

# Impact environnemental du numérique : on en est où ?

Laurent Lefèvre

Inria AVALON – Laboratoire LIP - Ecole Normale Supérieure de Lyon  
Membre du GDS Ecoinfo  
[laurent.lefevre@inria.fr](mailto:laurent.lefevre@inria.fr)

**Cette intervention est faite à titre personnel et ne reflète pas  
l'avis de mon employeur ni groupe associé.**

**Des chiffres sont (sans doute) faux !**

**Le message sur le numérique peut ne pas être que positif ☺**

# Le numérique : c'est fantastique (mais pas que..)

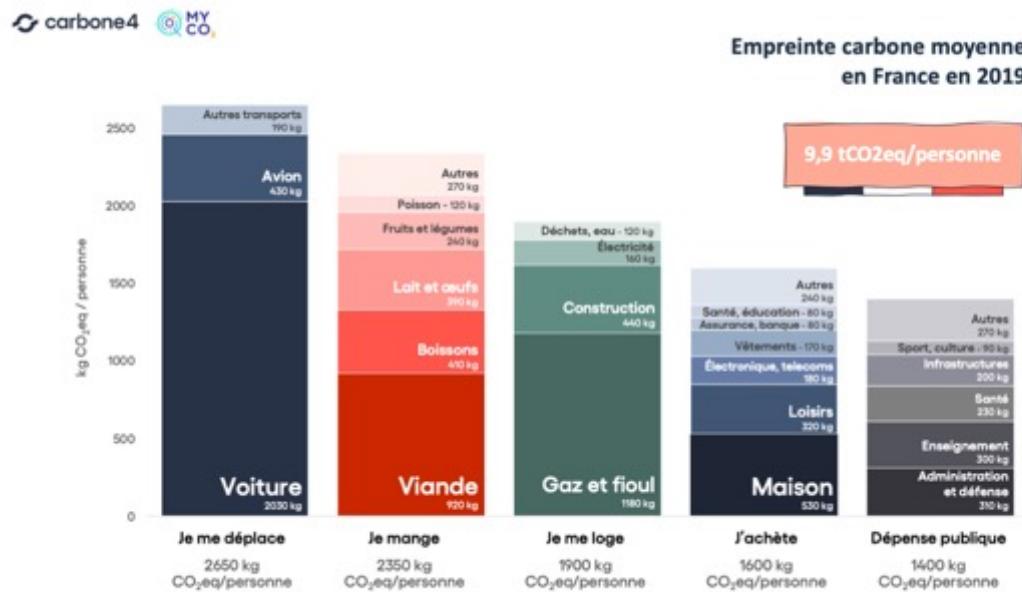
## Solution

- Compensation/Optimisation
- IT4Green
- Recherche
- (In)Formation/Education
- Accès aux soins
- Création artistique

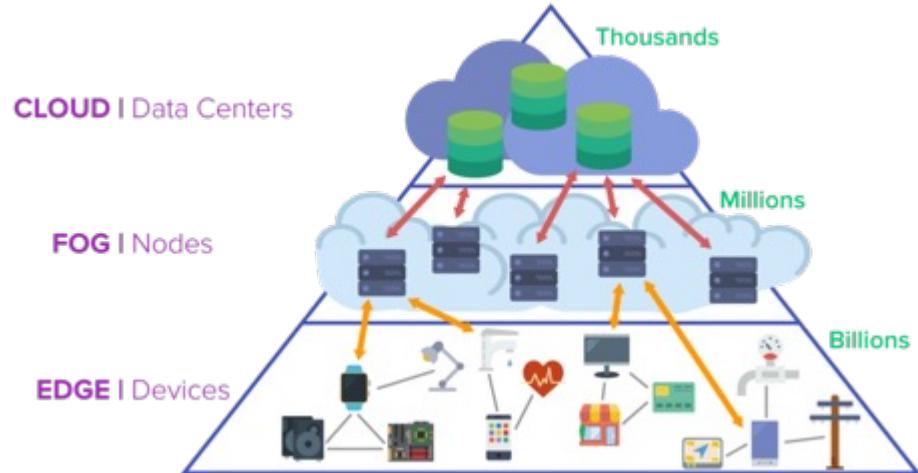


## Problème

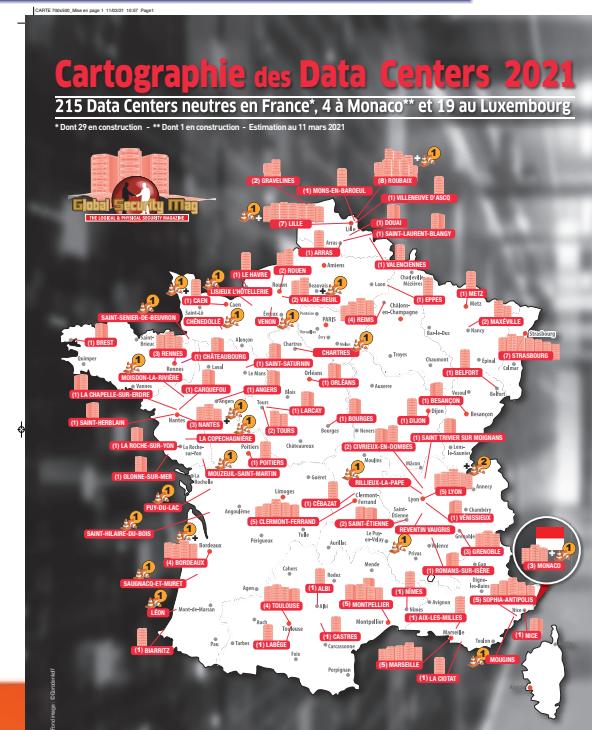
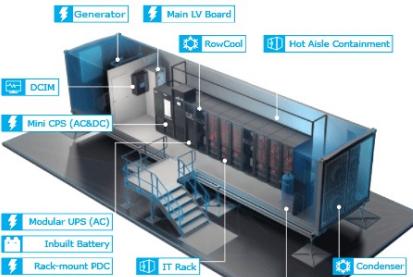
- Consommation énergétique
- Impacts environnementaux
- Santé
- Facteur d'accélération
- Facteur d'obsolescence
- Effets systémiques
- Effets rebonds



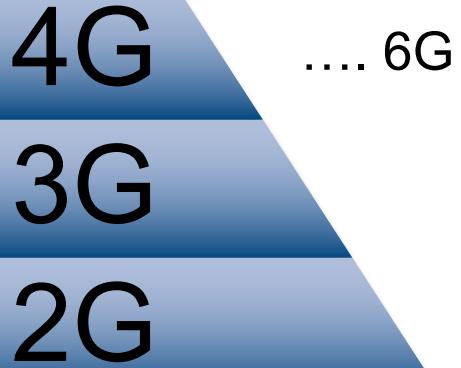
# Empilement numérique forcé par les usages/ hébergeurs/ prédictions : les datacentres !



China Telecom- Inner Mongolia Information Park  
1.2 M serveurs – 3 B\$ - 150 MW  
Kolos Norvège 2019-2020: 70 MW -> 1 GW

