

Les impacts du numérique sur l'environnement : quels constats, quelles actions ?

Emmanuelle Frenoux

Emmanuelle.Frenoux@universite-paris-saclay.fr

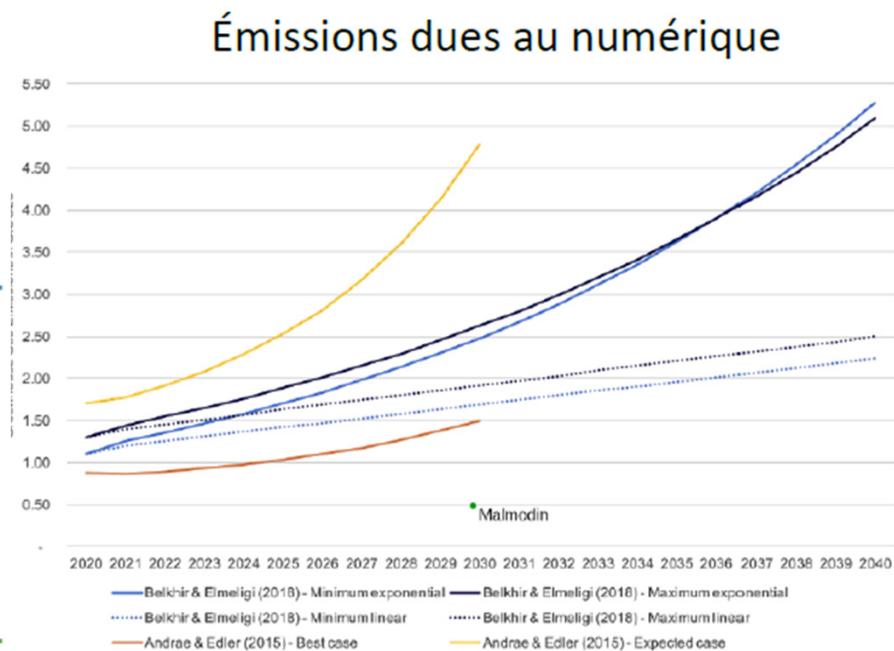
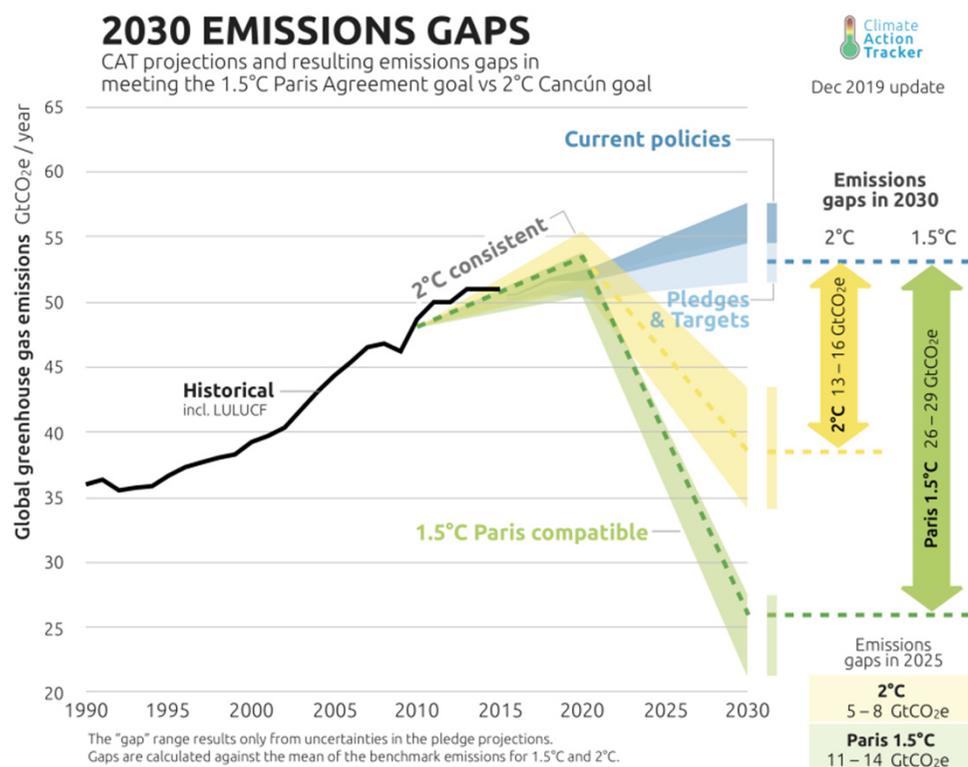


POUR UNE INFORMATIQUE ÉCO-RESPONSABLE



Quelques éléments de contexte...

Objectif GES 2030 vs émissions GES du numérique

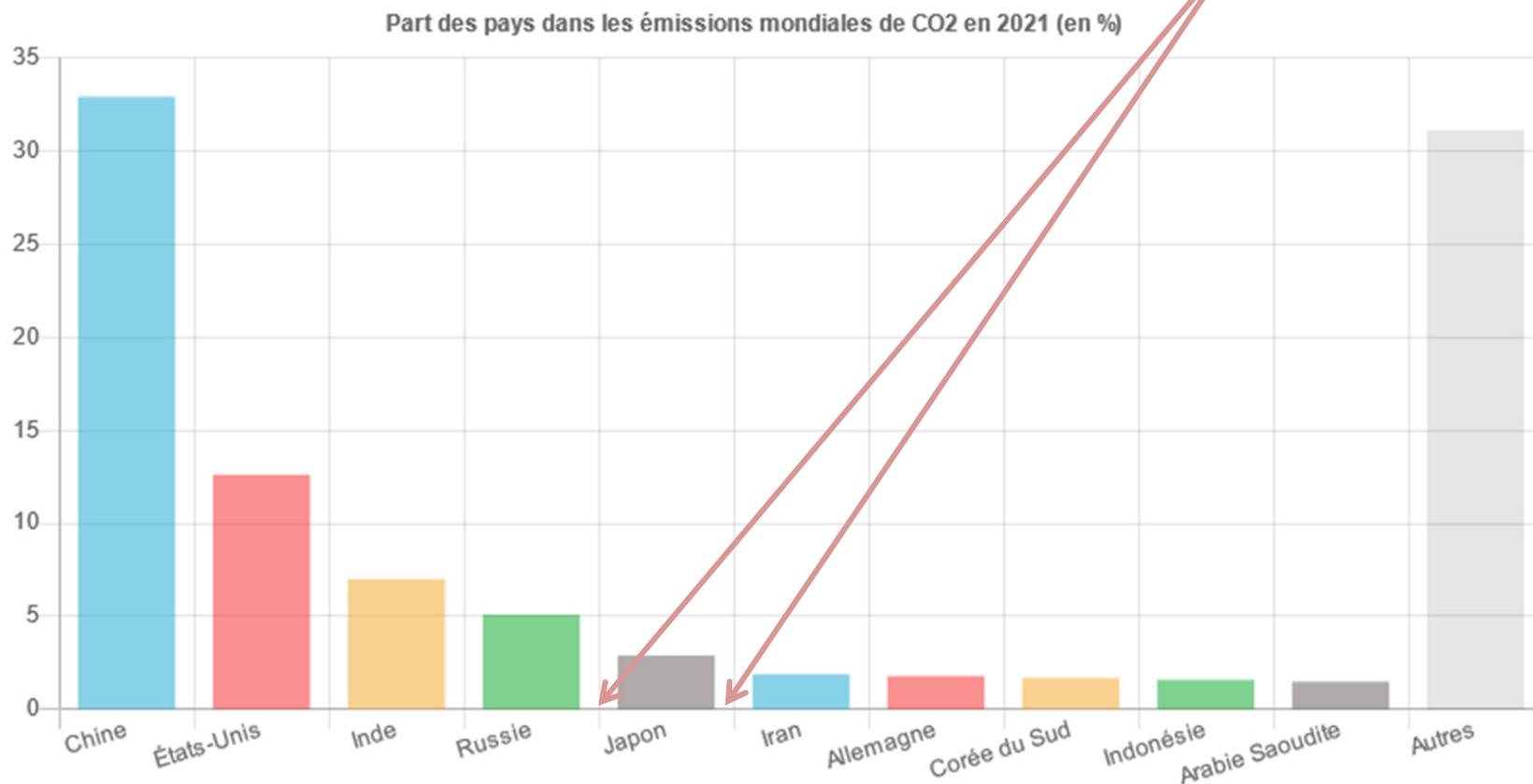


Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S., and Friday, A. (2021). The real climate and transformative impact of ict: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9) :100340

La tendance à l'augmentation est finalement confirmée aussi par Malmodin *et al* : https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4424264

À quoi correspondent les émissions de GES du numérique ?

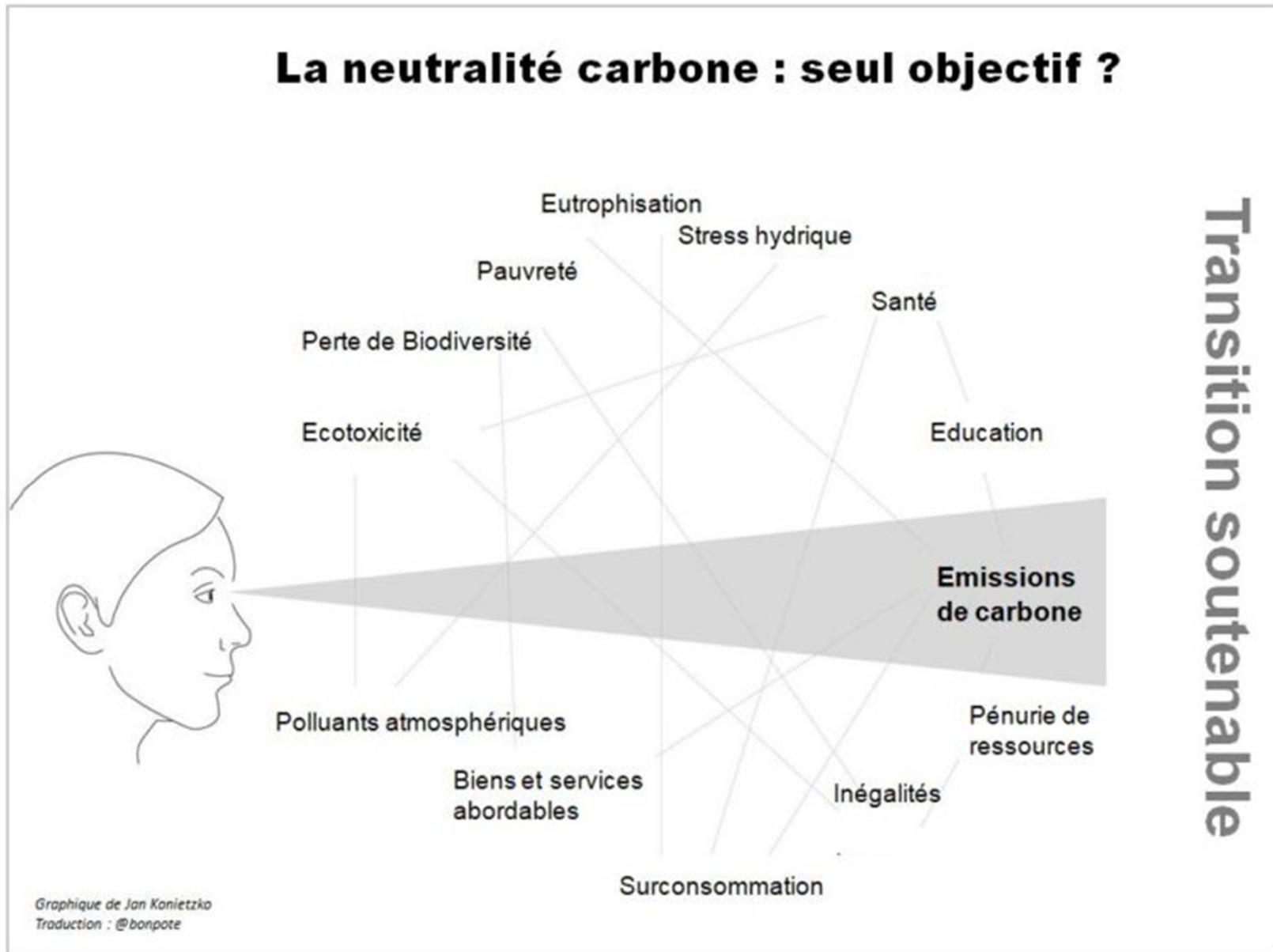
2 à 4% des émissions de GES mondiales



Source : [Commission européenne, calculs Statista \(2021\)](#)

Source illustration : <https://climate.selectra.com/fr/empreinte-carbone/pays-pollueurs>

Empreinte : lorsqu'on parle de GES, on met des œillères...

