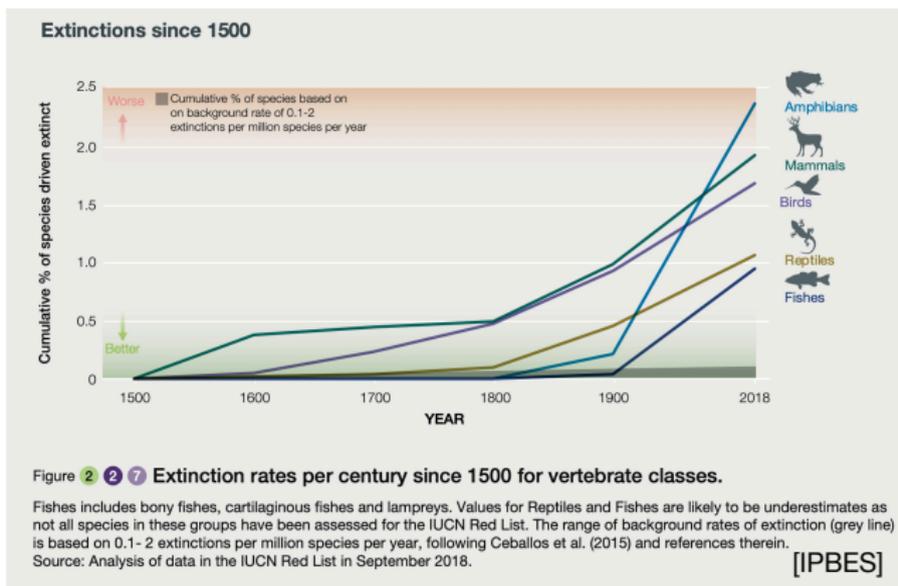
Le réchauffement climatique

Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



● [IPCC, 2023]

La perte de biodiversité



- “Aujourd’hui, plus d’espèces de plantes et d’animaux sont menacées d’extinction qu’à tout autre moment de l’histoire de l’humanité.” [IPBES, 2020]

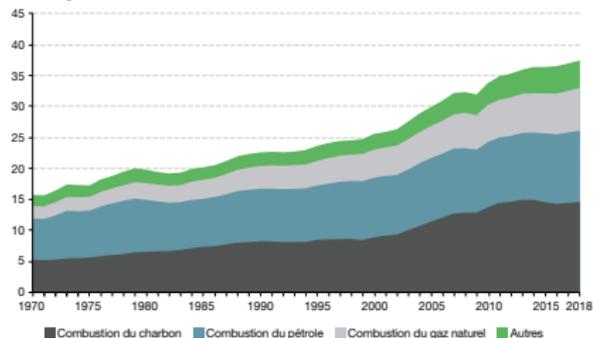
Mais pas seulement...

Exemples d'autres catégories d'impacts [ITU-T, 2014] L.1410 :

- Toxicité humaine
- Substances inorganiques, particules fines
- Rayonnements ionisants (radioactivité)
- Acidification des océans et des sols
- Utilisation/affectation des terres (qualité des sols)
- Consommation d'eau
- Épuisement des ressources abiotiques (minéraux et fossils)
- Destruction de l'ozone stratosphérique

Accord de Paris

- Signé en 2015 par 195 États à la COP21.
- Les signataires s'engagent à réduire leurs émissions de GES dès que possible et à faire de leur mieux pour maintenir le réchauffement climatique bien en dessous de 2°C et aussi proche possible de 1.5°C par rapport aux niveaux préindustriels.
- Pourtant les émissions de GES continuent à augmenter.
- Se méfier des comparaisons entre pays : global vs par habitant, émissions vs empreinte, émissions actuelles vs historique.

ÉMISSIONS DE CO₂ PAR COMBUSTIBLE DANS LE MONDEEn Gt CO₂

Note : les émissions comptabilisées ici sont celles liées à la combustion d'énergie fossile et aux procédés industriels. Cela correspond au total des émissions de CO₂ hors UTCATF (voir glossaire). Elles représentent près de 85 % des émissions de CO₂ dans le monde, soit environ 65 % des émissions de GES.

Sources : SDES, d'après EDGAR, 2019 ; AIE, 2020

[Chiffres clés du climat, 2021]

En France

Figure 2.1a – Émissions territoriales et empreinte carbone de la France depuis 2010

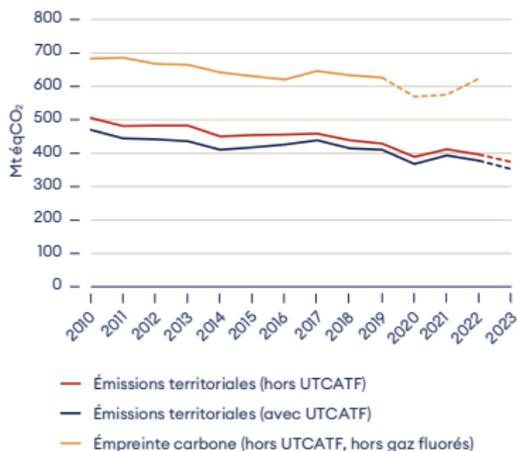
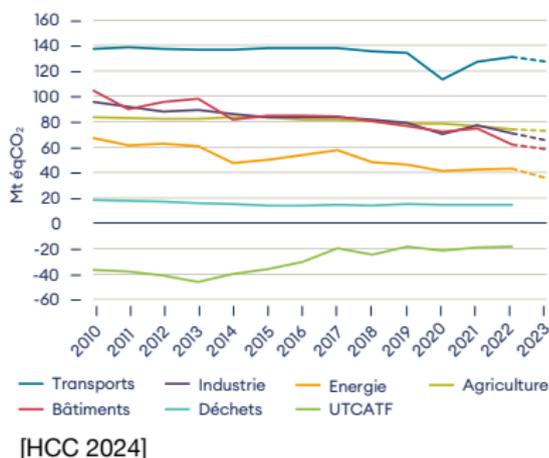


Figure 2.1d – Évolution sectorielle des émissions de gaz à effet de serre de la France depuis 2010



- Émissions brutes (hors puits de carbone) : 5.5 t eqCO₂/habitant
- Empreinte par habitant : 9.2 t eqCO₂/habitant [HCC, 2024]
- Cadre national/européen : SNBC/Fit for 55 (-50% en 2030 par rapport à 1990)

En France

Quelques exemples correspondant à 1t d'eqCO2 :

- 1 an de chauffage au gaz pour un 3 pièces à Paris
- 1 aller-retour Paris-New York en avion
- 4500 km de Twingo en ville
- 3300 km de 4x4 en ville

Plan de la présentation

- 1 La crise environnementale
- 2 Les impacts du numérique**
- 3 Les fausses bonnes solutions
- 4 Vers la sobriété numérique
- 5 Conclusion

Le numérique : un monde très matériel

Terminaux



1.5 milliard / an



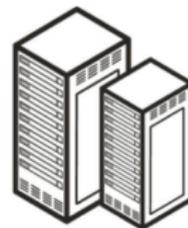
Tablettes, imprimantes, consoles, IoT, ...

