

# Impacts environnementaux du numérique et du *big data*

Guillaume LAVOUE

Centrale Lyon – ENISE

[guillaume.lavoue@enise.fr](mailto:guillaume.lavoue@enise.fr)

## Qui suis-je

- 2005 - Thèse en informatique
- 2006 - 2020 – Maître de conférence à l'INSA de Lyon, laboratoire LIRIS  
*Recherche en informatique graphique, traitement d'image et IA*
- Depuis 2020 - Professeur des universités à Centrale Lyon – ENISE  
*Responsable de l'équipe de recherche en réalité virtuelle*
- Depuis 2022 - Responsable de la transition numérique à Centrale Lyon

# D'où vient le contenu que je vais présenter

- Des ressources du GDS EcoInfo, en particulier de plusieurs supports :  
(<https://ecoinfo.cnrs.fr/ressources-2/communications/>)
  - « Impacts environnementaux du numérique : comprendre pour mieux agir », Inrae Occitanie, Gaël Guennebaud, 25 octobre 2022
  - « L'informatique verte... moins branchée ? », conférence du mardi de l'Espace des Sciences, Anne-Cécile Orgerie, 8 février, Rennes
  - « Données numériques : une immatérialité qui impacte », Didier Mallarino, 9 décembre 2021
  - « Mesurer et réduire les impacts du numérique », Formation IRD, Anne-Laure Ligozat et Francis Vivat, 7 juin 2021
  - « Impact du numérique et de l'IA sur l'environnement », CentraleSupélec, Anne-Laure Ligozat, 18 mars 2021
  - « Sobriété numérique », Evéline Riocreux, ENISE 2022.
- Des ressources de l'ADEME
- De diverses lectures



Soutenu par deux instituts du CNRS :

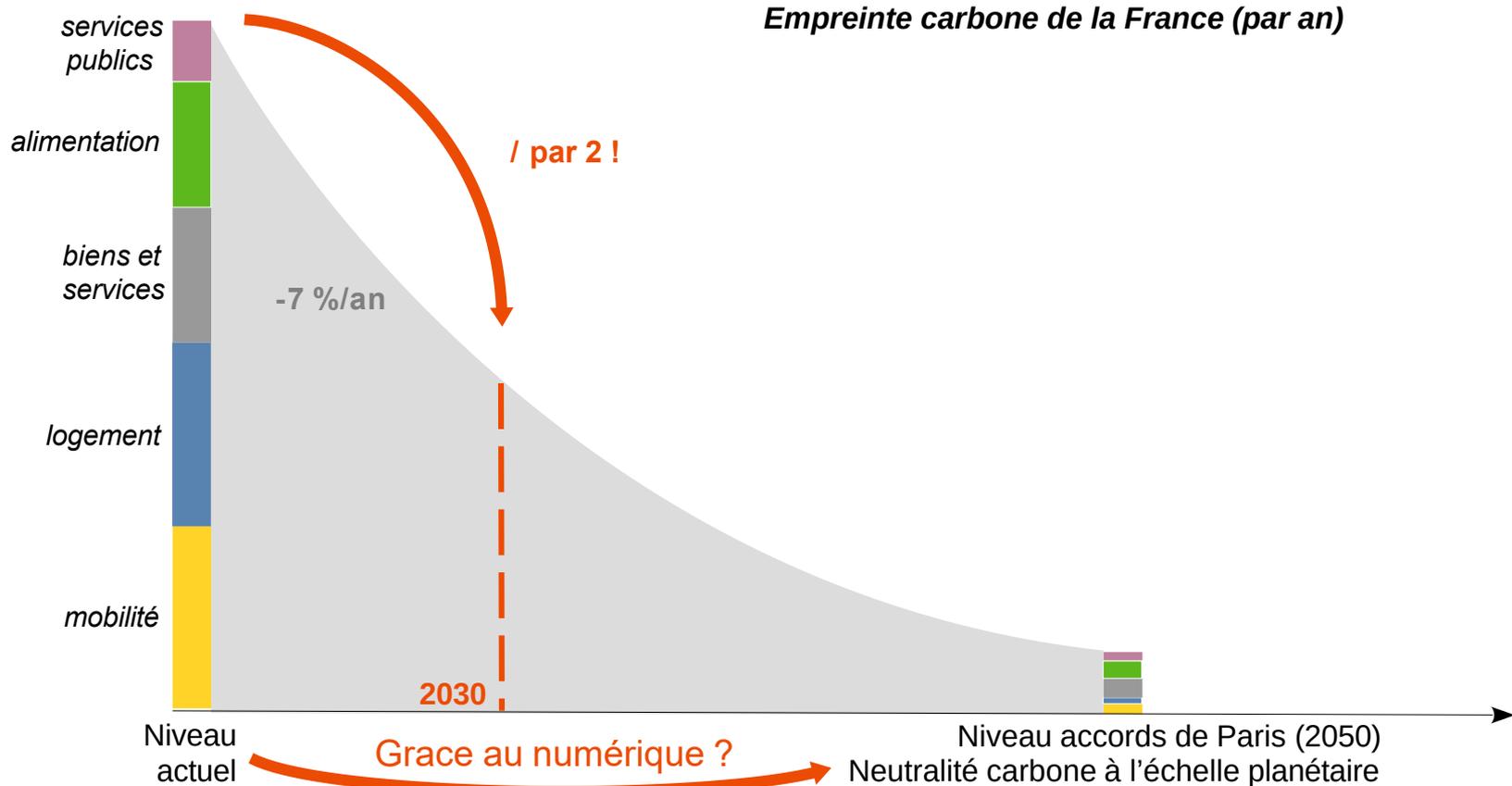
- informatique (INS2I)
- écologie et environnement (INEE)

> 50 ingénieurs et enseignants et/ou chercheurs de l'ESR partout en France

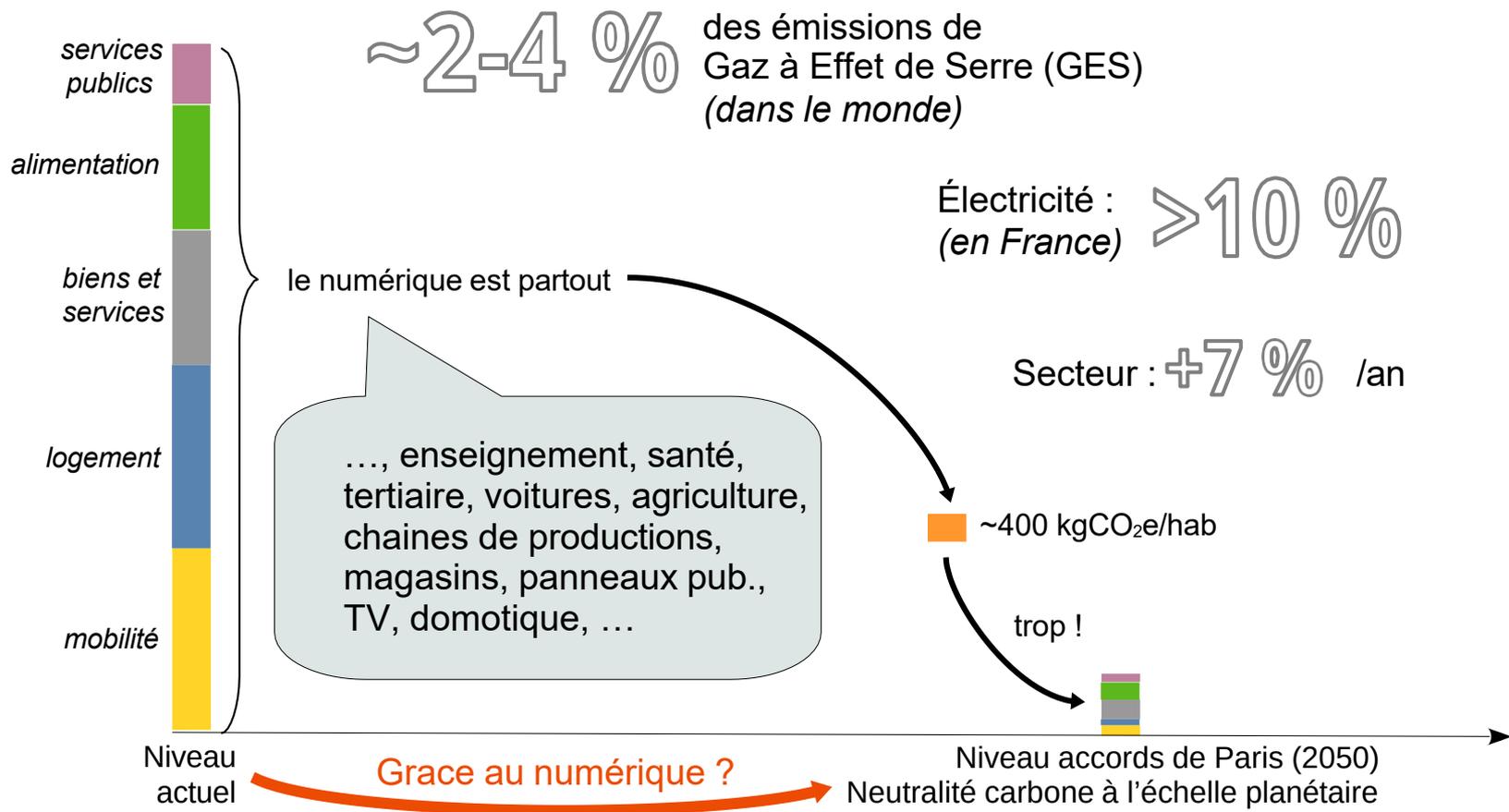
**Agir pour réduire les impacts environnementaux**