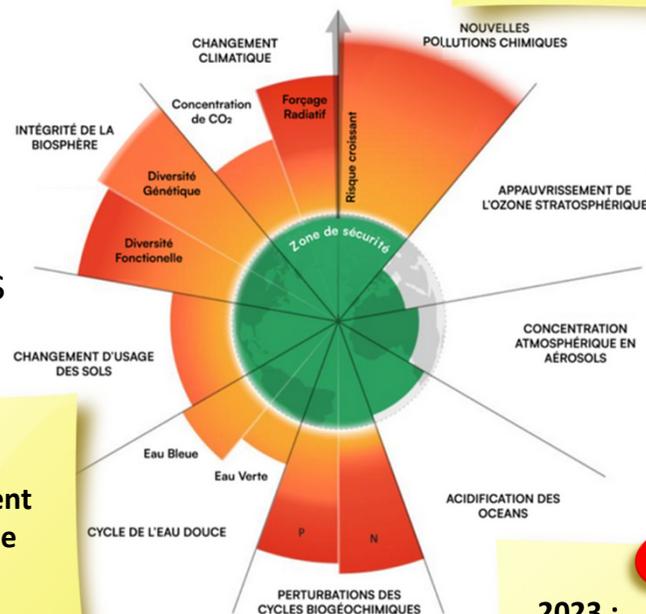


Notion de limites planétaires

- Concept proposé en 2009 par une équipe internationale menée par Johan Rockström (Stockholm Resilience Centre) et Will Steffen (Université nationale australienne)
- Indicateurs régulant la stabilité de la biosphère
- Seuils que l'humanité ne doit pas dépasser pour
 - ne pas compromettre les conditions favorables dans lesquelles elle a pu se développer
 - pouvoir vivre durablement dans un écosystème sûr
 - éviter les modifications brutales de l'environnement planétaire
- Il y a des interactions entre certaines limites (en dépasser une influe sur les autres)

Janvier 2022 :
dépassement de la 5^{ème} limite (Introduction de nouvelles entités dans l'environnement, facteurs de pollution)

2023 : 6 Limites dépassées



Mai 2022 :
dépassement d'une partie de la 6^{ème} limite (eau verte).

2023 :
dépassement de la limite de l'eau bleue → 6^{ème} limite franchie (cycle de l'eau douce)

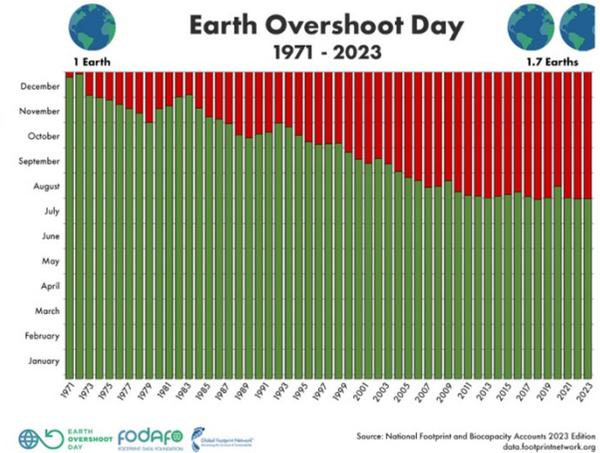
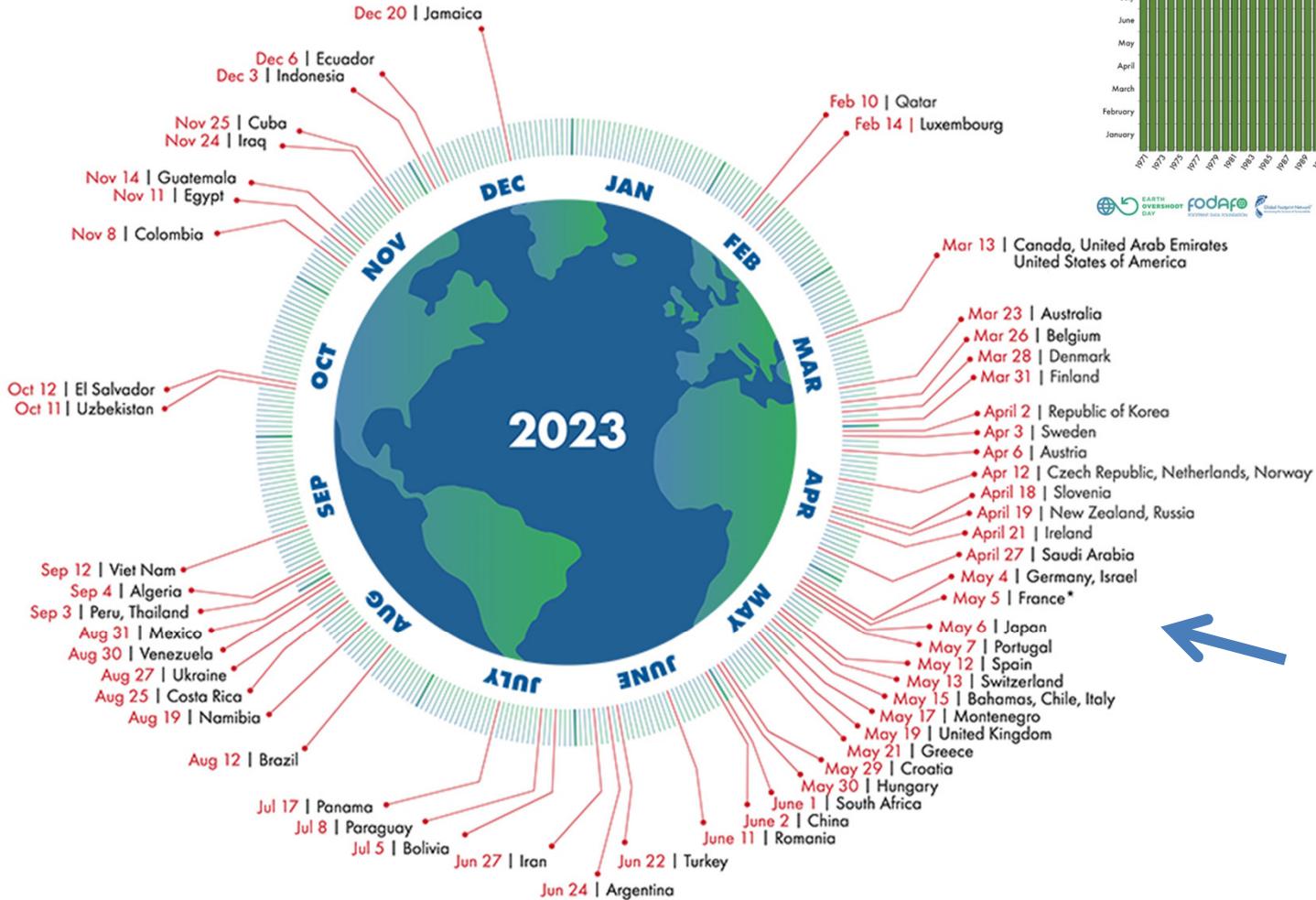
Source : Stockholm Resilience Center Traduction : Bon Pote

Sources :

<https://www.nature.com/articles/461472a>
<https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
<https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>
<https://bonpote.com/la-5eme-limite-planetaire-vient-detre-officiellement-franchie-et-tout-le-monde-sen-fout/>
<https://positivr.fr/cycle-de-leau-douce-une-6eme-limite-planetaire-a-ete-franchie/>

Country Overshoot Days 2023

When would Earth Overshoot Day land if the world's population lived like...



France 2022
et France
2023, même
date



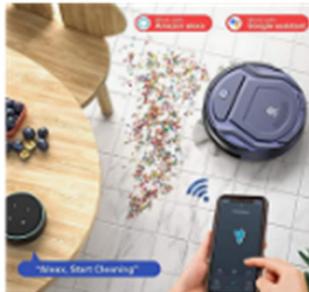
For a full list of countries, visit overshootday.org/country-overshoot-days.
*French Overshoot Day based on nowcasted data. See overshootday.org/france.
Source: National Footprint and Biocapacity Accounts, 2022 Edition
data.footprintnetwork.org



Comment positionner l'impact
environnemental du numérique
dans tout ça ?

Qu'est-ce qui fait
« officiellement »
partie du
numérique ?

Big Brother is watching you : le numérique est partout !



À quel point Big Bro est-il big ?

- en 2016, en France: 6.4 écrans/foyer (CSA et Médiamétrie)
- en 2019, en France (baromètre du numérique, ministère de l'économie) :
 - plus de 75% de la population française de 12 ans ou plus a
 - 2 terminaux (smartphone+PC ou ordinateur+tablette ou smartphone+tablette)
 - ou 3 terminaux (smartphone+tablette+PC)
- en 2018 (Shift Project), dans le monde :
 - Un américain possédait environ 10 périphériques numériques connectés et a consommé 140 Go de données/mois
 - Un indien possédait 1 seul périphérique numérique connecté et a consommé 2Go de données/mois.

