

TSE101 - Partie 2

Numérique et environnement

Philippe Ciblat

Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris



1. Aperçu sur la consommation du numérique
2. Numérique et matériaux
3. Mesure de l'impact environnemental
 - Notion d'Analyse de Cycle de Vie (ACV)
 - Effet rebond : paradoxe de Jevons
 - Effet de levier : externalités positives
4. Quelques exemples rapides
 - Technique : 5G, IA
 - Mode de travail : télétravail, congrès
 - Domaine : agriculture connectée

1 TP : Bilan-carbone du parc informatique d'une école

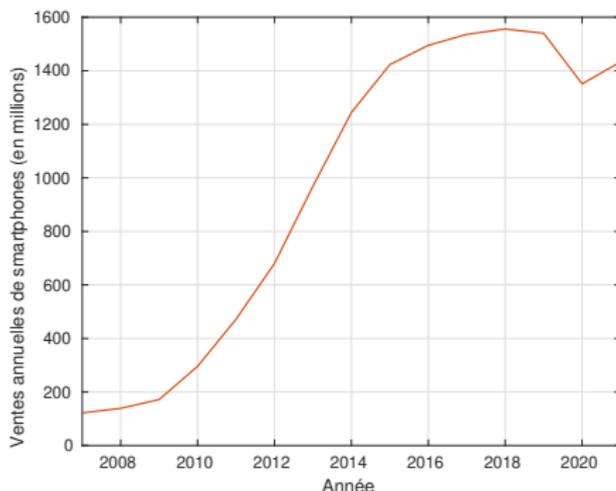
Objectifs de ce chapitre

- Consommation énergétique du numérique et de son évolution
- Deux notions fondamentales : effet rebond et effet de levier
- Analyse par approche systémique

Section 1 : Aperçu sur la consommation

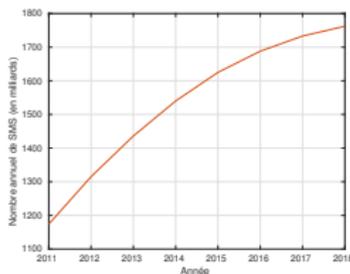
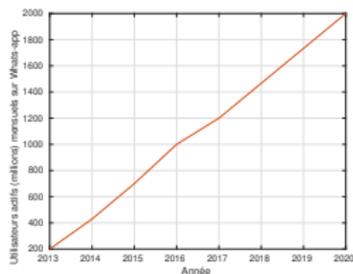
Chiffres sur les équipements terminaux

Mondialement, 67% des gens ont un téléphone mobile (+2% par an alors que population +1.1%)



source : Statista2022, WeAreSocial

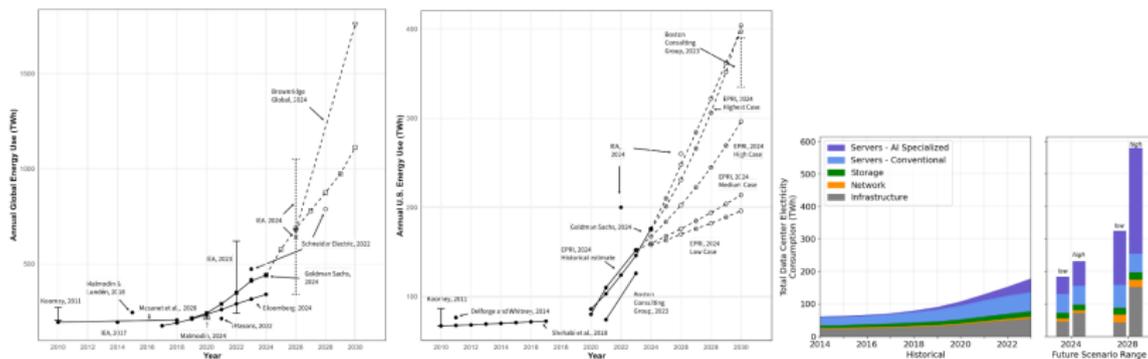
Chiffres sur le trafic



Pas de remplacement d'application mais accumulation des outils

source : Statista2022, Ericsson Mobility Report

Chiffres sur les centres de données (enfin de calcul) - 1

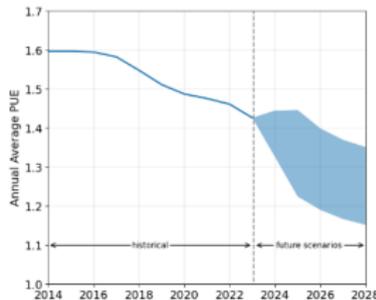
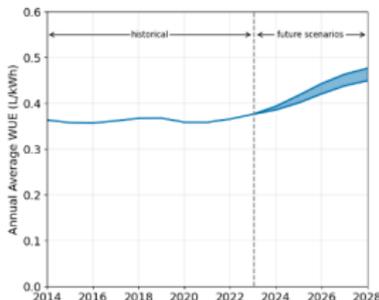


Croissance exponentielle alimentée par l'IA

source : *US data center energy usage report 2024 (Berkeley Lab)*

Chiffres sur les centres de données (enfin de calcul) - 2

- 460TWh/an en 2024
 - plus que les centrales nucléaires françaises
 - 2% de la production d'électricité mondiale
- Problème : refroidissement
 - solution avec l'**eau**: moins d'énergie mais dégradation de la biodiversité et conflit d'usage
 - ↳ *Water Usage Effectiveness (WUE)* autour de 0,4ℓ/kWh
 - ↳ Meilleur *Power Usage Effectiveness (PUE)* proche de 1,1