**et sociétaux (négatifs) des TIC**

# Enjeu climatique : pas plus de +2° ?



# Transition écologique → transition numérique ?



# Petit quiz

## Combien d'équipement numérique sont en service dans le monde ?

**34  
milliards**

dont 3,5 milliards  
de Smartphone

dont 1,4 milliards  
d'ordinateurs

Ci-dessous une liste des équipements pris en considération.

### Utilisateur

- Smartphones
- Téléphones mobiles
- Téléphones filaires et DECT
- Tablettes
- Ordinateurs portables
- Ordinateurs de bureau (UC)
- Ecrans
- Vidéo-projecteurs
- Boîtier TV (décodeur)
- TV
- Console de jeu
- Imprimantes
- Objets connectés

### Réseau

- Box particuliers + entreprises
- IP / PABX
- Point d'accès Wi-Fi
- Equipements actifs réseau (routeurs)
- Core network

### Centres informatiques

- Serveurs
- Autres équipements informatiques

# Petit quiz

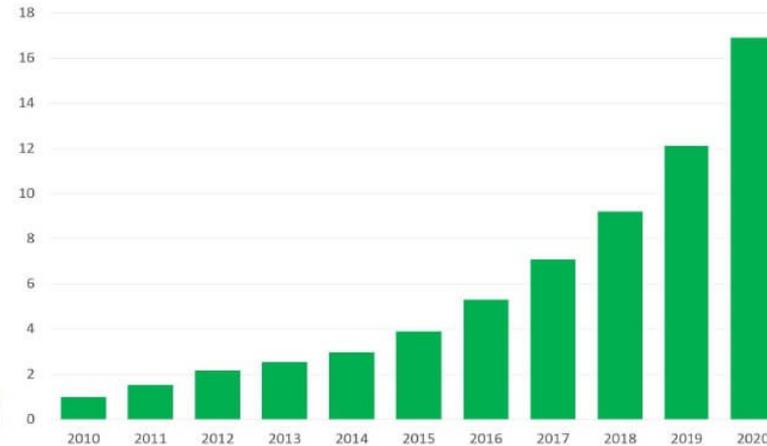
Quel  
pourcentage  
de l'humanité  
utilise  
internet ?

62%

1

## Internet et réseaux

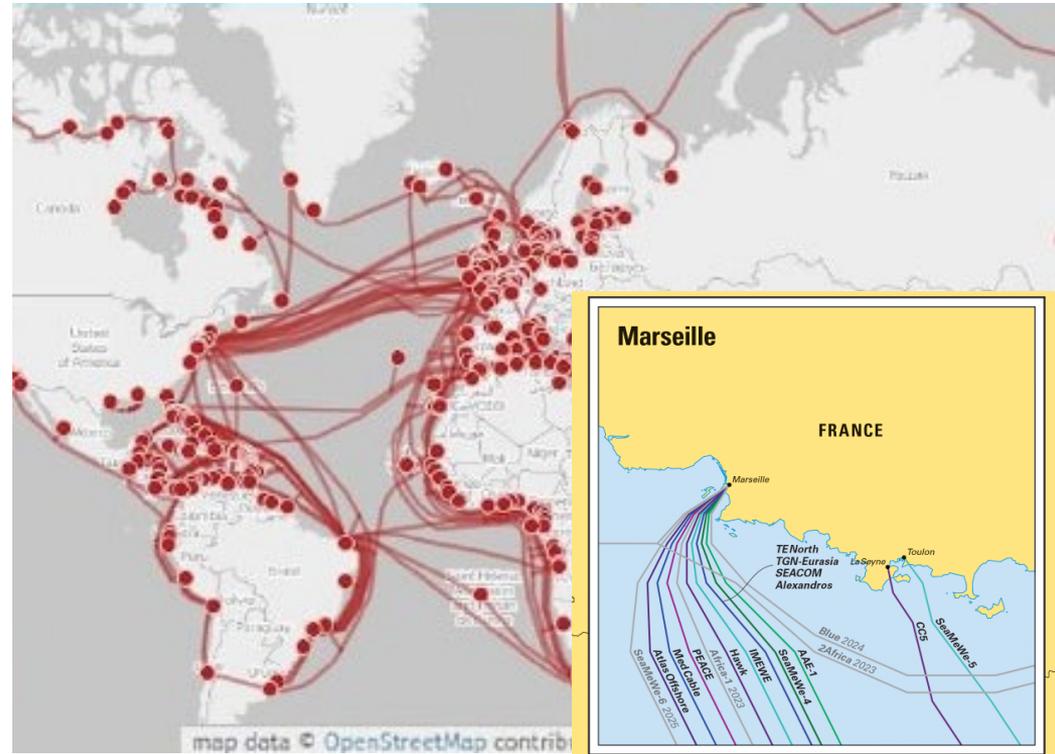
Trafic internet mondial (base 1 en 2010)



Source : International Energy Agency, "Global trends in internet traffic[...], 2010-2020"; 2021

# Petit quiz

Quel  
pourcentage  
du trafic  
internet  
mondial  
transite par  
des câbles  
sous-marins ?  
  