Sources :

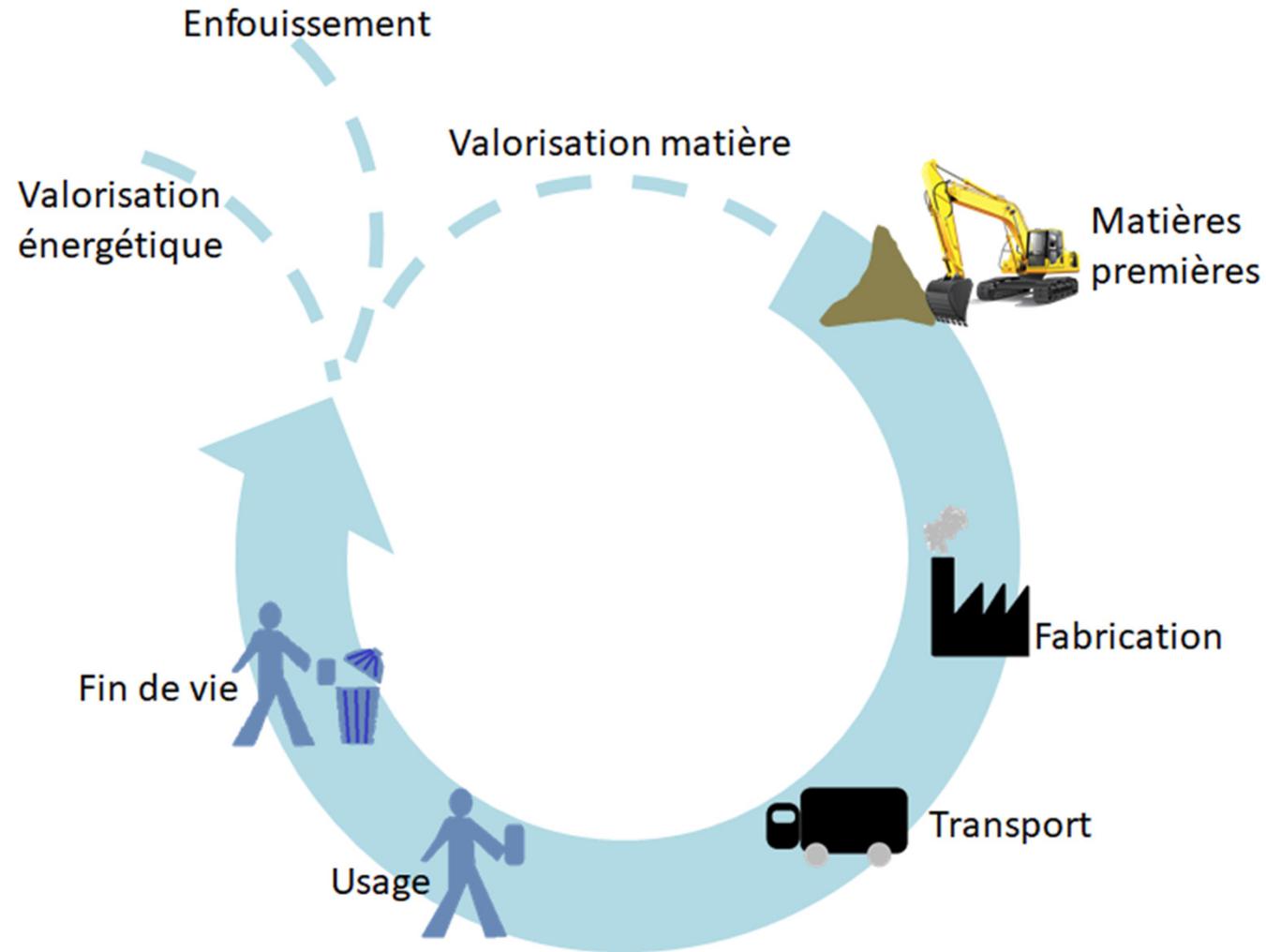
<https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-final-v8-WEB.pdf>

<https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/15625-Connected-Living-Report.pdf>

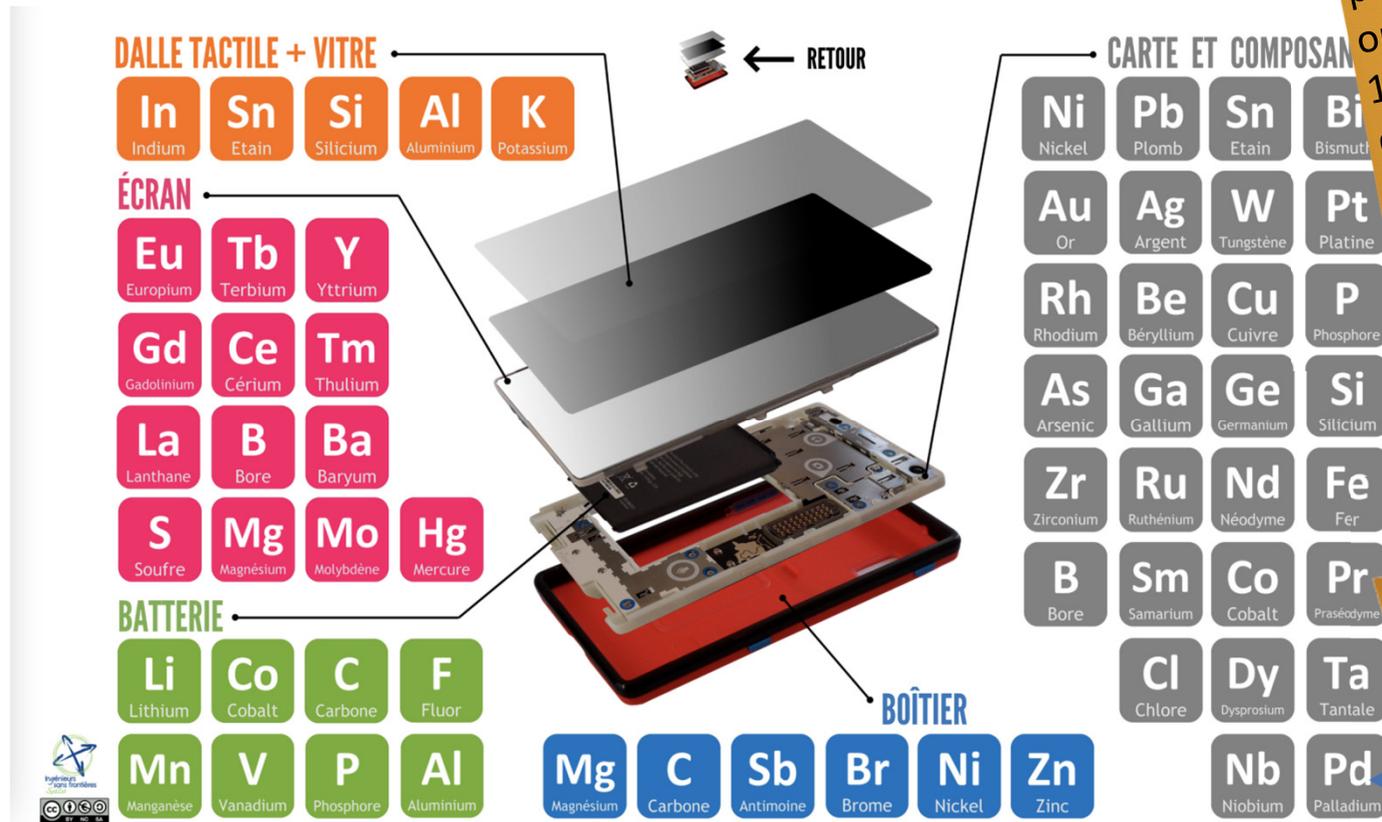
https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/barometre-numerique-2019.pdf

**Répartition
planétaire très
inéegale**

Le cycle de vie d'un produit...



Les matières premières



Chaque année, pour produire ordinateurs et mobiles : 19% de la prod. globale de métaux rares 23% du cobalt + les autres métaux

métaux, silice, plastiques
Meilleur, + petit, + rapide, + fiable : Gravure des wafers : 10nm, 7nm, 5nm, 3nm (2022)
Taille des virus VIH: 90 nm - SARS-CoV-2 : 50-140 nm

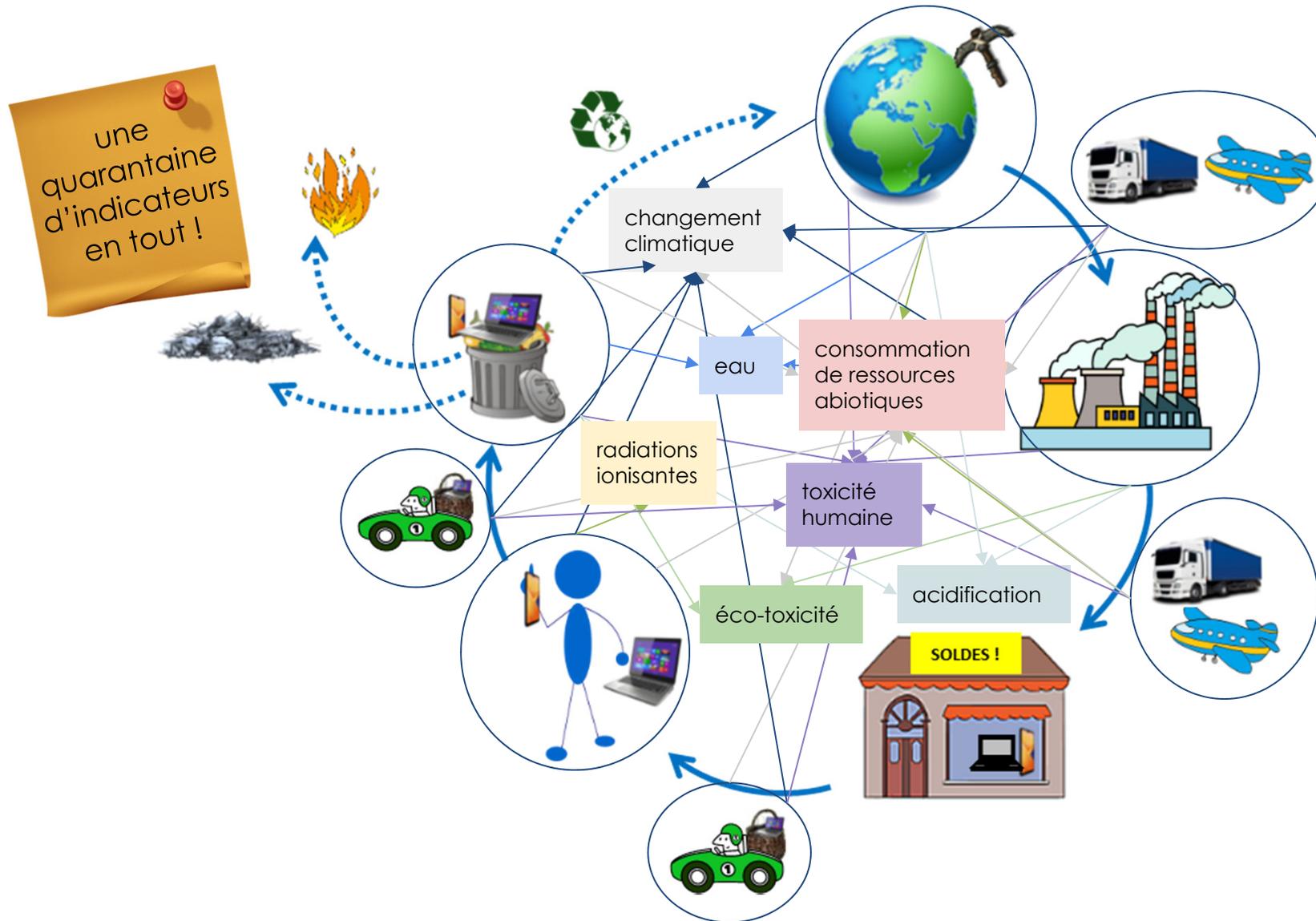
sources :

<https://www.systext.org/>

<https://www.systext.org/node/1724>

Laurent Lefèvre, EcoInfo, Eido64 2022

Impacts directs du numérique (ACV)



Impact des matières premières et de la fabrication...