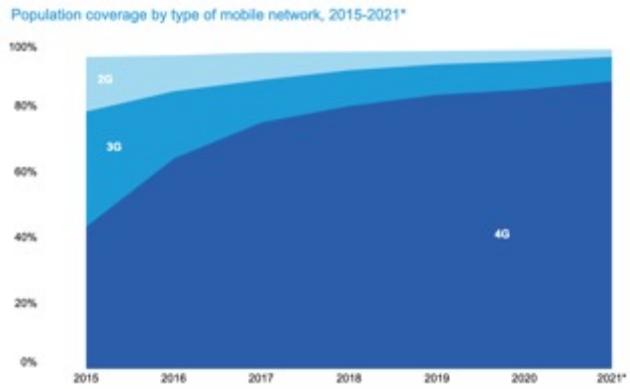


# 5G Empilement télécom

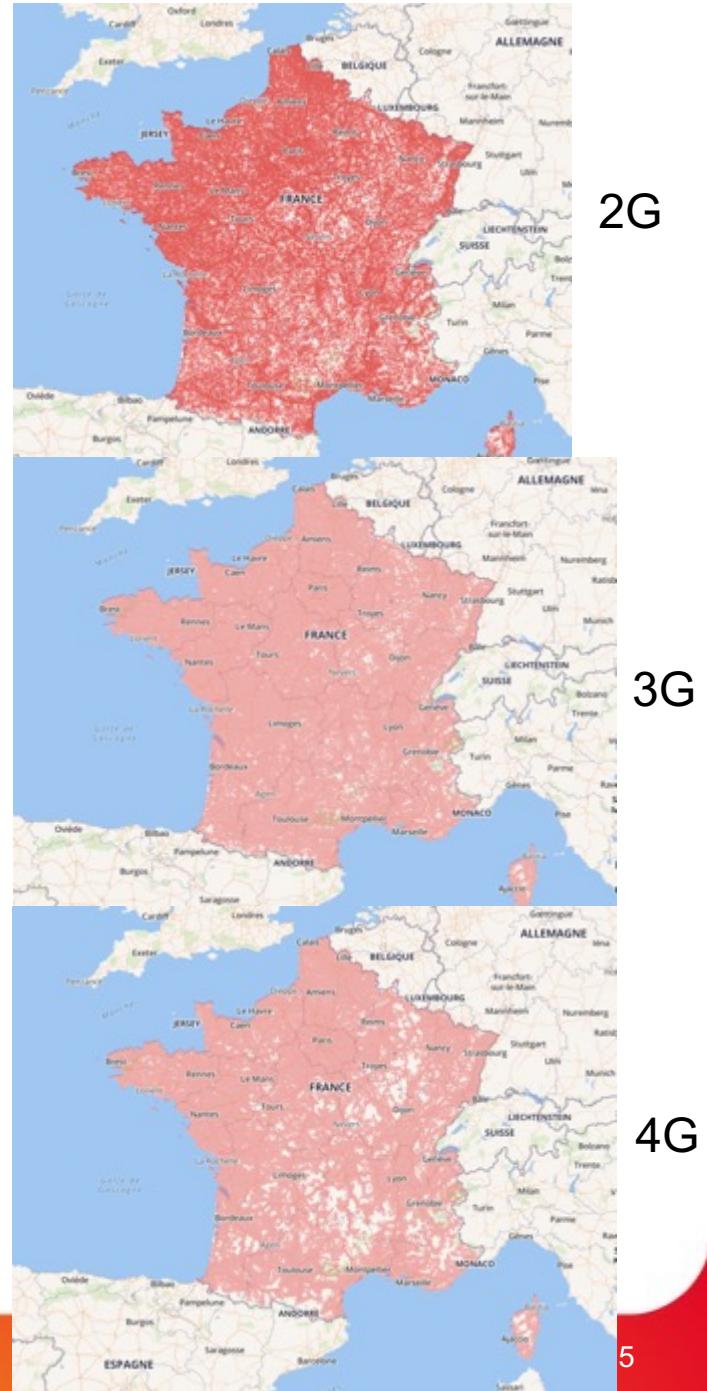


## Moteurs d'empilement :

- Meilleure QoS : latency, bande passante
- Plus grande infrastructure
- Plus d'utilisateurs/clients
- Plus de services



ITU - International  
Telecommunication Union -  
Measuring digital  
development - Facts and  
figures - 2021



Arcep

Note: The values for 2G and 3G networks show the incremental percentage of population that is not covered by a more advanced technology network (e.g. 95% of the world population is covered by a 3G network, that is 7% + 88%).

Source: ITU  
\* ITU estimate

# Empilement des usages

De l'IA partout... ?

100 processeurs par voiture autonomes  
?

Des milliards d'objets connectés avec  
services Edge/Cloud

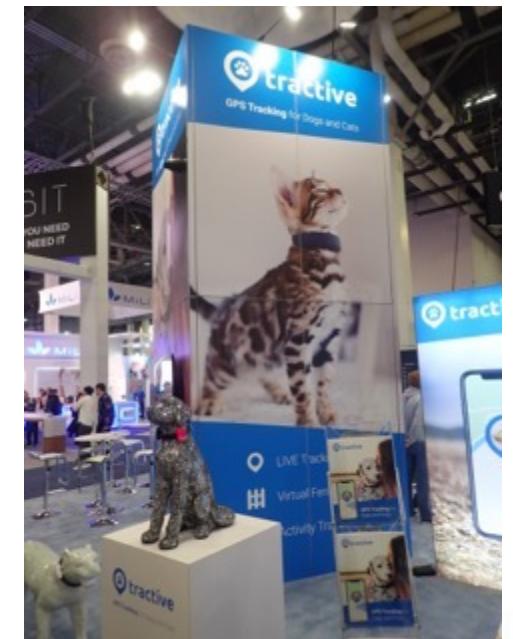
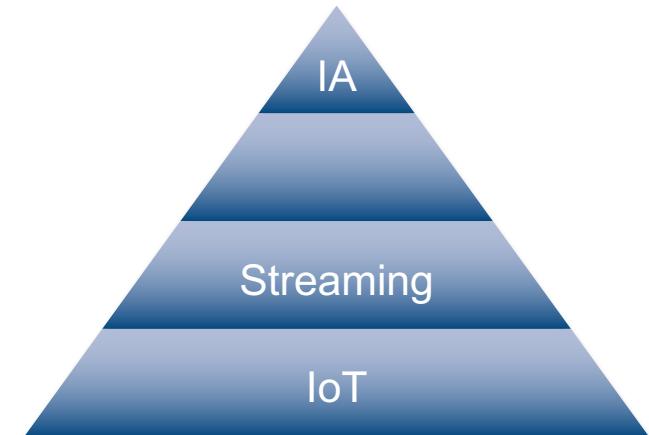
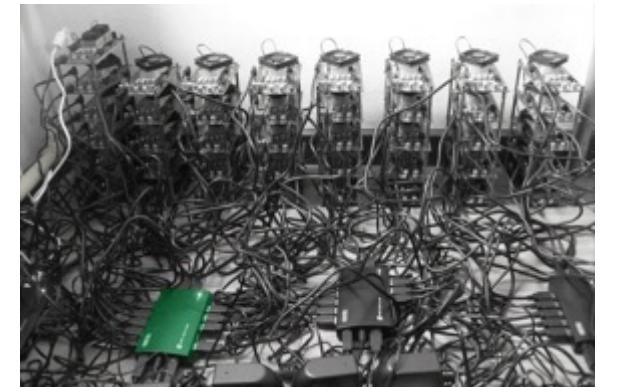
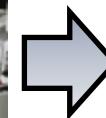
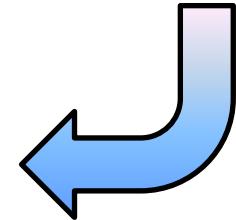


Image du jour (17h03) générée par StableDiffusion –  
« Exposé numérique et environnement au GDR IG-RV »