99%



## Petit quiz

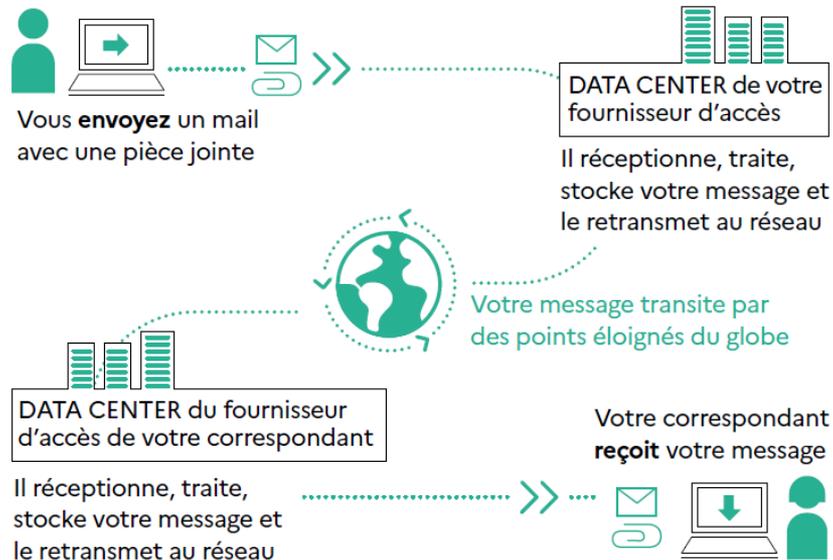
Le secteur du numérique consomme **10%** de la consommation électrique mondiale

À eux seuls, les centres de données représentent environ **2%** de cette consommation mondiale,

# Petit quiz

Quelle est la distance moyenne parcourue par une donnée numérique (mail, téléchargement, vidéo, requête web...):

# 15 000 km



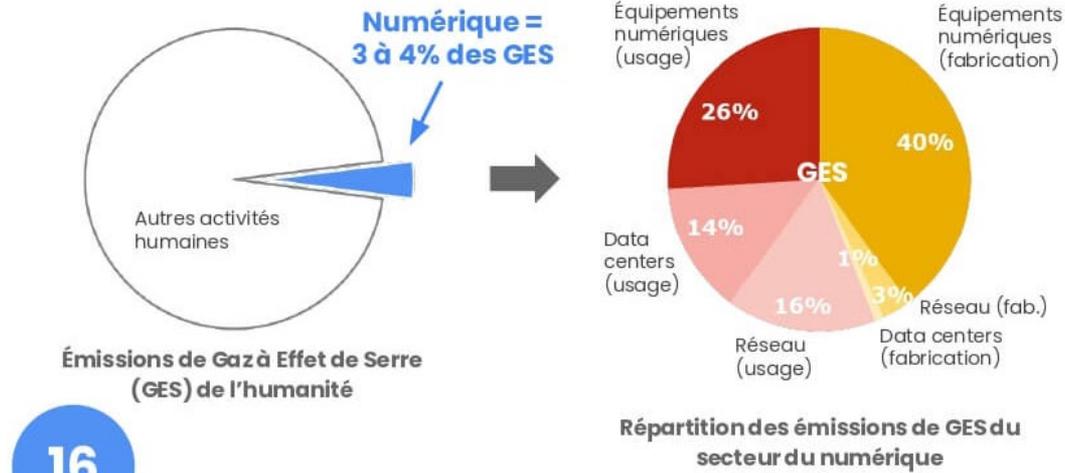
# Petit quiz

## Combien de kilos de ressources sont mobilisés pour la fabrication d'un ordinateur de 2 kg ?



# Petit quiz

Et d'un point de vue GES ? Quelle part des émissions de GES mondiales est due au Numérique ?

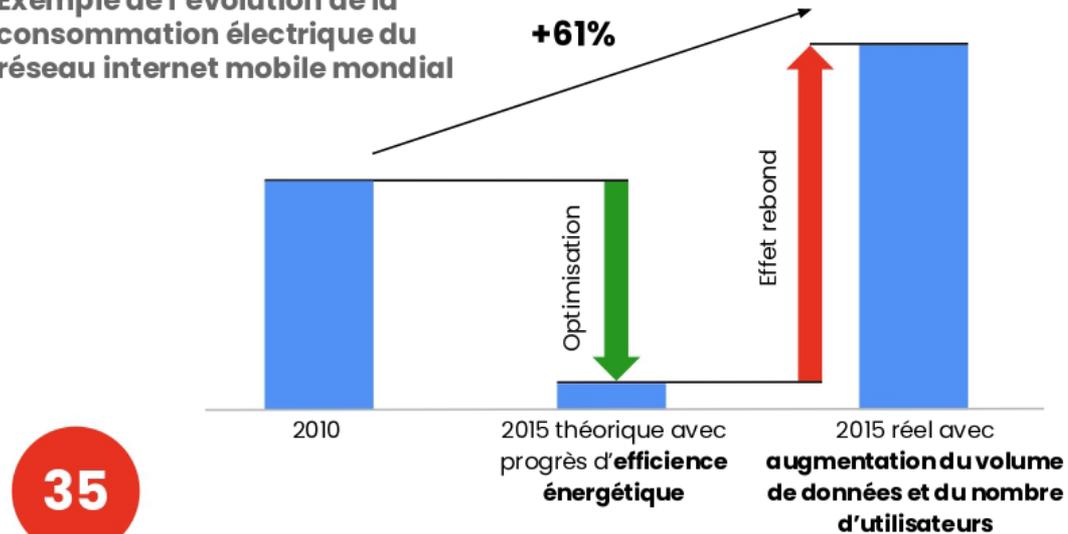


Source gauche : ARCEP, dossier "empreinte environnementale du numérique", 2022  
 Source droite : rapport de GreenIT.fr "Empreinte environnementale du numérique mondial", 2019

# Petit quiz

## Qu'est-ce que l'effet rebond ?

Exemple de l'évolution de la consommation électrique du réseau internet mobile mondial



Source données : étude "Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene", D. Bol, T. Pirson & R. Dekimpe, 2021

# Omni-présence du numérique

Équipements utilisateurs...



source : [ADEME](#)

# Omni-présence du numérique

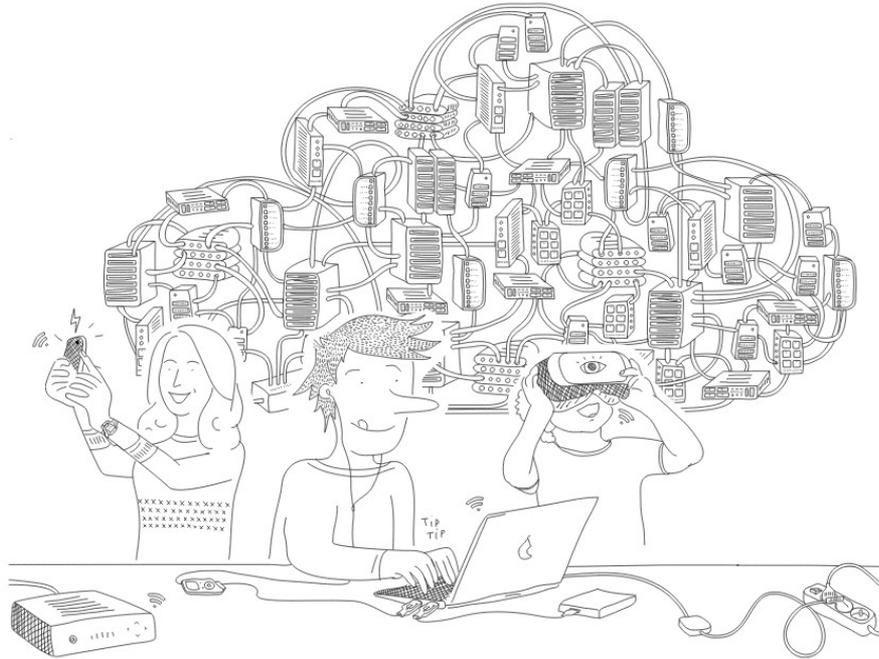
+ data centers et serveurs...



source : [ADEME](#)

# Omni-présence du numérique

+ infrastructure réseau



source : [ADEME](#)

# Le numérique, industrie non polluante ?

Empreinte environnementale du numérique très largement sous-estimée par ses utilisateurs :

- Miniaturisation des équipements
- Invisibilité des infrastructures services dans le *cloud*

