

Matérialité du numérique



Adrien Luxey-Bitri & Damien Marchal
Univ-Lille — Semaine des transitions
24 mars 2025

LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE
GÉNÉRÉES PAR LE NUMÉRIQUE :

47% DUES AUX ÉQUIPEMENTS
DES CONSOMMATEURS

53% DUES AUX DATA CENTERS ET
AUX INFRASTRUCTURES RÉSEAU

600 kg
de matières premières
mobilisées pour fabriquer
un ordinateur de 2kg

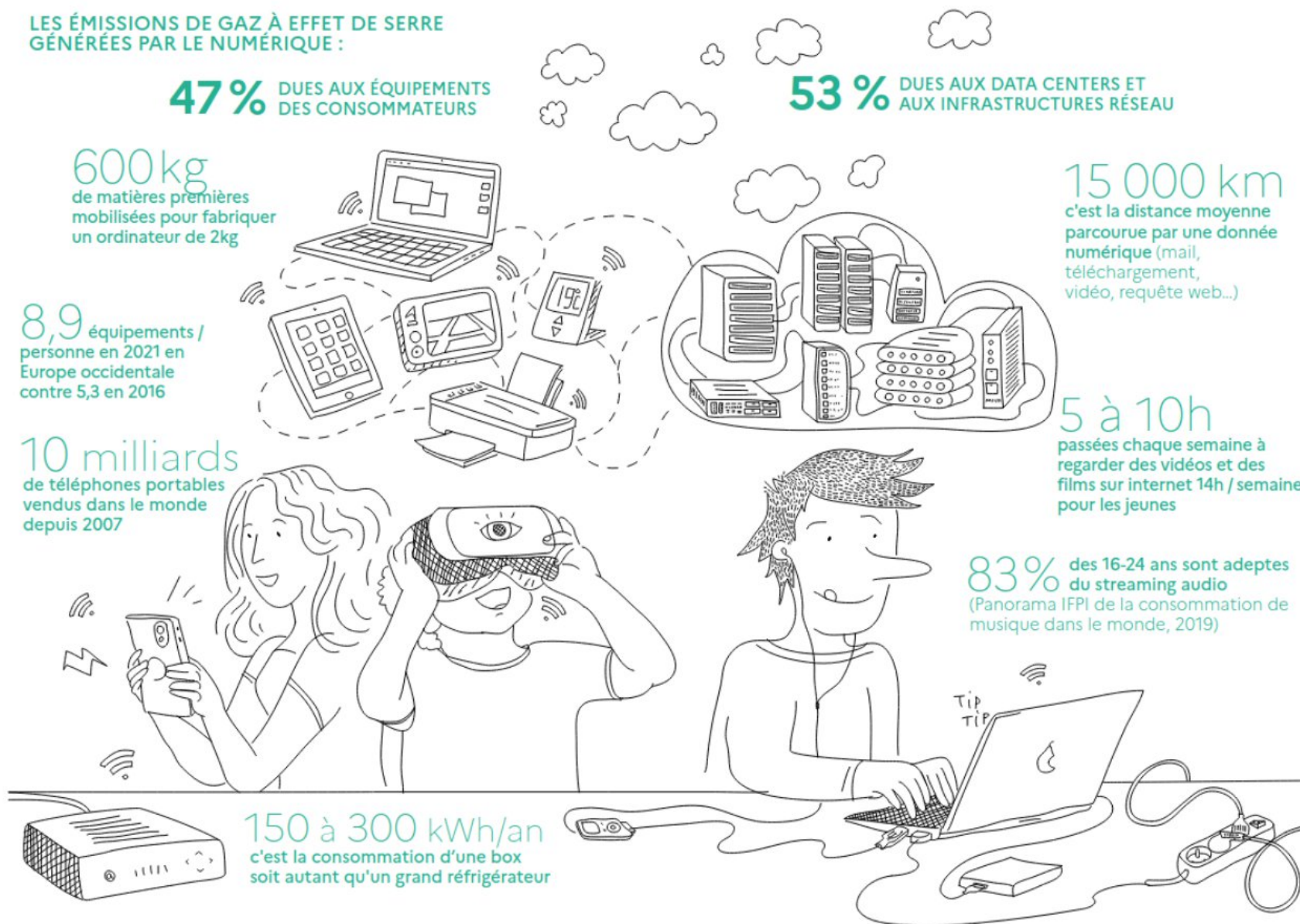
15 000 km
c'est la distance moyenne
parcourue par une donnée
numérique (mail,
téléchargement,
vidéo, requête web...)

8,9 équipements /
personne en 2021 en
Europe occidentale
contre 5,3 en 2016

10 milliards
de téléphones portables
vendus dans le monde
depuis 2007

5 à 10h
passées chaque semaine à
regarder des vidéos et des
films sur internet 14h / semaine
pour les jeunes

83% des 16-24 ans sont adeptes
du streaming audio
(Panorama IFPI de la consommation de
musique dans le monde, 2019)

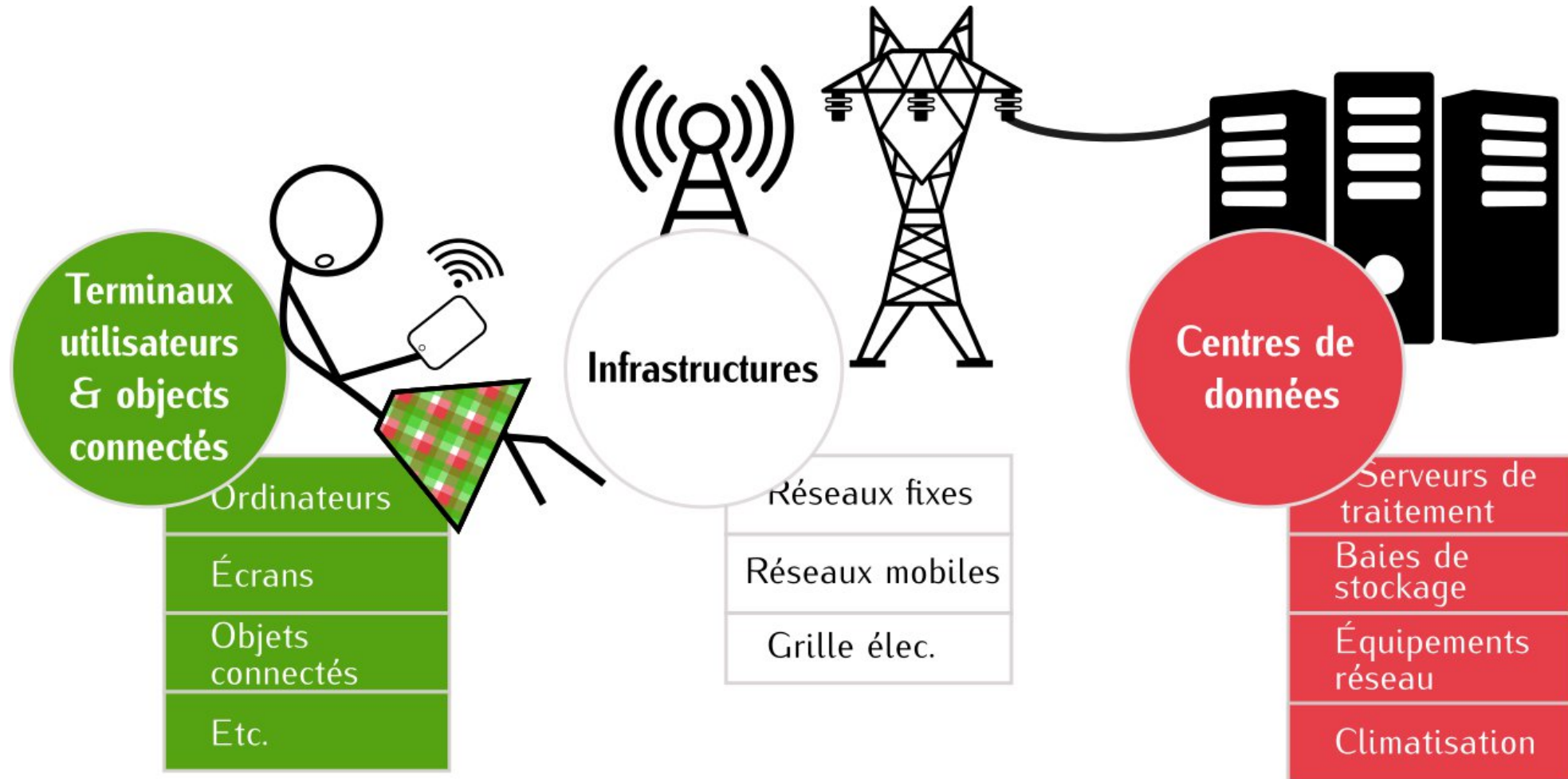


150 à 300 kWh/an
c'est la consommation d'une box
soit autant qu'un grand réfrigérateur

1. Le « numérique » et son écosystème



1.1 De quoi parle-t-on ?



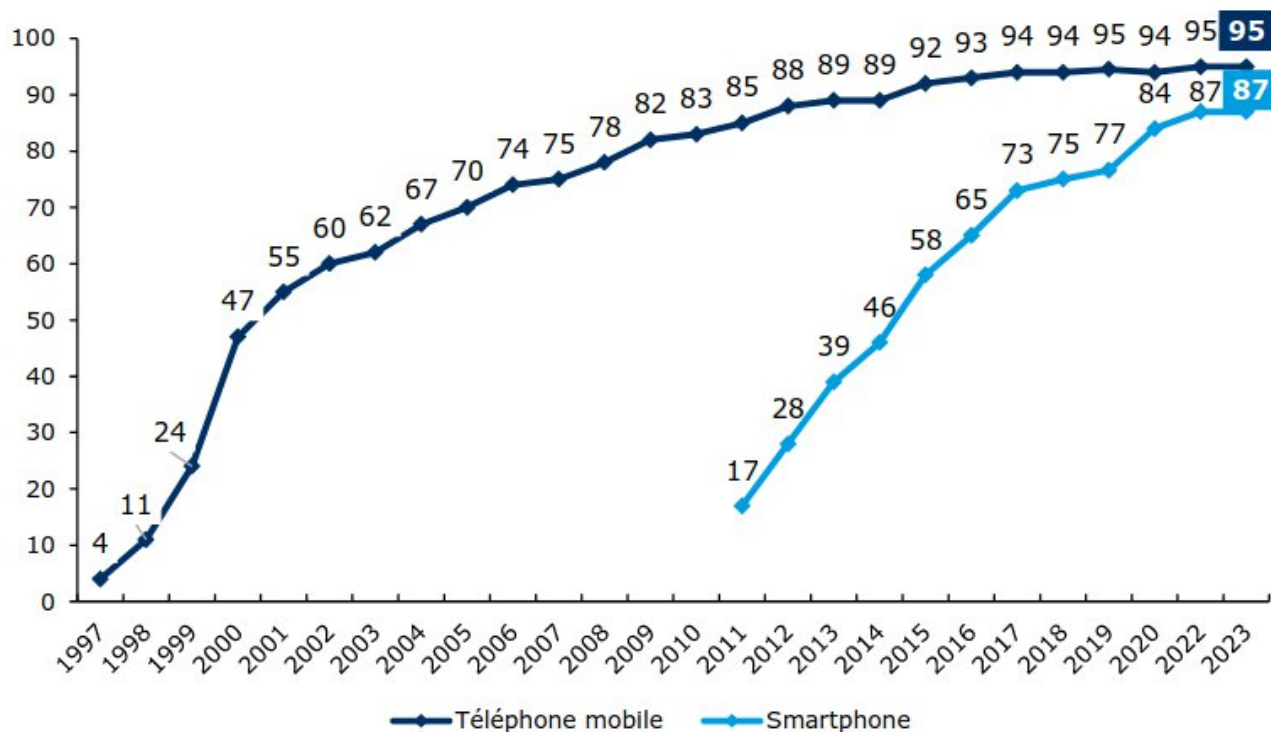
Les terminaux



Un secteur en croissance

Taux d'équipement en téléphone mobile et smartphone

- Champ : ensemble de la population de 12 ans et plus, en % -

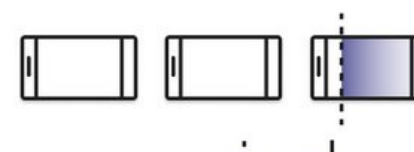


Source : CREDOC, Baromètres du numérique.

Les foyers possèdent en moyenne plus de 10 écrans, dont près d'un quart ne sont pas utilisés

Nombre moyen d'équipements par foyer disposant d'une connexion internet fixe, dont les équipements inutilisés

TÉLÉPHONES
MOBILES

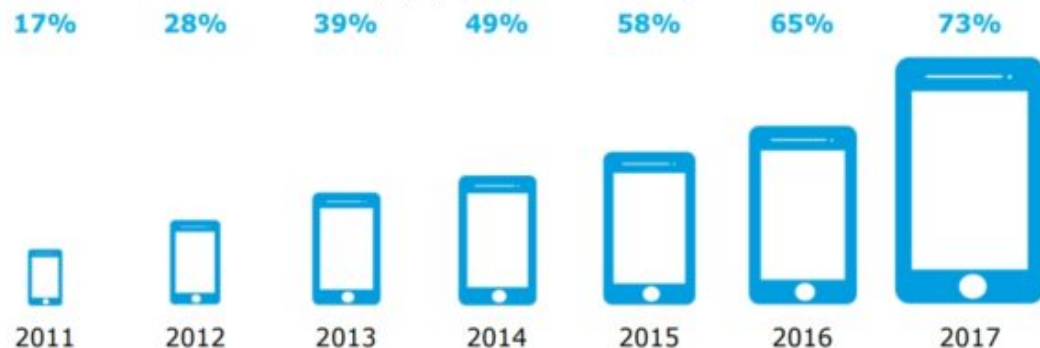


3 par foyer,
dont 0,6 inutilisé

Un secteur en croissance

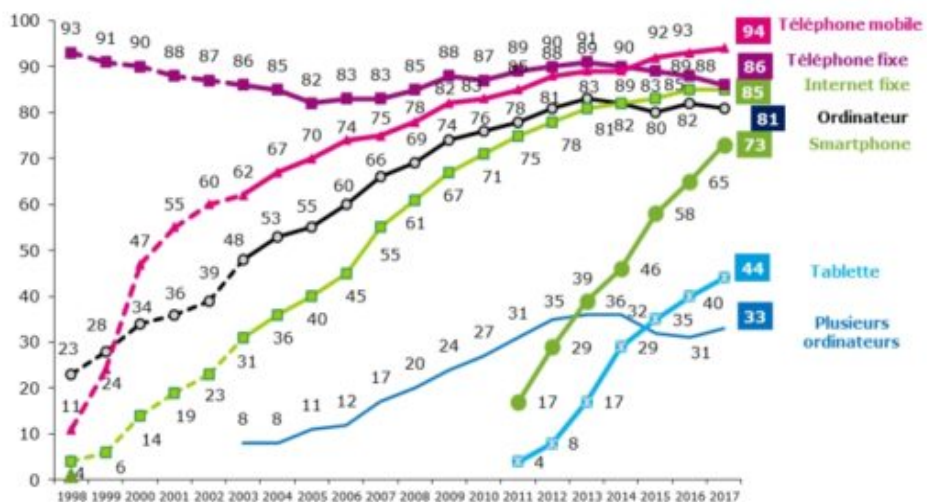
Graphique 1 - Taux d'équipement en smartphone