# Pour assurer cette empreinte, un cycle de vie mondialisé multi-impactant



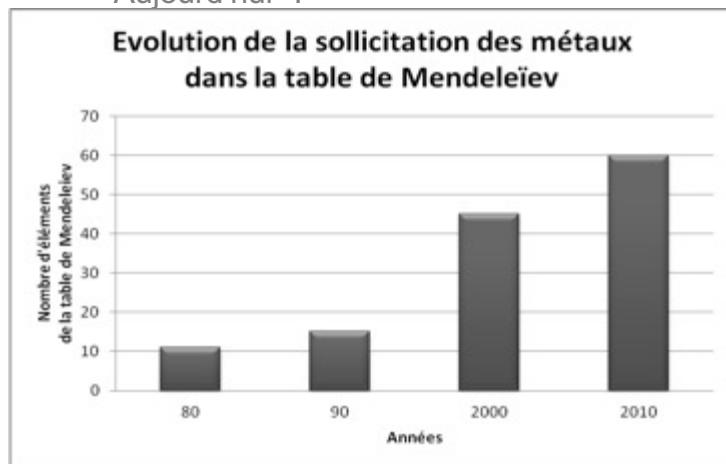
REUTERS/Benoit Tessier



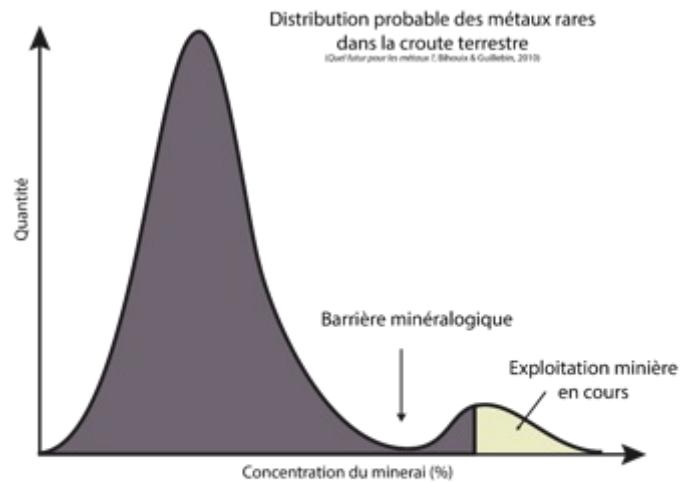
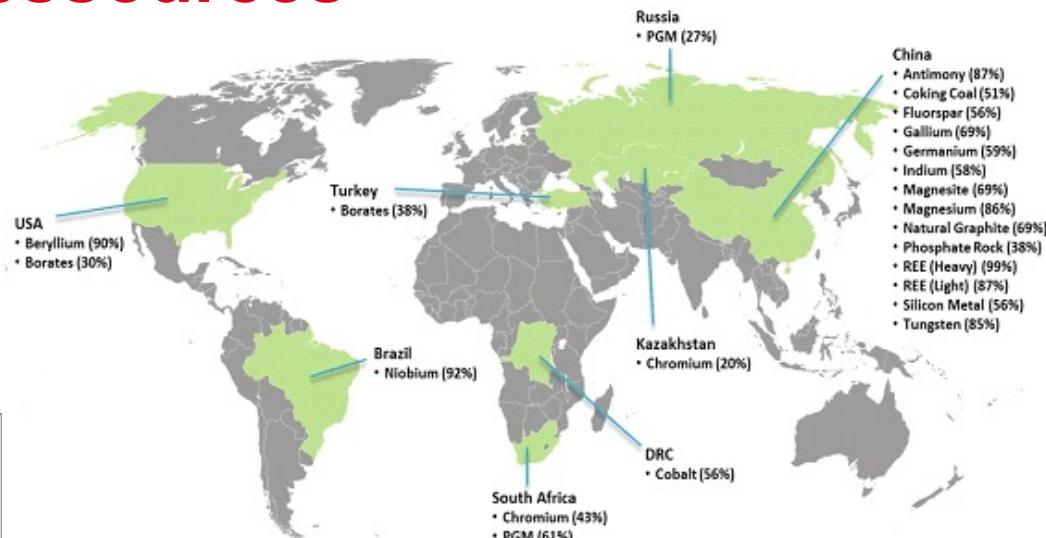
# Extraction des ressources

## Les métaux

- Jusqu'au Moyen Age, on utilisait 7 métaux
- Jusque dans les années 1980, on utilisait une dizaine de métaux dans les puces des ordinateurs
- Aujourd'hui<sup>1</sup>:



(1) OPECST (2011), Les enjeux des métaux stratégiques : le cas des terres rares, 84p



# Extraction des ressources

Conflits générés par l'exploitation minière<sup>1</sup> : manque de concertation avec les populations locales, manque d'information sur les conséquences environnementales, mauvaise distribution des revenus de la mine, problèmes d'accès à l'eau, ...

Travail des enfants dans les mines, métaux de sang...



Consoglobe

Congo/Numbi/Coltan - Radio-Canada/Frédéric Lacelle

- (1) <http://www.miningfacts.org/Collectivites/L-exploitation-miniere-cause-t-elle-des-conflits-sociaux/>
- (2) <http://www.cairn.info/revue-ecologie-et-politique1-2007-1-page-83.htm>

# La difficile question des réserves

Pour les **métaux porteurs**, les estimations correspondent à la **durée de vie** avant épuisement des **réserves actuelles** pour la consommation actuelle ou avec accroissement fixé.

		Ag	Cu	In	Ga	Ge	Li	Ta	REE	AI
TIC	Usage	Contacts	Cables	Ecrans	Leds	Wifi, FO	Batteries	LCD, Cond	LCD, aimants	Transistor, élect, refr. CPU
	% Prod	21%	42%	>50%	40%	15%	20%	66%	20%	
Réserves (ans)	15-30	40	10-15	10-15	10-15	Grandes	150	Grandes	50	
Substitution	Faible	Faible	Mat Orga.	Faible	Si	Ni, Zn, Cd, Pb	Faible	Faible	Oui	

Mais réserves augmentent avec la demande et l'efficacité d'extraction !  
(cas du Cu) -> problème volume à déplacer

D'après DREZET, 2012 et VIDAL, 2016

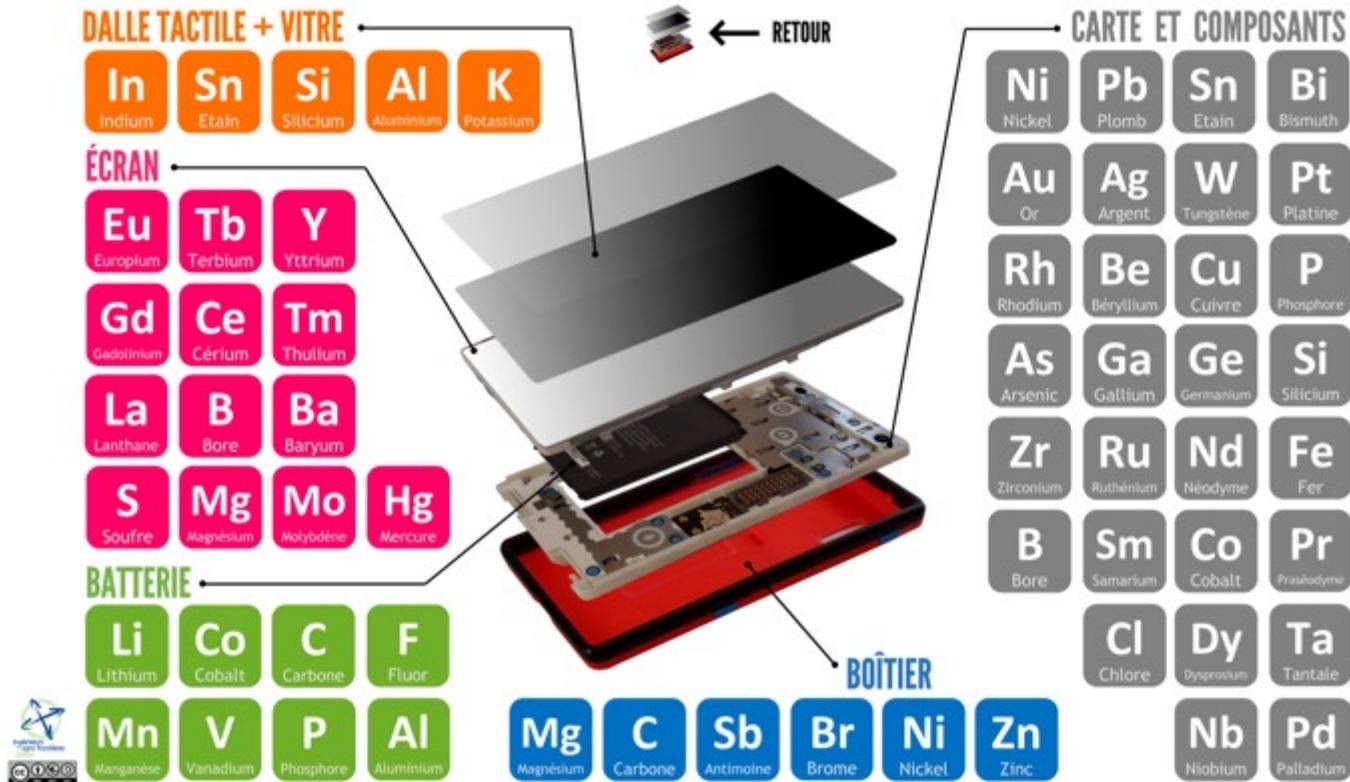
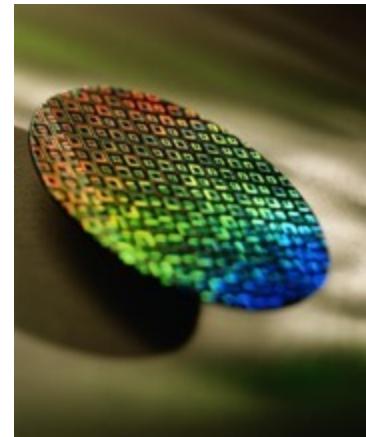
# Fabrication

Des métaux, silice, plastiques

Meilleur, plus petit, plus rapide, plus fiable :

Gravure des wafers : 10nm, 7nm, 5nm, 3nm (2022)

(Taille du virus VIH: 90 nm - SARS-CoV-2 : 50-140 nm)