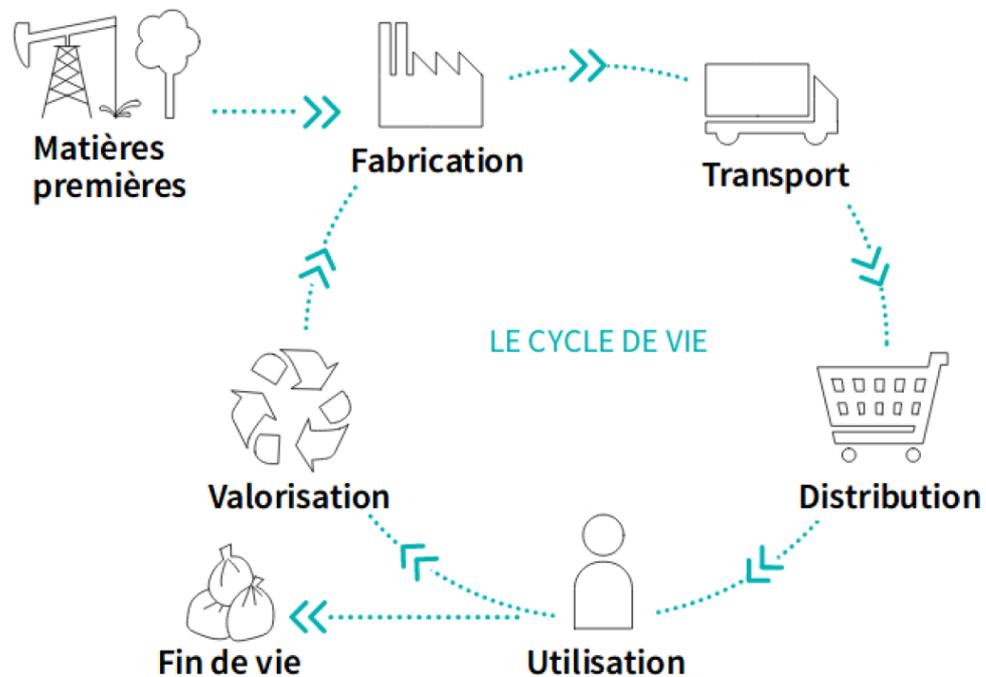
# Types d'impact du numérique

Type	Périmètre	TIC = solution	TIC = problème
<b>1er ordre</b> (directs)	technologie		Cycle de vie des TIC
<b>2e ordre</b> (indirects)	application	Optimisation Substitution	Induction Obsolescence
<b>3e ordre</b> (systémiques)	économie et société	Transition numérique Production et consommation durables	Interdépendance accrue Effets rebond

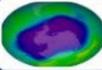
(Berkhout and Hertin, 2001 ; Hilty, 2008)

# Effets du premier ordre ☹️

Cycle de vie (source : Ademe)



# Quels impacts sur l'environnement ?

	<b>Consommation d'énergie primaire</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Consommation des ressources énergétiques</li></ul>
	<b>Changement climatique</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Émission de gaz à effet de serre</li></ul>
	<b>Destruction de la couche d'ozone</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Dommages causés à la couche d'ozone</li></ul>
	<b>Toxicité humaine</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour l'homme</li></ul>
	<b>Ecotoxicité aquatique</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour la faune et la flore aquatique</li></ul>
	<b>Déplétion des métaux</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Épuisement des métaux en provenance de la croûte terrestre</li></ul>
	<b>Consommation d'eau</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Consommation d'eau tout au long du cycle de vie</li></ul>

source : Françoise Berthoud, Ecoinfo

# Effets du deuxième ordre

- ☺ optimisation : réduit la consommation d'une ressource
  - chauffage intelligent
- ☺ substitution : remplace une autre ressource
  - liseuse remplace livres papier, positif si remplace l'impression de nombreux livres
- ☹ induction : stimule la consommation d'une ressource
  - imprimante : consomme plus de papier que machine à écrire
- ☹ obsolescence : raccourcit cycle de vie d'une autre ressource
  - ex de l'obsolescence logicielle sur les smartphones

# Effets du troisième ordre

😊 société et économie dématérialisées

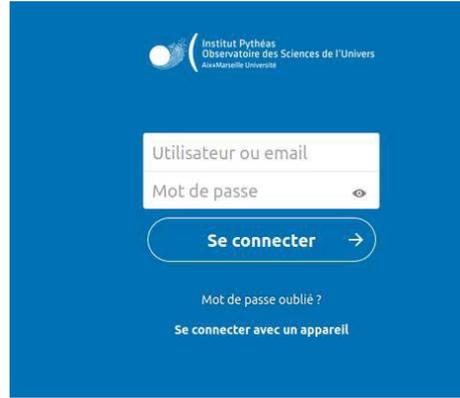
☹️ effets rebonds

- meilleure efficacité énergétique → consommation accrue
- processus de transition énergétique et numérique rarement coordonnés (approche systémique)

☹️ risques d'effondrement

- dépendance aux TIC de la société et l'économie

# Que se passe t'il vraiment ... ?

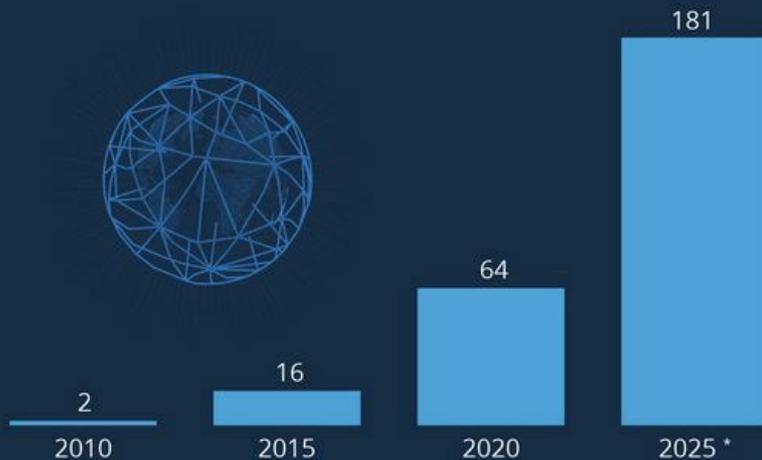




# Des données

## Le Big Bang du Big Data

Estimation du volume de données numériques créées ou répliquées par an dans le monde, en zettaoctets



Un zettaoctet équivaut à mille milliards de gigaoctets.

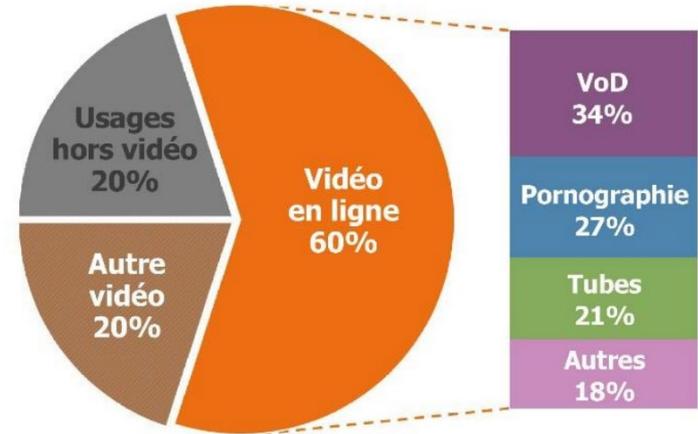
\* Prévvision en date de mars 2021.