- Champ : population de 12 ans et plus, en % -



Graphique 2 - Taux d'équipement en téléphonie, ordinateur et internet à domicile

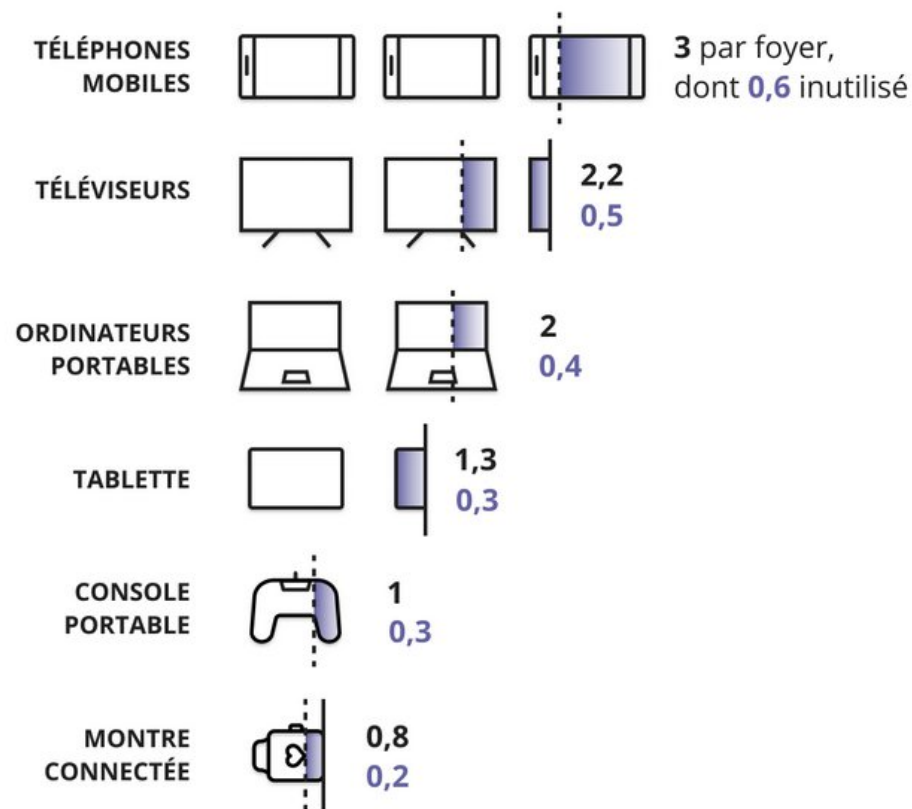
- Champ : population de 12 ans et plus, en % -



Source : CREDOC, enquêtes « Conditions de vie et Aspirations » (vague de juin de chaque année).
 Note : avant 2003 (en pointillés), les résultats portent sur les 18 ans et plus. A partir de 2003, les résultats portent sur les 12 ans et plus.

Les foyers possèdent en moyenne plus de 10 écrans, dont près d'un quart ne sont pas utilisés

Nombre moyen d'équipements par foyer disposant d'une connexion internet fixe, dont les équipements inutilisés

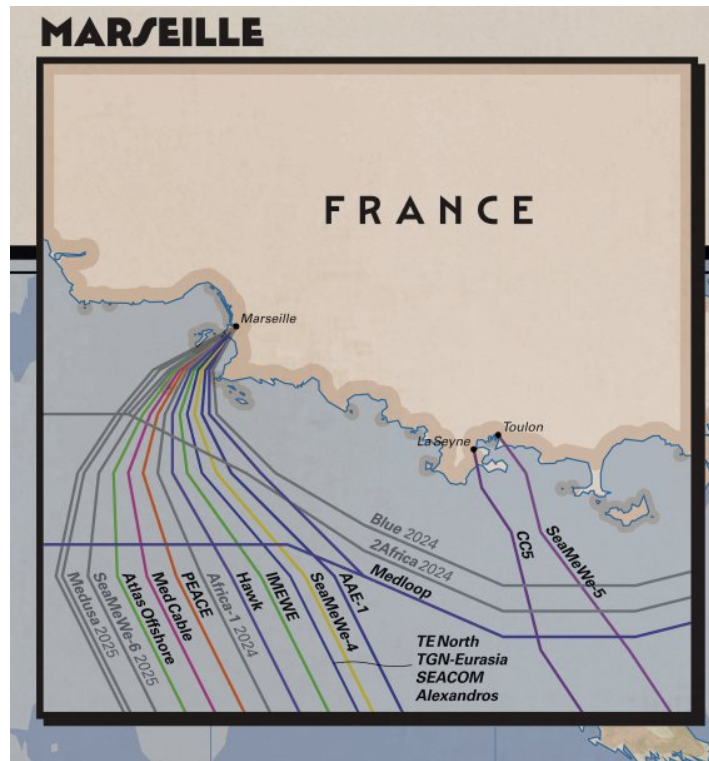
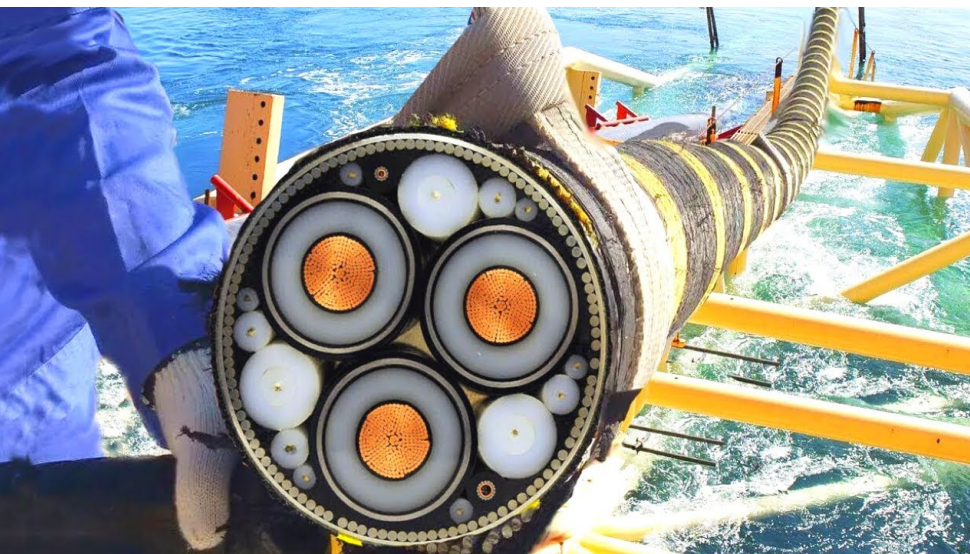


Numérisation d'objets pré-existants



Les infrastructures réseau

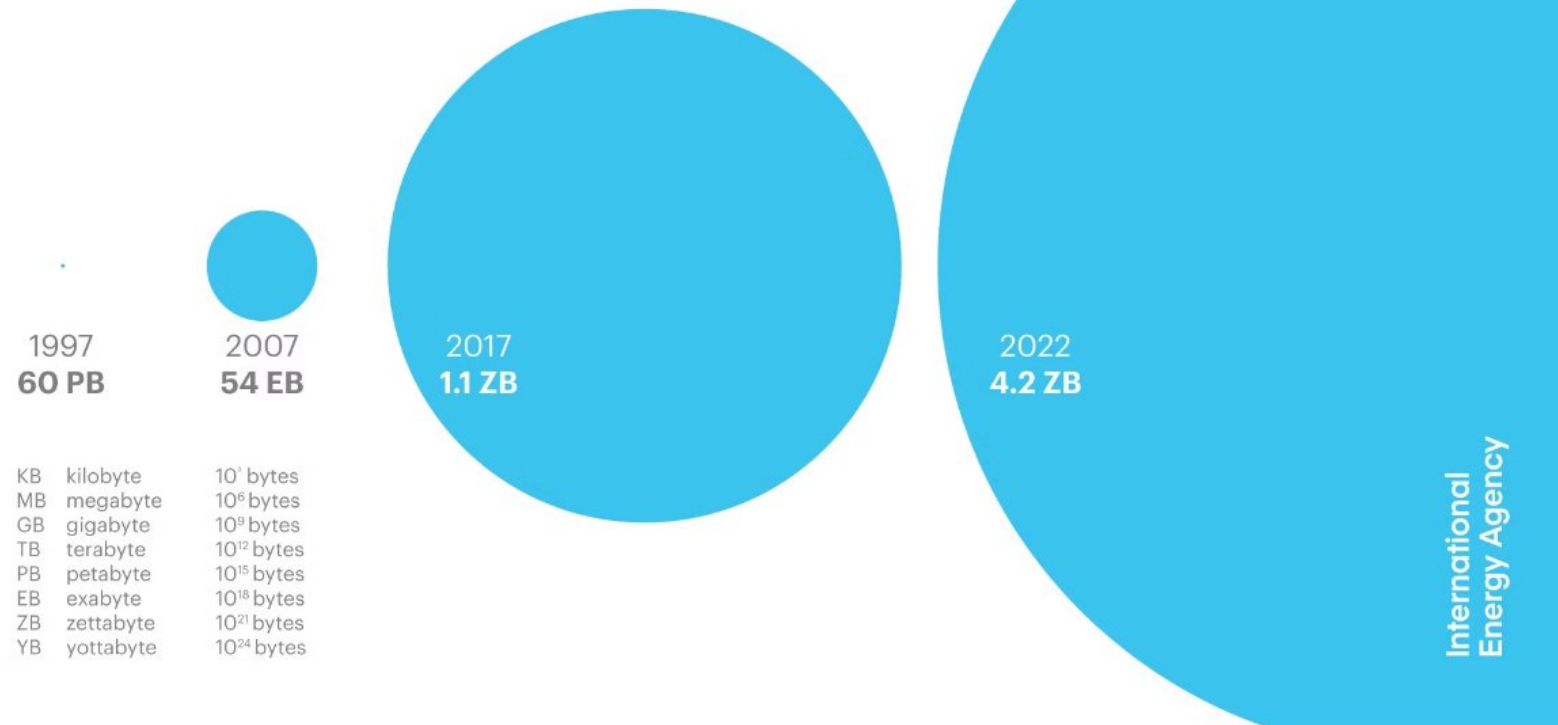
- 1) le réseau d'accès filaire, y compris le réseau téléphonique commuté public ;
- 2) le réseau d'accès sans fil ;
- 3) le réseau central des télécommunications et les centres de données connexes ;
- 4) les réseaux d'entreprise ;
- 5) le réseau de base et de transmission de données Metro/Edge/IP et les centres de données de réseau ;
- 6) la télécommunication par satellite



Progression du trafic Internet

Global annual internet traffic

Tracking Clean Energy Progress



Progression de 8 % par an

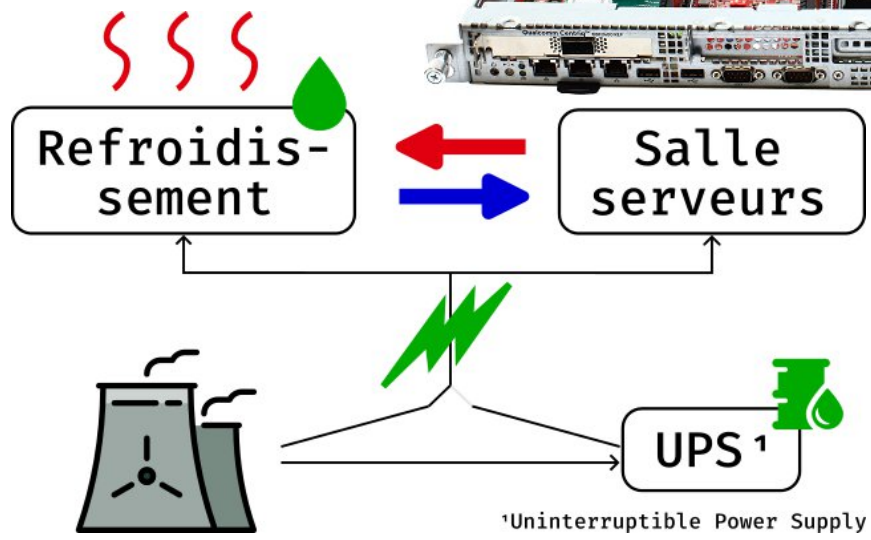
Croissance exponentielle

$$u_{n+1} = C \times u_n \iff u_n = u_0 \times C^n$$

Q. Si le num. croît de 8 %/an, en combien de temps double-t-il ?

R. $1.08^9 = 1.99 \rightarrow$ En 9 ans.

Les centres de données



Promesses du Sommet pour l'Action sur l'IA

En France d'ici 2030 :

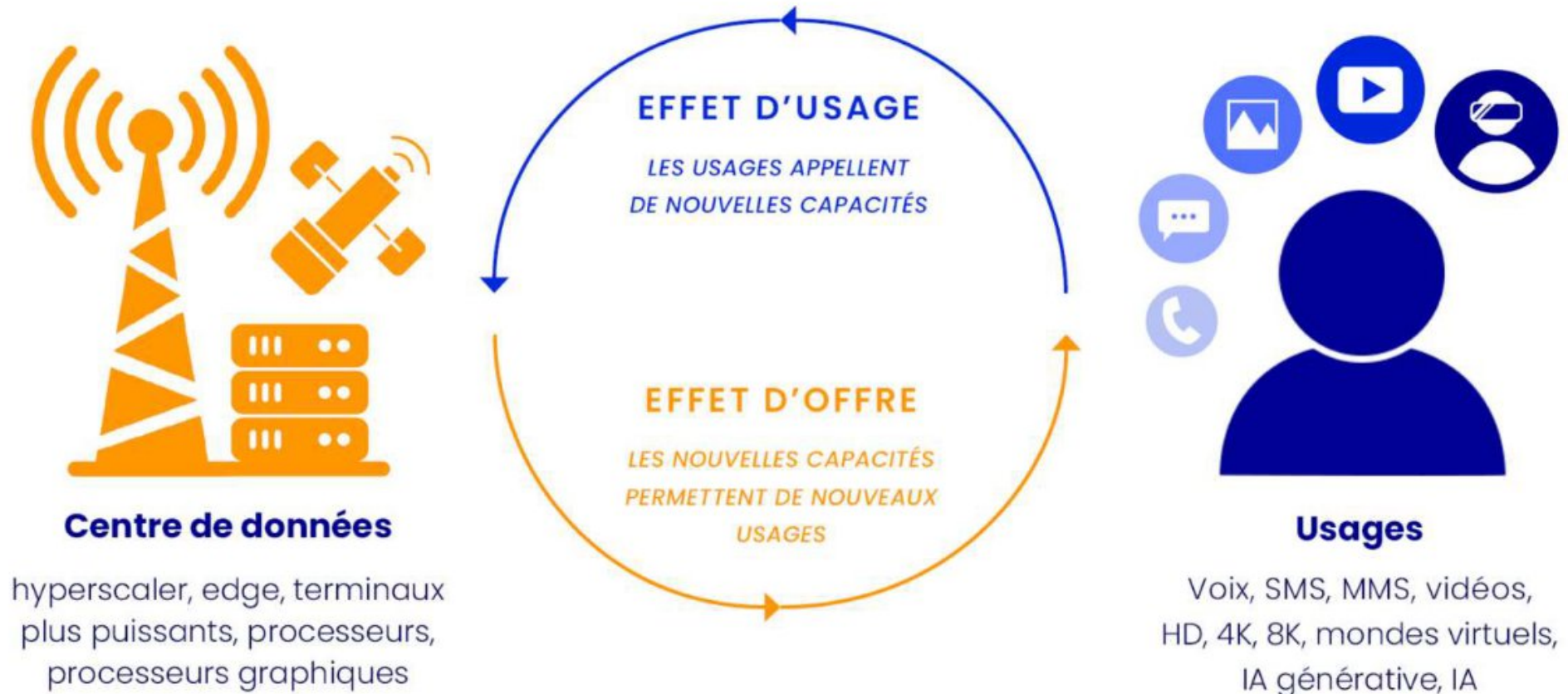
- Campus IA : 1GW
- Datacenter Cambrai : 1GW
- Datacenter Fluidstack : 1GW
- 35 autres centres de données IA