Emissions de GES (CO₂eq) du numérique

~ 4% des émissions mondiales et ~ 8% de croissance annuelle

Techniques de mesure (notamment dans les entreprises):

- *Activity-based*: on regarde les sources de création de CO₂
 - Consommation et production/fabrication
 - Scopes:
 - 1- émission directe (produite sur site)
 - 2- émission indirecte (produite hors site mais énergie associée consommée sur site)
 - 3- émission induite (produite par le client ou le fournisseur)
- *Spend-based*: on compte les € et ce marqueur/*proxy* se traduit en CO₂eq

source : *Lean ICT (rapport du Shift Project), 2018*

- Solution 1 : *GreenIT*

$$\text{Efficacité énergétique} = \frac{\text{métrique de performances}}{\text{énergie consommée}}$$

- objectif relatif (moins de GES par unité)
 - effet rebond (nombre d'unités augmente)
 - réponses techniques pas suffisantes pour résoudre le problème
- Solution 2 : *IT for Green*
 - objectif transféré (moins de GES ailleurs)
 - effet de levier (externalités positives)
 - transfert de l'efficacité énergétique, donc réponses techniques pas suffisantes pour résoudre le problème
 - Solution 3 : Sobriété
 - la puissance consommée est pré-définie
 - évite l'effet rebond et assure l'effet de levier

Efficacité joue sur l'optimisation, la sobriété sur le mode de vie

Section 2 : Numérique et matériaux

Dématérialisation ?

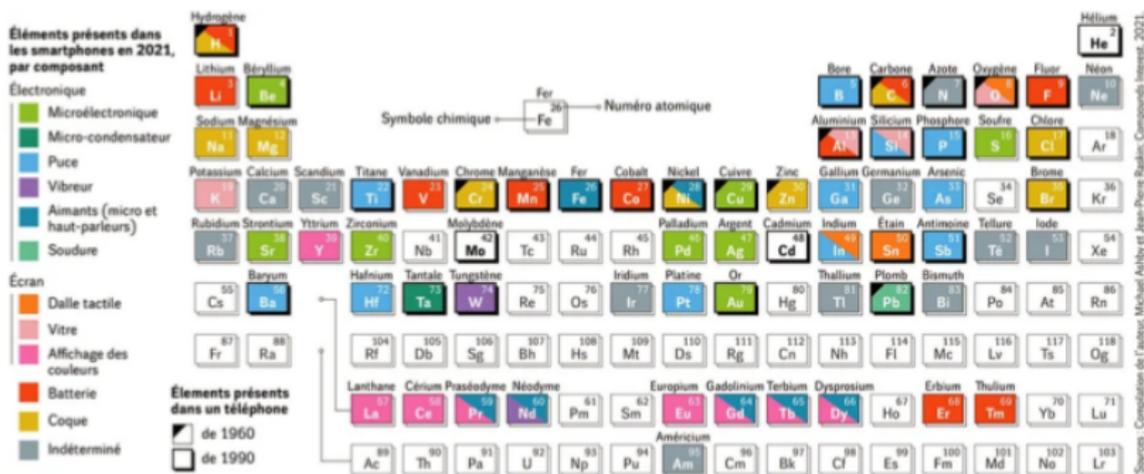
Le numérique, ...

- ce n'est pas virtuel
- et c'est plein de dispositifs matériels et donc de matériaux !



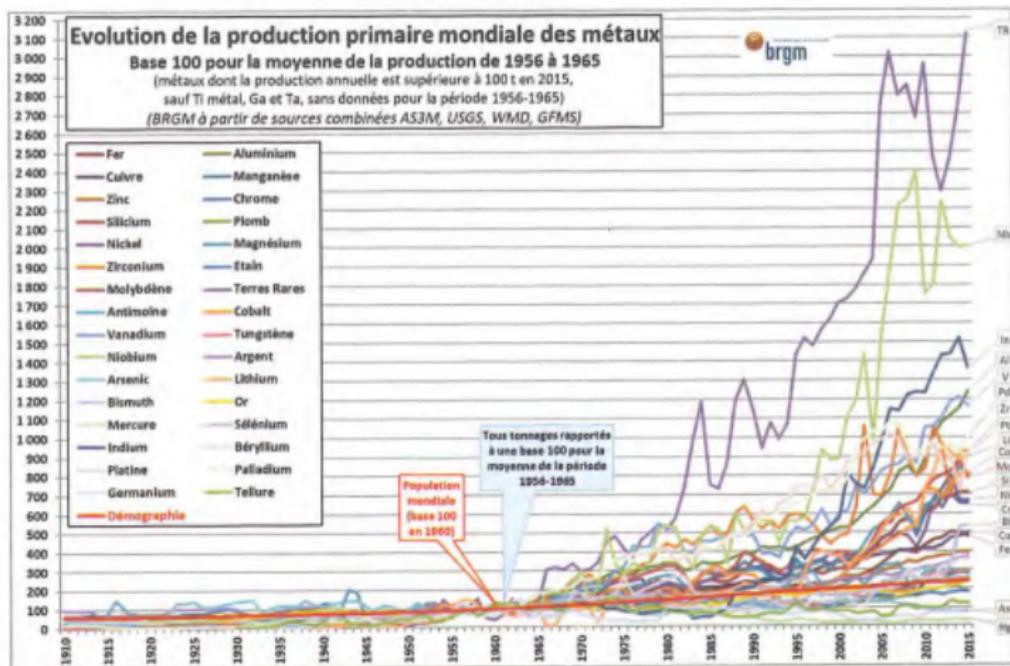
Une lourde contribution minière pour la planète