Réseaux

Routers, câbles (sous marins, fibres), antennes (2-5G, wifi), ...

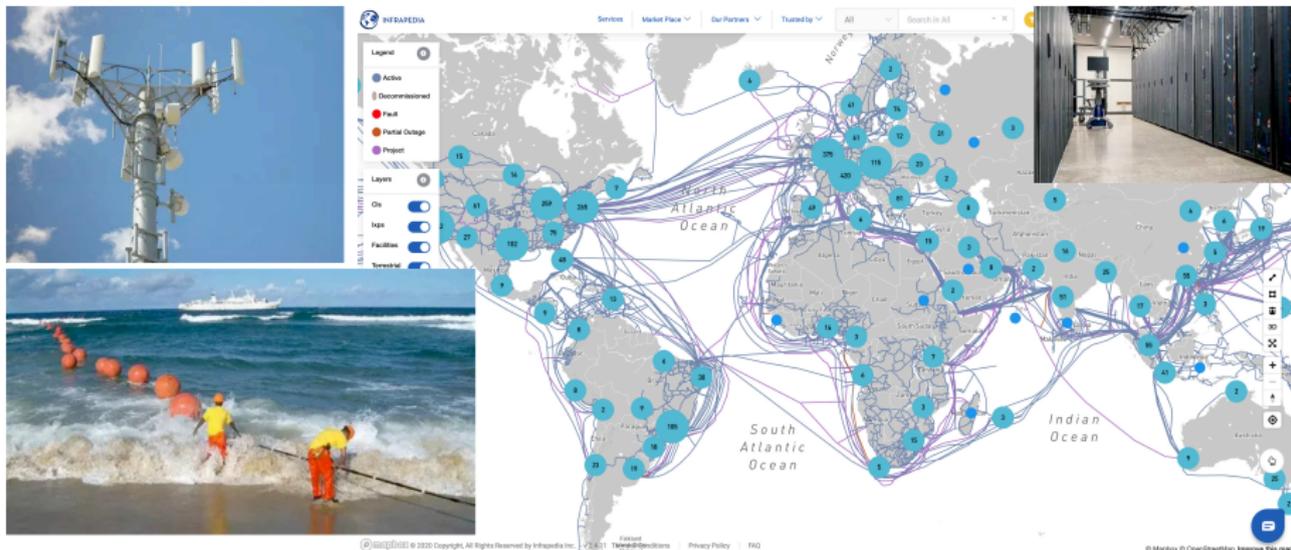
... mais aussi les **box-internet !**

Data centers



Le numérique : composants et techniques pour la transmission, le stockage et le traitement des données numériques.

Le numérique : un monde très matériel



La part du numérique dans le monde

Une part modeste mais en croissance :

- Le numérique représente 2 à 4% des émissions de GES en 2020 (environ 1.2-2.2 GtCO₂eq).
- Les émissions du numérique ont cru à un rythme beaucoup plus rapide que celui des émissions globales (peut-être deux fois plus vite entre 2002 et 2012).
- Autres impacts : 4.2% de consommation d'énergie primaire, 0.2% d'utilisation de l'eau, 5.5% de la consommation électrique [Bordage, 2019].
- Refs : [Freitag et al., 2021, Malmodin and Lundén, 2018, Andrae and Edler, 2015, SG Andrae, 2020, Belkhir and Elmeligi, 2018, Bordage, 2019]

La part du numérique dans le monde

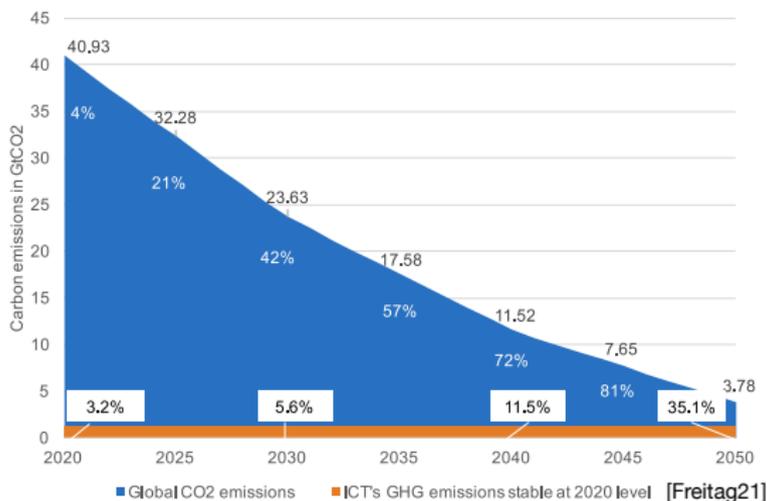
Difficulté à estimer au-delà de 10-20 ans (nouveaux usages, nouvelles techniques de production, incertitude sur les tendances historiques, etc). Mais accord sur :

- le trafic de données continue de croître
- la demande énergétique du numérique augmente
- le passage aux smartphones réduit les émissions des PC et des téléviseurs
- utiliser davantage d'énergies renouvelables réduirait les émissions

Les avis divergent sur les tendances :

- [Belkhir et Elmeligi], [Andrae et Edler], [GreenIT.fr] : les émissions augmentent en raison d'une augmentation du trafic de données, du nombre d'appareils (IoT), de la taille des écrans et d'une baisse des gains d'efficacité. Les auteurs pensent que les émissions continueront de croître ($\times 3$ entre 2010-2025 [Bordage, 2019])
- [Malmodin] : les émissions ont légèrement diminué grâce aux centres de données (adoption des énergies renouvelables) et aux réseaux (diminution des frais généraux malgré l'augmentation de la consommation d'énergie). Les auteurs pensent que les émissions se sont stabilisées et pourraient même diminuer.

La part du numérique dans le monde



- Si on ne fait rien, le numérique représentera 35% des émissions en 2050 [Freitag et al., 2021].

La part du numérique en France

À l'échelle de la France :

- 10% de la consommation électrique française (l'équivalent de 8,3 M de foyers).
- 2,5% de l'empreinte carbone de la France (légèrement supérieur au secteur des déchets).
- 20 millions de tonnes de déchets par an.

À l'échelle d'un habitant (11 à 15 appareils par personne) et par an :

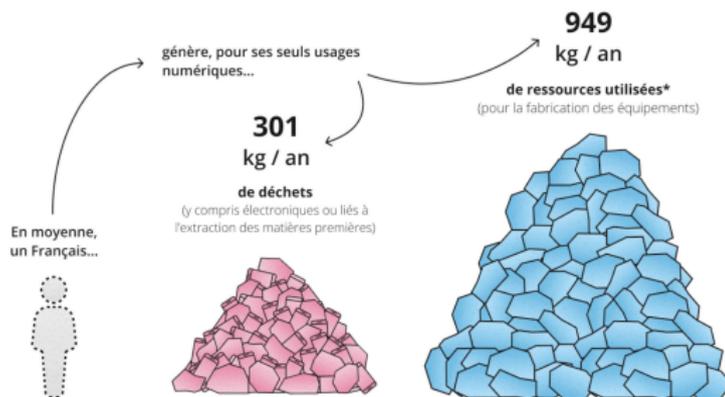
- Impact moyen sur le changement climatique similaire à 2259 km en voiture par an.
- 300 kg de déchets par an
- 932 kg de matériaux déplacés pendant la phase de fabrication.

source : ARCEP/ADEME

La part du numérique en France

Près d'une tonne de matériaux utilisés par personne chaque année pour nos usages numériques [ARCEP/ADEME]

Quantité de ressources utilisées ou de déchets produits chaque année pour répondre aux usages numériques d'une personne vivant en France en 2020



* comprenant ressources abiotiques (matériaux, énergie fossile...), biomasse, déplacements de terre et l'eau.