Conflits armés
(ex : guerre du Kivu)

Conflits sur les usages de l'eau

Droits Humains

Transfert de pollution / de responsabilité environnementale



Lubumbashi, Katanga, RDC, le 23 mai 2016. (JUNIOR KANNAH / AFP)

Déchets toxiques à ciel ouvert

Rejets de produits chimiques

Gestion (loi) de l'environnement

Gaz toxiques et pluies acides

Empoisonnement des nappes phréatiques et des terres



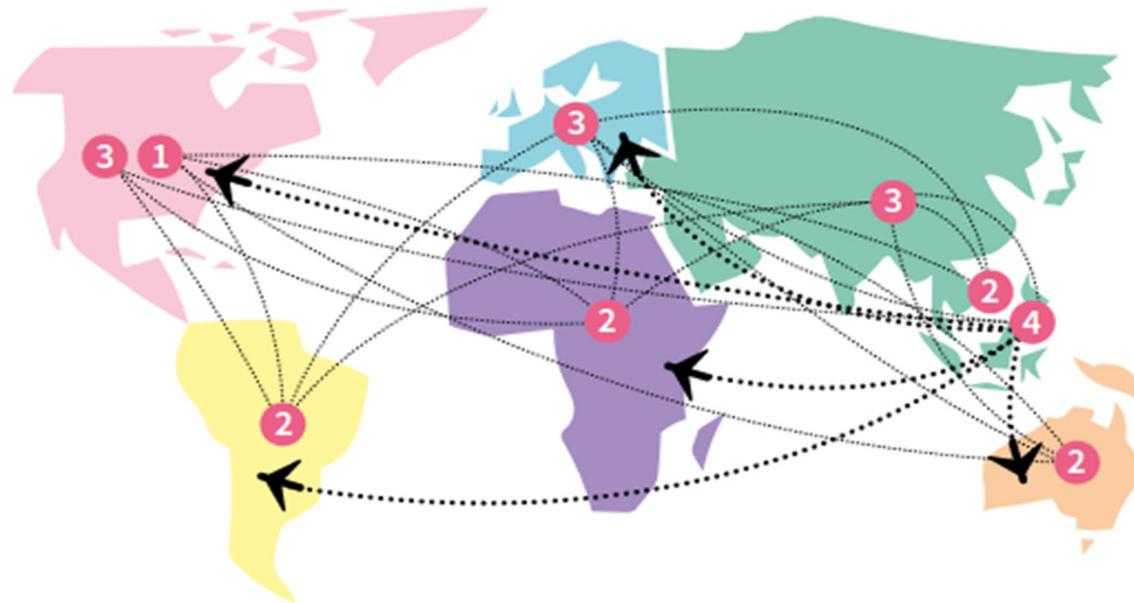
Saumures d'une mine de lithium, désert d'Atacama, Chili. Ivan Alvarado, REUTERS



La lac toxique de Baotou (Chine)
David Gray / Reuters

Conception, matières premières, fabrication : mon smartphone, ce pigeon voyageur !

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.

Sources :
ADEME &
France Nature Environnement

Une simple Analyse du Cycle de Vie nous montre que l'extraction des matières premières et la production ont beaucoup plus d'impact que le transport !

ACV d'un smartphone...

Empreinte carbone de chaque phase du cycle de vie d'un smartphone avec un mix électrique mondial (plus de 80% pour la production hors internet)

Combien de temps garde-t-on un smartphone en France ?

50% de matériaux recyclés ?

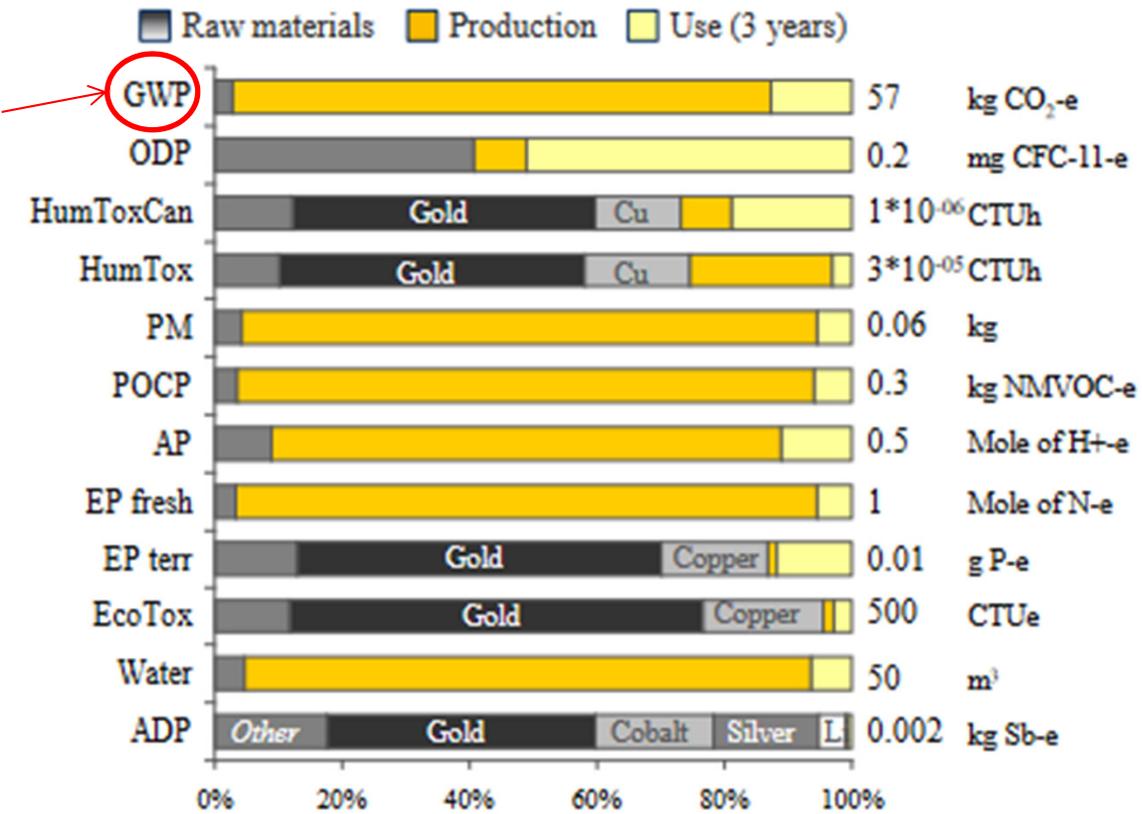
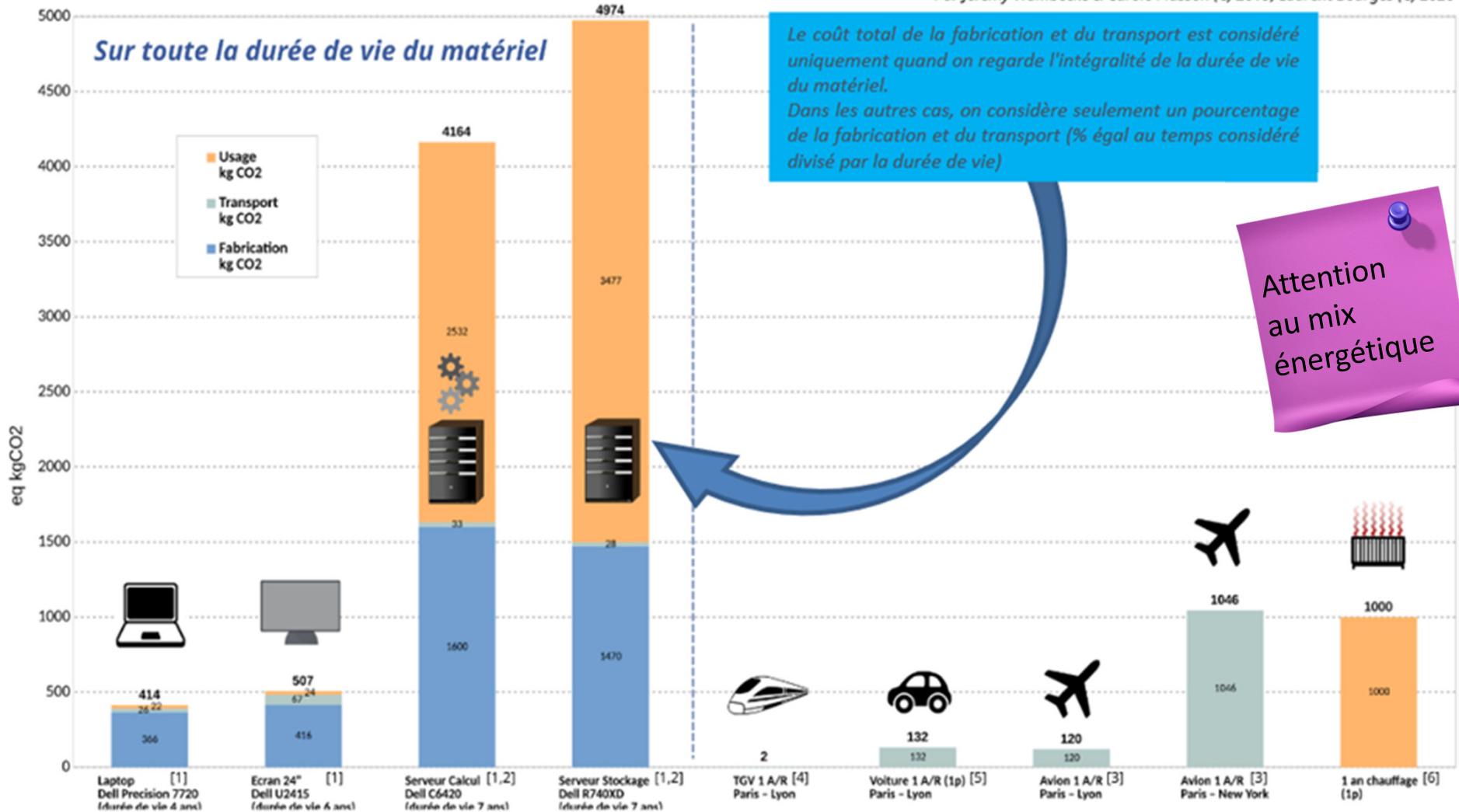


Fig. 4 Total life cycle result for all impact categories for smartphone Z5 with accessories using Ecoinvent database and adopting a 50/50 recycling approach with 19% recycling of gold assumed.

Impact carbone des matériels

Par Jérémy Wambecke & Carole Plasson (C) 2019, Laurent Bourges (C) 2020



[1] Données Fiches Dell (usage corrigé pour usage FR) :

(https://www.dell.com/learn/us/en/uscorp1/corp-comm/environment_carbon_footprint_products)

[2] Usage à partir de la consommation moyenne (Berthoud et al. 2020) d'un nœud = 275W (C6420), 375W (R740XD) (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02549565>)

[3] <https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/>

[4] <https://ressources.data.sncf.com/explore/dataset/emission-co2-tgv/table/>

[5] Trajet de 473km, pour une voiture émettant 0,140 kg CO₂/km

[6] <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/1281320/ip1445.pdf>

Facteur d'impact : 0,108 kgCO₂/kWh (FR)



Empreinte de la production : acheter moins, et mieux

- Acheter moins
- Choisir des garanties longues
- Prolonger la durée de vie des matériels (réparer)
- Acheter du matériel raisonné, réparable longtemps ou reconditionné (20% imposés par la loi)
- Prendre en compte les critères d'achat responsable
- Louer (/!\)
- Mutualiser



**DONS.ENCHERES-
DOMAINE**

Dons des biens mobiliers du
Domaine

Au-delà du matériel, les
infrastructures...