Principaux métaux utilisés dans le Numérique (ex.: le smartphone)



Evolution de la production

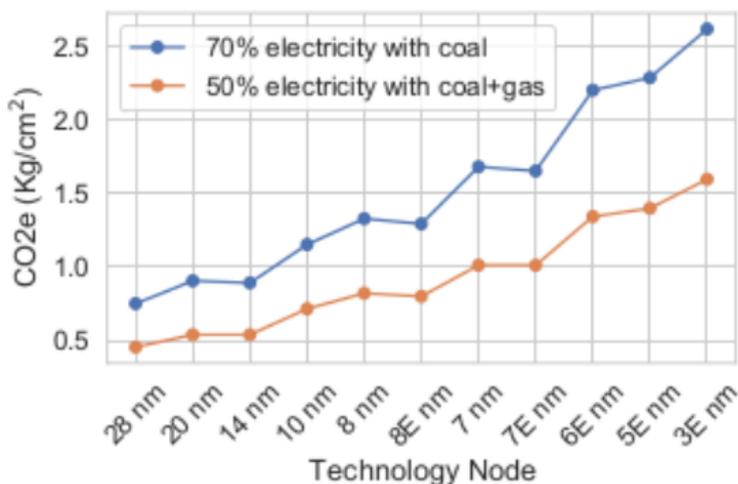
ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE MONDIALE DES MÉTAUX



Source : BRGM.

Coût énergétique de la fabrication

La **miniaturisation** permet de faire des circuits plus rapides et plus complexes pour la même dissipation thermique mais processus industriel plus consommateur d'énergie



source : S. Tannu and P. Nair, "The dirty secret of SSD: embodied carbon", preprint Arxiv, Jul. 2022

Ici, le problème est la pollution et non les émissions GES

- Hors filière: ~ 50%
 - exports illégaux, décharges
 - oubliés dans les tiroirs
- Filières contrôlées (officielles et agréées)
 - Valorisés
 - Recyclés: ~ 40% mais seulement partiellement
 - Éliminés (poubelle)

Ce sont des ordres de grandeur, difficile à vérifier et à tenir à jour !

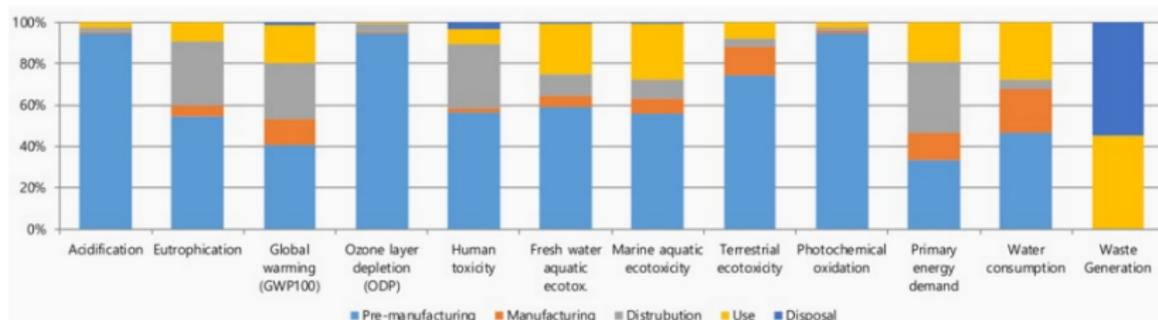
Exemple des terres rares

- Au Japon, collecte très efficace \rightsquigarrow notion de mines urbaines
- mais recyclage trop cher (c'est comme rechercher le sel dans du pain rassis !)

source : F. Fizaine, "Recycler 100% des métaux, un objectif atteignable?," *The conversation*, Nov 2022

Coût environnemental global

La pollution globale d'un téléphone portable



On peut alors définir un indice unique : *Product Environmental Footprint (PEF)*

| Indicateur de l'impact | Unité | Normalisation | Fonction | Facteur d'aggrégation |
|---|------------------------------------|---------------------|----------|---------------------------------|
| Changement climatique - total | kg CO2 eq. | 6.10 ⁻⁰³ | 21.06 | 0.026 mPt/kg CO2 eq. |
| Changement climatique - combustibles fossiles | | | | |
| Changement climatique - biomasse | | | | |
| Changement climatique - usage sol à grande | | | | |
| Appauvrissement de la couche d'ozone | kg CFC 11 eq. | 5.30 ⁻⁰² | 6.31 | 1176 mPt/kg CFC11 eq. |
| Acidification | mol H+ eq. | 5.58 ⁻⁰¹ | 6.20 | 3.1 mPt/mol H+ eq. |
| Eutrophication | | | | |
| Eutrophication - azoture, eaux douces | kg P eq. | 1.41 ⁻⁰⁰ | 2.80 | 17 mPt/kg P eq. |
| Eutrophication - azoture, mer | kg N eq. | 1.93 ⁻⁰¹ | 2.96 | 3.5 mPt/kg N eq. |
| Eutrophication - phosphore | mol P eq. | 1.23 ⁻⁰² | 3.71 | 0.21 mPt/mol P eq. |
| Formation de ozone photochimique | kg NBVOC eq. | 4.00 ⁻⁰¹ | 4.70 | 3.2 mPt/kg NBVOC eq. |
| Épuisement des ressources abiotiques | | | | |
| Idem - minerais et métaux | kg Sb eq. | 6.36 ⁻⁰² | 7.55 | 1188 mPt/kg Sb eq. |
| Idem - combustibles fossiles | MJ, sans carbure valent | 6.50 ⁻⁰⁴ | 8.52 | 0.0013 mPt/MJ |
| Besoin en eau | M ³ consommé eq. dérivé | 1.13 ⁻⁰⁴ | 8.51 | 0.0070 mPt/M ³ degré |
| Émission de particules fines | Charges incidence | 5.93 ⁻⁰⁴ | 8.96 | 0.012 mPt/kg 10-25 eq. |
| Raisonnements sanitaires, santé humaine | kg ULS eq. | 4.22 ⁻⁰³ | 5.01 | 0.00045 mPt/CTUe |
| Toxicité (sauf douce) | CTUe | 6.27 ⁻⁰⁴ | 1.92 | |
| Toxicité humaine | | | | |
| Toxicité humaine, effets cumulés | CTUh | 1.49 ⁻⁰⁵ | 2.13 | 218085 mPt/CTUh |
| Toxicité humaine, effets non cumulés | CTUh | 2.30 ⁻⁰⁶ | 1.84 | 80214 mPt/CTUh |
| Impacts liés à l'occupation des sols / Qualité du sol | dimensionless | 8.15 ⁻⁰⁵ | 7.84 | 0.00007 mPt/PS |