Sources : IDC, Seagate, Statista



# Des causes multiples à cette explosion

- Explosion du nombre d'objets connectés (flux vidéos, photos, analyse et mesures en continu)
- Explosion des flux vidéos : 80 % du trafic est pris par le flux vidéo
- Forte croissance des capacités de stockage,
- Déploiements de Technologies réseaux à haut débits (fibre optique, 5G, liaisons intercontinentales fibrées)
- « Démocratisation » de l'IA

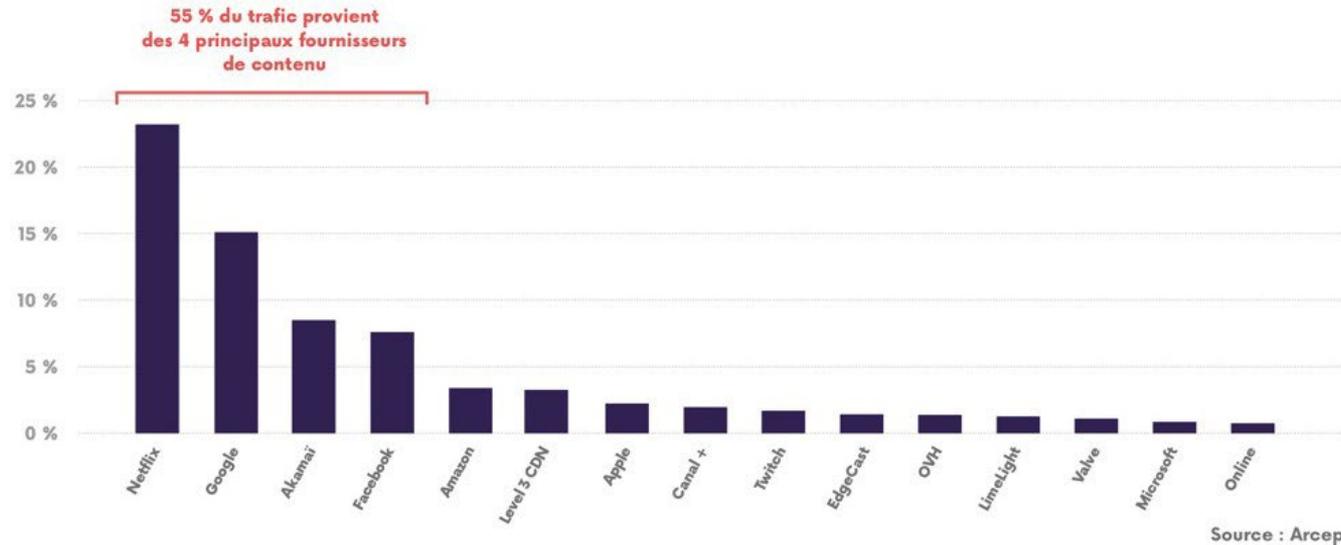


Répartition des flux de données en ligne entre les différents usages en 2018 dans le monde

[Source : *The Shift Project 2019* - à partir de (Sandvine 2018), (Cisco 2018) et (SimilarWeb 2019)]

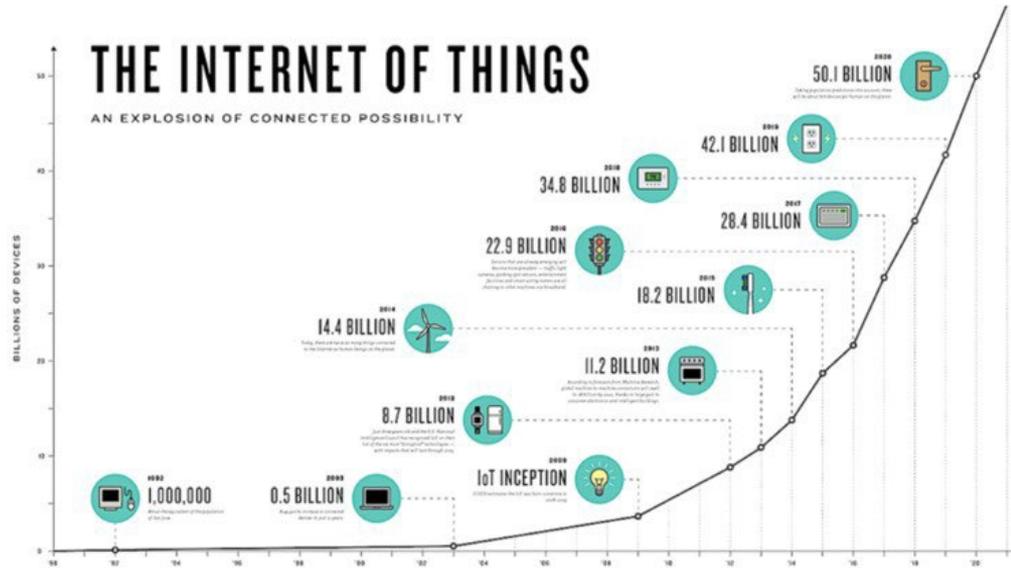
# Trafic Internet en France

## DÉCOMPOSITION SELON L'ORIGINE DU TRAFIC VERS LES CLIENTS DES PRINCIPAUX FAI EN FRANCE (FIN 2019)



[Source : Trafic Internet en France selon l'Arcep en 2019.]

# L'Internet des nombreux objets



[Source : <https://www.mesh-net.co.uk/what-is-the-internet-of-things-iot/>]



# Des objets de plus en plus indispensables

**10 MILLIARDS**

**DE SMARTPHONES VENDUS  
DANS LE MONDE DEPUIS 2007**

Source : Gartner, International  
Data Corporation  
et Greenpeace



**88 % DES FRANÇAIS  
CHANGENT LEUR TÉLÉPHONE  
PORTABLE ALORS QU'IL  
FONCTIONNE ENCORE...**



# Quelques faits saillants

Les voitures autonomes sont parties pour générer autour de 4TB de données par jour

Vos données stockées en ligne sont dupliquées 5 fois en moyenne

les TIC consomment environ 10 % de l'électricité mondiale (dont 10% de minage de bitcoin), soit l'équivalent de la production de 100 réacteurs nucléaires

Le poids d'une page Web a été multiplié par 115 entre 1995 et 2015 → la durée de vie d'un ordinateur est passée, en trois décennies, de onze... à seulement quatre ans

Aux États-Unis, un adolescent passe >7h de son temps libre par jour devant un écran, dont 3h à regarder des vidéos sur Netflix + 1h sur des réseaux sociaux tels que TikTok, SnapChat, Twitch, House party ou Discord,

Le numérique, qu'est ce que c'est ?

# Du matériel



# Du matériel

1,37 milliard de  
smartphones  
produits en 2019



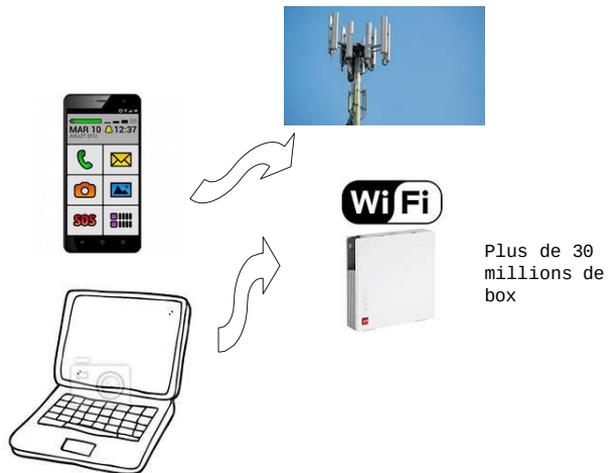
70 millions de  
machines en  
2019

# Du matériel

France : 4 antennes / 1000  
hab.