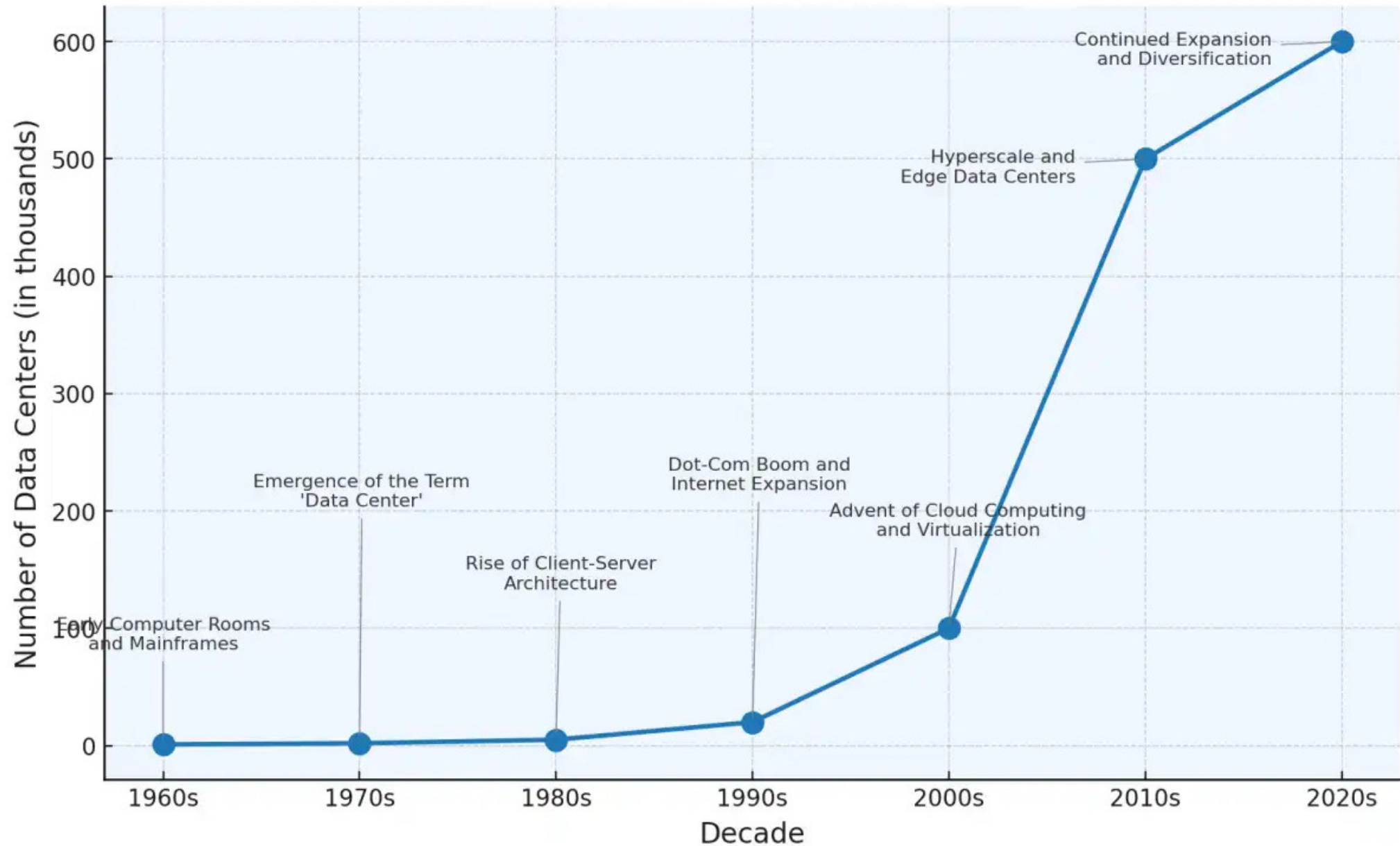
Rétroaction infrastructures/usages

NOS USAGES & NOS INFRASTRUCTURES

sont les deux faces d'une même dynamique



1.2 Dynamiques de croissance

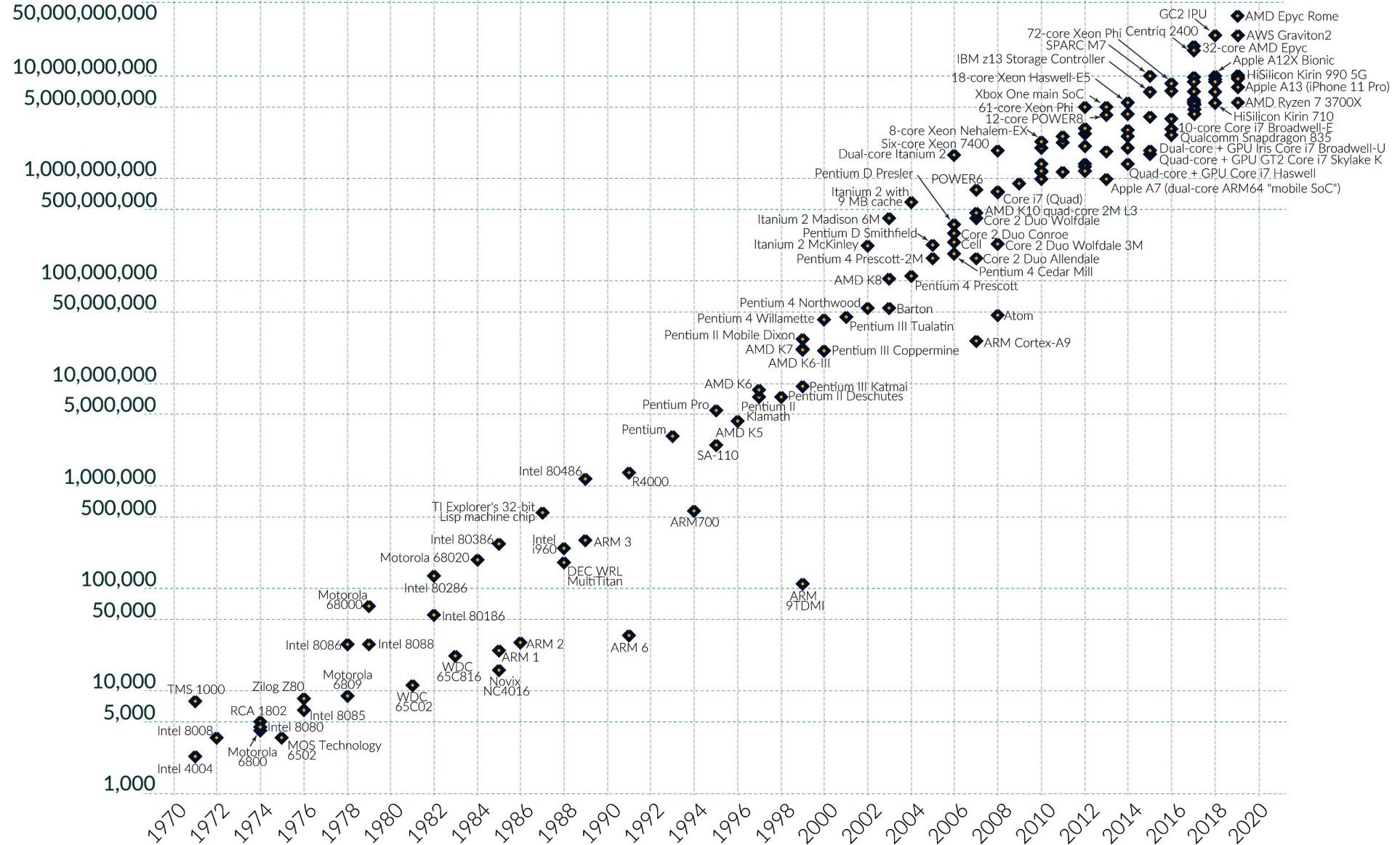


Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years



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

Transistor count



Data source: Wikipedia (wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

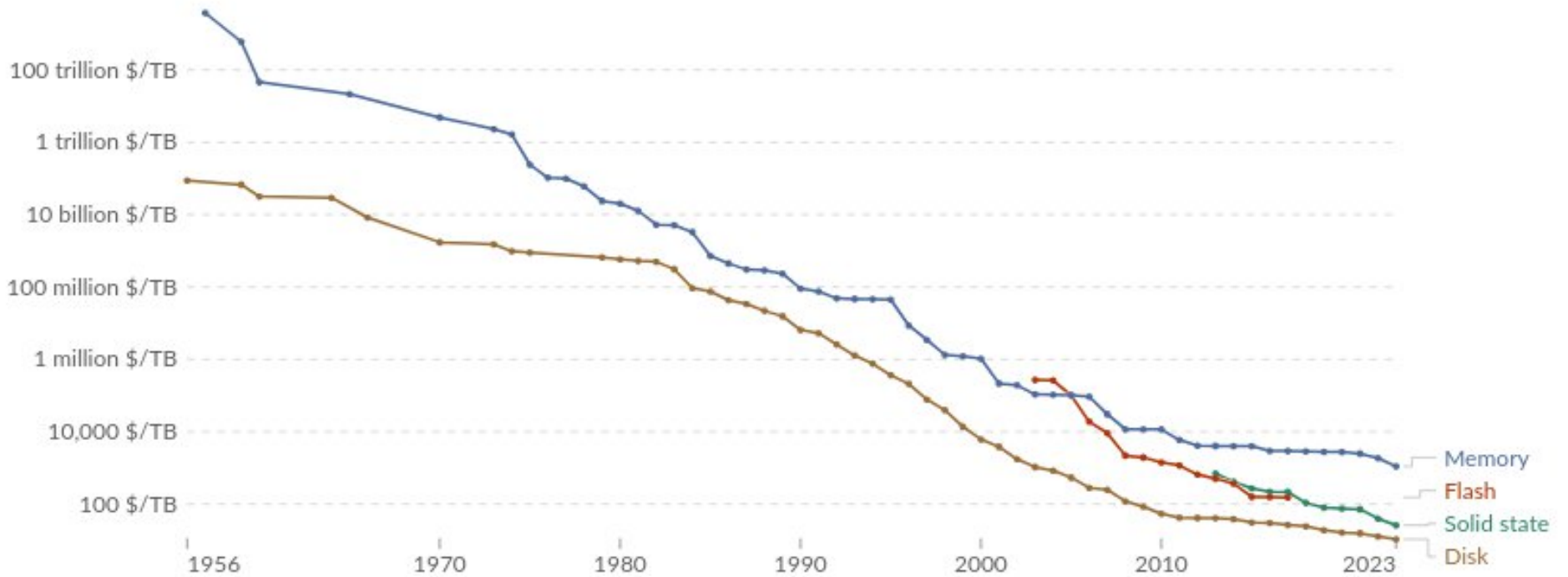
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Historical price of computer memory and storage

This data is expressed in US dollars per terabyte (TB), adjusted for inflation. "Memory" refers to random access memory (RAM), "disk" to magnetic storage, "flash" to special memory used for rapid data access and rewriting, and "solid state" to solid-state drives (SSDs).

Table Chart

Settings



1956 2023

Data source: John C. McCallum (2023); U.S. Bureau of Labor Statistics (2024) - [Learn more about this data](#)

Note: For each year, the time series shows the cheapest historical price recorded until that year. This data is expressed in constant 2020 US\$.

Download Share Full Screen

Petaflop/s-days

1e+4

1e+2

1e+0

1e-2

1e-4

1e-6

1e-8

1e-10

1e-12

1e-14

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

Perceptron

2-year doubling (Moore's Law)

NETtalk

ALVINN

TD-Gammon v2.1

RNN for Speech

Deep Belief Nets and layer-wise pretraining

BiLSTM for Speech

LeNet-5

AlexNet

VGG

ResNets

3.4-month doubling

DQN

Neural Machine Translation

TI7 Dota 1v1

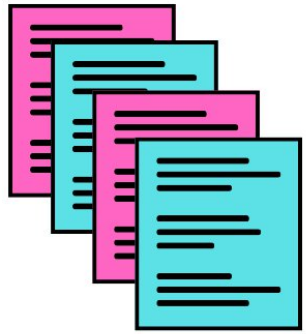
AlphaGoZero

← First Era

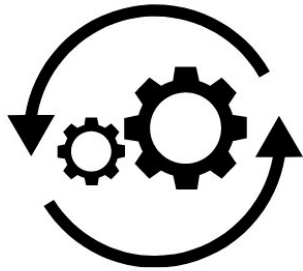
Modern Era →



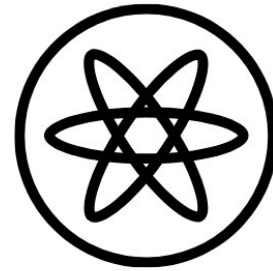
1.3 L'IA en bref



Données d'entraînement



Entrainement



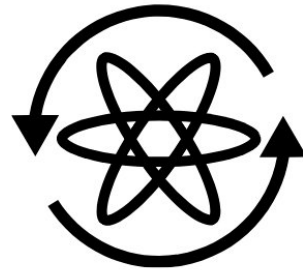
Modèle entraîné

- Répartition impacts production/usage :