Source : Ingénieurs sans frontières

# Usage : consommation électrique / GES

Environ 10% de la consommation électrique mondiale

Environ 3.5% des GES – en hausse de 6% par an

6% de croissance /an : Cela  
signifie un doublement tous les 12  
ans

Source : Shift project - Impact environnemental du numérique : tendances à 5 ans et gouvernance de la 5G – 30 Mars 2021

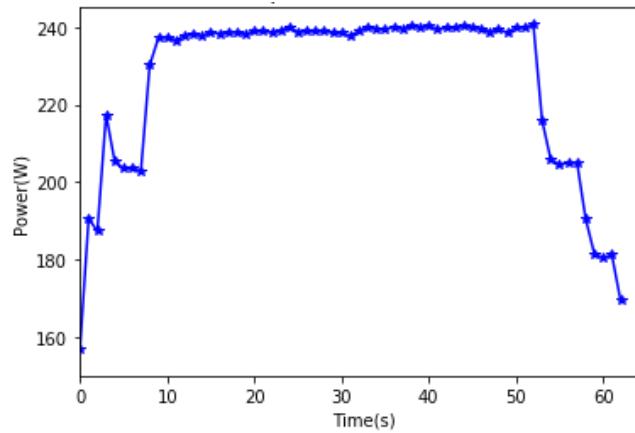
## En France : (Rapport Arcep Mars 2023)

- 2,5 % de l'empreinte carbone nationale
- Perspective : +40% à l'horizon 2040 (6.7% en France)
- Terminaux (65 à 92%), Datacenters (4 - 20%) Réseaux (4 à 13%).

# Comprendre l'usage : mesurer



Mesurer finement en usage (puissance et énergie)



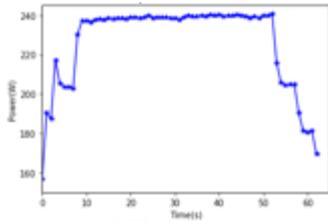
Sondes logicielles et matérielles



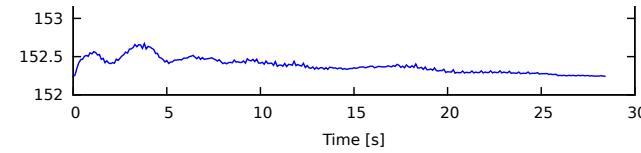
# Comprendre l'usage : mesurer de bout en bout



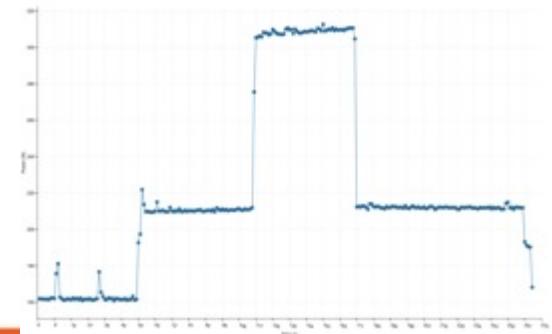
Mesurer finement en usage (puissance et énergie)



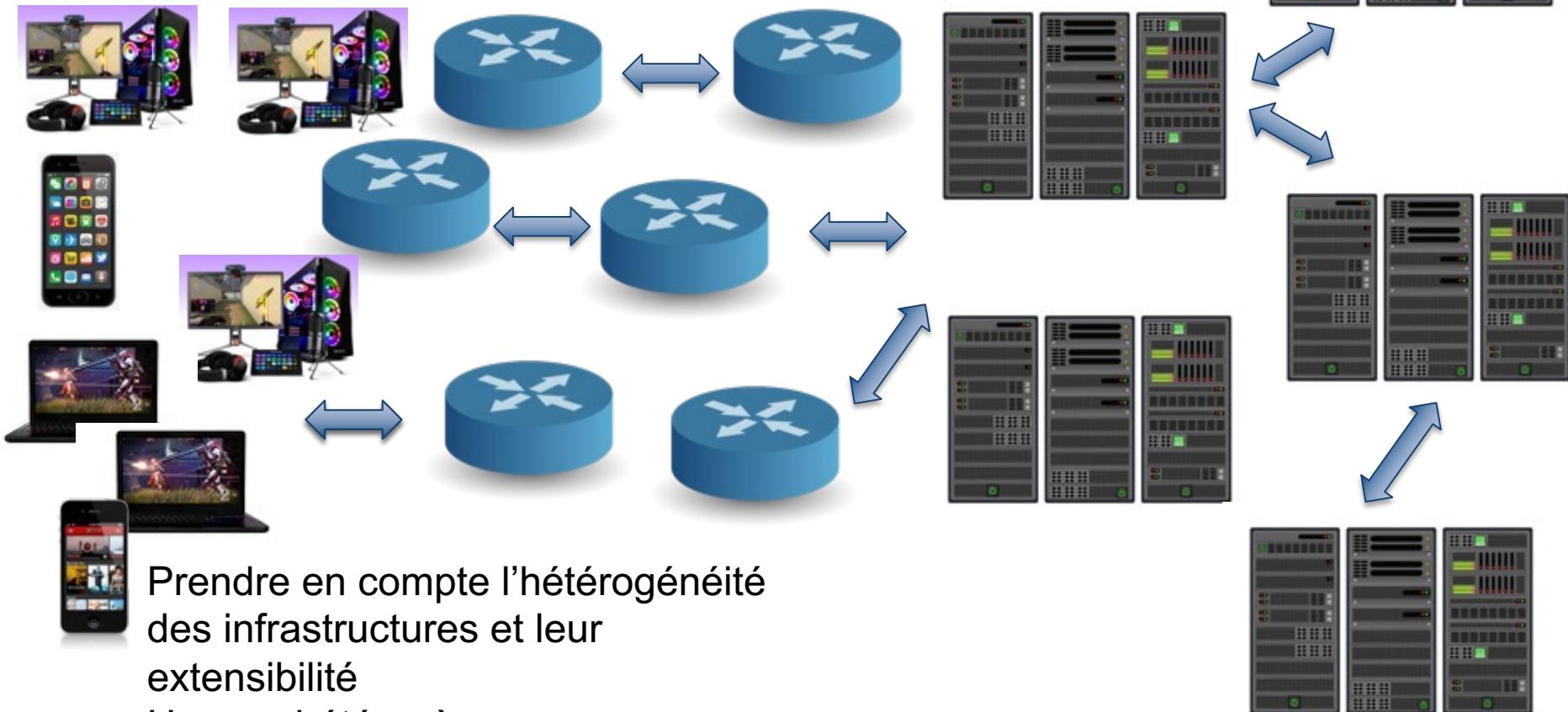
Mesurer de bout en bout (multi équipements, propriétaires)