Les raisons de la croissance : le trafic de données

Exemple des données mobiles :

Figure 1: Mobile subscriptions by technology (billion)

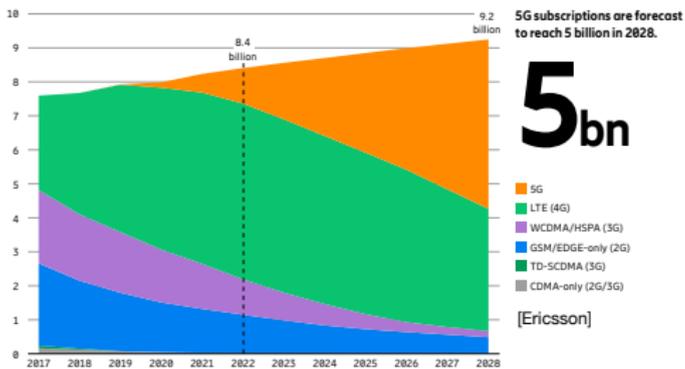
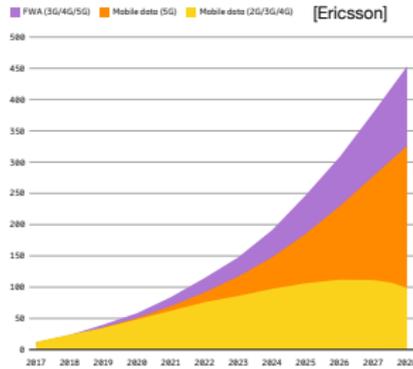


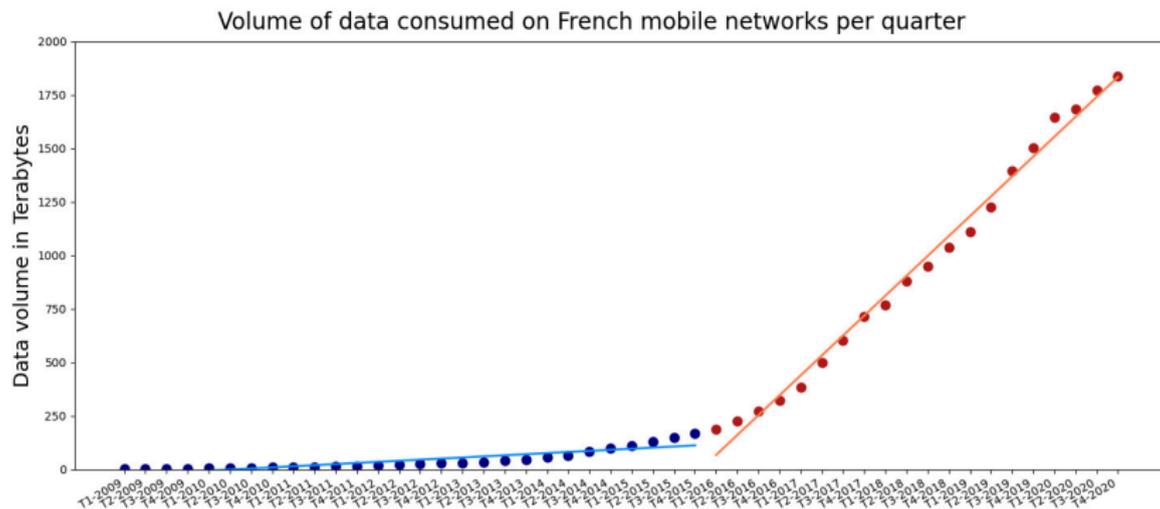
Figure 19: Global mobile network data traffic (EB per month)



- Le trafic de données mobiles a été multiplié par 2 ces 2 dernières années. On s'attend à ce qu'il soit multiplié par 4 entre 2022 et 2028.
- le trafic est tiré par un nombre croissant de smartphones et une quantité croissante de données/abonnement (70% pour la vidéo) [Ericsson, 2022]. EB = 10^{18} B = milliards de GigaB.

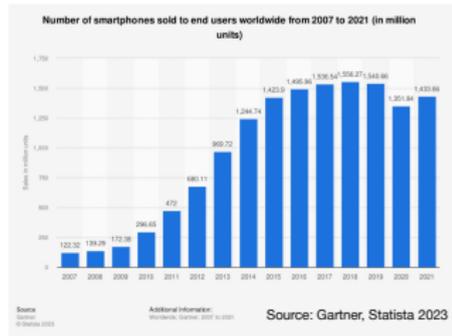
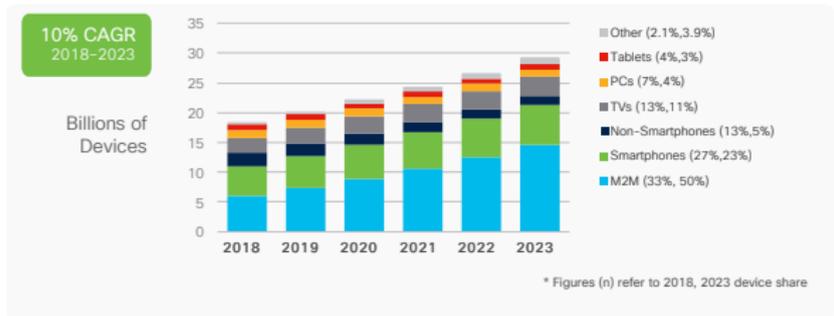
Les raisons de la croissance : le trafic de données

Exemple avec l'arrivée de la 4G en France :



- La 4G est arrivée en France en 2016 avec une accélération de la croissance du trafic (les volumes de données proviennent de l'ARCEP, les régressions par [Ciblat et al., 2022]).

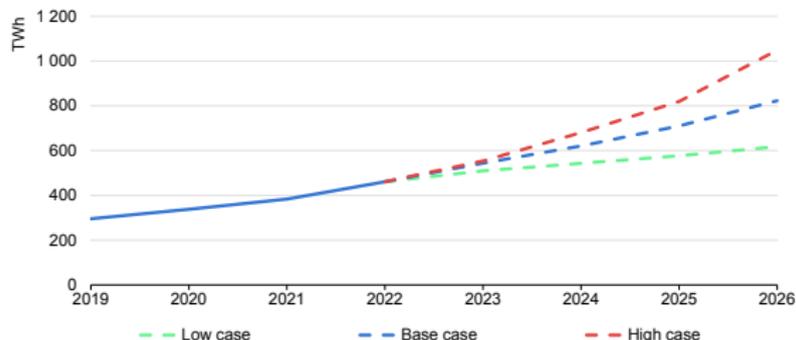
Les raisons de la croissance : les terminaux



- Le nombre de terminaux continue d'augmenter à un rythme très élevé.
- Les ventes de smartphones ralentissent à un niveau élevé (1,4 milliards en 2021) tandis que le nombre d'appareils IoT sans fil augmente rapidement.