- Tel : 80/20%
- Télé : 80/20%
- Serveur : 50/50%

- L'IA consomme fort à l'inférence

→ rebat les cartes



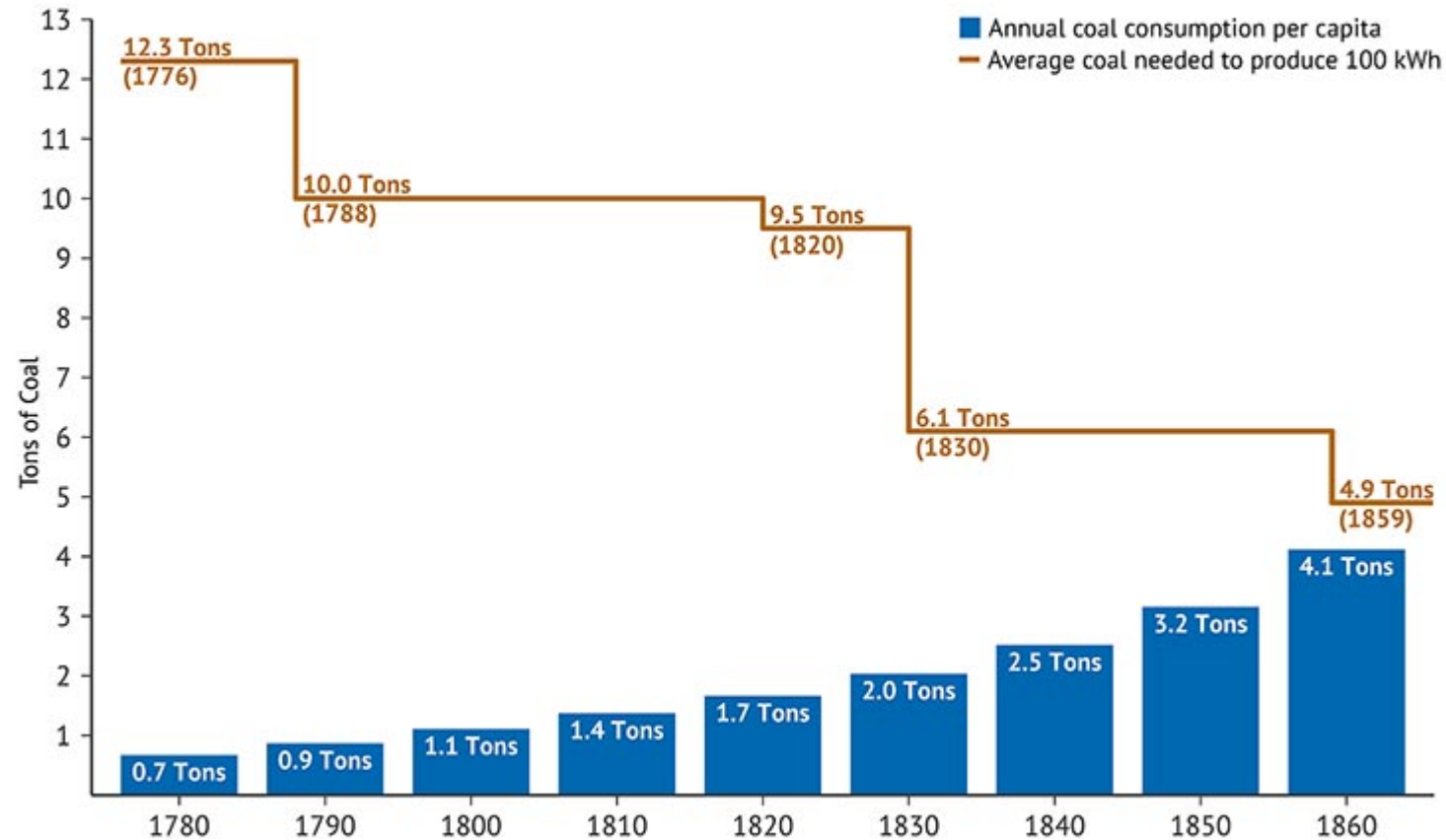
Inférence



1.4 Efficiency et effet rebond

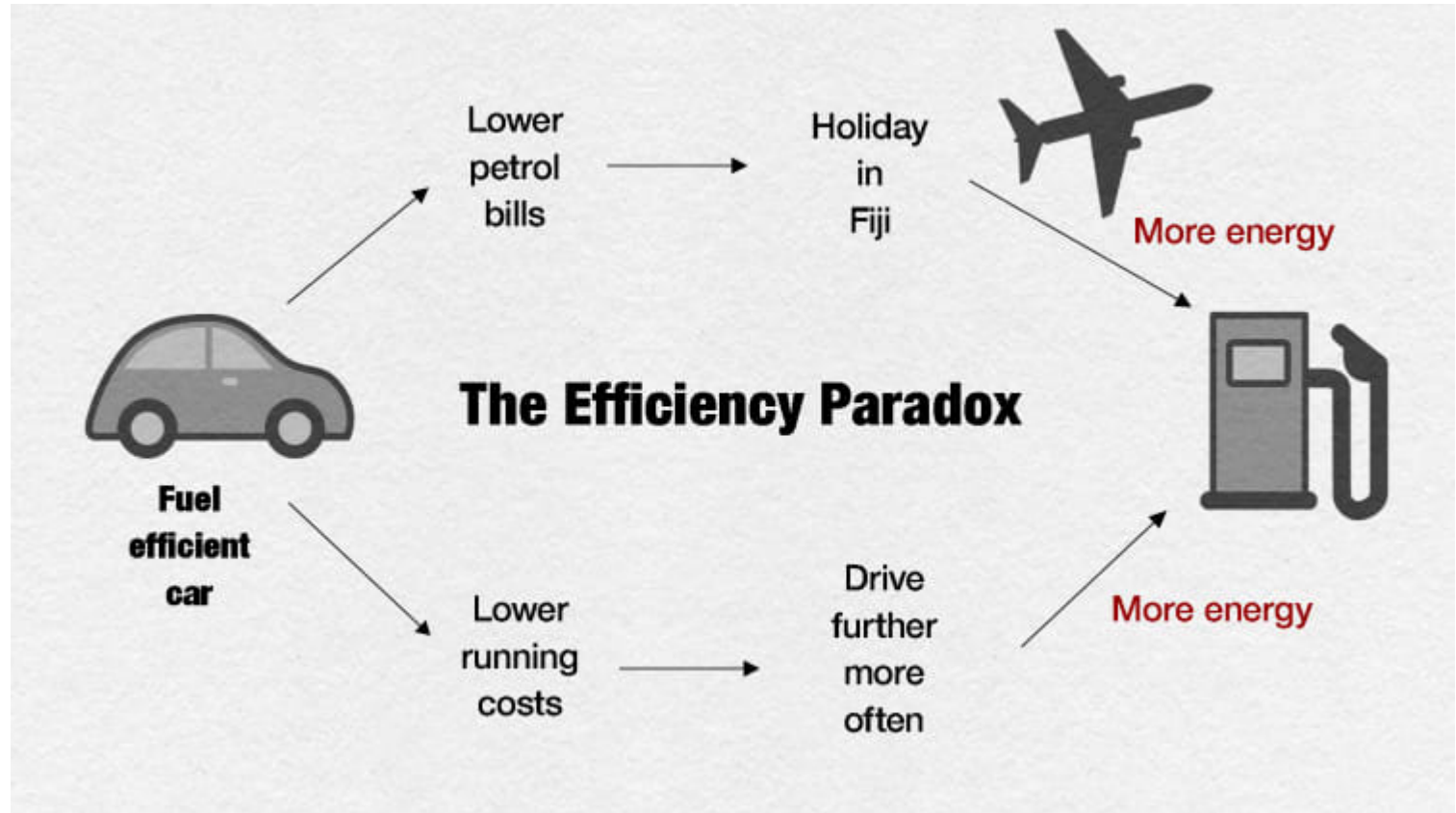
Jevons' Paradox

19th century coal consumption increased with advances in steam engine efficiency

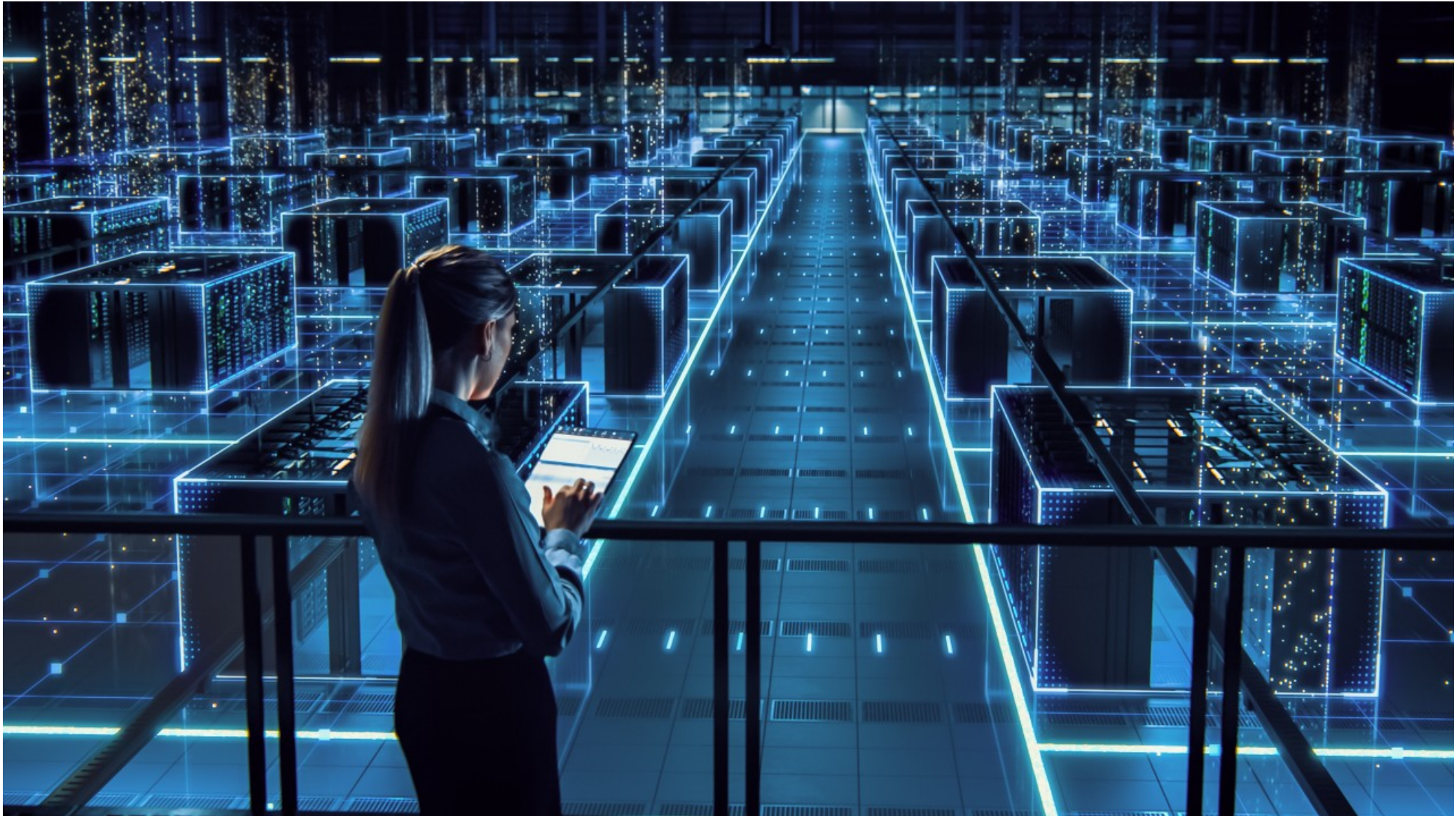




« Une voie de plus résoudra le problème »