Infrastructures réseau et câbles...

Répartition planétaire inégale

USA et Canada

Europe

1 200 000 km de câbles en 2019 (32 fois le tour de la Terre)
99% des échanges sont par câble

Amérique du sud

Afrique

Asie

selon Data Center Map, le 10 mai 2023 : 5004 DC en colocation dans 130 pays, dont 1851 aux USA et 163 en France.

<https://www.datacentermap.com/>

source :

<https://densitydesign.github.io/teaching-dd15/course-results/es01/group04/>

Légende



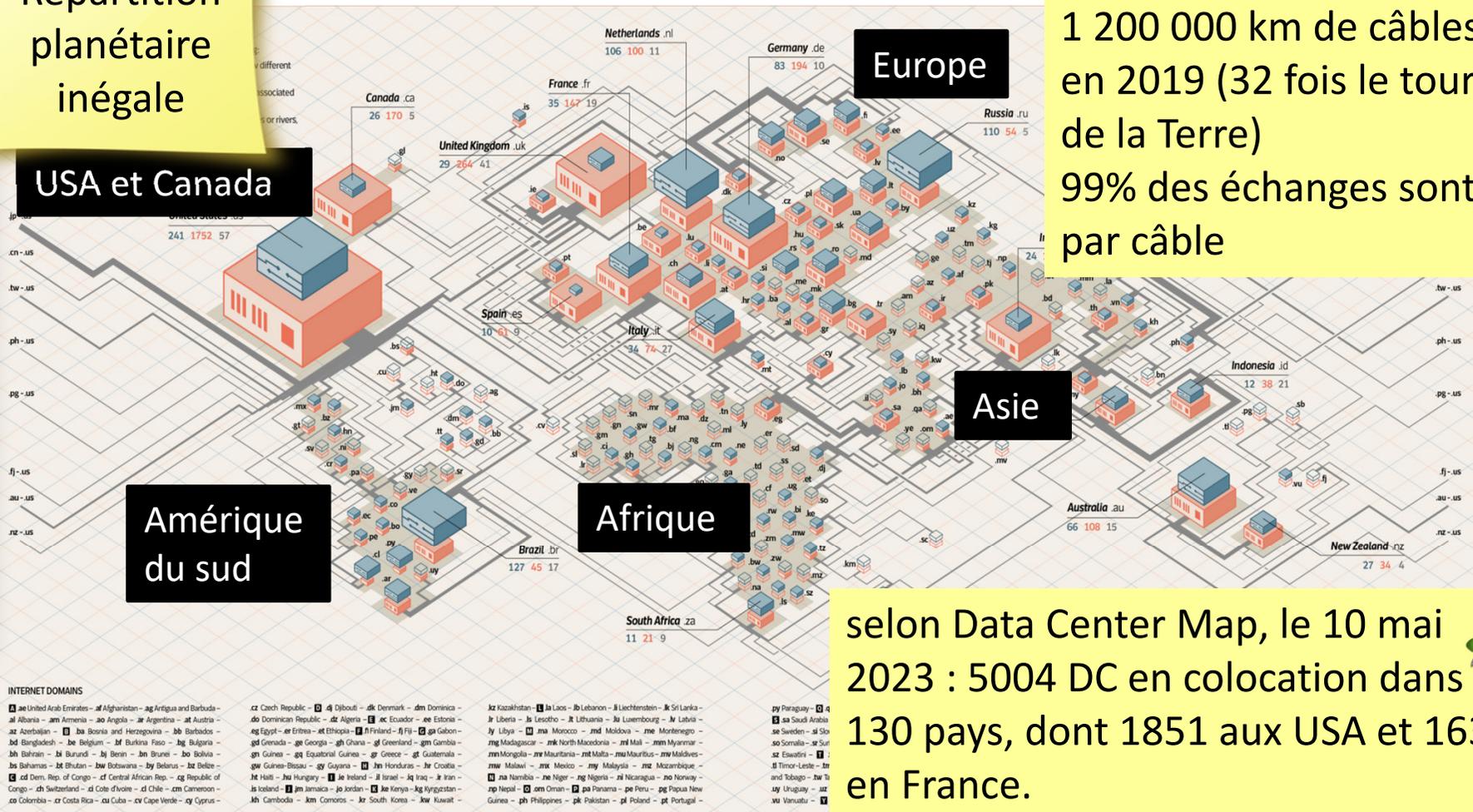
Points d'échange trafic FAI



Liens sous-marins



Centres de données



Centres de données : contexte

- Déploiement continu de gros centres de données
- Déploiement d'autres centres plus modestes (IoT : garantie de faibles latences entre serveurs et objets connectés)
- Faible proportionnalité énergétique (utilisation très variable)
- En 2015, l'institut Uptime considérait qu'aux États-Unis, 30 % des serveurs dans les centres de données étaient comateux (allumés pour rien)
- Lorsque l'usage d'un serveur diminue, sa consommation électrique ne tend pas vers zéro, mais vers 50 % de sa puissance électrique maximale

Source : <https://interstices.info/le-vrai-cout-energetique-du-numerique/>
<https://uptimeinstitute.com/>

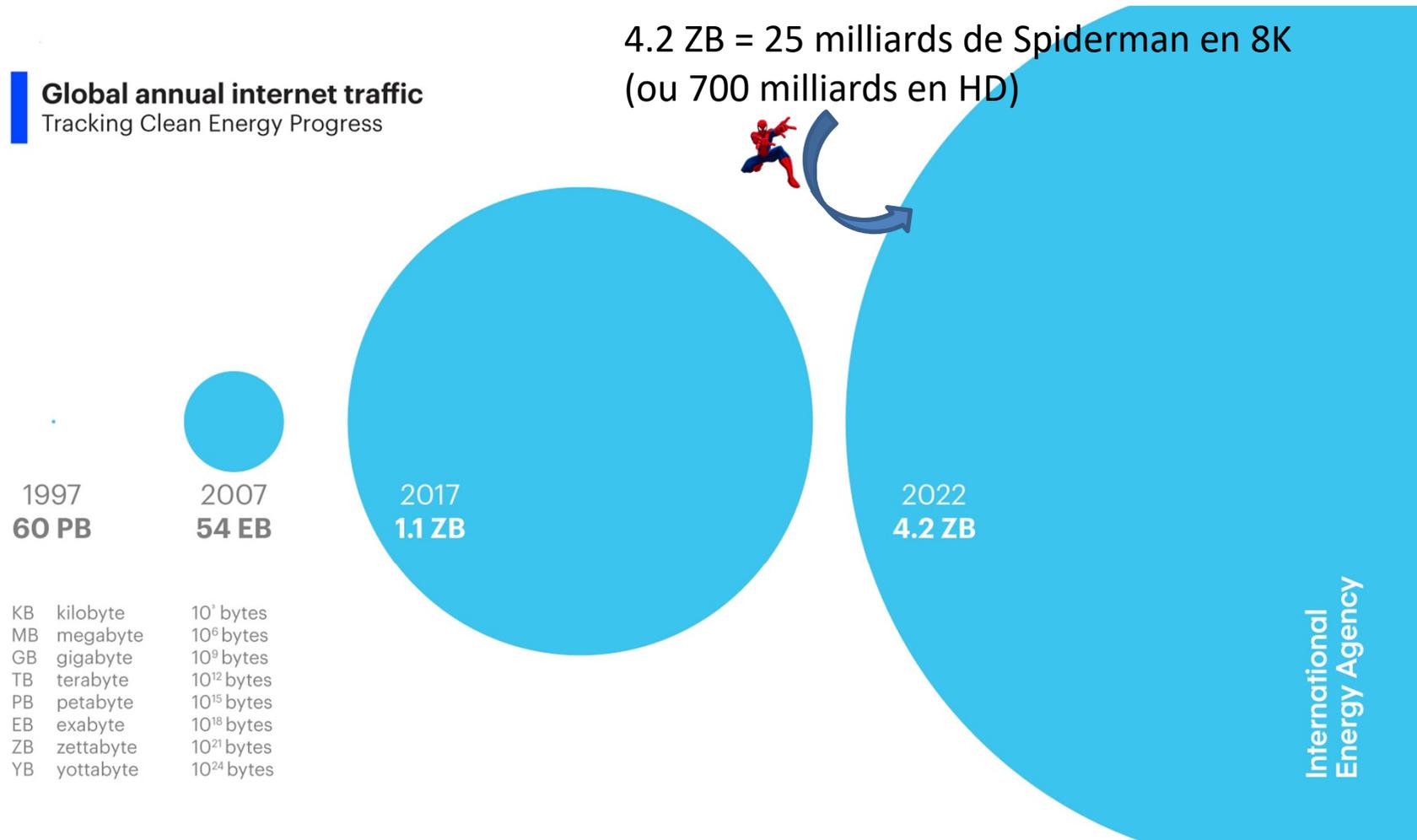


Stocker ou ne pas stocker les données ?

- Coût et complexité d'acquisition vs coût du stockage
- Partage des données
 - Normalisation et documentation
 - Formater
- Mode de stockage : données chaudes, données froides ?
- Penser aux principes du FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable, Réutilisable)
<https://www.ccsd.cnrs.fr/principes-fair/>
- Bien urbaniser les centres de données/de calcul

Et à propos de données...
quel volume ?

Volume de données annuel, chronologie...



Il y a quoi, dans tous ces octets ??

streaming vidéo
(vidéos en ligne,
télé-surveillance, ...)
80% de bande passante
selon le Shift Project

web



Skype, etc...

GLOBAL APPLICATION CATEGORY TRAFFIC SHARE

1	VIDEO STREAMING	60.6%(+2.9) ↓	22.2%(-0.1) ↑
2	WEB	13.1%(-3.8) ↓	10.3%(-10.6) ↑
3	GAMING	8.0%(0.2) ↓	4.9%(+2.2) ↑
4	SOCIAL	6.1%(+1.1) ↓	7.6%(+3.8) ↑
5	FILE SHARING	4.2%(+1.4) ↓	30.2%(+8.1) ↑
6	MARKETPLACE	2.6%(-1.9) ↓	1.6%(-0.2) ↑
7	SECURITY AND VPN	1.6%(+0.2) ↓	5.3%(-2.1) ↑
8	MESSAGING	1.6%(-0.1) ↓	8.3%(-0.1) ↑
9	CLOUD	1.4%(+0.01) ↓	9.0%(-0.3) ↑
10	AUDIO STREAMING	0.4%(-0.5) ↓	0.3%(-0.1) ↑

Source :

“The Global Internet Phenomena Report”, 2019, Sandvine

https://www.sandvine.com/hubfs/Sandvine_Redesign_2019/Downloads/Internet%20Phenomena/Internet%20Phenomena%20Report%20Q32019%2020190910.pdf