Les raisons de la croissance : les centres de données, l'IA, les crypto-monnaies

Global electricity demand from data centres, AI, and cryptocurrencies, 2019-2026 [IEA]



IEA. CC BY 4.0.

Notes: Includes traditional data centres, dedicated AI data centres, and cryptocurrency consumption; excludes demand from data transmission networks. The base case scenario has been used in the overall forecast in this report. Low and high case scenarios reflect the uncertainties in the pace of deployment and efficiency gains amid future technological developments.

Sources: Joule (2023), [de Vries, The growing energy footprint of AI](#); [CCRI Indices \(carbon-ratings.com\)](#); The Guardian, [Use of AI to reduce data centre energy use](#); [Motors in data centres](#); The Royal Society, [The future of computing beyond Moore's Law](#); Ireland Central Statistics Office, [Data Centres electricity consumption 2022](#); and Danish Energy Agency, [Denmark's energy and climate outlook 2018](#).

- Aujourd'hui, environ 2% de la consommation électrique globale (UE : 4%).
- La demande pourrait doubler entre 2022 et 2026.

Qui a le plus d'impact ?

On distingue généralement 3 segments :

- Les terminaux : smartphones, tablettes, ordinateurs, écrans, consoles, imprimantes, box, mais aussi tous les objets connectés de "l'Internet des objets" (compteurs intelligents, GPS, etc).
- Les réseaux : les réseaux fixes et mobiles (câbles, fibres, routeurs Internet, antennes, etc.)
- Les centres de données : ils sont composés de serveurs (des ordinateurs très puissants) qui permettent de stocker des informations, de les traiter à distance, de faire tourner des applications ou des algorithmes (cloud).

Qui a le plus d'impact ?

On distingue aussi les étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un service :

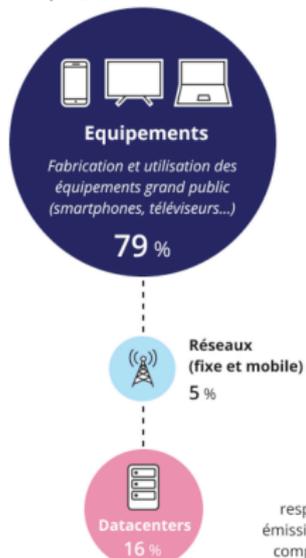
LES ÉTAPES DE CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT



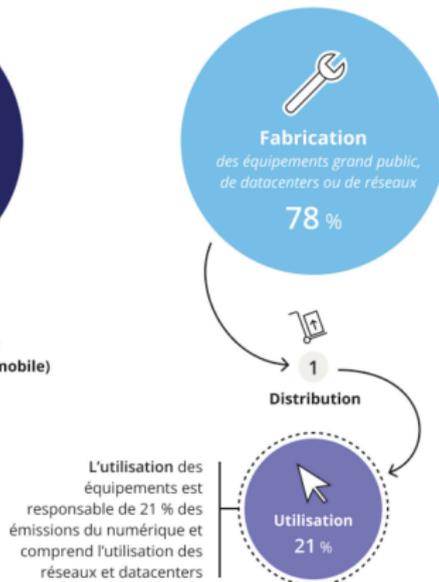
Qui a le plus d'impact ?

L'empreinte carbone du numérique dépend essentiellement des équipements et de leur fabrication [ARCEP/ADEME]

Répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par composantes du numérique (%)



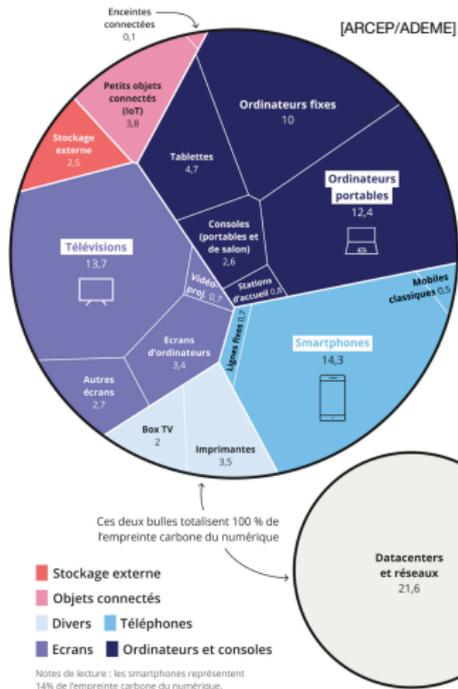
Répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par phase du cycle de vie (%)



Qui a le plus d'impact ?

Les smartphones et les téléviseurs, les deux principaux moteurs des émissions du numérique

Part de chaque type d'équipement (sur tout le cycle de vie) dans l'empreinte carbone du numérique en 2020, comparée à celle des centres de données et réseaux (%)



Qui a le plus d'impact ?

Pour rentrer un peu plus dans les détails :

%	 Energy	 GHG	 Water	 Elec.	 ADP
User equipment	60%	63%	83%	44%	75%
Network	23%	22%	9%	32%	16%
Data centres	17%	15%	7%	24%	8%

Breakdown of impact of the digital world in 2019

[GreenIT.fr]

 GHG balance	Manufacturing	Use	Total
User equipment	40%	26%	66%
Networks	3%	17%	19%
Data centres	1%	14%	15%
	44%	56%	

Greenhouse gas emissions balance 2019

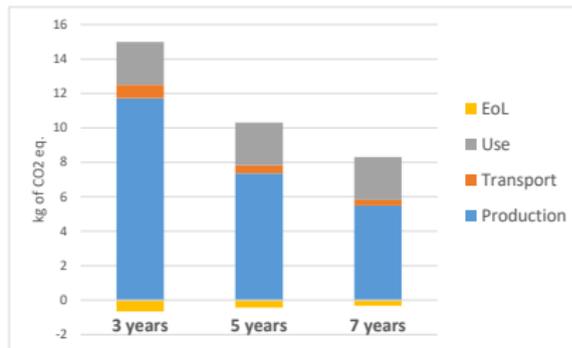
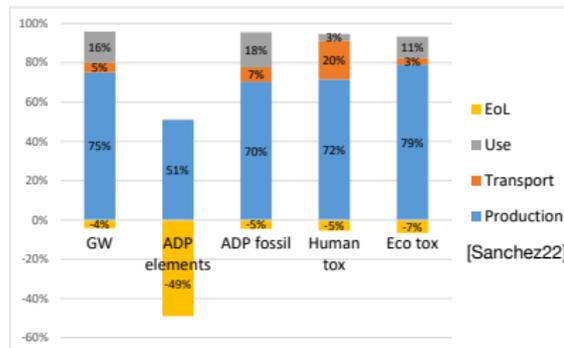
[GreenIT.fr]

Ordre d'impact pour les émissions de GES :

- La fabrication des terminaux (40%)
- La consommation énergétique des réseaux et des centres de données (31%)
- La consommation énergétique des terminaux (26%)
- La fabrication des réseaux et des centres de données (4%)

Qui a le plus d'impact ?