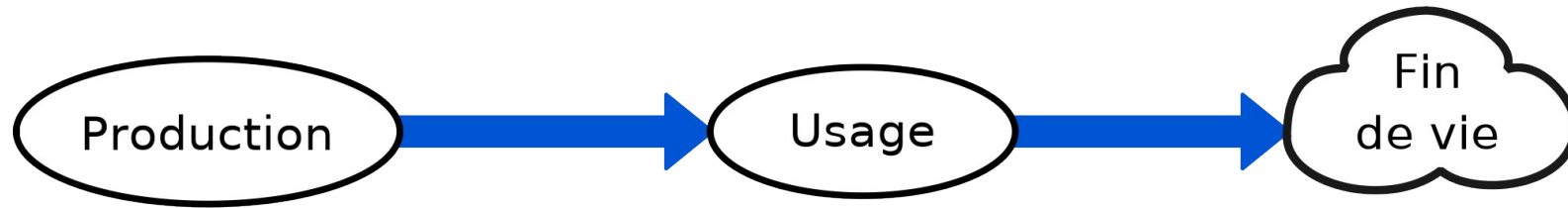
1.2 Dynamiques du numérique



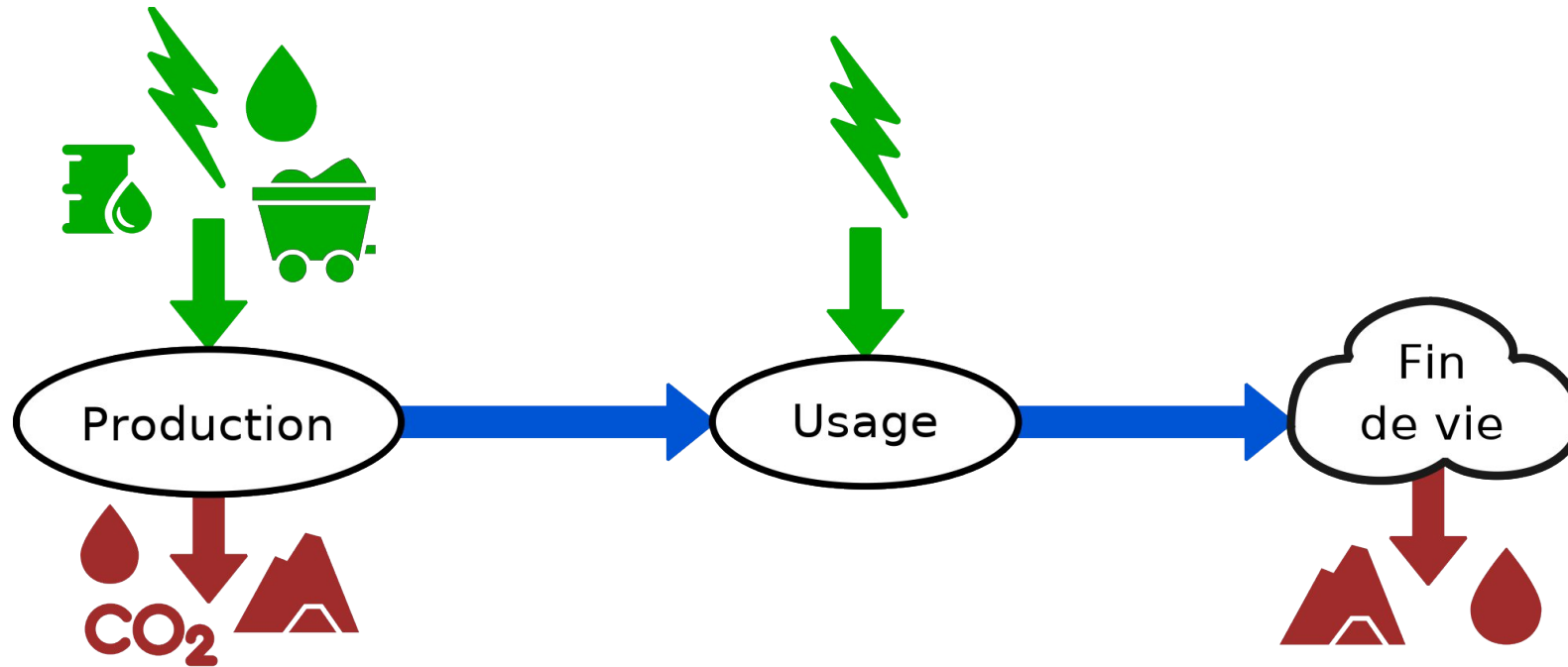
2. Les impacts du numérique



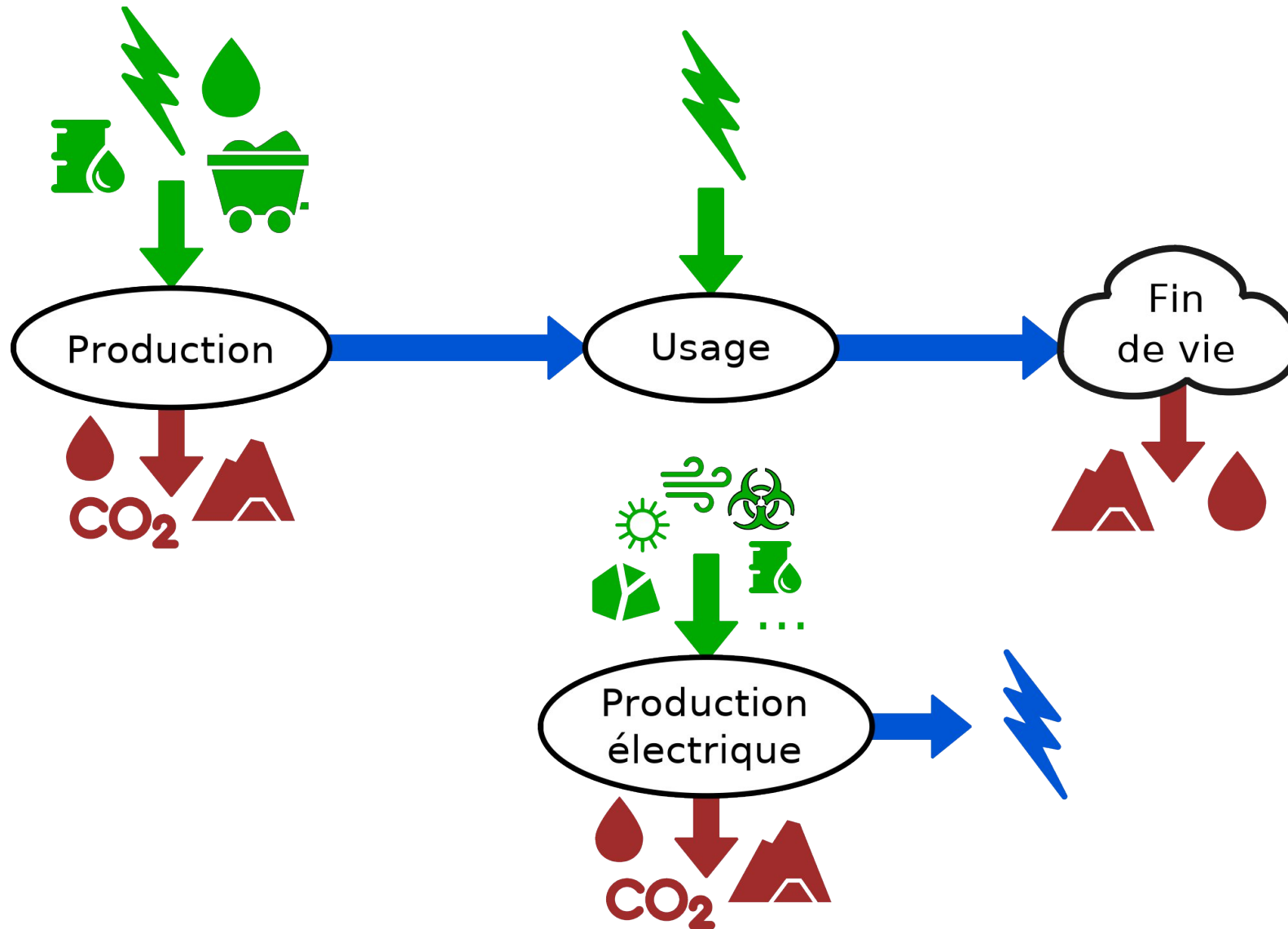
Cycle de vie du numérique



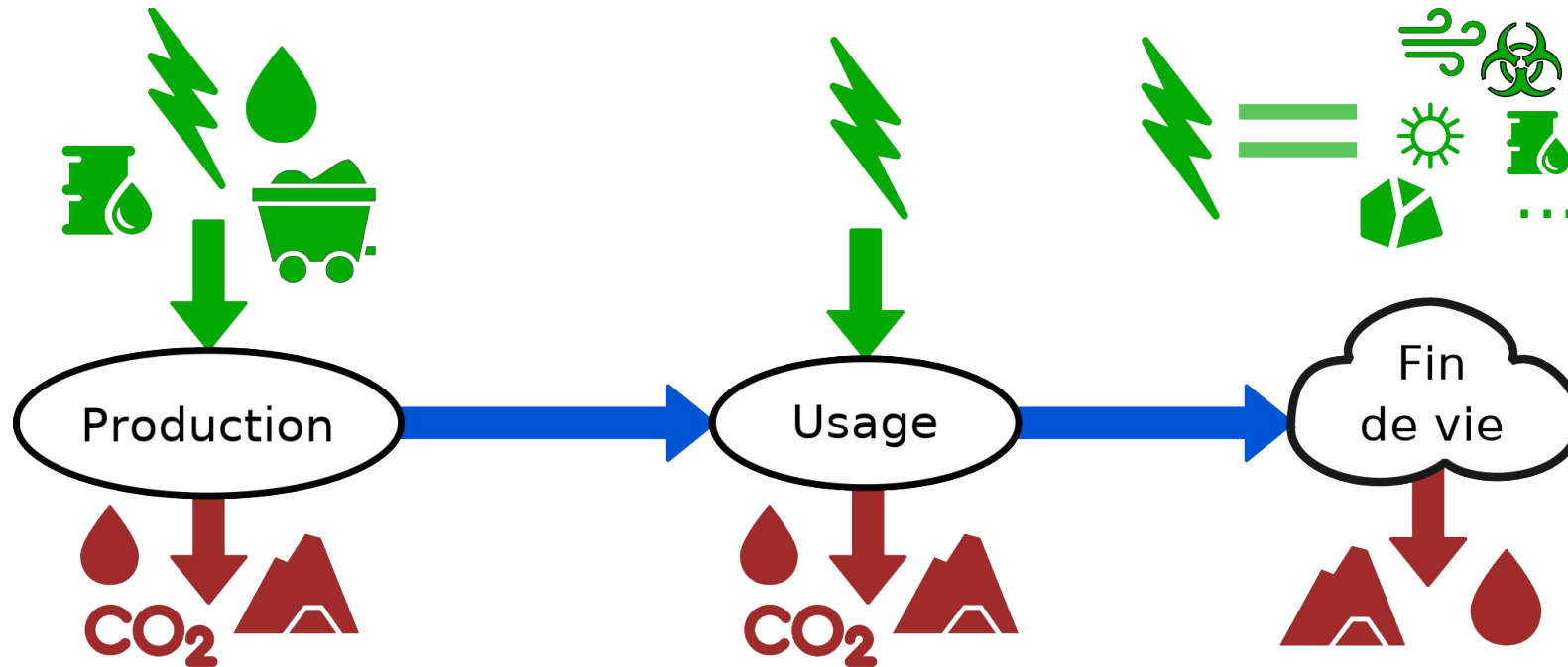
Cycle de vie du numérique



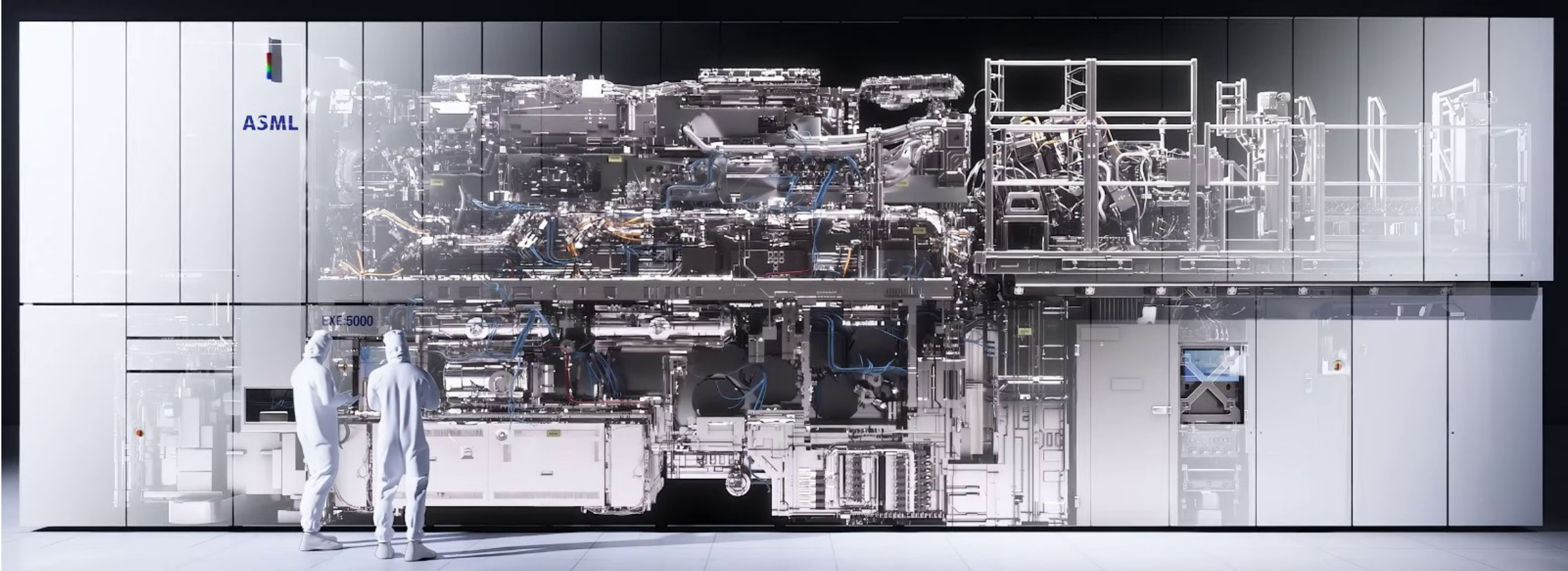
Cycle de vie du numérique



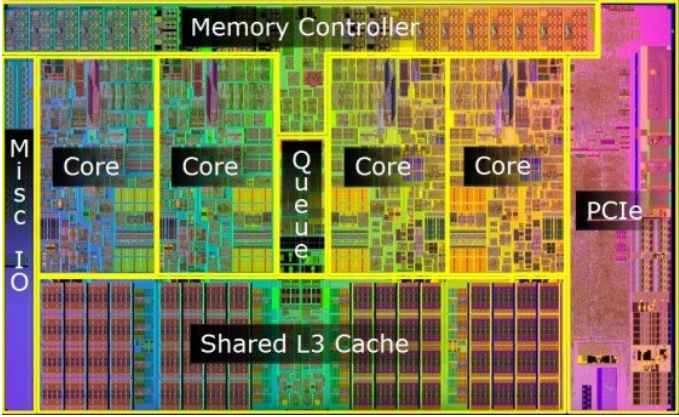
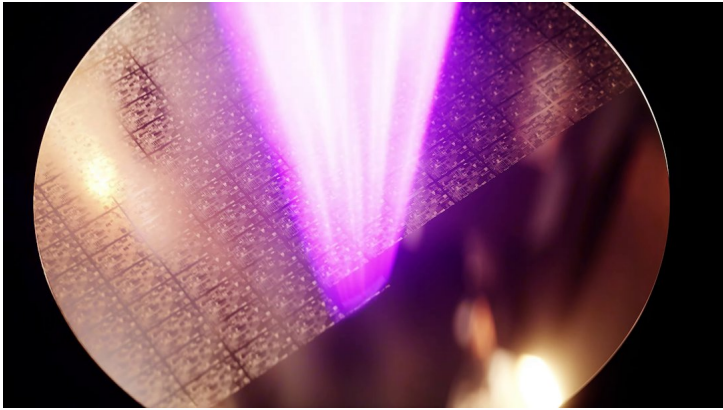
Cycle de vie du numérique