# Du matériel



# Du matériel



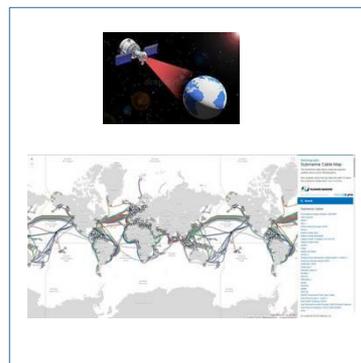
Plus de 40 millions de lignes  
fixes et 20 millions de poteaux  
téléphoniques

# Du matériel

99 % du trafic intercontinental : câbles sous marins ; 250 câbles en 2013, 448 câbles en 2018 pour 1,2 million de kilomètres ; ~ 100.000 km de câbles / an posés



WiFi



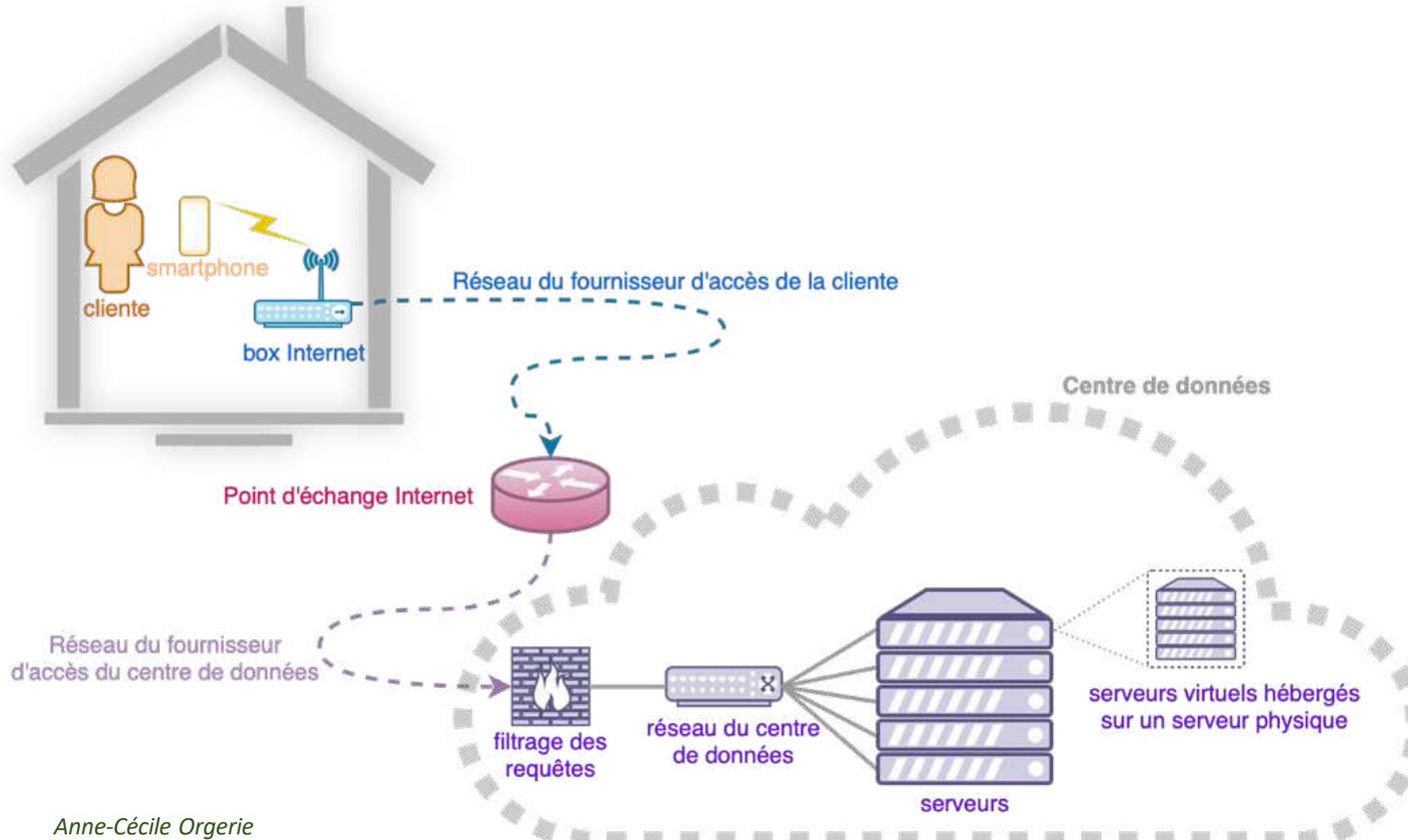
En 2022, on compte environ 5000 datacentres (250 en France, Les datacentres installés en France absorbaient 8% de la consommation électrique nationale en 2016.)

# Des milliards de lignes de code

- Plus d'un million de logiciels par store :
  - En moyenne, 30 applications par smartphone
  - **Une application sur 4 non utilisée**
  - 59 % utilisée une seule fois
- Taille d'une application (une page de livre, environ 20 lignes :-):
  - **Application simple** : une centaine à quelques milliers de lignes de code
  - **Androïd** : 10 millions,
  - **Noyau Linux** : 15 millions
  - **Windows 7** : 40 millions,
  - **Office 2013** : 45 millions
  - **Une voiture connectée** : 100 millions
  - **Services Web Google** : 2 milliards



# Zoom sur le cloud





# Un Cloud

19

# Centre de calcul de Google

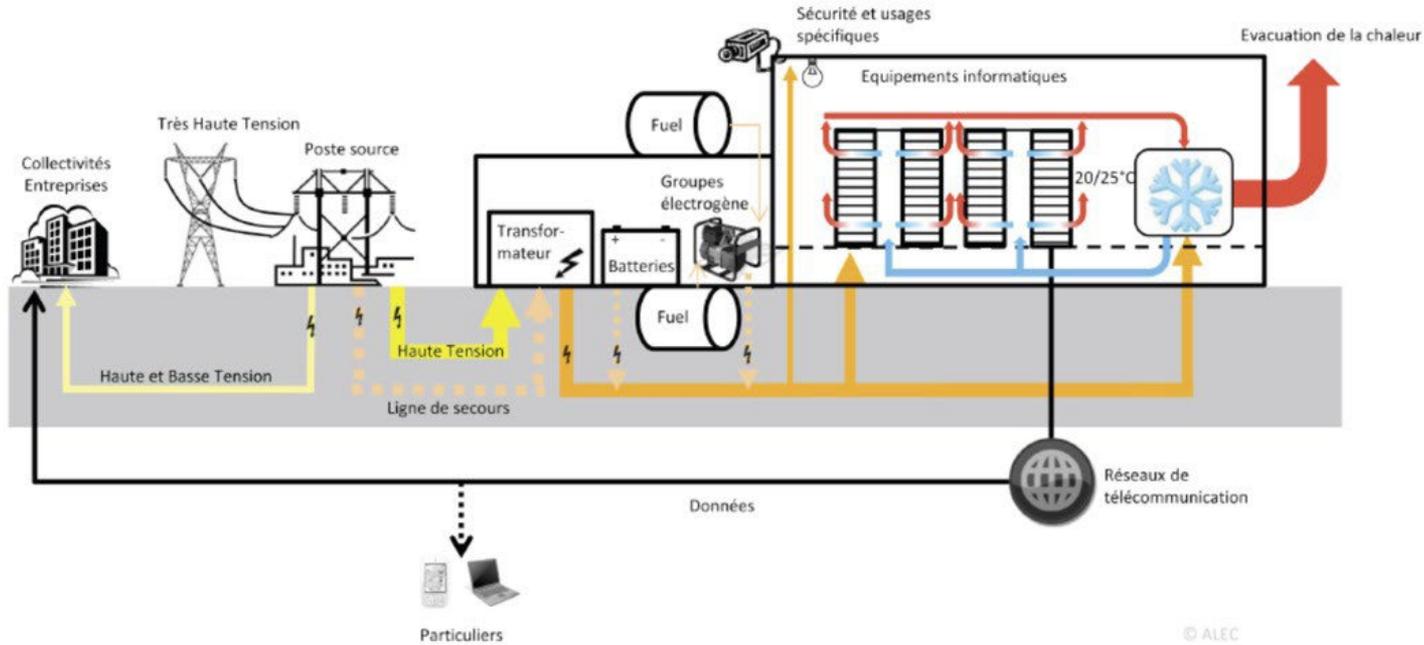


Dalles, Oregon

**1,5 terrains de  
football**  
**100 MWatts**  
**100 000 serveurs**

[Source : <https://www.google.com/about/datacenters/inside/locations/the-dalles/>]