Exemple de l'analyse de cycle de vie du Fairphone [Sanchez et al., 2022] :

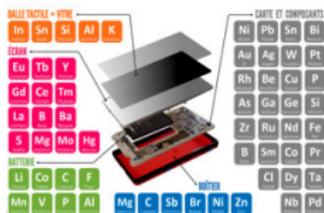


- La production est la phase la plus impactante. Au sein de la production, les composants électroniques dominent.
- L'extension de la durée de vie de 3 à 7 ans réduit les émissions annuelles de GES de 45%.

La fabrication : focus sur les ressources

Les appareils électroniques sont composés de nombreux matériaux qui sont extraits dans des mines. Impacts écologiques :

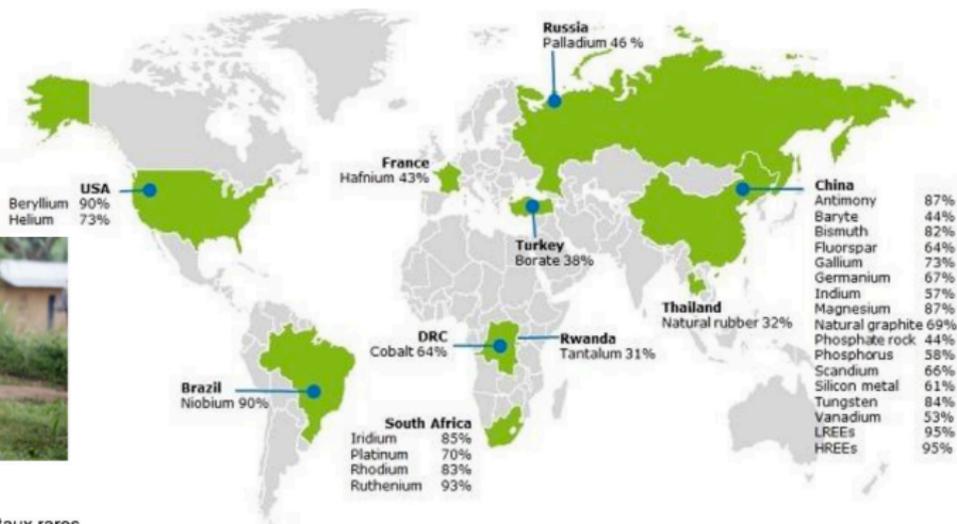
- Destruction d'éco-systèmes
- Pollution des sols et de l'eau
- Consommation croissante d'énergie et d'eau (baisse des concentrations)
- Excavation de terres : 800kg pour un ordinateur portable de 2kg, 70kg pour un smartphone
- Émission de GES : le secteur minier représente 28% des émissions mondiales



La fabrication : focus sur les ressources

Des implications sociales et géopolitiques :

- Travail des enfants
- Conflits armés
- Appropriation des terres

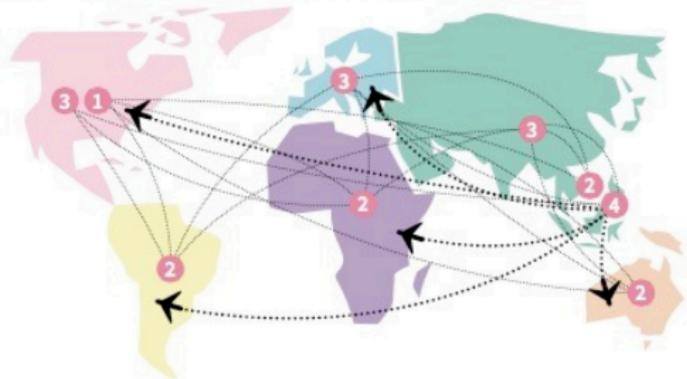


Le Monde ; Les minerais du conflit
 Guillaume Pitron : La guerre des métaux rares
 ARTE : la face cachée des énergies vertes
systext.org

Figure 13: Countries producing the largest amounts of critical raw materials
 [Source: (European Commission, 2017)]

La fabrication : le transport

QUATRE TOURS DU MONDE POUR FABRIQUER UN SMARTPHONE



1. Conception le plus souvent aux États-Unis

2. Extraction et transformation des matières premières en Asie du Sud-Est, en Australie, en Afrique centrale et en Amérique du Sud

3. Fabrication des principaux composants en Asie, aux États-Unis et en Europe

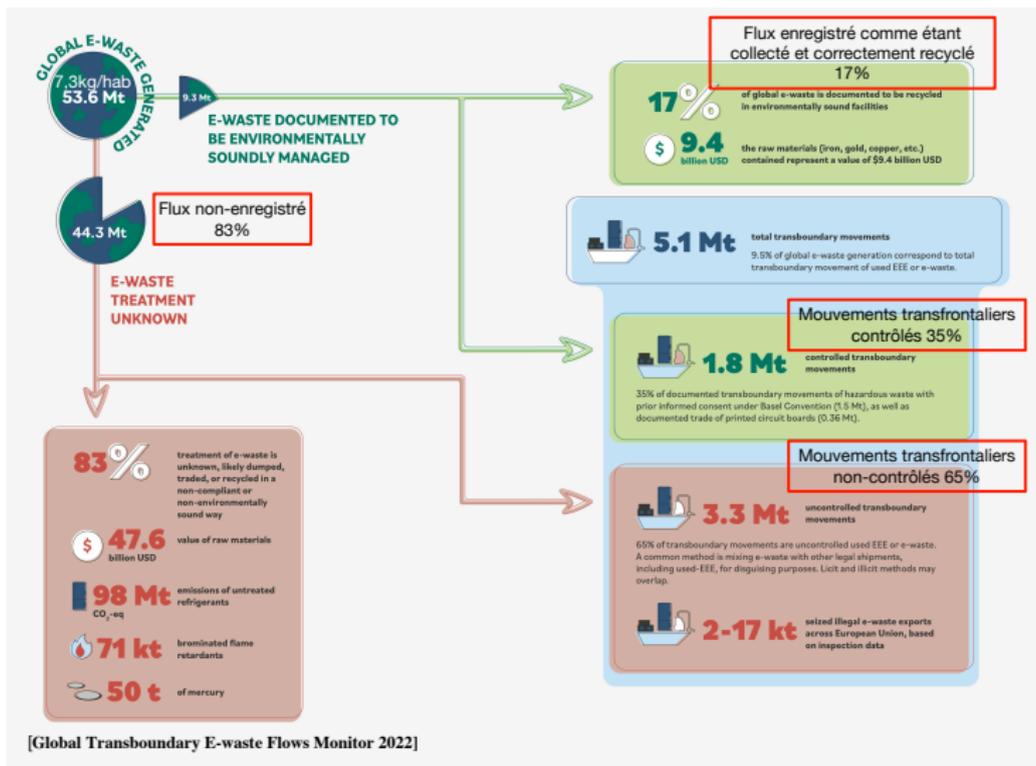
4. Assemblage en Asie du Sud-Est

↑
Distribution vers le reste du monde, souvent en avion.