Section 3 : Mesure de l'impact environnemental

Comment évaluer/mesurer tout cela ?

Exemple : requête sur Internet

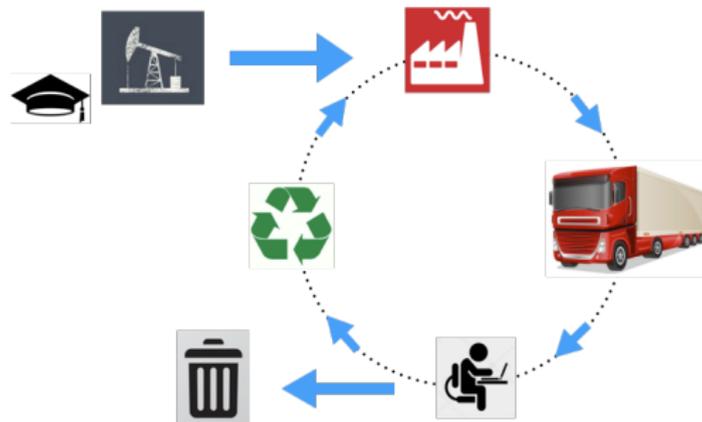
mobilise un terminal (téléphone ou ordinateur), connexion sans fil 4G/Wifi, box Internet, routeurs/réseau, pare-feu, serveurs dans un gros centre de données,

Des difficultés structurelles

- Peu de données accessibles (concurrentiel)
 - Si données, souvent trop agglomérées
 - Si données, souvent trop optimistes (car constructeurs)
 - Evolutions trop rapides des données
- Modèles complexes

source : C. Freitag et al., "The real climate and transformative impact of ICT: a critique of estimates, trends, and regulations," Patterns, Sep. 2021

Analyse du cycle de vie

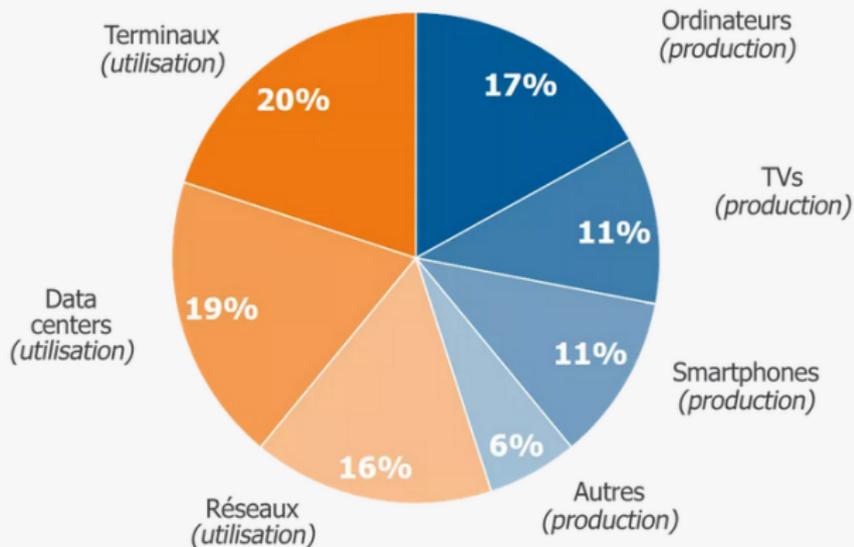


Conception

- matières premières → fabrication → transport-distribution
- utilisation
- valorisation et/ou fin de vie

L'utilisation n'est pas forcément la plus grande part !
Cela dépend de l'objet étudié

Répartition entre utilisation et fabrication



Distribution de la consommation énergétique du numérique par poste pour la **production (45 %) et l'**utilisation** (55 %) en 2017**

[Source : Lean ICT, *The Shift Project* 2018]

Exemple 1 : un équipement (ordinateur portable)

Etude d'Apple en 2019 sur les portables MacBook 16 pouces stockage 512 Go, fréquence 2,6 GHz.

- La phase d'utilisation en première main est considérée à 4 ans.
- l'empreinte carbone est de 394 kgCO₂eq
 - la fabrication constituant alors 75%
 - le transport 5%
 - l'utilisation 19%
 - la fin de vie le 1% restant.