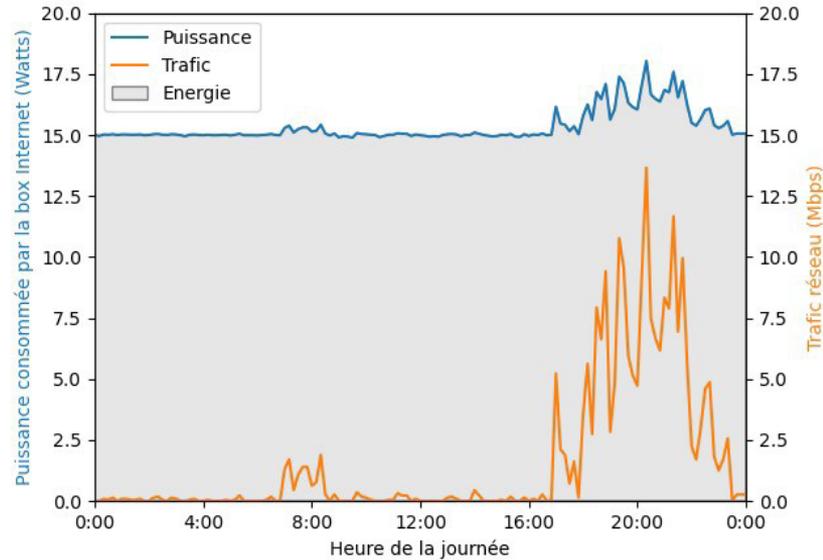
# Aperçu d'un centre de calcul



© ALEC

[Source : <http://www.alec-plaineo.org/wp-content/uploads/2013/10/ALEC-Plaine-Commune-2013-Les-data-centers-sur-Plaine-Commune.pdf>]

# Efficacité énergétique



Efficacité énergétique en Joules/bit ?

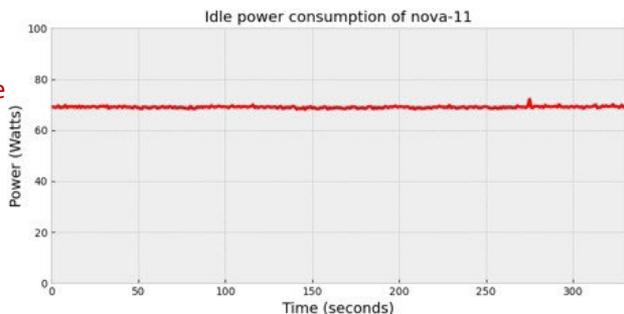
Efficacité = énergie / volume de données

# Idées fausses



*#1 Un serveur qui ne fait rien consomme rien ou peu.*

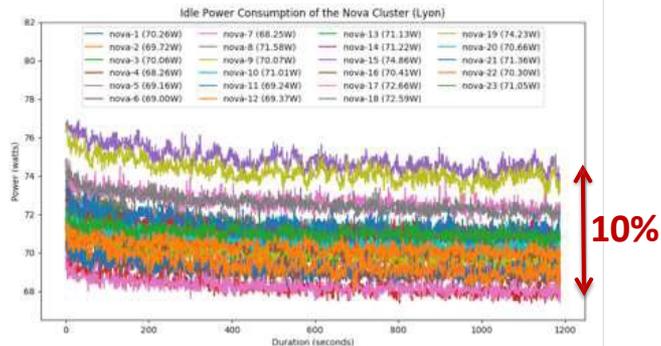
$P_{idle}$



Dell PowerEdge R430 : 2 x Intel Xeon E5-2620 v4, 8 cœurs/CPU, 64 Go RAM, 598 Go HDD (2016)

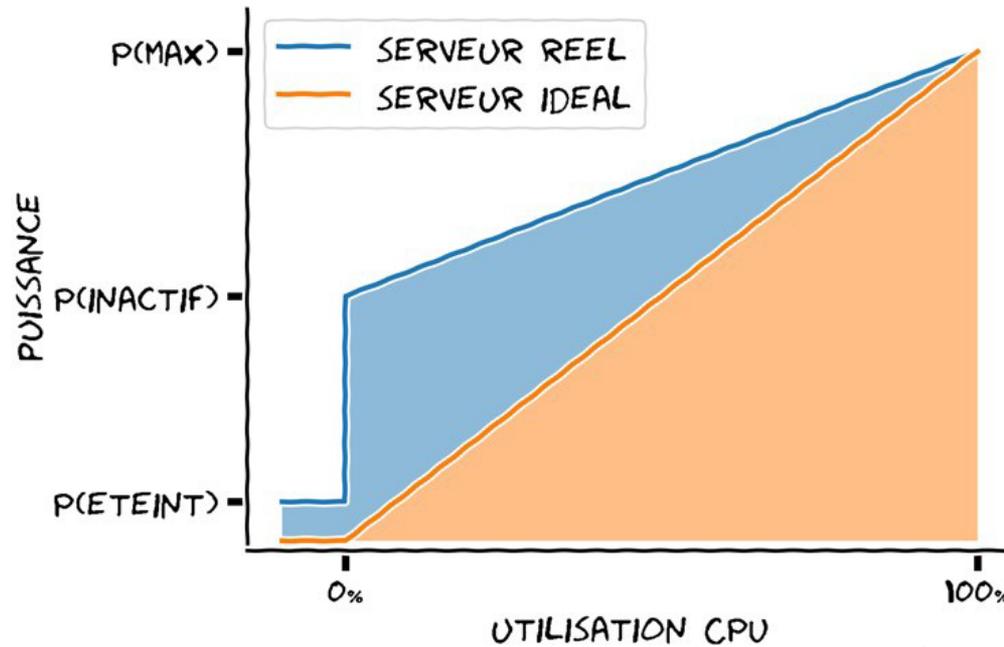
70 Watts environ pendant une période d'inactivité pour ce serveur.

*#2 Un modèle de serveur consomme une puissance donnée.*



10% de différence de consommation en période d'inactivité et plus à plein charge.

# Serveur idéal vs. Serveur réel



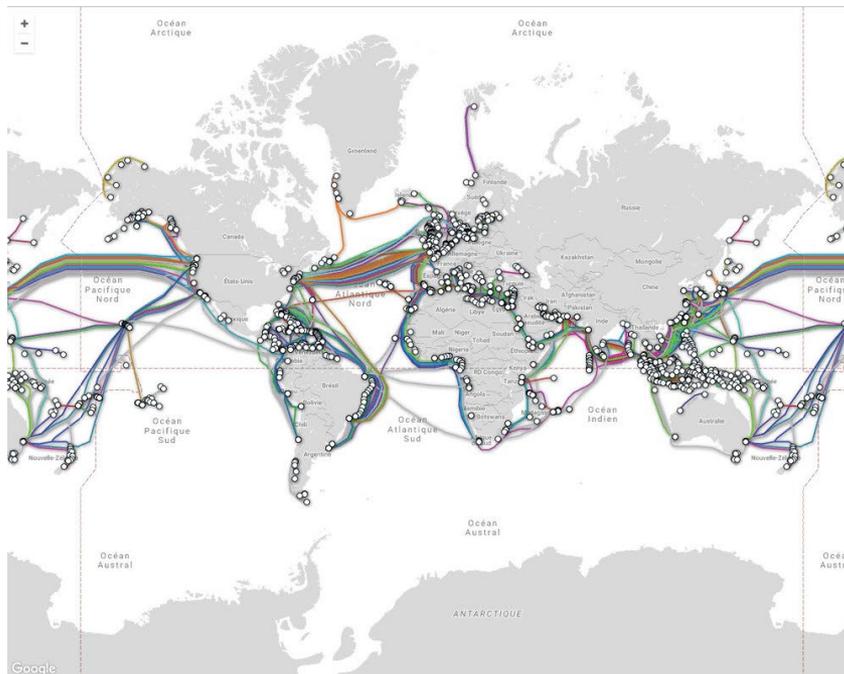
[Source : David Guyon]

# Zoom sur les câbles sous-marins

Ils véhiculent 99% des communications mondiales (450 câbles, 1,2 Millions de kms)