Matériels et logiciels partagés



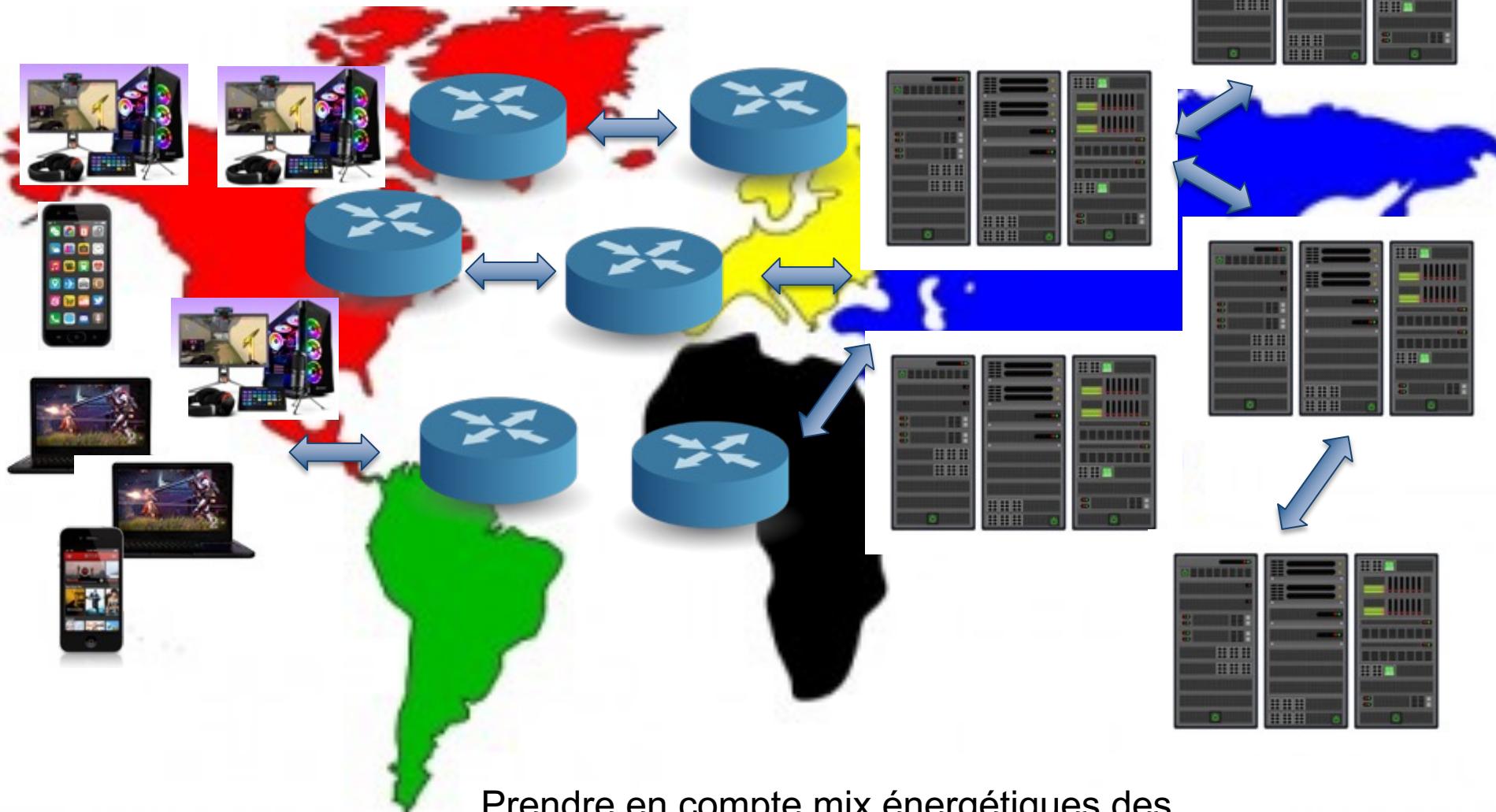
# Comprendre l'usage : mesurer et estimer



Prendre en compte l'hétérogénéité  
des infrastructures et leur  
extensibilité  
Usages hétérogènes  
Réactions dynamiques  
Equilibrage de charges

Mesurer de bout en bout (multi  
équipements, propriétaires)

# Comprendre l'usage : mesurer et estimer



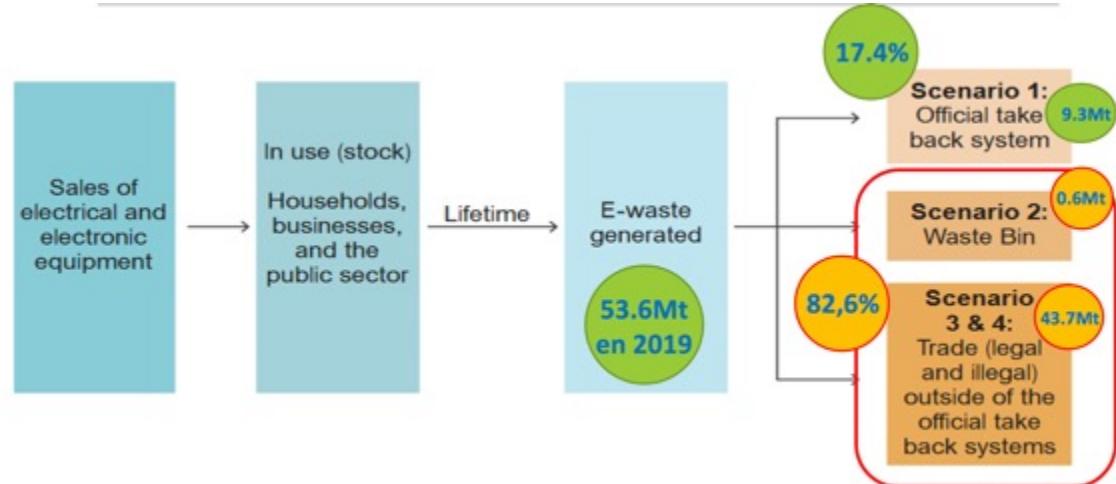
Prendre en compte mix énergétiques des infrastructures -> métriques environnementales

# Fin de vie : DEEE : Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques

## Le monde croule sous les déchets : Océan de plastique / Enfouissement permanent / Décharges sauvages

Montée en puissance du numérique : Prévisions Objets connectés : 50 Milliards en

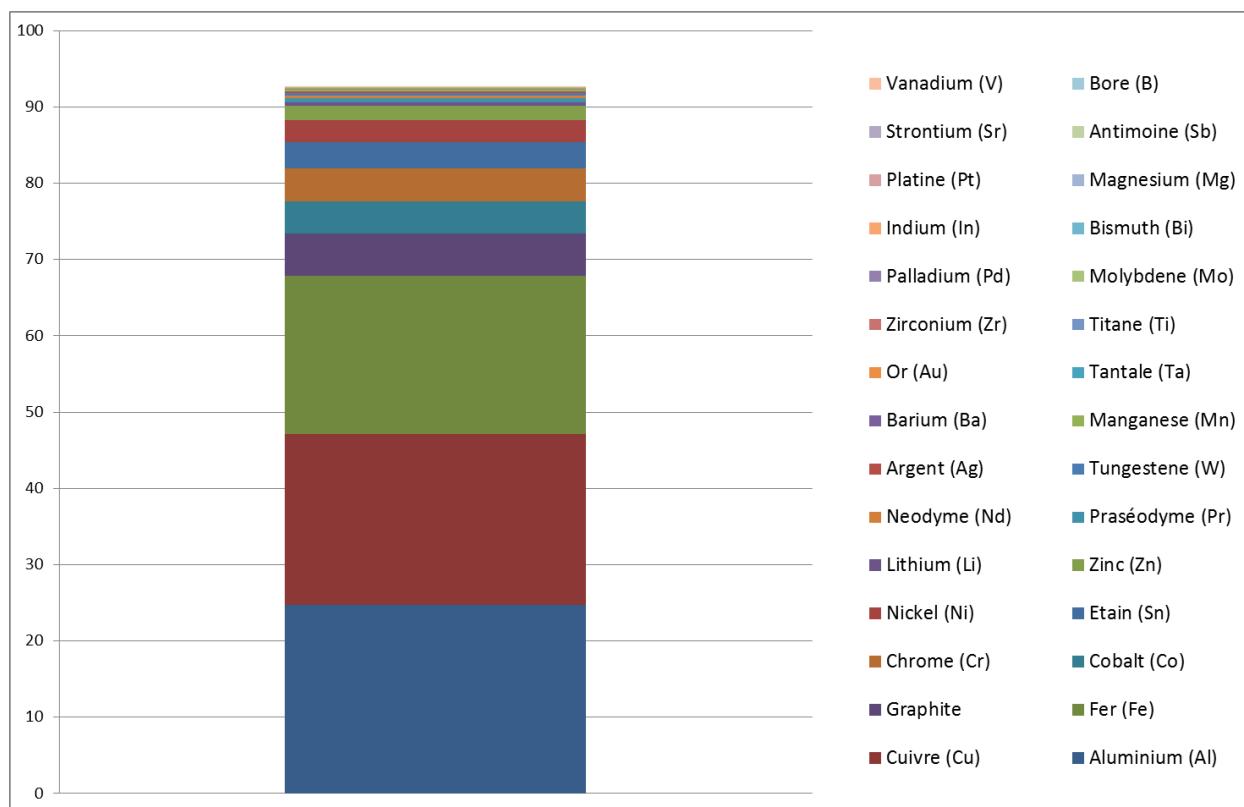
2023 -> 50 milliards ? -> à la poubelle en 2026 ? En 2030 : 100 Milliards ?