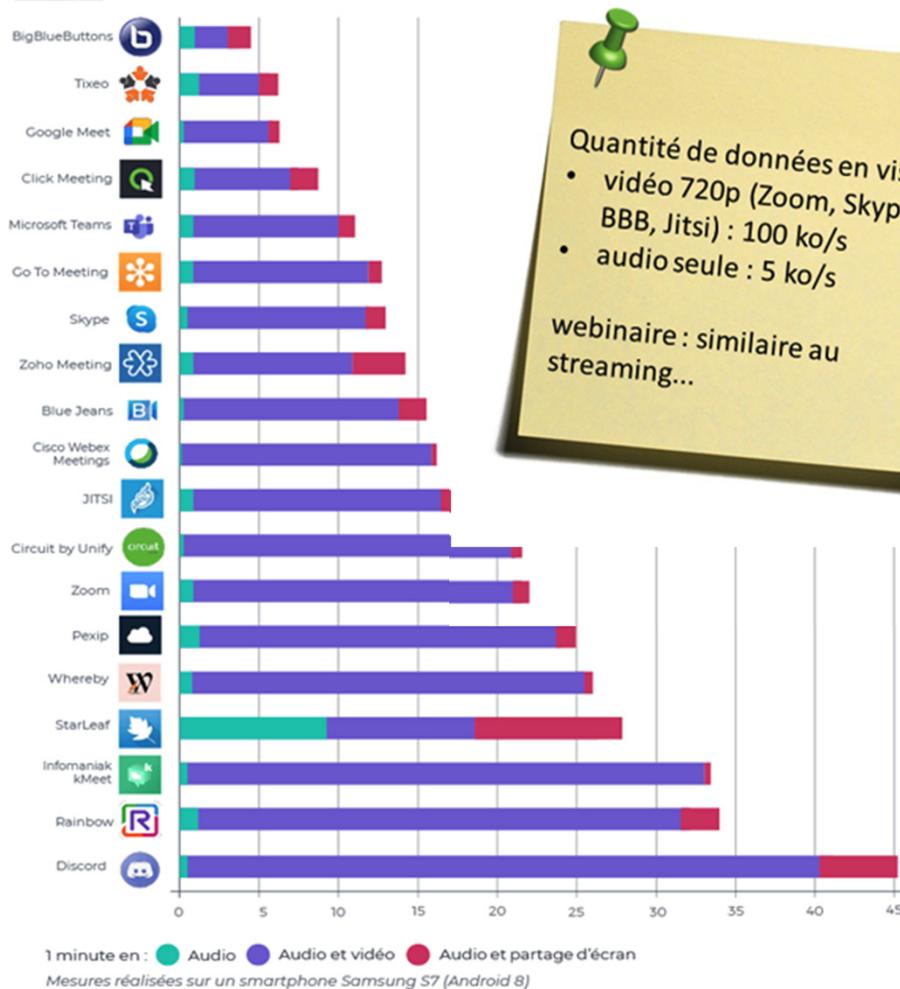


Impact du streaming, quelques bonnes pratiques

- Limiter le streaming.
- Désactiver l'auto-play et tout ce qui procède de la captation d'attention (un plugin possible : Minimal, <https://minimal.aupya.org/>).
- Diminuer la résolution des vidéos pour le visionnage.
- Stopper la pub des sites web.
 - Avec un bloqueur (<https://adblockplus.org/fr/>, <https://ublockorigin.com/fr>)
 - En trompant le navigateur (<https://www.greenit.fr/2015/09/15/web-eliminer-definitivement-les-publicites/>)

Focus visioconférences et webinaires

Données échangées d'une minute de visioconférence sur mobile
 Greenspector - Visioconférences - Avril 2021
 Plus cette valeur est basse, meilleure est l'



Quantité de données en visio :

- vidéo 720p (Zoom, Skype, BBB, Jitsi) : 100 ko/s
- audio seule : 5 ko/s

webinaire : similaire au streaming...

Paris-Berlin
en avion : 275 ± 27 kg eCO2 (sans traînées de condensation)
 ou 502 ± 352 kg eCO2 (avec)
en voiture : 493 ± 296 kg eCO2 (1 personne/voiture)
en train : 34 ± 20 kg eCO2
Visio : 7 g à 70 g eCO2/h (max 1,12 kg eCO2 pour 16h)
 Données : Labos1point5

Bonus saturation cognitive et CO2

- En visio, désactiver la vidéo après s'être dit bonjour.
- Pour un webinaire : télécharger la vidéo pour la regarder ensuite hors connexion.



Pistes d'actions pour gérer les données

- Utiliser des standards (partage, réutilisabilité)
 - Éviter les silos
 - Attention aux choix de formats et de langages (poids des fichiers, interopérabilité)
 - Importance des métadonnées notamment dans la gestion des collections (découvrabilité, réutilisabilité)
-
- une application intelligente des principes FAIR (Facilement Accessibles, Interopérables et Réutilisables) et de la science ouverte va dans le sens d'une activité de moindre impact environnemental
 - incitation à travailler avec du texte (format particulièrement facile à pérenniser à moindre coût environnemental)

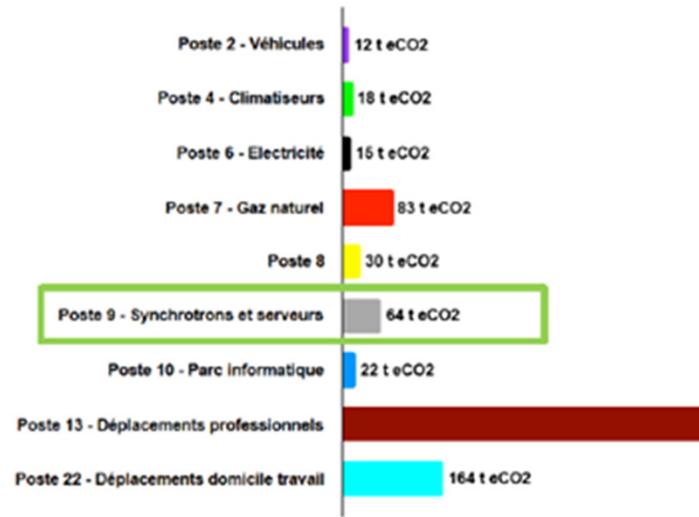
Dans nos labos, le travail sur les données ne représente qu'une partie des émissions liées aux activités de recherche...

Qui elles-mêmes ne représentent qu'une partie du total de nos émissions.

Les TIC, c'est aussi du code et du calcul !

Le calcul et les TIC à l'échelle d'un labo

Emissions de GES par poste d'émission



TOTAL : 1065 tonnes eCO₂

ISTERRE, bilan 2017, 250 personnes

https://www.isterre.fr/IMG/pdf/beges_isterre_2017_c

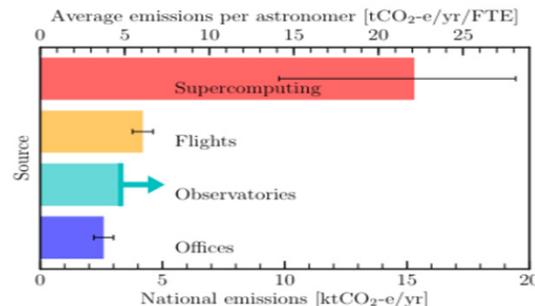
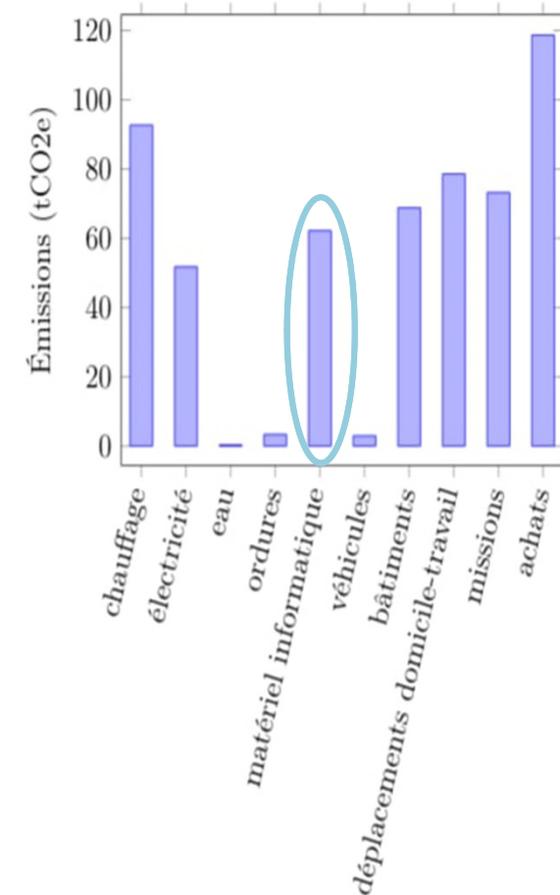
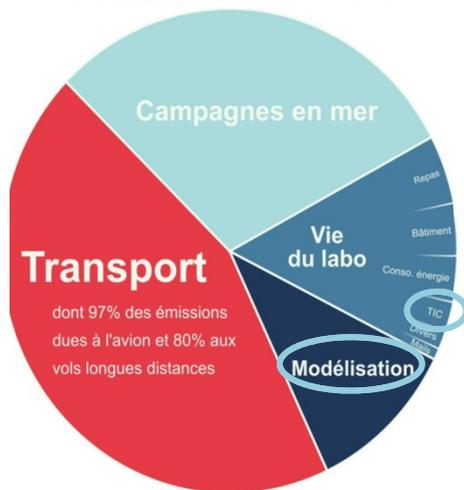


Figure 2: Breakdown of the four sources of Australian astronomers' emissions considered in this work. Error bars provide an estimate of our uncertainties, but should not be interpreted as formal confidence intervals. The value for observatories is a lower limit. 'Per astronomer' refers to the 691.7 FTE including PhD students, postdocs, and senior researchers.



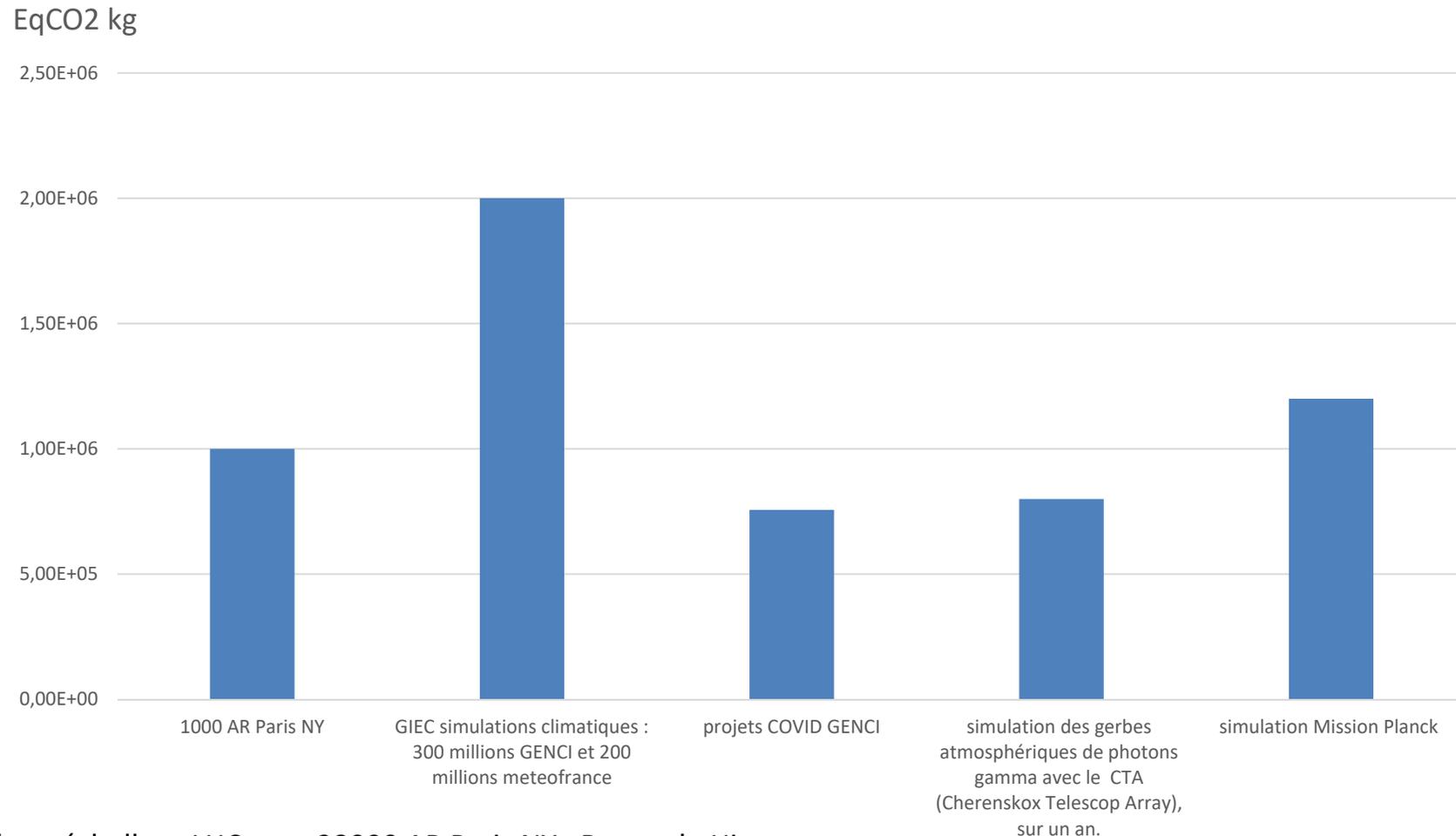
LIMSI : UPR, 2019
169 personnes, INS2I.