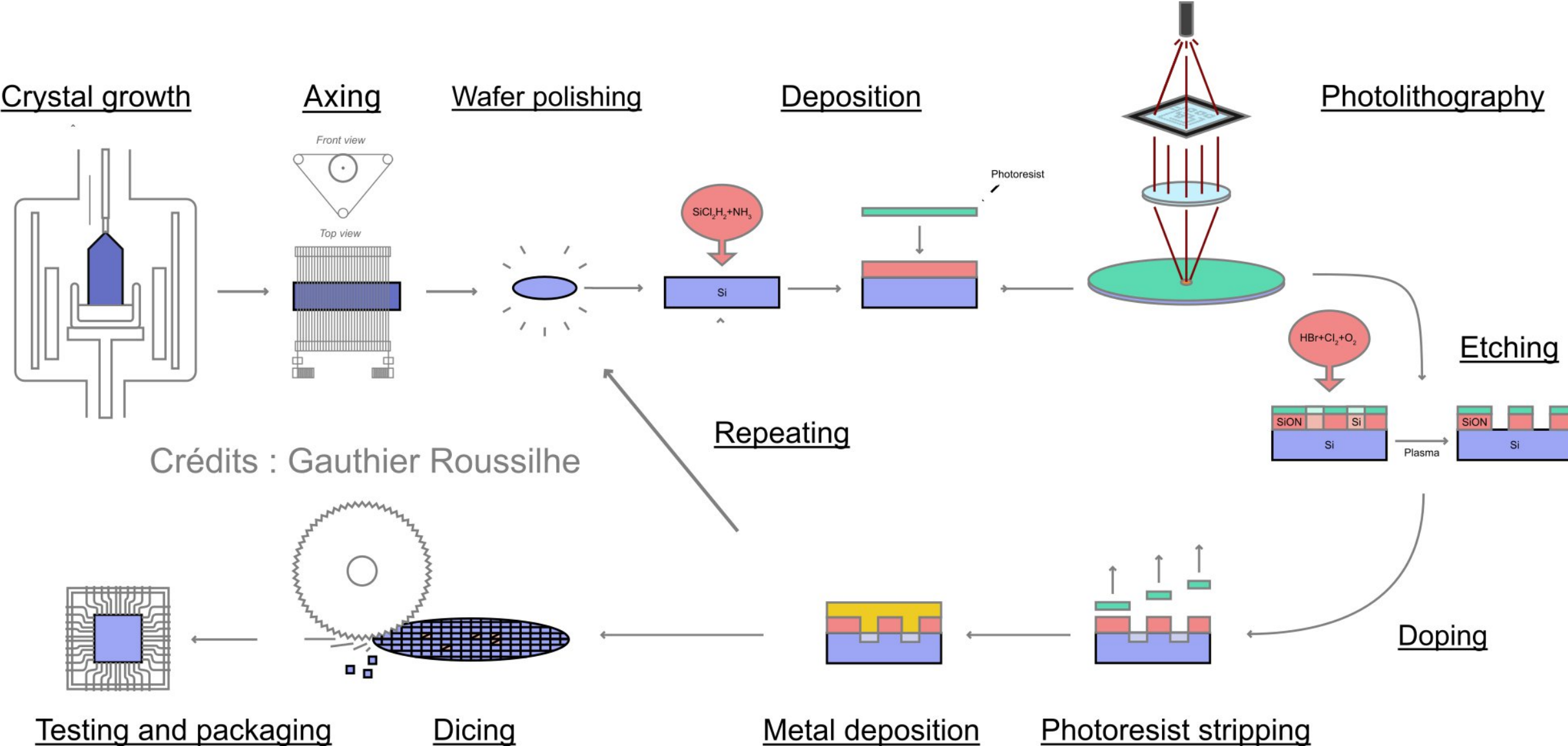
Production : des usines de pointe



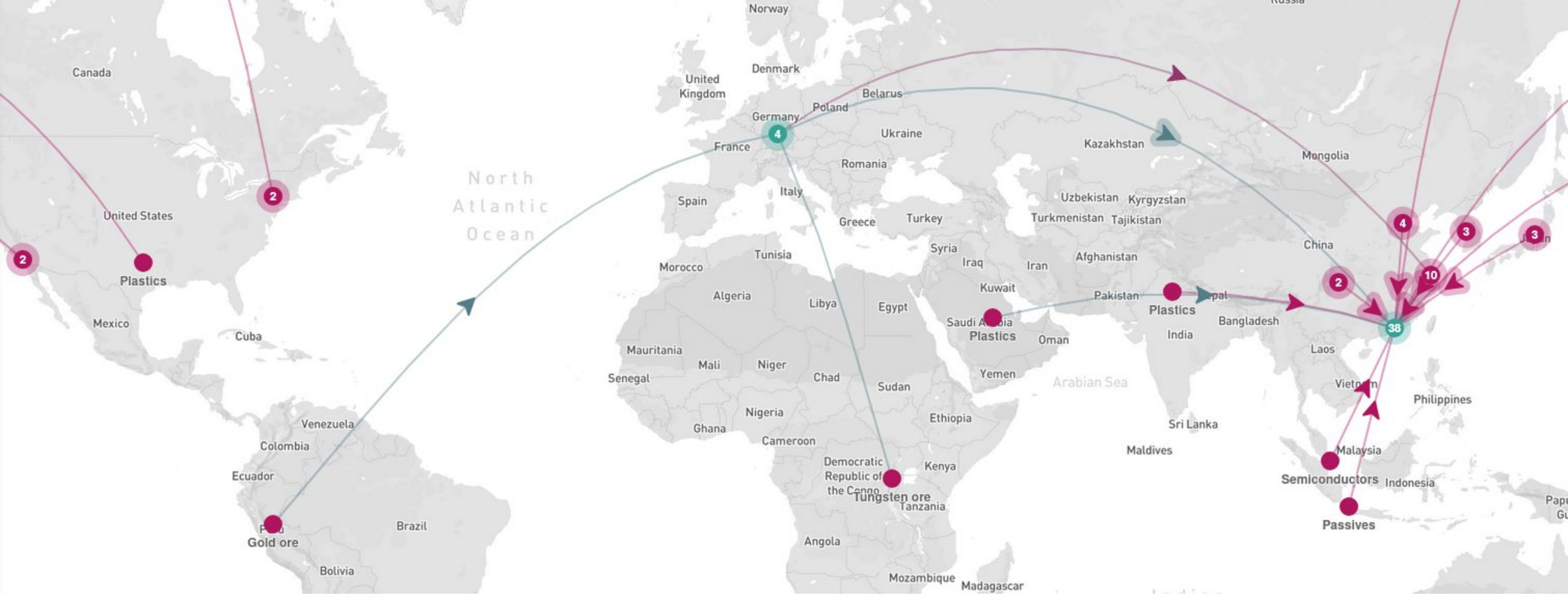
Résolution : 3nm
Prix : 380 M\$



Production : fabrication d'un micro-contrôleur



Production : une chaîne de production mondialisée



Chaîne d'approvisionnement du Fairphone 4

Production : un cocktail minéral

DALLE TACTILE + VITRE

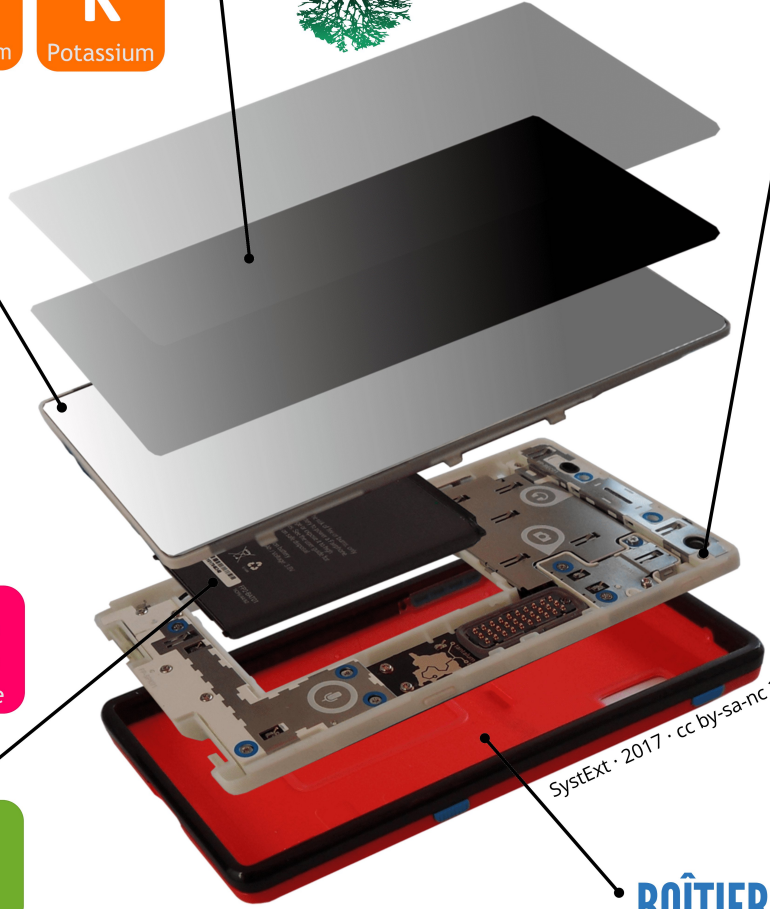
In Indium	Sn Etain	Si Silicium	Al Aluminium	K Potassium
---------------------	--------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------

ÉCRAN

Eu Europium	Tb Terbium	Y Yttrium	
Gd Gadolinium	Ce Cérium	Tm Thulium	
La Lanthane	B Bore	Ba Baryum	
S Soufre	Mg Magnésium	Mo Molybdène	Hg Mercure

BATTERIE

Li Lithium	Co Cobalt	C Carbone	F Fluor
Mn Manganèse	V Vanadium	P Phosphore	Al Aluminium



BOÎTIER

Mg Magnésium	C Carbone	Sb Antimoine	Br Brome	Ni Nickel	Zn Zinc
------------------------	---------------------	------------------------	--------------------	---------------------	-------------------

CARTE ET COMPOSANTS

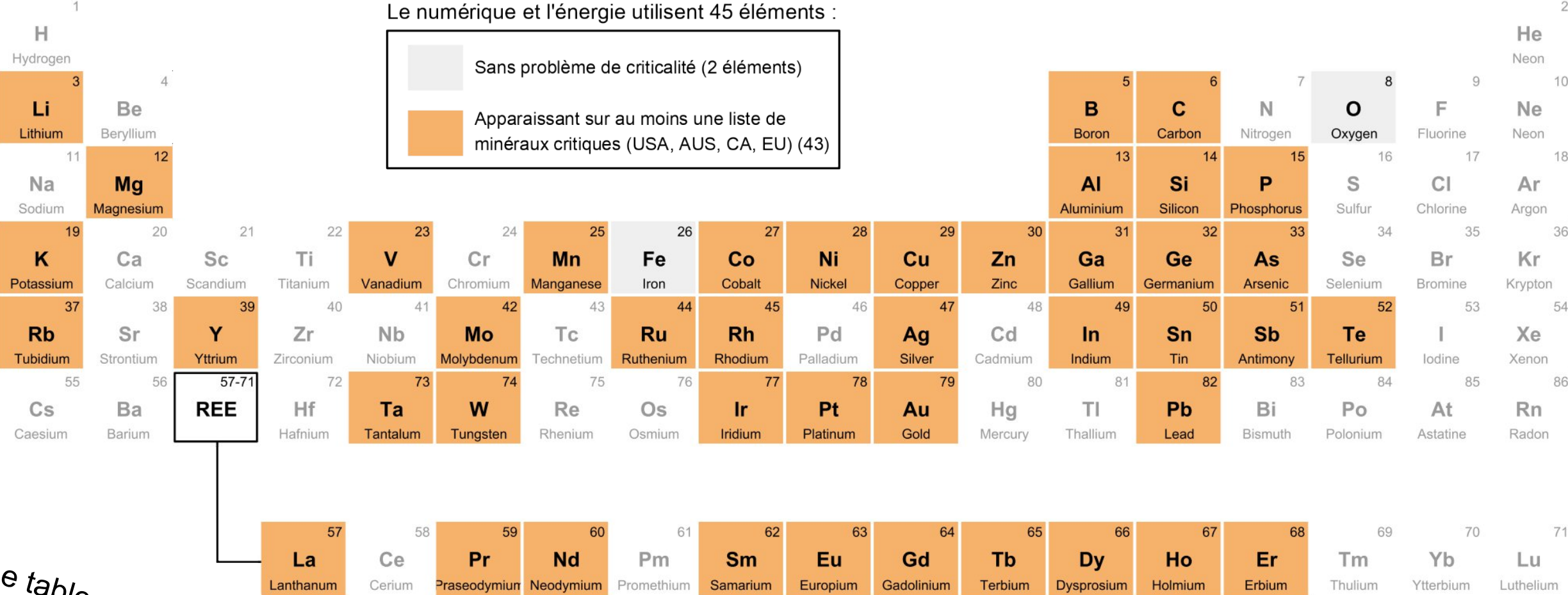
Ni Nickel	Pb Plomb	Sn Etain	Bi Bismuth
Au Or	Ag Argent	W Tungstène	Pt Platine
Rh Rhodium	Be Béryllium	Cu Cuivre	P Phosphore
As Arsenic	Ga Gallium	Ge Germanium	Si Silicium
Zr Zirconium	Ru Ruthénium	Nd Néodyme	Fe Fer
B Bore	Sm Samarium	Co Cobalt	Pr Praséodyme
Cl Chlore	Dy Dysprosium	Ta Tantale	
	Nb Niobium	Pd Palladium	

SystExt · 2017 · cc by-sa-nc 3.0 fr

Production : dont certains sont considérés comme critique

Le numérique et l'énergie utilisent 45 éléments :

	Sans problème de criticalité (2 éléments)
	Apparaissant sur au moins une liste de minéraux critiques (USA, AUS, CA, EU) (43)



*Le tableau est faux : il y en a plus !
(Palladium, Rhenium...)*

Production : à ciel ouvert, *mass mining* (Bingham, Utah, USA)



Production : nouveaux gisements, les fonds marins



Production : et parfois « artisanalement »



Usage : que de l'électricité

- France : 11% conso élec
(sans compter usages importés : Netflix)
- Monde : ~4% (peu fiable)
 - Hausse 4,3% en 2024
Hausse ~ = conso du Japon (en un an)


Three Mile Island To Be Restarted To Power Microsoft Data Centres

Oct 11, 2024

Written by [Gus Brewer](#)



Google invests big time in renewable energy in Finland, Sweden, Belgium and Denmark

 By [Mary Loritz](#) September 20, 2019



Usage : « net zero » par compensation

Carbon Neutrality
(Offsetting emissions)



Since 2007

Google has purchased enough high-quality carbon offsets and renewable energy to bring our net operational emissions to zero.

100% Renewable Energy
(Reducing emissions)



Since 2017

Google has matched our global, annual electricity use with wind and solar purchases. However, our facilities still rely on carbon-based power in some places and times.

24/7 Carbon-free Energy
(Eliminating emissions)



By 2030

Google will match our operational electricity use with nearby (on the same regional grid) carbon-free energy sources in every hour of every year.

Usage : moteur des énergies décarbonées

Moteur d'extractivisme

- Panneau solaire = semiconducteurs
- Durée de vie 25 ans
- 1 éolienne = 500kg terres rares
- Stockage = batteries (lithium, cobalt...)



Fin de vie



Fin de vie



Fin de vie



3. Les usages et leurs dynamiques

Tout les usages ont ils la même valeur ?

- Divertissement
- Industrie et Service productifs
- Service publics
- Médical
- Scientifique

*Le speaker il est
malade :(*

RIP Damien Marchal

Futurs informatiques

IA

Robotique

Internet des objets

Véhicules autonomes

6G

Informatique quantique

*Le speaker il est
malade :(*

RIP Damien Marchal

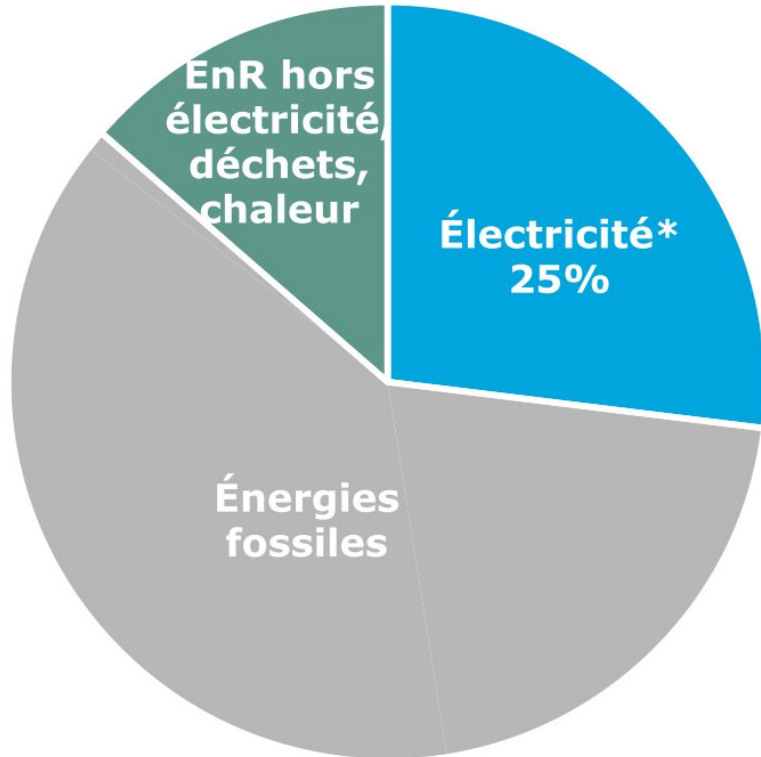
4. Conclusion



Sobriété numérique

Aujourd'hui

1 600 TWh
d'énergie consommée

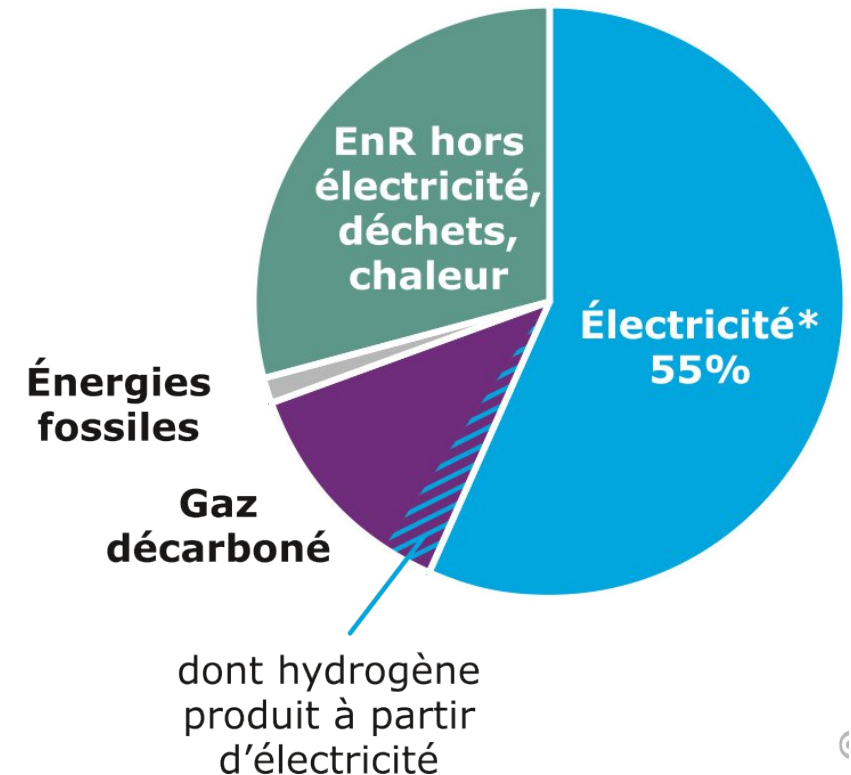


-40 %



2050

930 TWh
d'énergie consommée



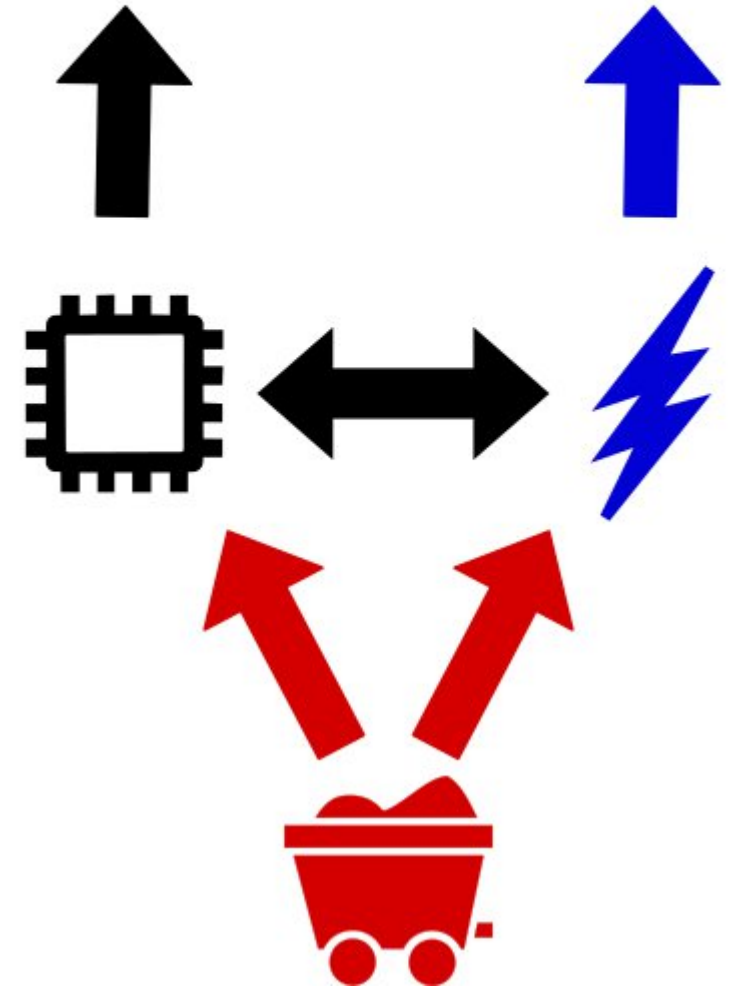
Dépendance minérale



Sans nous imposer de limite, l'efficacité ne nous fait pas de bien.