Baldé, C.P., Wang, F., Kuehr, R., Huisman, J. (2015),  
The global e-waste monitor – 2014, United Nations University,  
IAS – SCYCLE, Bonn, Germany. Dernière mise à jour : 2020

Eléments	Poids en g
Aluminium (Al)	24,76
Cuivre (Cu)	22,39
Fer (Fe)	20,72
Graphite	5,49
Cobalt (Co)	4,30
Chrome (Cr)	4,28
Etain (Sn)	3,41
Nickel (Ni)	2,92
Zinc (Zn)	1,84
Lithium (Li)	0,54
Praséodyme (Pr)	0,51
Neodyme (Nd)	0,32
Tungstene (W)	0,31
Argent (Ag)	0,24
Manganèse (Mn)	0,18
Barium (Ba)	0,10
Tantale (Ta)	0,07
Or (Au)	0,05
Titane (Ti)	0,04
Zirconium (Zr)	0,04
Molybdene (Mo)	0,03
Palladium (Pd)	0,03
Bismuth (Bi)	0,02
Indium (In)	0,01
Magnesium (Mg)	0,00
Platine (Pt)	0,00
Antimoine (Sb)	0,00
Strontium (Sr)	0,00
Bore (B)	0,00
Vanadium (V)	0,00

## Composition & Poids des éléments présents dans un smartphone



Source : orange

# Fin de vie : recyclage

Exemple : Recycleur européen : Umicore (Belgique) :

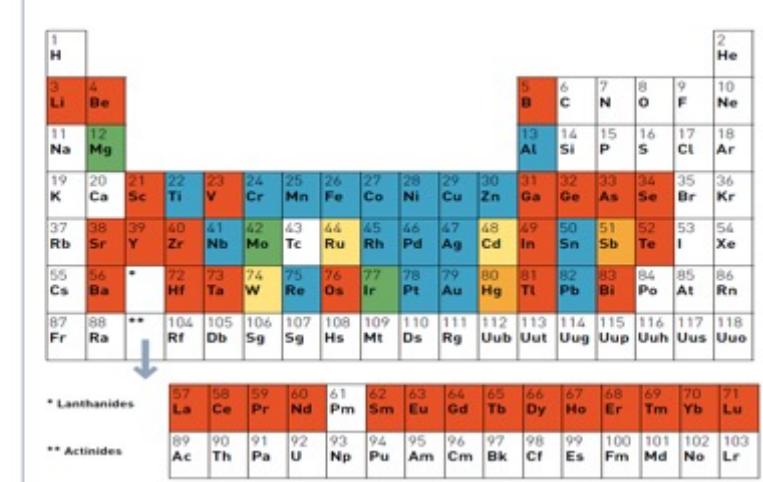
17 métaux sur 60 peuvent être recyclés et réinjectés/revendus sur les marchés

100 000 smartphones (sans batterie) = 8.5 tonnes

Récupération (pyrométallurgie, hydrométallurgie) :

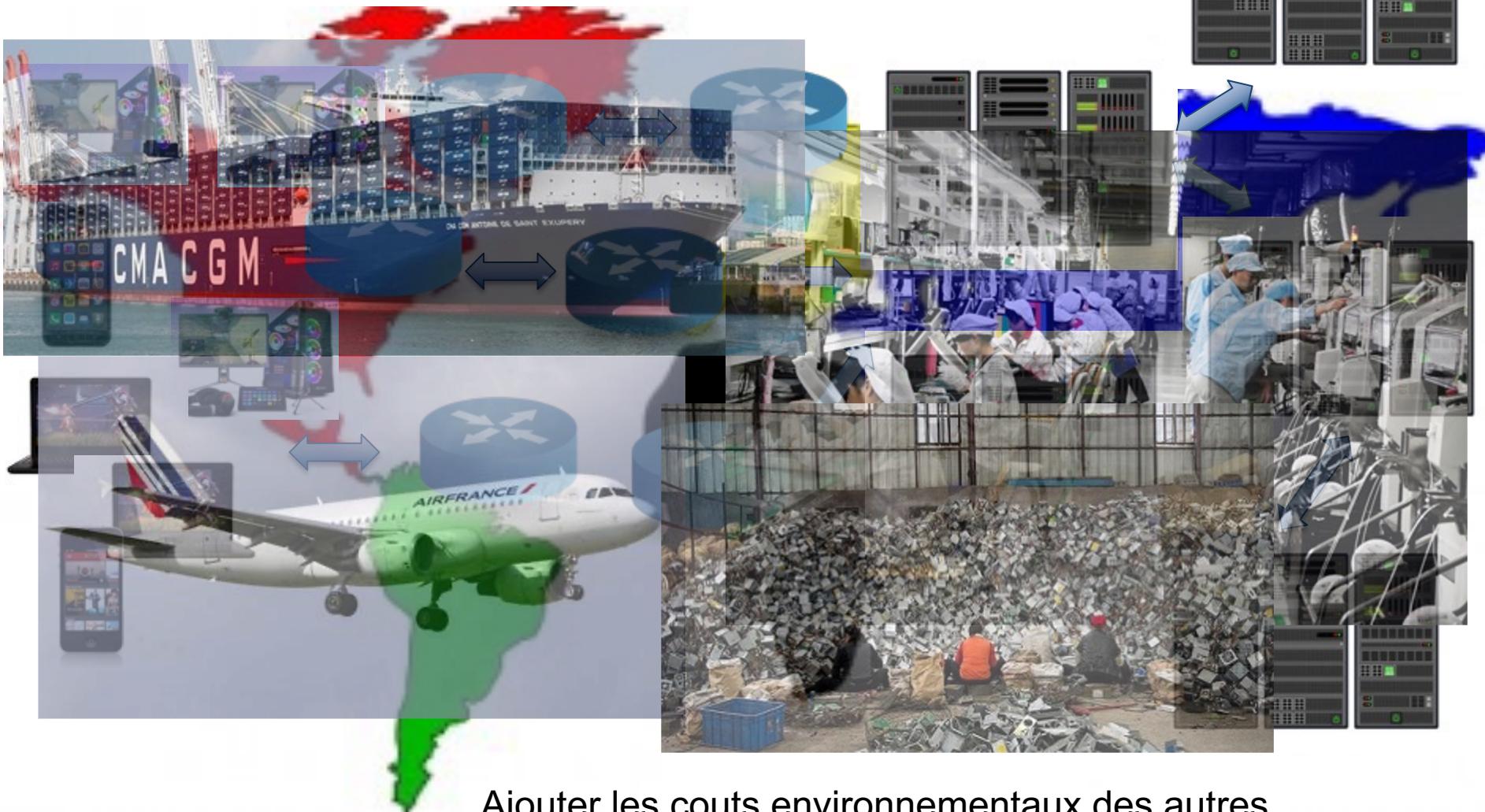
- Or: 2 kg
- Argent : 9 kg
- Palladium : 250 g
- Cuivre : 900 kg

Palladium 1.3K once / Or 1.8K once – utilisé dans condensateurs électroniques 15% de la production mondiale)



Source : UNEP / Recycling rates of metals 2011

# Comprendre l'usage : mesurer et estimer



Ajouter les couts environnementaux des autres étapes du cycle de vie

# Cycle de vie : impacts environnementaux



**Consommation d'énergie primaire:** consommation des ressources naturelles énergétiques



**Changement climatique:** émissions de gaz à effet de serre



**Destruction de la couche d'ozone:** dommages effectués à la couche d'ozone



**Toxicité humaine:** émissions dans l'air, l'eau, et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour l'homme



**Ecotoxicité aquatique:** émissions dans l'air, l'eau, et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour la faune et la flore aquatique



**Eutrophisation des eaux:** diminution de la faune et la flore aquatique due à la formation excessive d'algues consommatrices d'O<sub>2</sub> favorisée par une concentration excessive de nutriments



**Consommation d'eau:** consommation d'eau tout au long du cycle de vie

Slide F. Berthoud

# Et les effets sur la santé

- Impacts sur le développement du langage
- Troubles du sommeil (lumière, contenu)
- Désocialisation
- Troubles hormonaux
- Exposition aux perturbateurs endocriniens
- Impacts des ondes
- Capture de l'attention



**Conf EcolInfo « Ecrans : menaces sur la santé » – 09 Mai 2023**

<https://ecolinfo.cnrs.fr/2023/02/27/conf-ecolinfo-ecrans-menaces-sur-la-sante-09-mai-2023/>

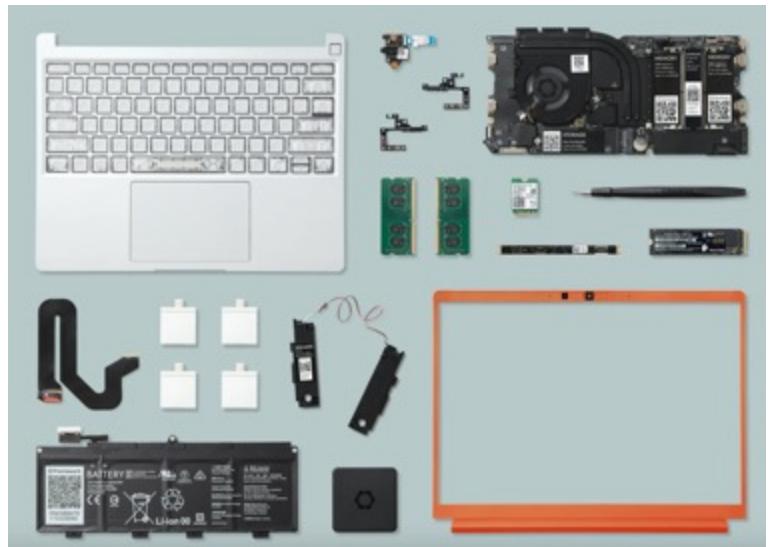
# Quelques pistes d'améliorations

...On ne parlera pas des boites mail !