1750 tCO₂e
émises par le LOCEAN en 2018



LOCEAN : UMR, 2019
187 personnes, INSU.

Le calcul à l'échelle d'un pays...



+ hors échelles : LHC avec 28000 AR Paris NY : Boson de Higgs :

4 expériences LHC (Grand collisionneur de hadrons) qui enregistrent les particules issues des collisions entre proton

Total approximatif heures de calcul sur 1 an = 7Md heures de calcul = 28 000 tonnes EqCO2

*Sources : Données GENCI et estimations après enquêtes non officielles (Planck et LHC)
Estimation faite en utilisant le facteur de conversion 1 heure de calcul = 0.004 kg EqCO2*



Réduire l'impact du code



Je code : les bonnes pratiques en écoconception de service numérique à destination des développeurs de logiciels

Par exemple :

- avant : maîtriser le nombre de fonctionnalités, réutiliser des briques logicielles, planifier la gestion du logiciel...
- pendant : analyser son code, mesurer les performances...
- après : choisir hébergement mutualisé, labellisé CoC, local, privilégier mutualisation...

Réduire l'impact du calcul scientifique

- Minimiser le nombre d'expériences
 - préparation
 - réutilisation de modèles, mise en commun de calculs
- Minimiser leur impact
 - choix du centre de calcul : localisation, efficacité énergétique

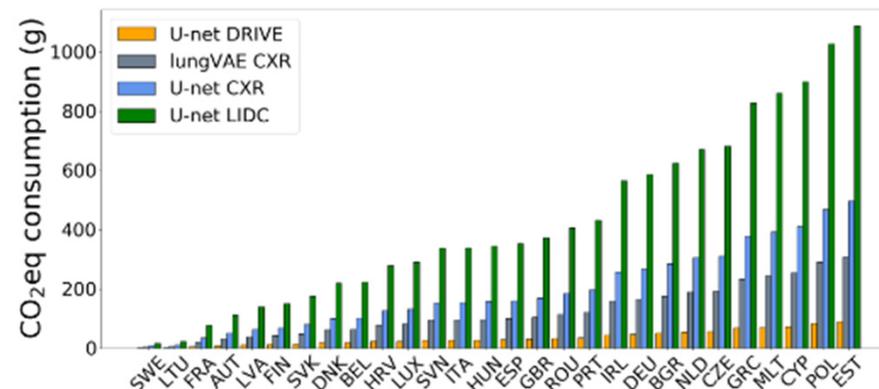


Figure 4. Estimated carbon emissions (gCO₂eq) of training our models (see [Appendix B](#)) in different EU-28 countries. The calculations are based on the average carbon intensities from 2016 (see [Figure 8](#) in Appendix).



Choisir son supercalculateur :
toi aussi, t'es dans le Top500 ?

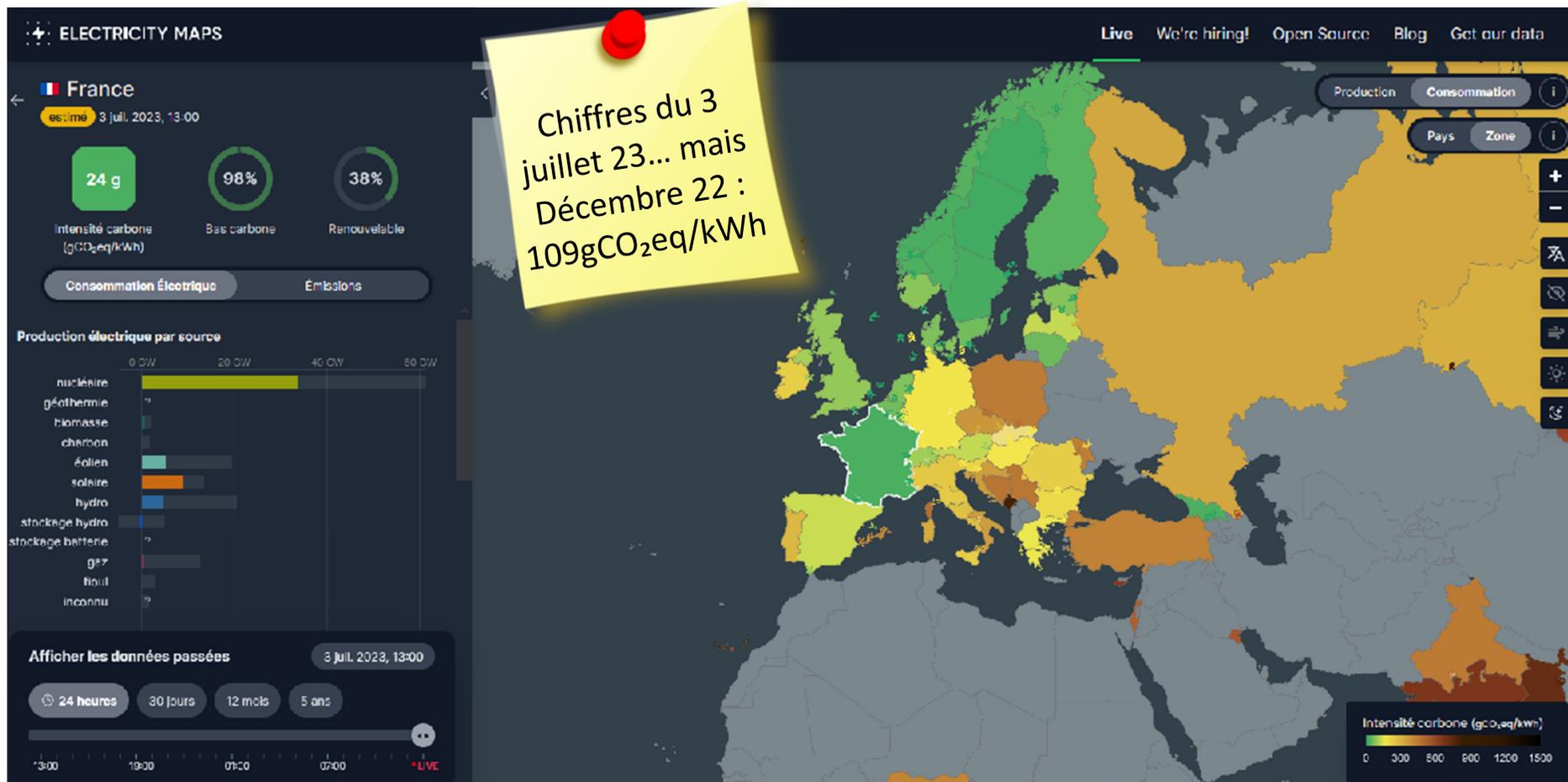
TOP500 : projet d'évaluation des 500 plus gros
supercalculateurs en termes de performances sur des
benchmarks d'analyse numérique.

Depuis 2007 : **Green 500** évalue l'efficacité
énergétique.

<https://top500.org/>

<https://www.top500.org/lists/green500/>

Énergie propre ?

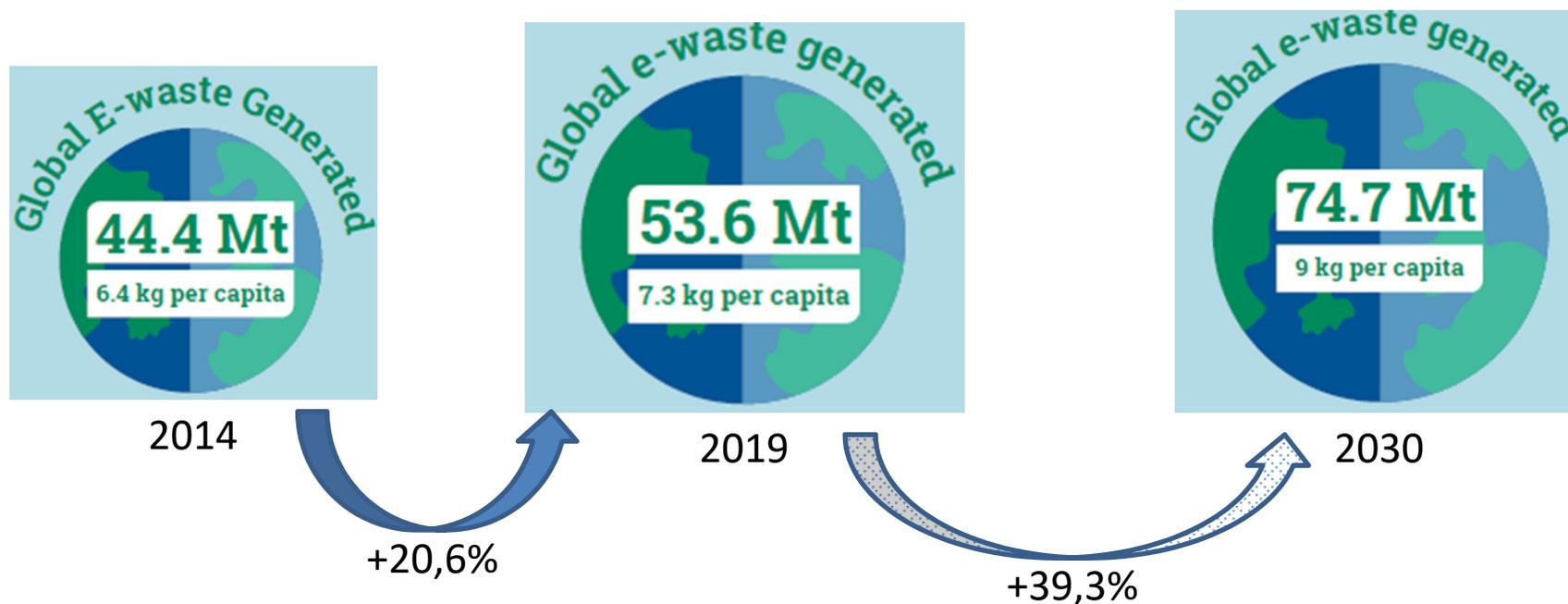


Source : <https://app.electricitymaps.com/zone/FR>
(intensité carbone : 24gCO₂eq/kWh le 3 juillet 2023)