[France Nature Environnement]

La fin de vie : les déchets électroniques

On parle de DEEE pour "Déchets des équipements électriques et électroniques".



La fin de vie : les déchets électroniques

La tendance n'est pas bonne. 53 Mt = 350 bateaux Queen Mary 2.



[Global Transboundary E-waste Flows Monitor 2022]

La fin de vie : les déchets électroniques

En France :

- 1,2 milliards d'équipements électriques et électroniques mis sur le marché en 2020, soit 2,1 millions de tonnes (215 Tours Eiffel - en hausse continue depuis 7 ans).
- 850 mille tonnes de DEEE collectées en 2020. [ADEME, 2021]

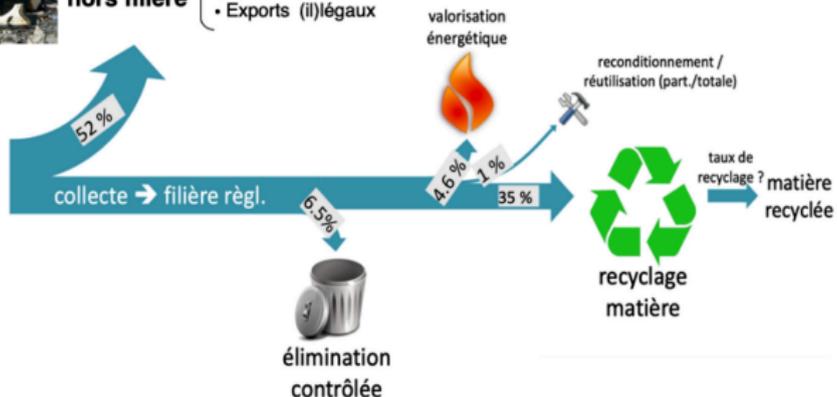


hors filière

- Tiroirs,
- Déchets ménagers
- Ferraille
- Encombrants
- ...
- Exports (il)légaux



DEEE
21 kg/an/hab



Source : registre DEEE, [Ademe](#), 2016,2018, 2019

Plan de la présentation

- 1 La crise environnementale
- 2 Les impacts du numérique
- 3 Les fausses bonnes solutions**
- 4 Vers la sobriété numérique
- 5 Conclusion

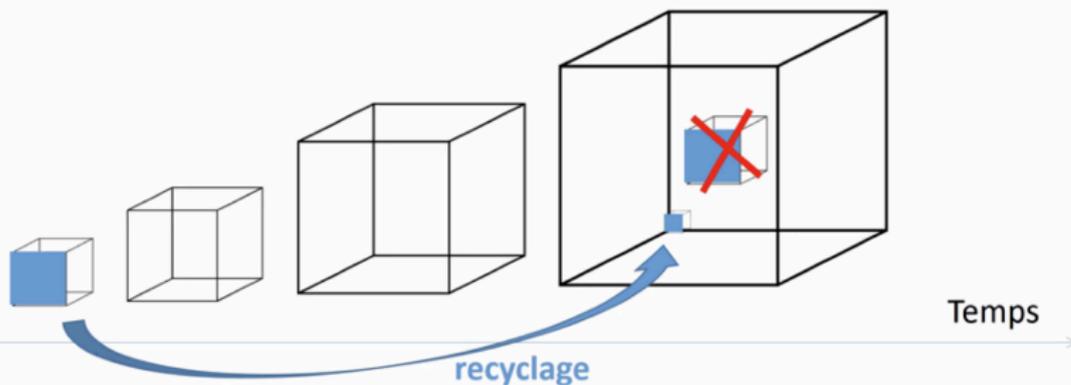
L'économie "circulaire"

La croissance de la demande en métaux en exponentielle depuis 1950

- Aluminium : 5%
- Cuivre : 3%
- Métaux rares et spécifiques : 6 à 12%

Les taux de recyclage des métaux varient entre 0% et 38 % (pour les TICs)

Quantité demandée



Crédit : F. Berthoud

L'efficacité énergétique et les effets rebonds

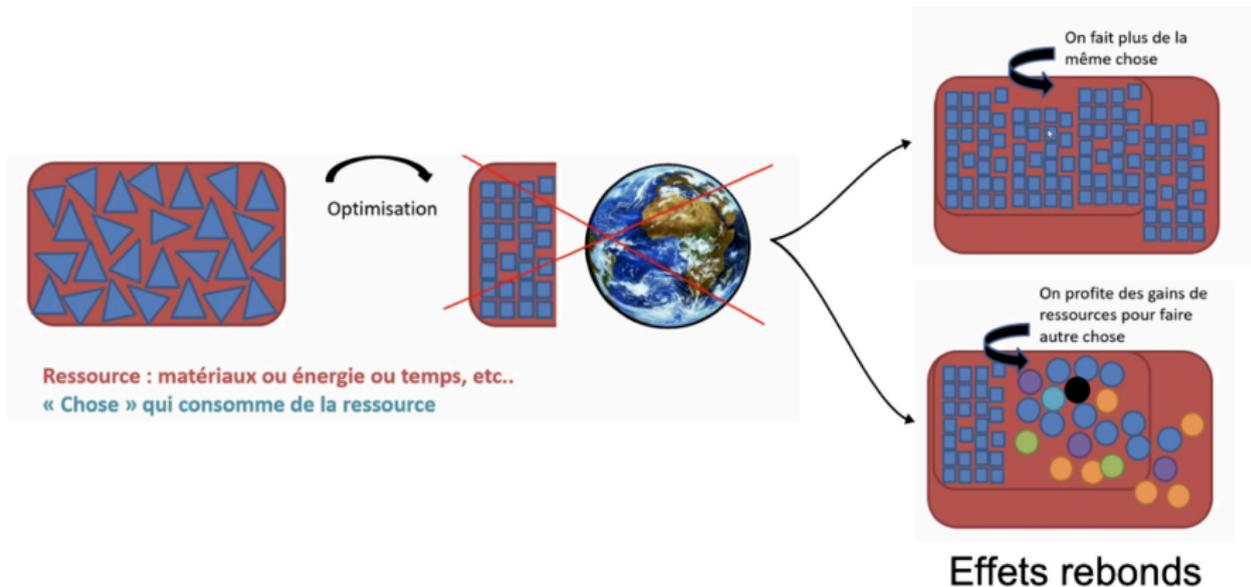
Amélioration de l'efficacité énergétique = "on fait la même chose avec moins d'énergie" ou bien "on fait plus avec la même quantité d'énergie qu'avant". Exemples :

- Plus de débit
- Plus de stockage
- Applications plus lourdes
- Meilleure qualité vidéo... pour la même quantité d'énergie.

Est-ce que pour autant on consomme moins d'énergie ?

L'efficacité énergétique et les effets rebonds

Non ! car l'efficacité énergétique crée un appel d'air, accélère l'obsolescence et est un levier de croissance économique.