Il faudrait utiliser cet ordinateur **4 fois plus longtemps** pour que la part de l'utilisation soit du même ordre que la fabrication.

Etude similaire chez Dell en 2018 avec des mêmes conclusions

Exemple 2 : une application (courriel)

Il est compliqué d'estimer *précisément* le coût d'un courriel en terme de son impact CO₂.

Exemple (sans stockage ni ACV):

- [Aslan2018] – 6mgCO₂eq pour un courriel de 1Mo
- [Ficher2021] – 2mgCO₂eq pour 1Mo (sur Renater)

mais avec stockage et ACV 20gCO₂e pour 1Mo [Ademe2011]

Effet rebond ou paradoxe de Jevons

- Une technologie s'améliore
- L'utilisation s'en retrouve augmentée

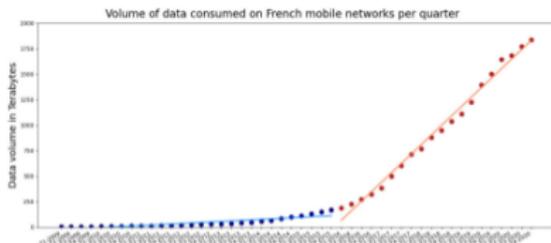
et finalement la consommation initiale est dépassée

Classification de l'effet rebond [Combaz-Coupechoux2022]

| Scope | Effect | 5G Examples |
|--------------|---------------------------|--|
| First order | Embodied footprint | Production of 5G equipments and devices |
| | Operational footprint | Operation of networks, devices, data centers |
| | Disposal footprint | Equipments and devices end-of-life |
| Second order | ● Induction | 5G motivates the sale of VR headsets |
| | Optimization | More efficient data transfer |
| | Substitution | Visio-conferencing replaces meetings |
| | ● Direct rebound | More mobile data are consumed |
| Third order | ● Indirect rebound | Footprint during time saved in data transfer |
| | ● Economy-wide rebound | Structural changes in production patterns and consumption habits |
| | ● Systemic transformation | 5G modifies the way people are working and living |
| | ● | |

Exemples provenant du numérique

- Amélioration des algorithmes d'apprentissage automatique
 - Augmentation du nombre d'applications les utilisant
 - Augmentation du volume de données traitées
- Amélioration de l'électronique et des batteries
 - Augmentation de l'usage du téléphone portable
 - Non-augmentation de l'autonomie des portables
- Amélioration des générations de normes de communication
 - augmentation du volum des données échangées



source : P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux, K. Marquet, and A.-C. Orgerie, "Environmental impacts of 5G (part 1)", 1024 newsletter, April 2024

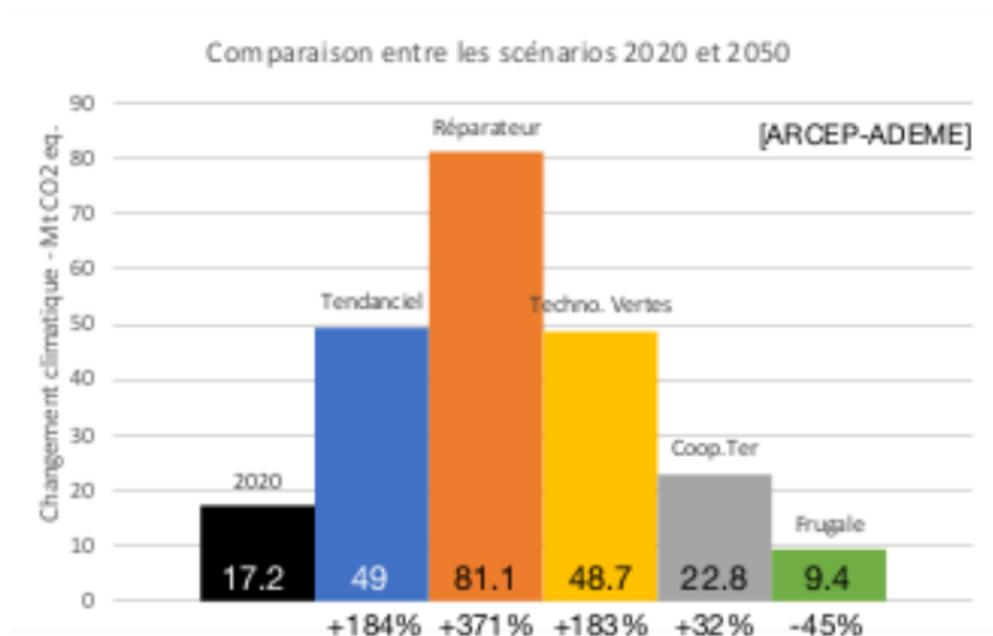
Effet de levier ou externalités positives

Grâce au numérique, d'autres secteurs vont diminuer (drastiquement) leur consommation énergétique

Résultat fantaisiste dénoncé dans [Roussilhe2021] : 1gCO₂e consommé en ICT évite 10gCO₂e ailleurs [GSMA2019]

- voitures autonomes (alternative des transports publics)
- logistique (port de Livourne avec gain annuel de 250km)
- télétravail
- agriculture connectée (aquaculture requiert peut-être 6G)

- Solutions multiples et conditionnées sauf si secteur limité
- Introduction d'une nouvelle technologie plutôt liée à une hausse attendue de productivité : commission IA en 2024 dit « renforcer transparence environnementale (*mesure*), recherche dans modèles à faible impact (*efficacité*) et utilisation pour transitions environnementales (*effet de levier*) »



Section 4 : Exemples applicatifs

Environ une nouvelle génération tous les 10 ans

- 2G : première numérique mais voix
- 3G : données pour l'Internet mobile
- 4G : données à haut débit (du sens avec écran grand et tactile)
- 5G :
 - Très grand débit (eMMB) : réseau cellulaire
 - Faible latence et grande fiabilité (URLLC) : automatisation
 - Grande connectivité (mMTC) : Internet des objets (IoT)

Est-ce efficace ?