Fin de vie :
petit EEE deviendra grand DEEE

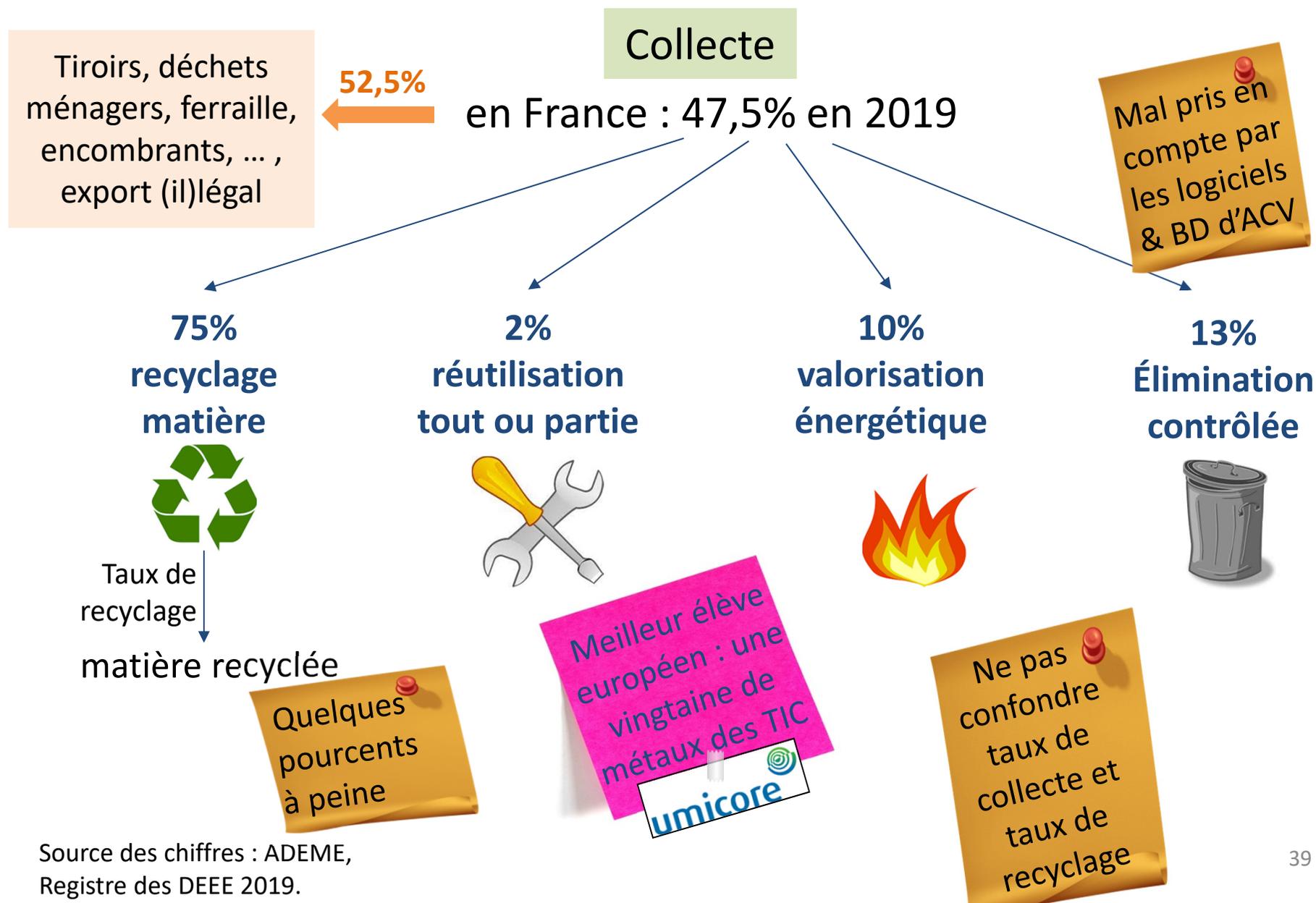
Évolution de la quantité de DEEE dans le monde

Petit cours de conversion...
44.4 millions de tonnes
≈ 4400 tours Eiffel



Source : [Global E-wasteMonitor 2020](http://ewastemonitor.info/), Forti, Baldé, Ruediger Kuehr, Garam Bel
<http://ewastemonitor.info/>

En fin de vie, il y a un impact aussi...



Source des chiffres : ADEME,
Registre des DEEE 2019.

Export illégal des DEEE et pollution



Pollution des sols, des eaux, de l'air, risques pour la santé humaine, droits de l'enfant, etc.



Images : FranceTVinfo, reportage au Ghana



Fin de vie : quelques bonnes pratiques

- Le meilleur DEEE est celui qu'on ne produit pas
 - prolonger la durée de vie au delà de 5 ans :
remettre à niveau, réparer
 - contourner l'obsolescence programmée
 - favoriser le réemploi
- Lorsque le matériel est hors d'usage, s'adresser à des filières ou associations spécialisées et agréées

Nous n'avons parlé que des impacts directs, il y a également des Impacts indirects ou induits

Effets directs, effets indirects ?

Type	Périmètre	Effet	Exemples
Effets directs	équipements eux-mêmes	impacts des phases du cycle de vie (extraction, fabrication, transports, usage, traitement déchets)	énergie grise / consommation d'énergie en usage / pollution des eaux lors de l'extraction des métaux
Effets indirects	 effets sectoriels	effets générés par l'utilisation du numérique (optimisation, substitution, induction)	achat de matériel supplémentaire / dématérialisation
	 effets sectoriels	effets générés par les gains d'efficacité grâce au numérique (effets rebond directs et indirects, obsolescence)	Augmentation de consommation énergétique des 500 calculateurs les plus rapides malgré les gains d'efficacité. Obsolescence des équipements ménagers, obésiciels, etc.
	effets systémiques	obsolescence systémique, accélération des flux (logistiques, financiers, de personnes, ..)	obsolescence en cascade (logiciels, connectique, systèmes, pièces, équipements...) accélération de l'économie (trading haute fréquence,...)
	 effets systémiques	transformations sociétales/effets sociaux	télétravail et déménagements, mondialisation ++

Des impacts difficiles à quantifier...

- problèmes de droits humains sur les sites d'extraction et de traitement de déchets
 - conditions de travail et travail des enfants
 - conflits armés pour la possession des mines (eg. guerre du Kivu, en RDC, pour le Coltan)
 - conflits d'accès à l'eau (extraction métaux, fabrication puces)
- santé humaine liée à l'usage excessif (selon âge) des écrans
 - Neuro-développement chez l'enfant (cognitif, attention, comportement)
 - troubles musculo-squelettiques
 - troubles du sommeil
- et tout le reste...
 - surveillance généralisée
 - concentration de pouvoir
 - résilience (de notre société vis-à-vis de sa dépendance au numérique)
 - souveraineté
 - tension sur les métaux entre énergies renouvelables, numérique, mobilité, ...

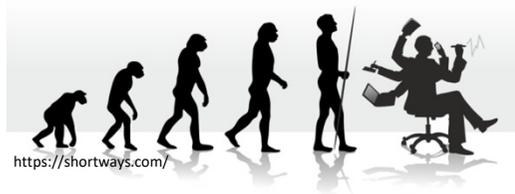
En conclusion...

Les enjeux sont importants

- Disproportion Nord/Sud (activités des pays du nord incompatibles avec la préservation d'une planète vivable)
- Deux voies
 - adaptation des fonctionnements existants (ajustement à la situation climatique)
 - mitigation (réduction des émissions de GES, réduction de l'activité)
- Scénarii de l'ADEME : importance du techno-solutionnisme en Europe/dans les pays du Nord
<https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/les-scenarios/>
- Problème systémique → pas de solution simple, consensuelle et implémentable en largeur.

Les petits gestes sont-ils vraiment utiles ?

- toute réduction est bonne à prendre
- pour faire bouger le système, il faut s'y attaquer à de multiples niveaux
- les améliorations ne se mesurent pas qu'en tonnes de CO2 épargnées
- nous devons montrer l'exemple



Vers la sobriété numérique...

- Ralentir
- Réduire nos usages et nos achats
- Mutualiser
- Avoir un usage raisonné
- Débrancher/éteindre (ordinateurs, serveurs, smartphones, ...)
- Mettre les Low Techs à la mode
- Faire attention au Green Washing
- Bifurquer ? (faire le bilan bénéfices/impacts)

Sobriété Numérique, les clés pour agir. Frédéric Bordage, Ed. Buchet-Chastel, 2019.

L'impératif de la sobriété numérique, l'enjeu des modes de vie. Fabrice Flipo, Ed. Matériologiques, 2020.

<https://ecoinfo.cnrs.fr>



Concrètement, comment mesurer les impacts directs ?

Impact environnemental global (multi-critères)

- Analyse du Cycle de Vie
 - Attributionnelle (quelle part des impacts ?)
 - pas de lien cause-conséquence
 - traduit le « degré de responsabilité »
 - comptabilité
 - Conséquentielle (quelle conséquence sur les impacts ?)
 - si l'on augmente la demande
 - si l'on modifie le cycle de vie
- Étude d'impact
- Multi Regional Input Output analysis (MRIO)
- Warning DEEE !

<https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>
<https://consequential-lca.org/clca/why-and-when/>

Outils de mesure de consommation (CO2)

Outils de mesure de puissance :

- PDU (Protocol Data Unit ou Unité de données de protocole), wattmètre, ampèremètre
- paramètres de ces outils : fréquence, échantillonnage, précision, multi-prises, actionnables à distance, ...

Outils logiciels :

- Power API
- Intel Power Gadget
- Mac Power Meter (comparaison logiciel/wattmètre)

Un exemple de mesure du coût du transit des données :

<https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2020/12/Rapport-revise-1Go-VF02-2021.pdf>

<https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/articles/intel-power-gadget.html>.

<https://gitlab.inria.fr/guenneba/mac-power-meter/-/tree/master>.

<https://pypi.org/project/powerapi/>.

Outils de mesure de consommation

Outils de mesure en ligne : mesure d'impact d'une page web (diagnostic)

- Carbonalyser : extension du navigateur calculant le carbone émis pendant un temps d'utilisation du navigateur
- Ecometer : analyse l'impact environnemental d'un site
- Ecoindex : analyse l'impact environnemental d'un site

Attention, certains outils sont critiqués pour leur imprécision.

Évaluer son matériel : Ecodiag

<https://ecoinfo.cnrs.fr/ecodiag-calcul/>

Effectuer le bilan GES du labo : GES1point5

<https://www.labos1point5.org/ges-1point5>

➤ On peut aussi [faire] auditer son centre de calcul

<https://github.com/carbonalyser/Carbonalyser>

<http://www.ecoindex.fr/>

<http://www.ecometer.org/>