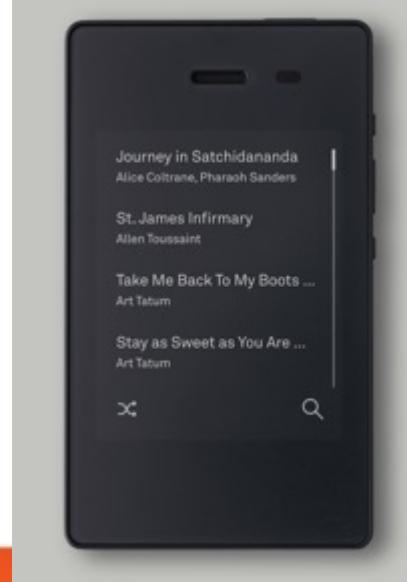
Appliquer les « 8R » : Réfléchir, Refuser,  
Réduire, Ralentir, Rationnaliser, Ré-utiliser,  
Réparer, Recycler

ANF2023 (EcoInfo) 20-24 Novembre 2023 La Rochelle

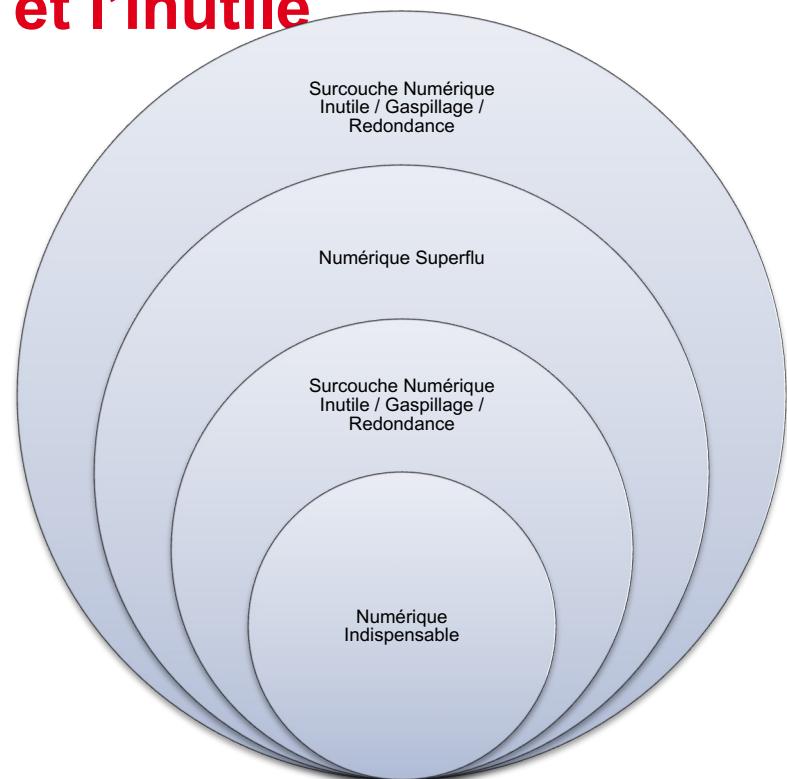
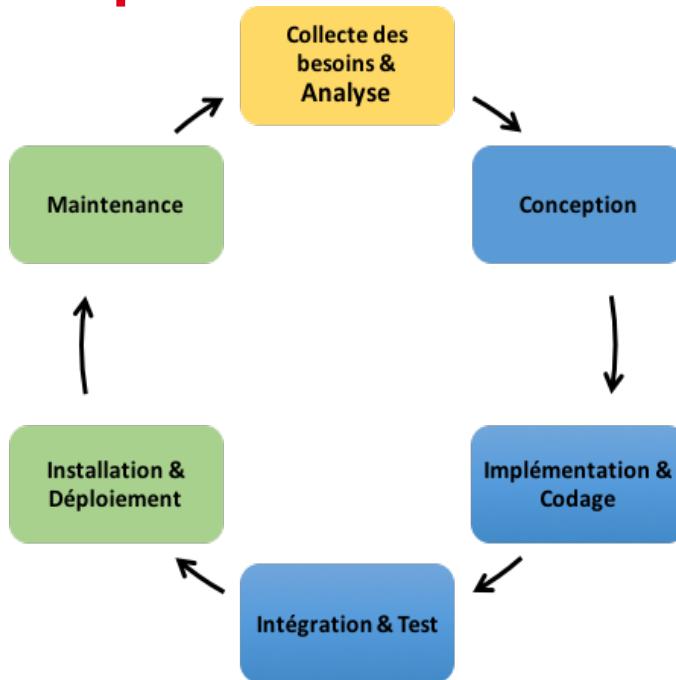
# Posséder moins, posséder mieux, plus longtemps...



Why !  
Framework  
Fairphone  
Light Phone II



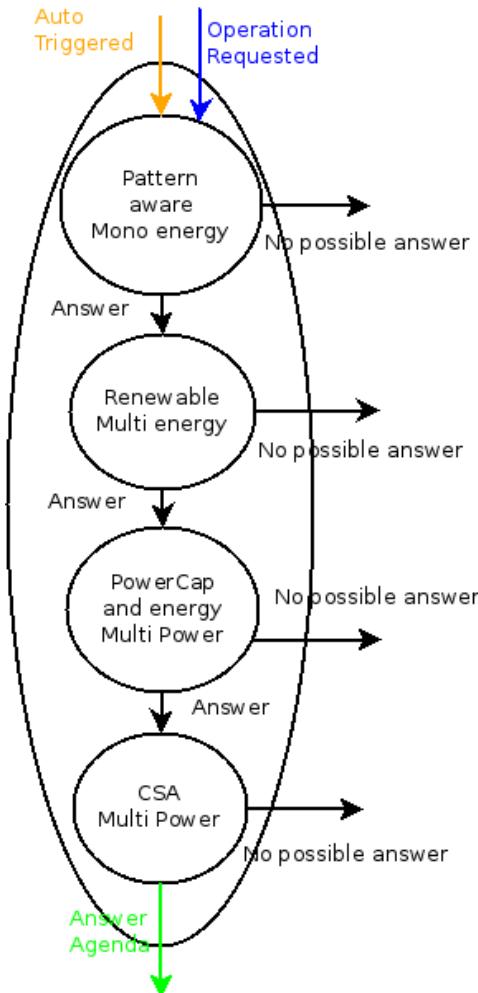
# (Re)concevoir : maîtriser le développement des services numériques - Enlever le superflu et l'inutile



- Sur dimensionnement massif pour la performance -> sortir de cette zone de confort créée -> sobriété
- Favoriser l'éco-conception (matérielle et logicielle)
- Multiples leviers technologiques à maîtriser
- Combiner réduction impacts avec tolérance aux pannes, sécurité, et QoS (multi-métriques)

Plaquette Ecolinfo. « Je code : les bonnes pratiques en éco-conception de service numérique à destination des développeurs de logiciels » 2020.  
<https://hal.inria.fr/hal-03009741v2>

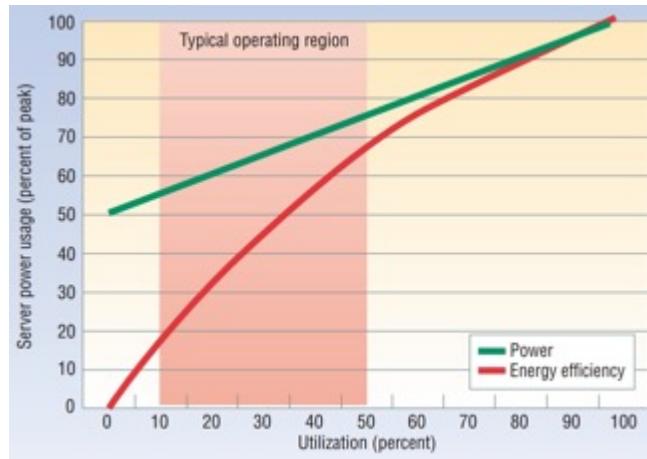
# Eteindre et allumer... c'est compliqué...