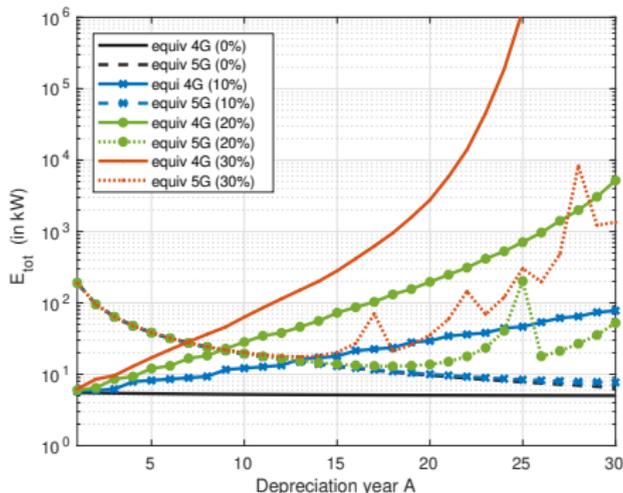
- $P_{\text{manufacturing}}$: énergie de fabrication (liée à l'ACV)
- $P_{\text{circuitry}}$: énergie des circuits analogiques
- $P_{\text{processing}}$: énergie de traitement numérique
 - nouveauté protocolaire : mode veille
- P_{tx} : énergie de transmission
 - MIMO massif, plus de bandes de fréquences.

$$E_{\text{tx,fichier}} = \frac{LP_{\text{tx}}}{n_{\text{tx}} B \log_2 \left(1 + \gamma \frac{P_{\text{tx}}}{n_{\text{tx}} B N_0} \right)}$$

- Efficacité en E_{tx} : oui
- Efficacité globale : ?
- Sobriété : non

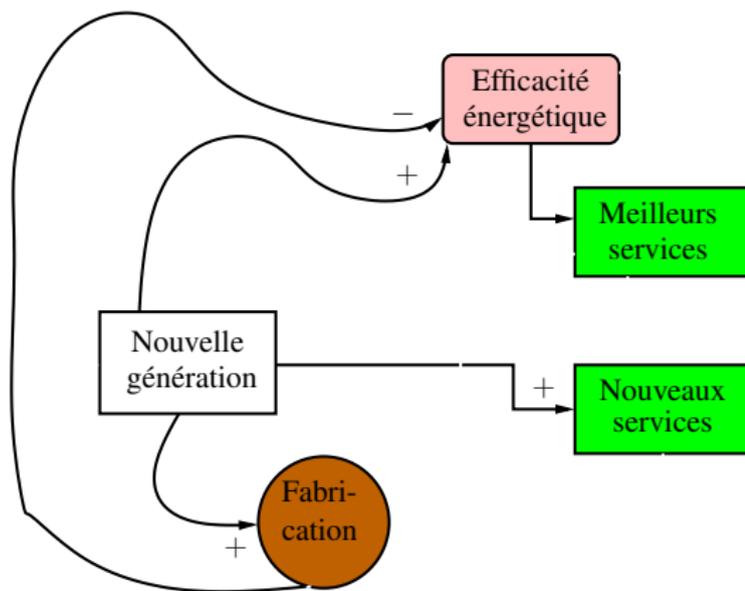
Efficacité globale ?

- Modèle 4G : 4 antennes, amortissement de 10 ans déjà
- Modèle 5G : 100 antennes
- Fabrication prise en compte (dont l'écart entre antennes)