Secteurs d'activité

- Transport
- Divertissement
- Banque
- Services publics
- Recherche
- Industrie
- Habitat
- ...



Que faire ?

- À l'échelle individuelle :
 - Faire durer son matériel
 - Avoir un usage raisonné de la tech (e.g. IA)
- En tant que scientifique :
 - Produire des données sur les systèmes productifs et l'environnement
« Instruction scientifique des dossiers politiques » – Y. Bréchet
 - Pivoter vers des thématiques de la sobriété
La sobriété c'est technique !
 - Informer, informer, informer
« La responsabilité des intellectuels » – N. Chomsky

"Quand on pense
qu'il suffirait que
les gens ne les
achètent plus pour
que ça ne se vende pas"



Coluche

5. Discussion

Quelques idées :

- Comment aligner les besoins aux coûts ?
- Comment prévoir les effets rebond ?
- Quels modèles économiques pour la sobriété ?
- Comment matérialiser les limites dans nos travaux ?
- ...



Références I

- ARCEP, ARCOM, CGE, et ANCT, « Baromètre du numérique », mai 2024.
- S. Cerf, A. Luxey-Bitri, C. Quinton, R. Rouvoy, T. Simon, et C. Truffert, « Untangling the Critical Minerals Knot: when ICT hits the Energy Transitions », 2023.
- SystExt, « Des métaux dans mon smartphone », 2017. <https://www.systext.org/sites/all/animationreveal/mtxsmf/>
- « Gold mining in Kazakhstan · Kazakhstan travel and tourism blog ». <https://aboutkazakhstan.com/blog/business/gold-mining-in-kazakhstan/>
- C. Krönes et F. Weigensamer, « Welcome to Sodom », Documentaire, 2018.
- G. Roussilhe, « Manufacturing electronic components », 2023. <https://gauthierroussilhe.com/en/resources/la-fabrication-de-composants-electroniques>
- Data Centers : A Timeline of Growth and Expansion, sept. 2024. <https://www.datacate.net/data-centers-a-timeline-of-growth-and-expansion/>
- D. Raabe, « The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys », À : Chemical Reviews (mars 2023), doi : 10.1021/acs.chemrev.2c00799.
- SystExt, Controverses minières – Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales – Mine secondaire et recyclage, Rapport d'étude Volet 2 - Tome 3, avr. 2024, url : https://www.systext.org/sites/all/documents/RP_SystExt_Controverses-Mine_VOLET-2_Tome-3_Avril2024.pdf (vu le 18/06/2024).

Références II

- The Shift Project, « Intelligence artificielle, données, calcul : quelles infrastructures dans un monde décarboné ? », mars 2025. url : <https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2025/03/Rapport-intermediaire-IA-VF.pdf>
- A. S. Luccioni, E. Strubell, et K. Crawford, « From Efficiency Gains to Rebound Effects: The Problem of Jevons' Paradox in AI's Polarized Environmental Debate », 01/2025, doi: 10.48550/arXiv.2501.16548.
- O. Vidal, H. Le Boulzec, B. Andrieu, et F. Verzier, « Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World », Sustainability, 2021, doi: 10.3390/su14010011.
- G. Brewer, Three Mile Island To Be Restarted To Power Microsoft Data Centres, oct. 2024, url : <https://networks.verdantix.com/climate-innovation-network/three-mile-island-to-be-restarted-to-power-microsoft-data-centres> (vu le 23/03/2025).
- ADEME, « Numérique & environnement : entre opportunités et nécessaire sobriété », 01/2025, url : <https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/7883-avis-de-l-ademe-numerique-environnement-entre-opportunites-et-necessaire-sobriete.html> (vu le 03/02/2025)
- C. Krönes et F. Weigensamer, Welcome to Sodom, Documentaire, nov. 2018.
- F. Lebrun, Barbarie numérique – Une autre histoire du monde connecté, L'échappée, oct. 2024, isbn : 978-2-37309-158-8.

La France reste un atout pour les flux numériques internationaux

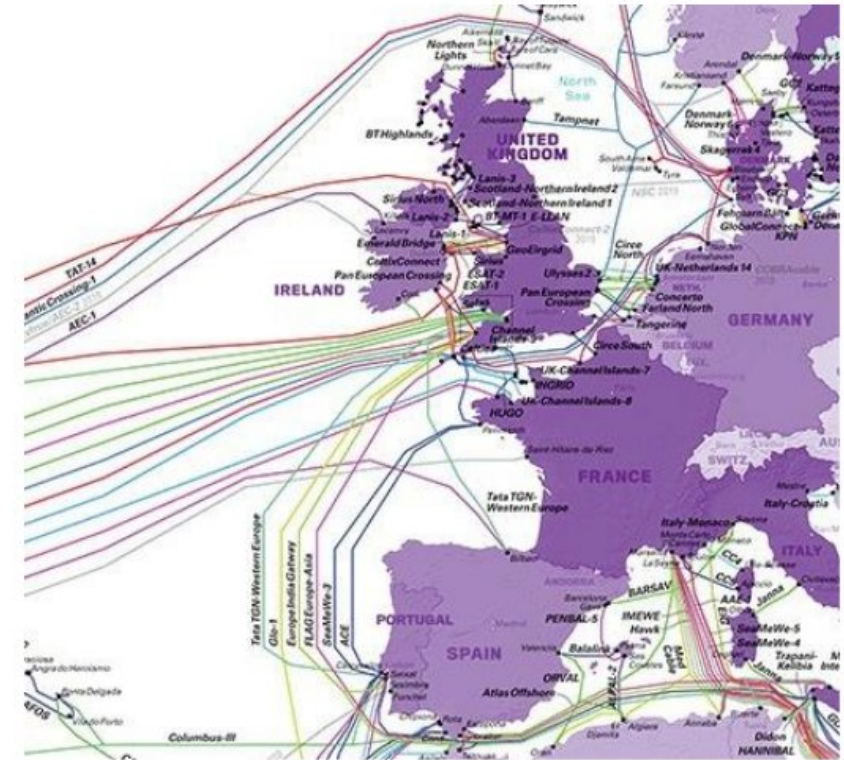
Les principaux inducteurs pour l'installation des datacenters :

- accès fibre optique et réseau électrique
- disponibilité foncière : sa rareté (concurrence) plus que son coût constitue un facteur limitant
- proximité avec les clients finaux (locataires qui interviennent sur les serveurs)

Un datacenter est constitué :

- d'une coque (bâtiment ventilé) : 10 M€/MW
- de serveurs informatiques : 35 M€/MW

80 % des datacenter sont opérés en interne par les entreprises propriétaires, les 20% restants proposent des services d'hébergement/location, mais la tendance actuelle du marché va vers davantage d'hébergement pour gagner sur les effets d'échelle (externalisation, concentration, efficacité énergétique).

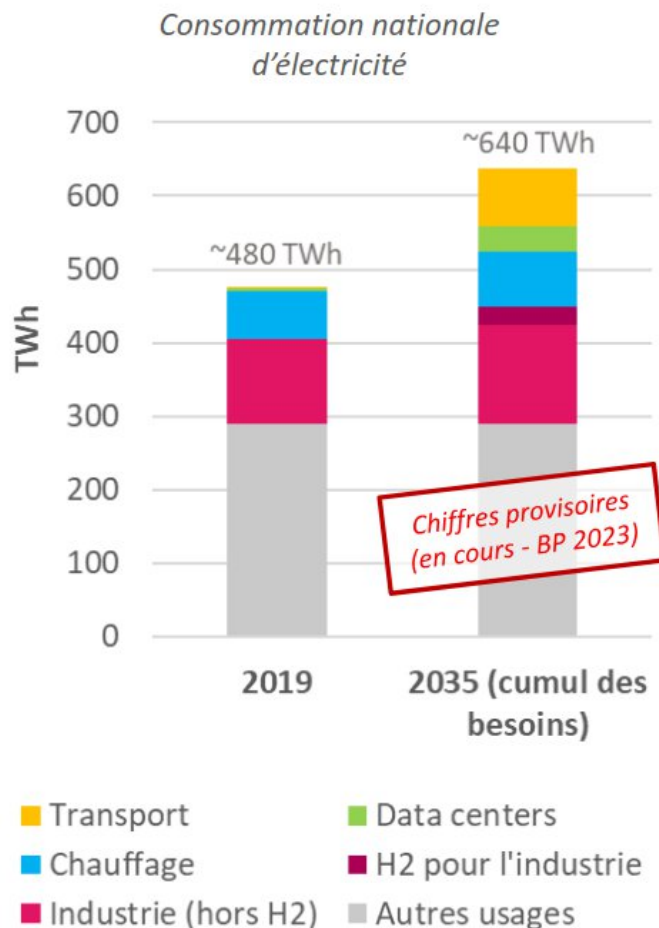


En France : une position géographique clé et l'excellence des infrastructures télécoms

Réseau de fibre optique maritime international
(source : Telegeography, 2019)



A l'échelle nationale, les perspectives d'augmentation de la consommation électrique se renforcent et s'accroissent à moyen terme

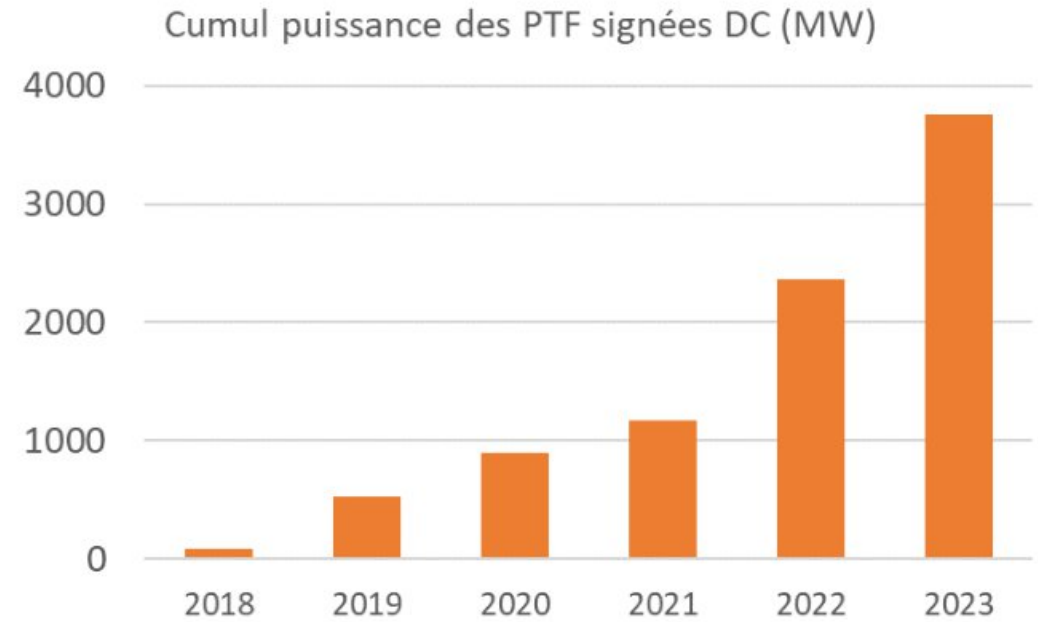
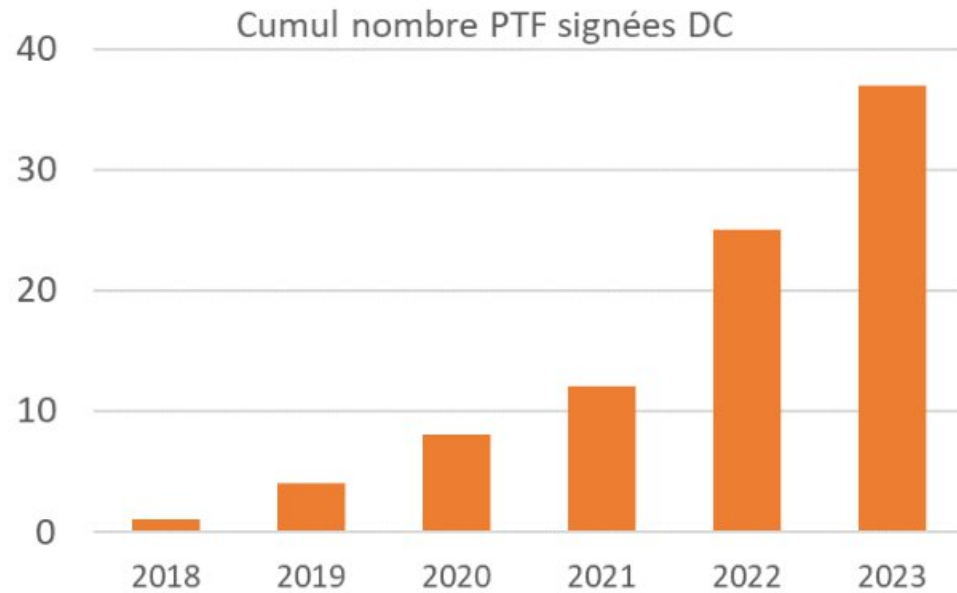


- Plusieurs éléments de contexte poussent à une réactualisation des perspectives d'évolution de la consommation d'électricité à l'horizon 2030-2040 :
 - accélération de l'**électrification dans l'industrie**, directe et indirecte (via hydrogène) et de la réindustrialisation (France 2030, PJI industrie verte) ;
 - accélération de l'**électrification des transports** (directe ou via carburants de synthèse) concernant désormais tous les secteurs (routier, aérien, ferroviaire et maritime), avec toutefois de fortes incertitudes sur l'horizon de déploiement de certaines technologies ;
 - hausse très nette des demandes d'implantation des **data centers** ;
 - accélération de la **décarbonation du bâtiment**.
- Des effets baissiers seront présents (progrès d'efficacité énergétique, sobriété, ...) et sont nécessaires pour limiter la hausse.
- Les perspectives de **hausse de la consommation sont très fortes (jusqu'à +30-40% en 15 ans par rapport à aujourd'hui)**.