Effets directs et indirects

Ordre	Effet	Exemples 5G
1er	Empreinte embarquée	Production d'équipements 5G
	Empreinte opérationnelle	Opération des réseaux, centres de données, terminaux
	Empreinte de fin de vie	Fin de vie des équipements 5G
2e	Induction	5G motive la vente de casques VR
	Optimisation	Plus de bits transférés par Joule
	Substitution	La visio 5G remplace les réunions
	Rebond direct	Plus de données sont consommées
3e	Rebond indirect	Empreinte supplémentaire pendant le temps économisé
	Rebond à l'échelle de l'économie	Changements structurels dans la façon de consommer et de produire (jeux numériques, vente en ligne)
	Transformation systémique	La 5G modifie la façon dont les gens vivent et travaillent

La classification est une version simplifiée de [Roussilhe, 2021], les exemples sont de moi. Voir aussi [Hilty et al., 2013, Greening et al., 2000].

Transition numérique = transition écologique ?



- Les politiques publiques suggèrent que le numérique pourrait être une réponse à la crise écologique. On parle de “dématérialisation”, smart cities, smart grids, voitures électriques ou autonomes, etc. ⇒ **Plus de numérique !**

Transition numérique = transition écologique ?

Des associations d'industriels poussent la notion "d'enablement effect" [GSMA, 2019, GeSi and Accenture, 2015] :

- "Compared to the global carbon footprint of mobile networks themselves, the level of avoided emissions enabled by mobile communications technologies is 10 times greater" (2,1 GtCo2e avoided vs 220 MtCO2e in 2018) [GSMA, 2019]
 - Ces études sont sujettes à conflits d'intérêt et altérées par des erreurs méthodologiques [Roussilhe, 2021].
 - Elles se focalisent sur des cas d'usage isolés toujours favorables au numérique.
- ⇒ En fait, dans la littérature scientifique, rien ne vient prouver que le numérique puisse avoir des effets positifs au niveau global. La numérisation est plutôt associée à une augmentation de la consommation énergétique [Lange 2020]. La numérisation massive de ces dernières années n'a pas fait baisser les émissions de GES.

Plan de la présentation

- 1 La crise environnementale
- 2 Les impacts du numérique
- 3 Les fausses bonnes solutions
- 4 Vers la sobriété numérique**
- 5 Conclusion

Que faire ?

...à notre échelle...

Fabrication :

- Limiter le nombre d'équipements.
- Garder nos équipements le plus longtemps possible.
- Acheter en seconde main.
- Acheter des équipements éco-conçus (ex : fairphone).
- Éviter les livraisons par avion.

Fin de vie :

- Faire réparer, réemployer, revendre, donner.
- Bien choisir sa filière de recyclage.

Que faire ?

Usage :

- Éteindre les appareils, box
- Limiter l'utilisation du cloud, favoriser l'usage des données en local, faire le tri
- Préférer les connexions filaires, puis WiFi puis 4G
- Limiter les pièces jointes
- Limiter le streaming, couper la caméra
- Diminuer la qualité des vidéos

En tant qu'E/C :

- Enseigner l'impact du numérique, l'éco-conception, la sobriété, etc.
- Réorienter ses thèmes de recherche

Mais tout ceci sera insuffisant si nos modes de vie ne changent pas et si tous les acteurs (fabricants de terminaux, opérateurs, fournisseurs de service, publicitaires) ne sont pas mis à contribution.

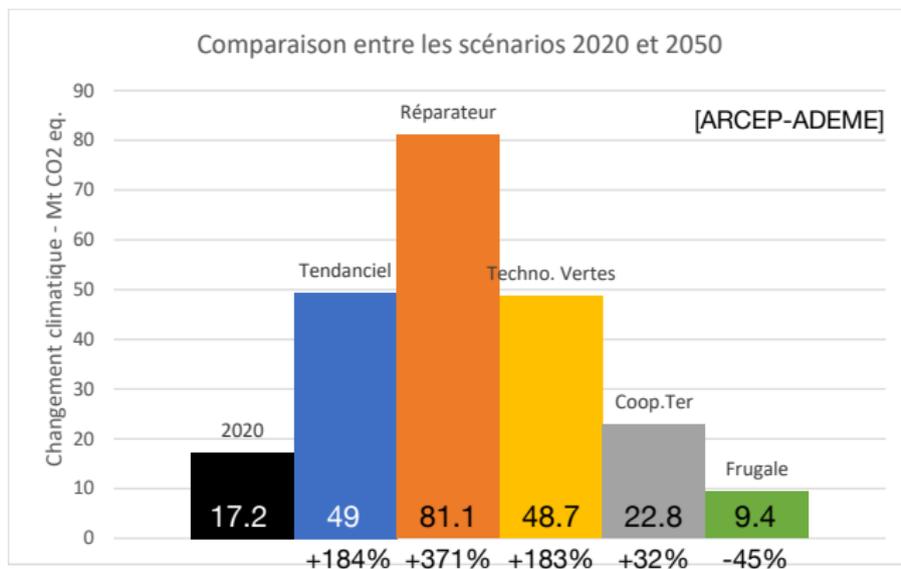
Prospective ARCEP/ADEME pour la France

Scenarios pour 2050 : (déclinaison TIC) [Perasso et al., 2022]

- **“Génération frugale”** : la transition est guidée par une frugalité contrainte et une sobriété volontaire. La production est basée sur le low-tech : les technologies sont simplifiées, robustes et peuvent être contrôlées par les citoyens. Eco-conception systématique des logiciels et du matériel. Durée de vie de l'appareil +2 ans. Nb d'appareils stable. Partage de réseau.
- **“Coopération territoriales”** : scénario intermédiaire guidé par la sobriété. Augmentation modérée des services et appareils numériques. Durée de vie de l'appareil +1 an. Le nombre d'antennes relais reste stable par rapport à 2020.
- **“Technologies vertes”** : la transition est guidée par la technologie. Le numérique est partout. Le nombre d'appareils continue de croître, mais à un rythme plus lent. L'accent est mis sur le déploiement de la 5G.
- **“Pari réparateur”** : la transition est guidée par la confiance de la société dans la « gestion » et la « réparation » des impacts environnementaux. Le mode de vie est maintenu. La numérisation est la norme. Le nombre d'équipements explose. La 6G est déployée.