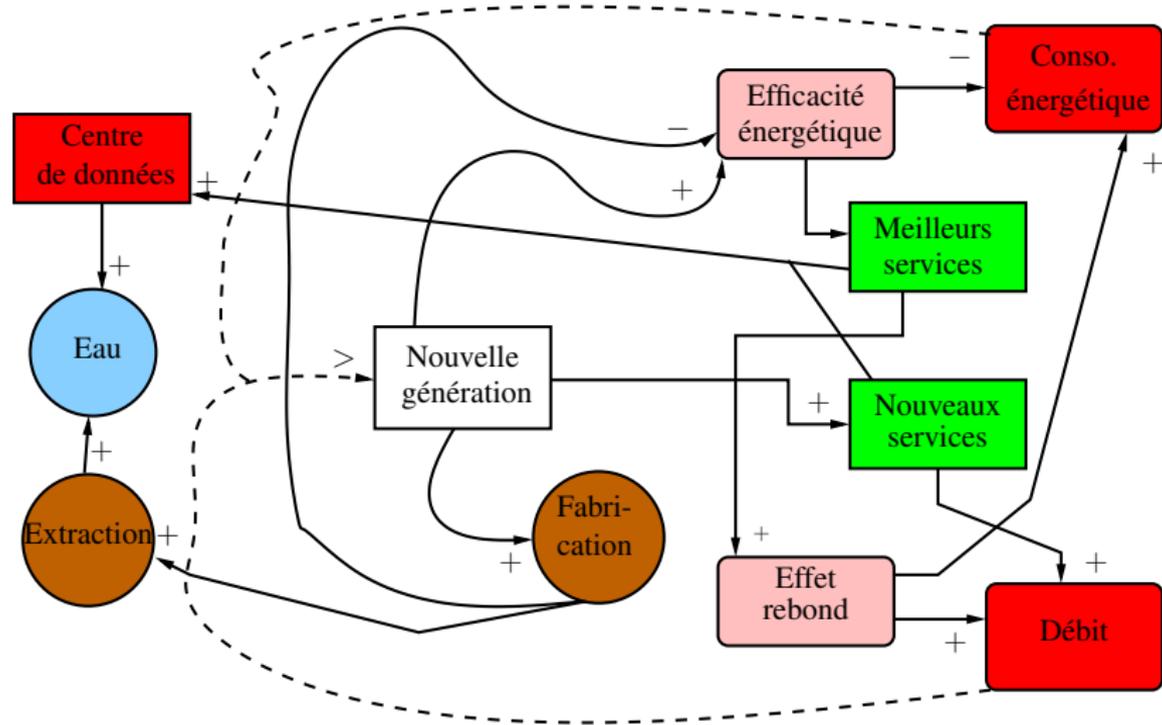


source : P. Ciblat, "A propos du MIMO massif dans un contexte de sobriété numérique," 2022

Analyse systémique de la xG

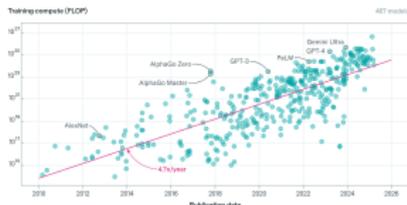


Analyse systémique de la xG



Technique : Intelligence artificielle

- Efficacité \Leftrightarrow IA frugale : mettre des contraintes de complexité dans la construction et l'optimisation des algorithmes
- Evaluation de la consommation (Petaflop/model)



- Quelques chiffres de consommation
 - ↳ Microsoft +30% d'émissions en 2023 ; Google +50% en 5 ans
 - ↳ Installation en France de centres (de calcul) à 1GW chacun
 - ↳ Objectif de carbone net zéro impossible en 2030

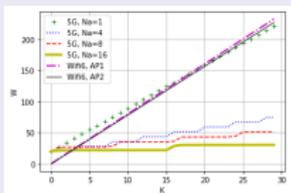
sources : R. Couillet et al., "The submerged part of the AI-berg", *Signal Processing Mag*, Sep 2022 ; A. de Vries, "The growing energy footprint of artificial intelligence", *Joule*, 2023 ; D. Trystram, "Position paper: key challenges in fostering the environmental performance of AI", 2025 ; <https://epochai.org>

Mode de travail : télétravail

- Travaux ante-covid : exemple de la région londonienne
 - ↳ gain nul car loi de Zahavi (1h par jour en moyenne)
- Travaux post-covid : étude statistique de l'Ademe
 - ↳ gain de 200kgCO₂e par an : 10km par jour
 - ↳ mais pas de baisse des émissions du secteur des transports

Quel outil technique pour le télétravail ?

Phase d'usage ($P_{tx} + P_{processing} + P_{circuitry}$)



source: B. Motte-Baumvol et al., "Does working from home reduce CO2 emissions? An analysis of travel patterns as dictated by workplaces", 2020 ; J. Almosni et al., "Quand le télétravail devient possible : analyse des impacts de la crise sanitaire sur les pratiques de mobilité", 2021 ; J. Bieser et al., "Next Generation mobile networks", 2020