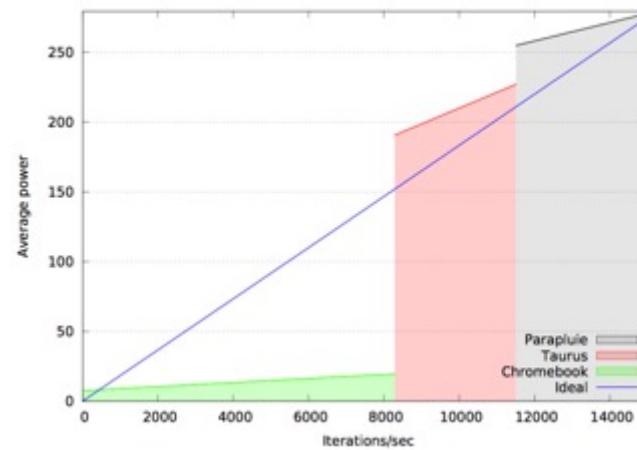
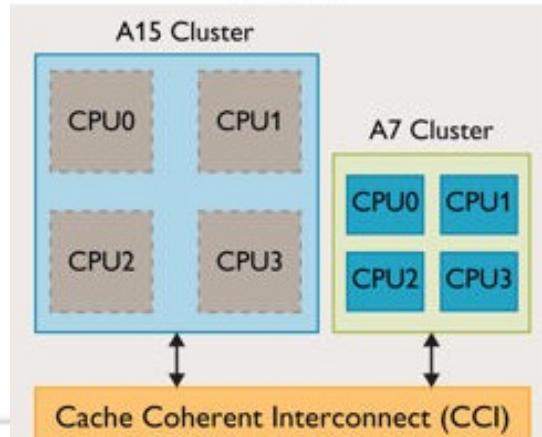
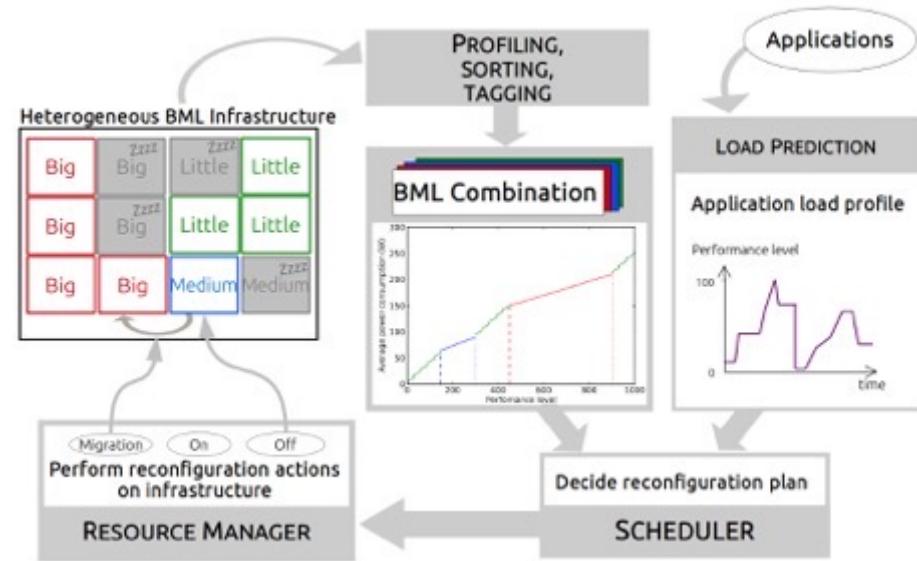
Anne Benoit, Laurent Lefevre, Anne-Cécile Orgerie and Issam Rais. "Reducing the energy consumption of large-scale computing systems through combined shutdown policies with multiple constraints", The International Journal of High Performance Computing Applications, Sage Publisher, July 2017

# A la recherche de la proportionnalité énergétique

- Hybrid computing architectures : low power processors, co processors, GPUs...
- Supporting a “Big, Medium, Little” approach : the right processor at the right time

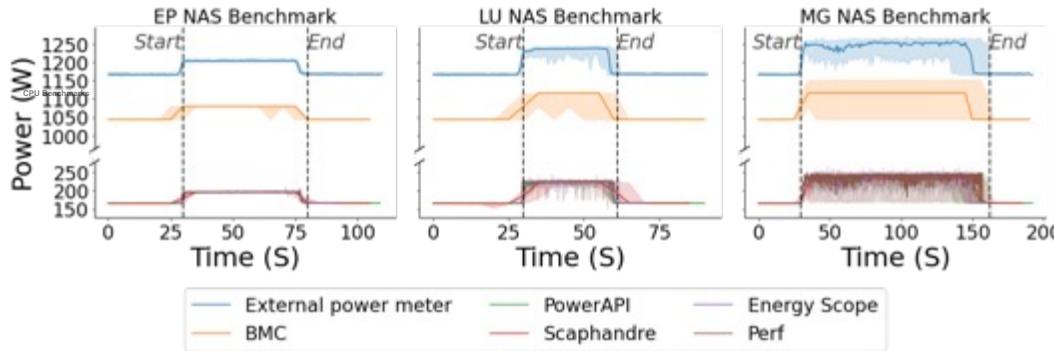


« *The case for Energy-Proportional Computing* »  
L. A. Barroso and U. Hözle, IEEE Computer, 2007

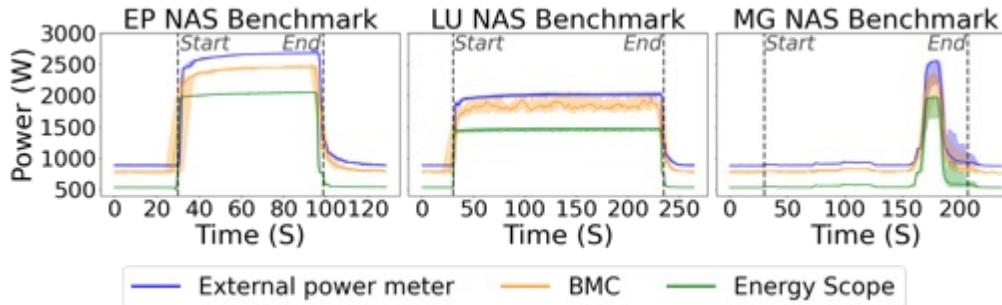


Violaine Villebonnet,  
Georges Da Costa,  
Laurent Lefevre,  
Jean-Marc Pierson  
and Patricia Stolf.  
"Big, Medium, Little" :  
Reaching Energy  
Proportionality with  
Heterogeneous  
Computing  
Scheduler", Parallel  
Processing Letters,  
September 2015

# Des capteurs matériels aux capteurs énergétiques logiciels



Breakend/experiment-  
impact-tracker



Energy scope



28

« FrugalCloud » Inria&OVHcloud

Mathilde Jay, Vladimir Ostapenco, Laurent Lefevre, Denis Trystram, Anne-Cécile Orgerie and Benjamin Fichel. "An experimental comparison of software-based power meters: focus on CPU and GPU", CCGrid 2023 - 23rd IEEE/ACM international symposium on cluster, cloud and internet computing, Bangalore, India, May 1-4, 2023

## **Questionner les usages**

## **Prendre en compte les effets systémiques**

**-→ Exposé de Peter !**

# Conclusions

- Limiter le gaspillage et surdimensionnement / réduire la consommation
  - Disposer de chiffres qui fassent consensus (base impact Ademe, base NegaOctect)
  - Risque principal : GreenIT -> effet rebond
  - Sortir les résultats de recherche des labos et les confronter à la réalité du numérique en production- exemple : Défi « FrugalCloud » Inria&OVHcloud
  - Attention au Green Washing ! IT4Green ..
  - Sortir de la zone de confort créée par le sur-dimensionnement -> sobriété
  - Combiner réduction énergétique avec tolérance aux pannes, sécurité, et QoS (multi-métriques)
  - Les réponses ne sont pas que technologiques, il faut aussi repenser notre usage/dépendance au numérique -> explorer les multiples facettes de la sobriété numérique
- 
- Un nouveau numérique à construire : élastique, intermittent, résilient, lowtech, frugal... ambitieux, indispensable, enthousiasmant !

# Questions ?



[laurent.lefevre@inria.fr](mailto:laurent.lefevre@inria.fr)