Prospective ARCEP/ADEME pour la France

Empreinte carbone du numérique en France 2020-2050 [Perasso et al., 2022] :



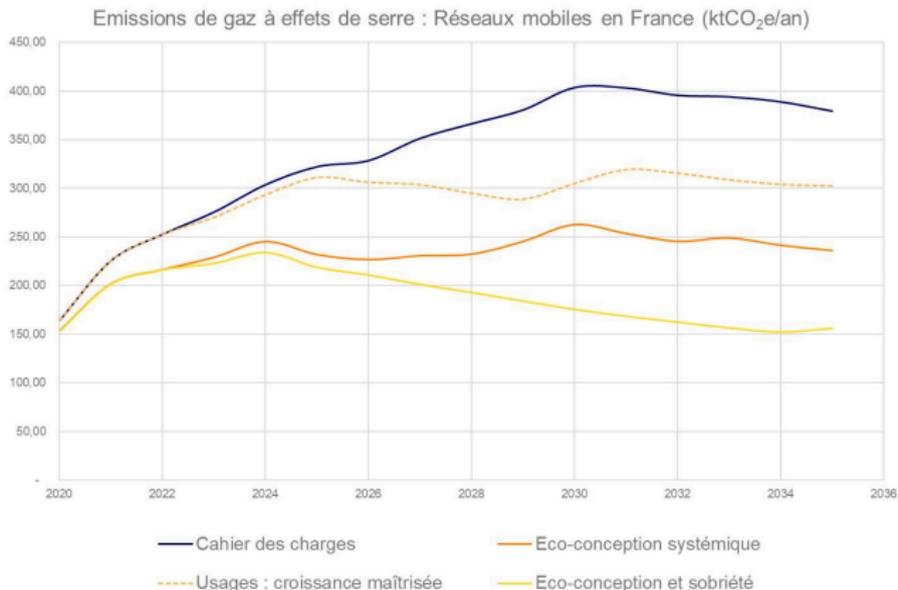
- A noter que les résultats sont à prendre avec précaution en raison du long terme, des effets rebond difficiles à prendre en compte, des données imprécises, uniquement des infrastructures françaises,...

Prospective The Shift Project pour la France

4 scénarios [Buquicchio et al., 2024] :

- **“Cahier des charges”** : régulation prévue par l'ARCEP, 6G en 2030, partage comme en 2024, croissance du trafic cohérente avec les prédictions actuelles (150 Go/m/hab en 2035)
- **“Usage croissance maîtrisée”** : idem mais avec une croissance contrôlée du trafic (45 Go/m/hab in 2035).
- **“Éco-conception systémique”** : objectifs de couvertures seulement avec les bandes basses, contraintes de régulation gelées en 2024, moratoire sur la 6G, durée de vie allongée des équipements, amélioration de l'efficacité énergétique, partage comme en 2024, évolution des usages grâce à une éco-conception des services numériques et une généralisation de codecs efficaces (réduction de 20% du trafic par rapport au cahier des charges).
- **“Éco-conception et sobriété”** : idem mais avec un trafic contrôlé (45 Go/m/hab en 2035).

Prospective The Shift Project pour la France



- Éco-conception, durée de vie accrue des équipements, nombre de terminaux contrôlé, trafic contrôlé, partage de réseau, déploiement raisonné de nouvelles technologies, régulation sensible aux impacts environnementaux sont **les éléments clefs d'un contrôle des émissions.**

Efficacité ou sobriété ?

L'efficacité :

- Des mesures qui ne remettent pas en cause le mode de vie et ne permettent pas d'avoir prise sur lui.
- Elle s'accompagne invariablement d'un effet rebond car notre mode de vie est orienté vers les "toujours plus" de croissance et de consommation.
- Les mesures d'efficacité sont toujours relatives (par Mo, par usage, etc.).

La sobriété :

- Elle consiste à atteindre des objectifs collectifs de réduction.
- Elle ramène les modes de vie à leurs conséquences globales.
- Elle explicite comment les actions locales sont reliées à des résultats globaux.
- Elle renvoie à un monde limité où les limites sont collectivement négociables.

Citation de : F. Flipo AOC, 2023.

Plan de la présentation

- 1 La crise environnementale
- 2 Les impacts du numérique
- 3 Les fausses bonnes solutions
- 4 Vers la sobriété numérique
- 5 Conclusion**

Conclusion

Quelques messages :

- Le numérique, ce n'est pas virtuel, c'est une réalité bien matérielle
- Son impact sur l'environnement va croissant.
- Mais il n'y a pas que le réchauffement climatique, il y a d'autres impacts écologiques et sociaux tout aussi importants.
- Attention : c'est la fabrication qui a le plus grand impact, conservez vos équipements le plus longtemps possible !
- Quelques leures : l'économie circulaire, l'efficacité énergétique, le techno-solutionnisme, les prophéties auto-réalisatrices.
- Imaginons une vie plus sobre.
- Réorientons notre façon d'enseigner et nos thèmes de recherche.

Merci pour votre attention !

References I



Andrae, A. S. G. and Edler, T. (2015).

On global electricity usage of communication technology : Trends to 2030.
Challenges 2015, Vol. 6, Pages 117-157, 6 :117–157.



Belkhir, L. and Elmeligi, A. (2018).

Assessing ict global emissions footprint : Trends to 2040 & recommendations.
Journal of Cleaner Production, 177 :448–463.



Bordage, F. (2019).

The environmental footprint of the digital world.
Technical report, GreenIT.fr.



Buquicchio, I., Coupechoux, M., Bank, M. D., Efoui-Hess, M., Ferreboeuf, H., Guennebaud, G., Meyer, J., Millet, F., and Richard, F. (2024).

Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients.
Technical report, The Shift Project.

References II

-  Ciblat, P., Combaz, J., Coupechoux, M., Marquet, K., and Orgerie, A.-C. (2022). Impacts environnementaux de la 5G. Research report, EcoInfo.
-  Ericsson (2022). Ericsson mobility report. Technical report.
-  Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S., and Friday, A. (2021). The real climate and transformative impact of ICT : A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9).
-  GeSi and Accenture (2015). #smarter2030 : Ict solutions for the 21st century challenge. Technical report, Global e-Sustainability Initiative.

References III

 Greening, L. A., Greene, D. L., and Dfiglio, C. (2000).

Energy efficiency and consumption—the rebound effect—a survey.
Energy policy, 28(6-7) :389–401.

 GSMA (2019).

The enablement effect.
Technical report.

 HCC (2024).

Rapport annuel 2024.
Technical report, Haut Conseil pour le Climat.

 Hilty, L., Lohmann, W., Aebischer, B., and Andersson, G. (2013).

An annotated bibliography of conceptual frameworks in ict for sustainability.

References IV



IPBES (2020).

Ipbes global assessment report on biodiversity and ecosystem services.

Technical report, The Intergovernmental Science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES).



IPCC (2023).

Ar6 synthesis report : Climate change 2023.

Technical report, The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).



ITU-T (2014).

L.1410 : Methodology for environmental life cycle assessments of information and communication technology goods, networks and services.

Technical report, International Telecommunication Union (ITU).



Malmodin, J. and Lundén, D. (2018).

The energy and carbon footprint of the global ict and e & m sectors 2010-2015.

Sustainability (Switzerland), 10.

References V



Perasso, E. L., Vateau, C., Domon, F., Aiouch, Y., Chanoine, A., Corbet, L., Drapeau, P., Ollion, L., Vigneron, V., Prunel, D., Ouffoué, G., Mahasenga, R., Orgelet, J., Bordage, F., and Esquerre, P. (2022).

Évaluation de l'impact environnemental du numérique en france et analyse prospective.

Technical report, ARCEP-ADEME.



Roussilhe, G. (2021).

Que peut le numérique pour la transition écologique ?

Technical report.



Sanchez, D., Proske, M., and Baur, S.-J. (2022).

Life cycle assessment of the fairphone 4.



SG Andrae, A. (2020).

New perspectives on internet electricity use in 2030.

Engineering and Applied Science Letter, 3(2) :19–31.