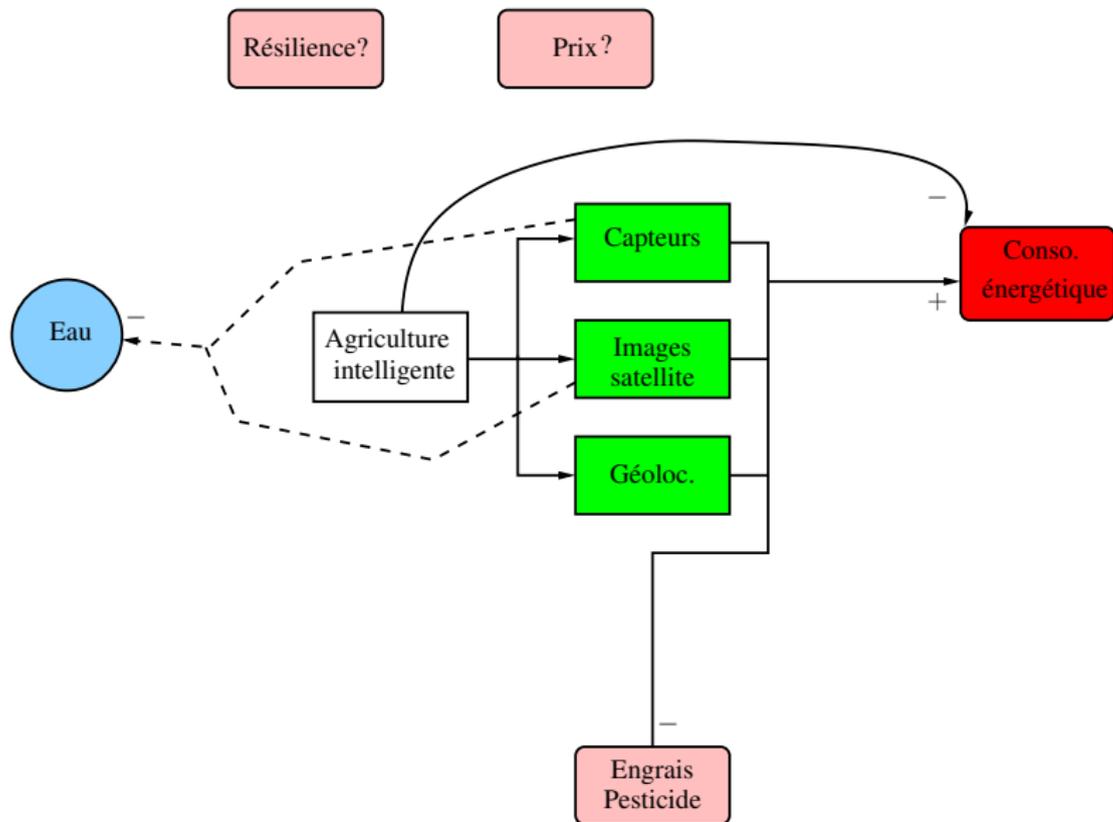
Mode de travail : congrès virtuel

- présentiel : 10.000km d'avion par personne
 - 150 personnes à 0km et 150 à 20.000km AR
 - AR Paris-NY par passager = 1tCO₂e pour 12.000km ce qui donne 1km/passager= 83gCO₂e. Donc $150 \times 20000 \times 83$ (gCO₂e)=249 tCO₂e
- distanciel : visionnage de 80 vidéos par personne
 - 1 vidéo dure 20mn, 20 vidéos/j, 4j de congrès
 - 24.000 fichiers de 45Mo, d'où 1 To et donc 6kgCO₂e (sans compter le stockage ni ACV)

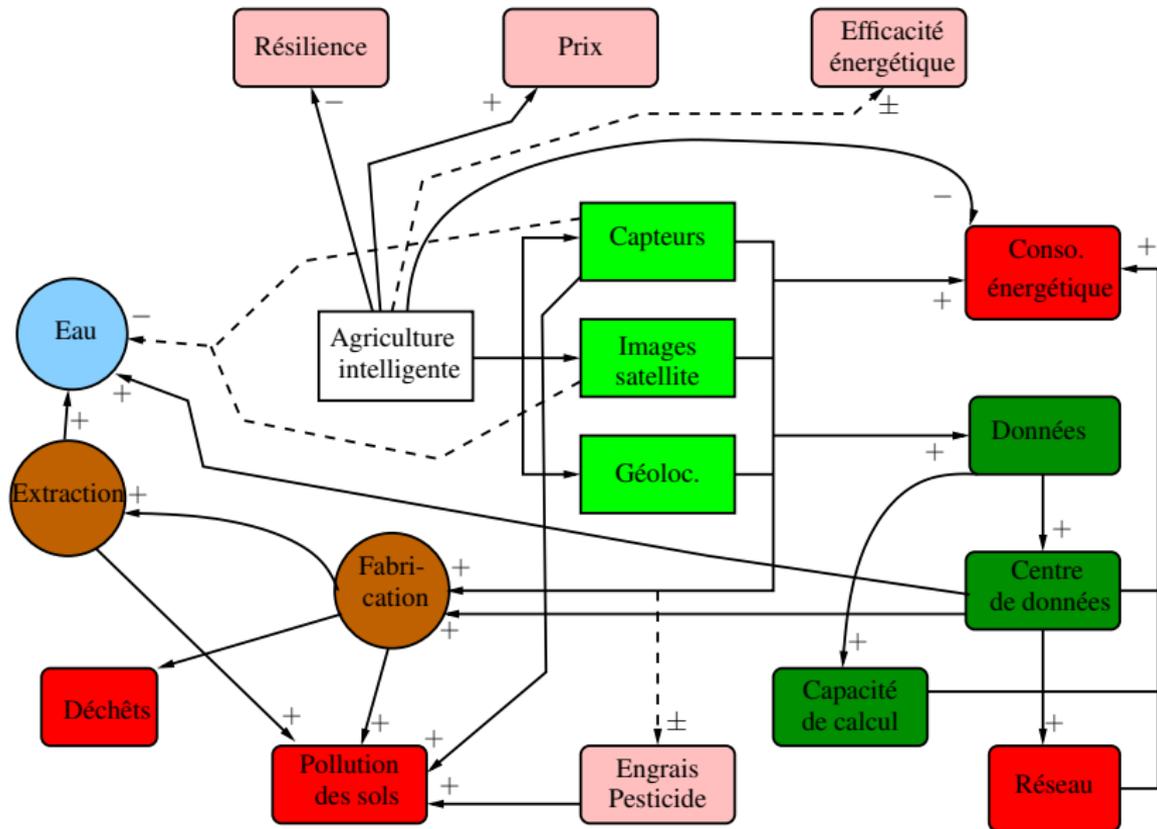
Remarques

- Facteur 40.000 en faveur du distanciel (mais 4 avec ACV mais alors faire ACV de l'aviation : attention aux chiffres !)
- mais est-ce encore un congrès (réseautage inexistant)
- retour à des congrès continentaux en présentiel plus pertinent ?
- et on voit une hausse du trafic aérien régulière

Point de vue systémique de l'agriculture connectée



Point de vue systémique de l'agriculture connectée



Savoir :

- Quelques ordres de grandeur
- Le numérique fait partie du problème comme toute technique demandant de l'énergie et du matériel

Savoir-faire :

- Comprendre les limites d'un ACV
- Elargir votre champ d'analyse sur un problème énergétique d'une nouvelle technologie