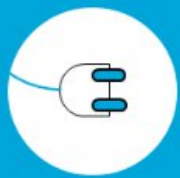
Derniers travaux : 615 TWh en 2035 pour le scénario de référence



La croissance de la consommation électrique en IdF est largement portée par le développement des projets de Datacenters

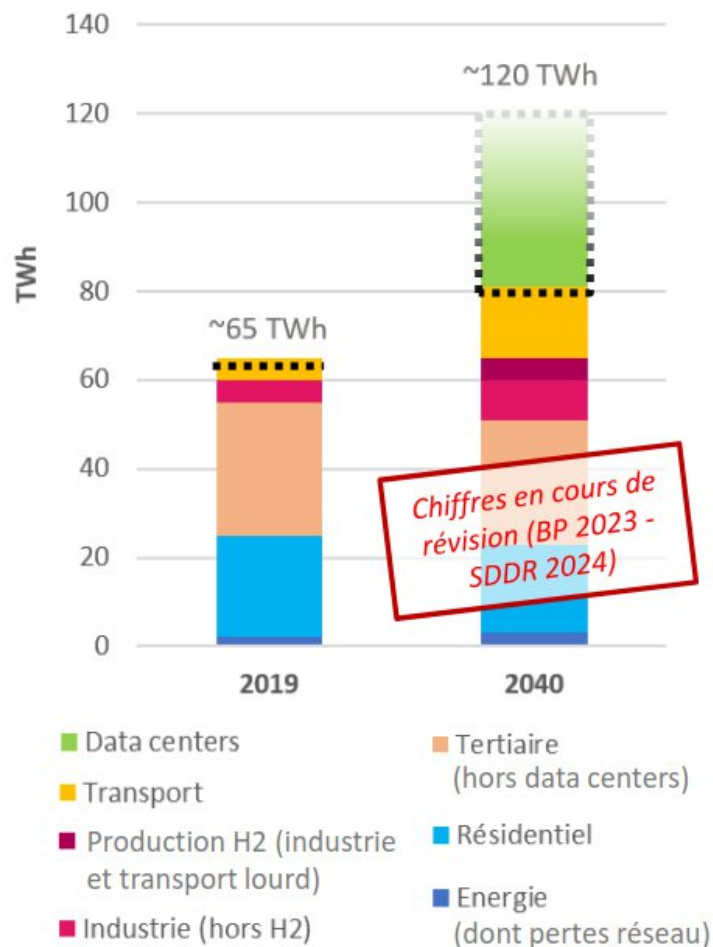


Nota : toute demande de raccordement au RPT se voit offrir une proposition technique et financière



Une hausse très nette de la consommation d'électricité francilienne, majoritairement poussée par les datacenters

Consommation en IDF prévue dans l'étude FE 2050 (réactualisée sur les datacenters)



Consommation du secteur du numérique (data centers)

- **Au niveau national** : une très forte hausse (plusieurs dizaines de TWh d'ici 2040), reflet des demandes de raccordement reçues par RTE.
- **Au niveau francilien** : la très grande majorité de cette hausse est localisée en Ile-de-France dans les études prospectives (reflet de la dynamique effectivement observée en matière de demandes de raccordement).
Ce poste de consommation pourrait constituer à lui seul près de deux tiers de la consommation actuelle dans la région, mais reste très incertain.

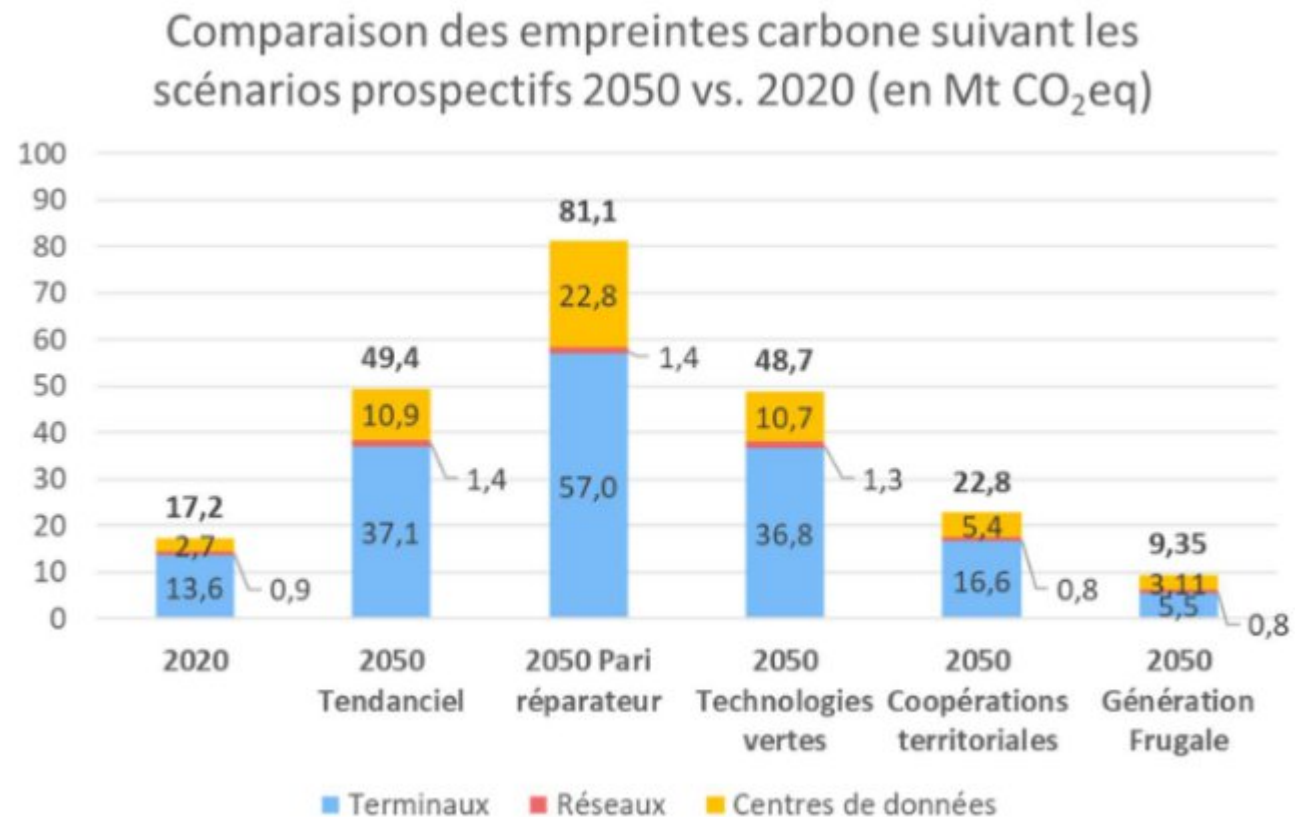


Cette trajectoire est soumise à deux incertitudes de premier ordre qui pèseront sur les stratégies d'adaptation du réseau RTE :

- 1 à COMBIEN s'établira le niveau effectif de consommation électrique ? (ici consommation totale contractualisée sans facteur d'abattement, 40 TWh)
- 2 OÙ sera cette consommation ?

➤ **Ces deux points sont de première importance pour s'assurer de l'adéquation entre les moyens de production et la consommation et développer le réseau en conséquence**

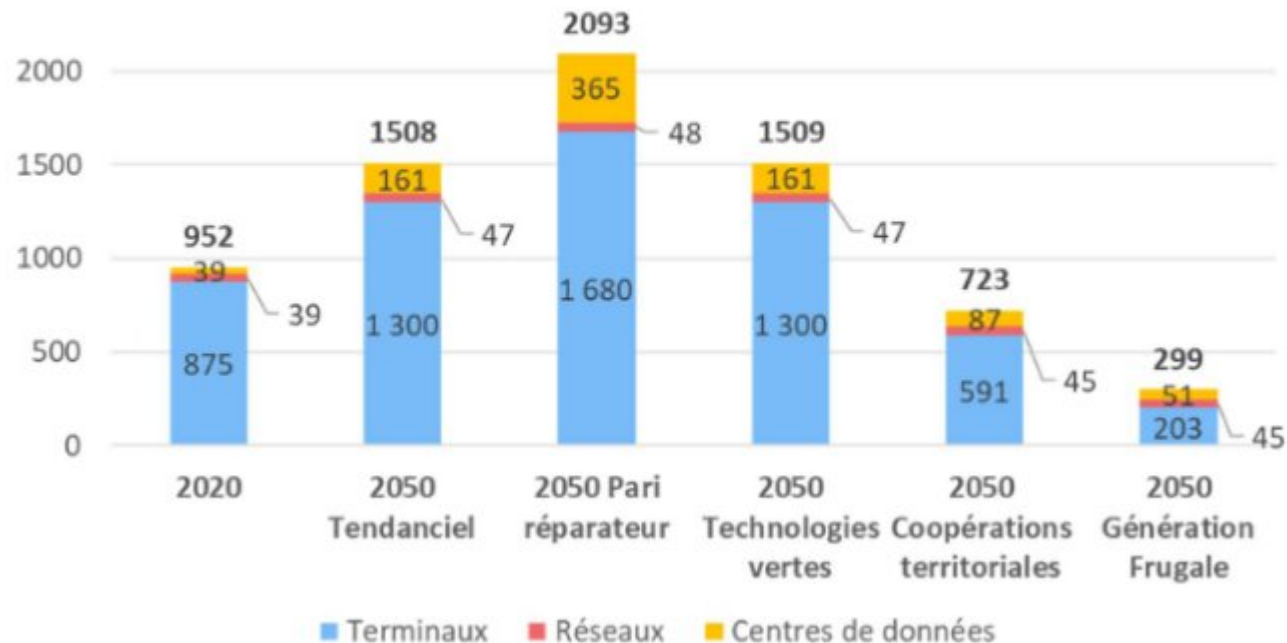
Scénario tendanciel du numérique



https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-prospective-2030-2050_mars2023.pdf

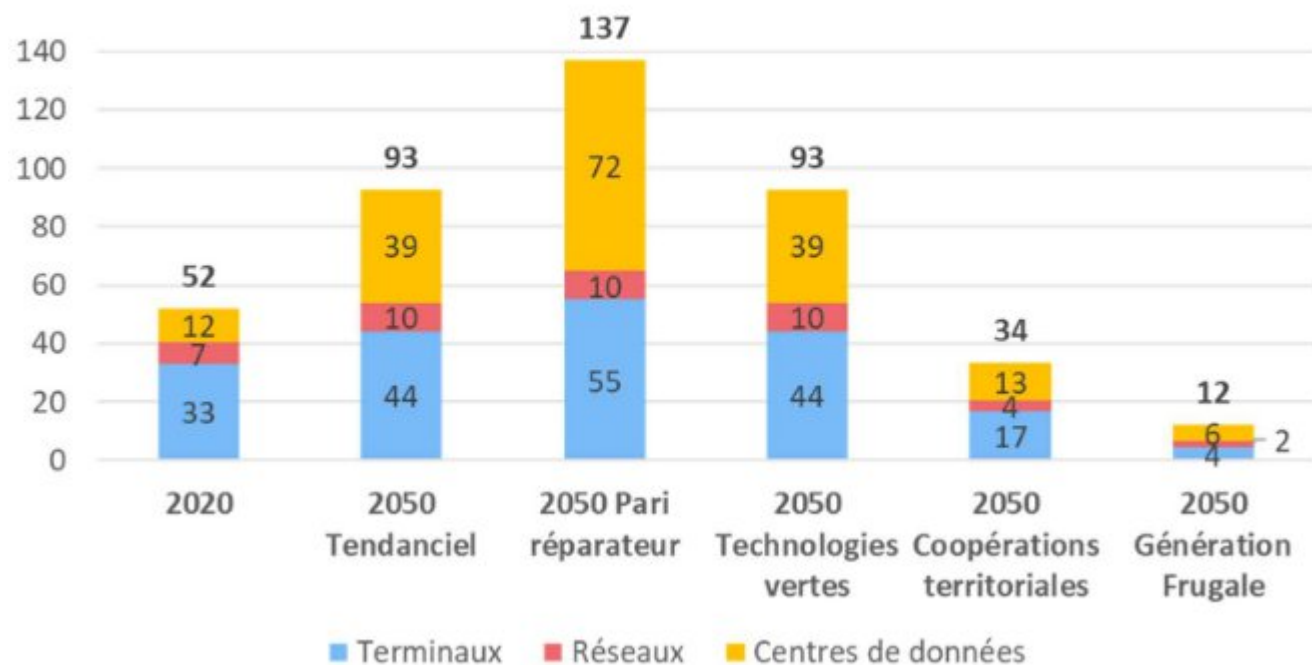
Scénario tendanciel du numérique

Comparaison des consommations de ressources abiotiques (minéraux et métaux) suivant les scénarios prospectifs 2050 vs. 2020 (en tonnes Sb eq)



Scénario tendanciel du numérique

Comparaison des consommations électriques en phase d'usage suivant les scénarios prospectifs 2050 vs. 2020
(en TWh)



Plan

1. Le « numérique » et son écosystème
 1. Des objets, des câbles et des serveurs
 2. Cycle de vie du numérique
 1. Production métaux + électricité
 2. Usages = électricité
 3. Retraitement
2. Dynamique des usages du numérique
 1. Les usages actuels : communication & information, divertissement, optimisation des process (serv. pub., navigation, industrie)
 2. Les usages prospectifs (une explosion couple numérique+robotique)
 1. Exemple de mobilité 2.0 et 3.0, L'industrie 3.0, 4.0 et 5.0, La cuisine 2.0, ...
 3. Pour ces nouveaux services x.0 il faut des techniques avancées d'informatique (eg : ML et l'IA (entraînement + inférence))
Aussi déploiement d'infrastructure 5G, 6G, ...
3. Les impacts socio-environnementaux du numérique
 1. Électrique (GIEC, RTE, Shift 2025) (focus - IA, focus prospectif)
 2. Minéral (SystExt) (focus - IA, focus prospectif)
 3. Social (guerre métaux, perturbe rapport au travail, à la culture, vérité, démocratie)
4. Conclusion : ça fait 75 ans qu'on fait de l'efficience
5. Faut il une éthique propre au numérique ... ou juste une éthique : usages, utilisation d'infrastructure, logiciel, services
 - Sous forme de questions qu'on pose à l'audience /discussion
 - Aligner le coût au besoin
 - Version Damien : arbitrage entre utilité et son coût (socio-éco)
 - Ya du boulot de recherche, d'ingénierie, de technicien dans la sobriété
 - Plutôt de réfléchir et de travailler pour faire plus, travaillons et réfléchissons à faire le maximum dans une enveloppe donnée.
 - Faire plus sous contrainte c'est faire mieux ; faire plus sans contrainte c'est juste faire plus
 - D'abord on se fixe une contrainte, et ensuite on fait ce qu'on peut dedans (je ne dépasserai pas 500 vaches, mais j'en tirerai le maximum)

Croissance