200 000km/s

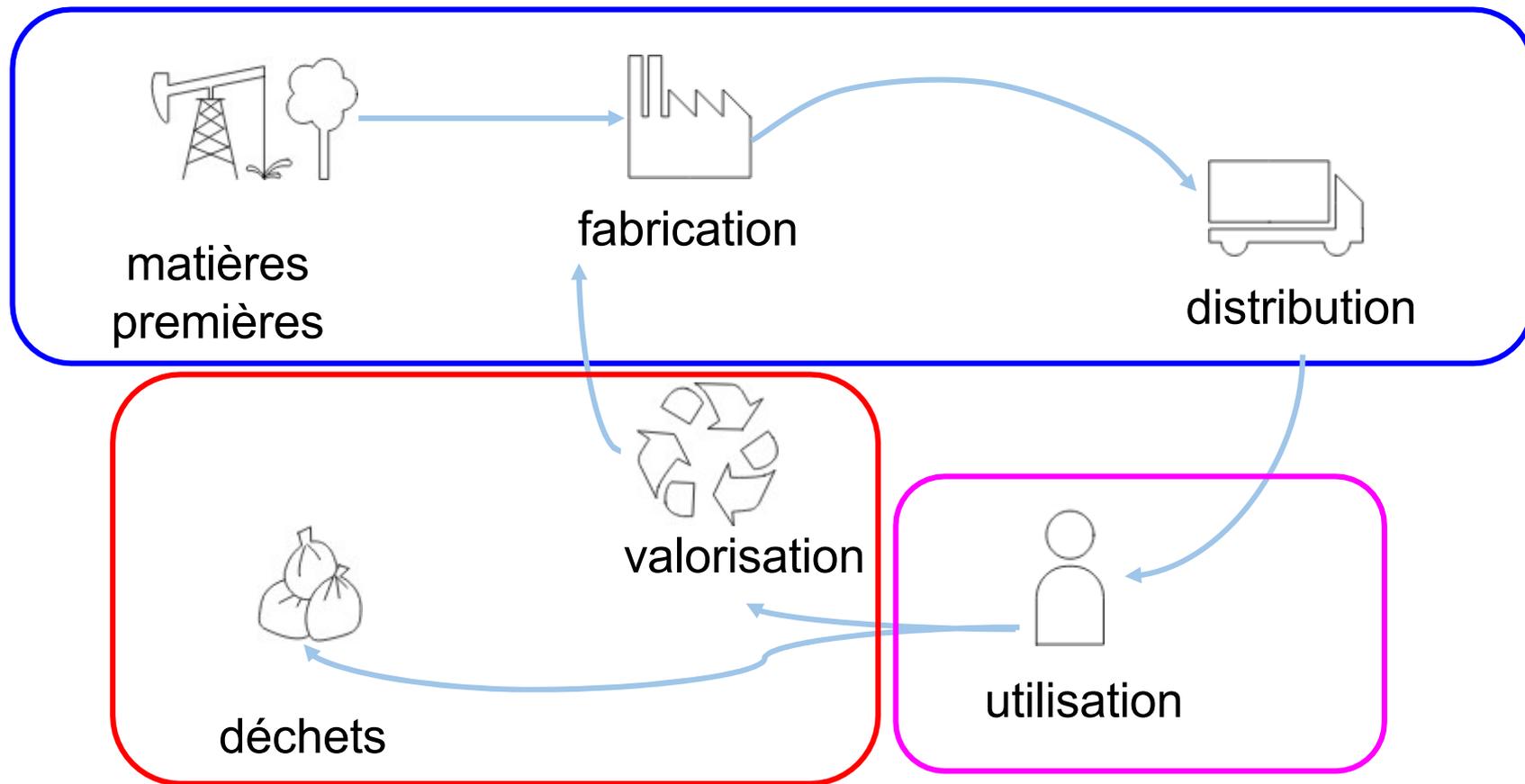
Enjeux géopolitiques (GAFAMs, écoutes...)



Câbles Equiano (Google) et 2Africa (Facebook) en cours de déploiement autour du continent africain

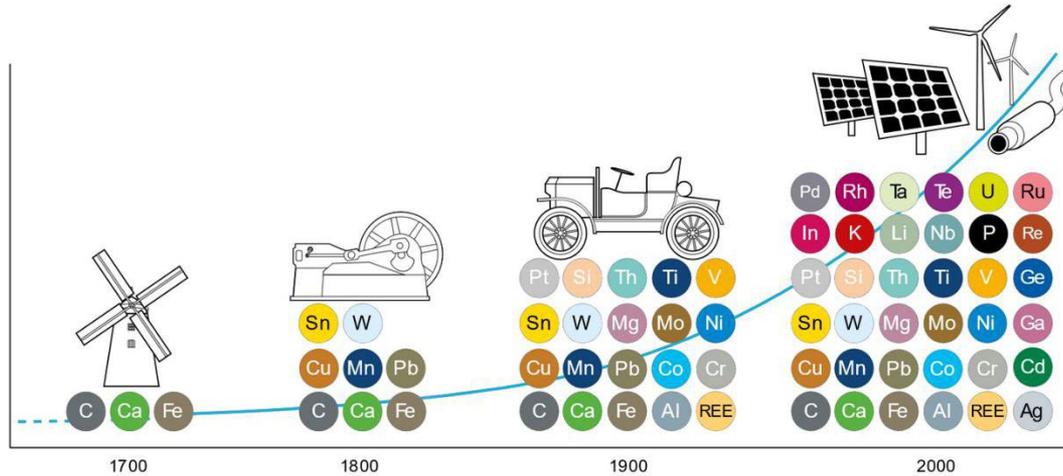
# Analyse du cycle de vie

# Cycle de vie des équipements numériques

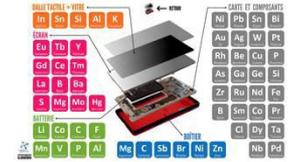


# Des dizaines de matériaux indispensables

## Diversité et quantités de métaux



Source: V. Zepf, 2014



# Des dizaines de matériaux indispensables

## ELEMENTS OF A SMARTPHONE

Colour Key

- Rare Earth Elements
- Base Metals
- Precious Metals
- Industrial Minerals
- Minor Metals
- Halogens

Elements in **Bold and black** occur in Ireland in economic or potentially economic quantities

### SCREEN



Indium tin oxide is a mixture of indium oxide and tin oxide and forms a transparent but conductive layer. This allows a smart phone screen to function as a touch screen. Indium is usually produced as a by-product of zinc production. Tin is mined as the mineral cassiterite.



In 2015, **zinc** oxynitrate was used to create a new thin film transistor that is significantly faster than its predecessors - this could significantly speed up displays on LCD screens.



Smart phone glass is usually a combination of **alumina** and **silica**. Potassium ions can help to strengthen the glass.



Rare Earth Elements are used in minute quantities to produce colours and reduce UV penetration into the phone. Rare earths are found in the mineral bastnasite or in ion-adsorption clays weathered from granites.

### BATTERY



Most phones use Lithium ion batteries, composed of two electrodes, one made of lithium cobalt oxide and one made of carbon. **Lithium** is found either in brines or in the mineral spodumene, which occurs in pegmatite veins related to granites while cobalt is a frequent by-product of copper or nickel production.



### ELECTRONICS



**Copper** is used for wiring with **gold**, **silver** and tantalum also used to manufacture microelectrical components. Copper occurs typically as one of several sulphide minerals, while gold generally occurs in a pure form. Silver is a typical by-product of lead-zinc mining in Ireland and tantalum occurs in a mineral called tantalite.



The microphone is usually made of nickel, with rare earths such as neodymium, gadolinium and praseodymium used in the speaker and earphone magnets. Terbium and dysprosium are also used to make the phone vibrate.



Silicon forms a major part of the chip that provides the phone's brain. Other minerals such as antimony, arsenic, gallium and phosphorus are used to alter the conductive properties of the silicon. **Antimony** occurs in nature as the mineral stibnite. Arsenic is a by-product of copper production and gallium is a by-product of zinc and aluminium extraction. Phosphorus occurs in nature within phosphate minerals and is an important fertiliser.



Tin and **lead** are used as soldering agents.

### CASE



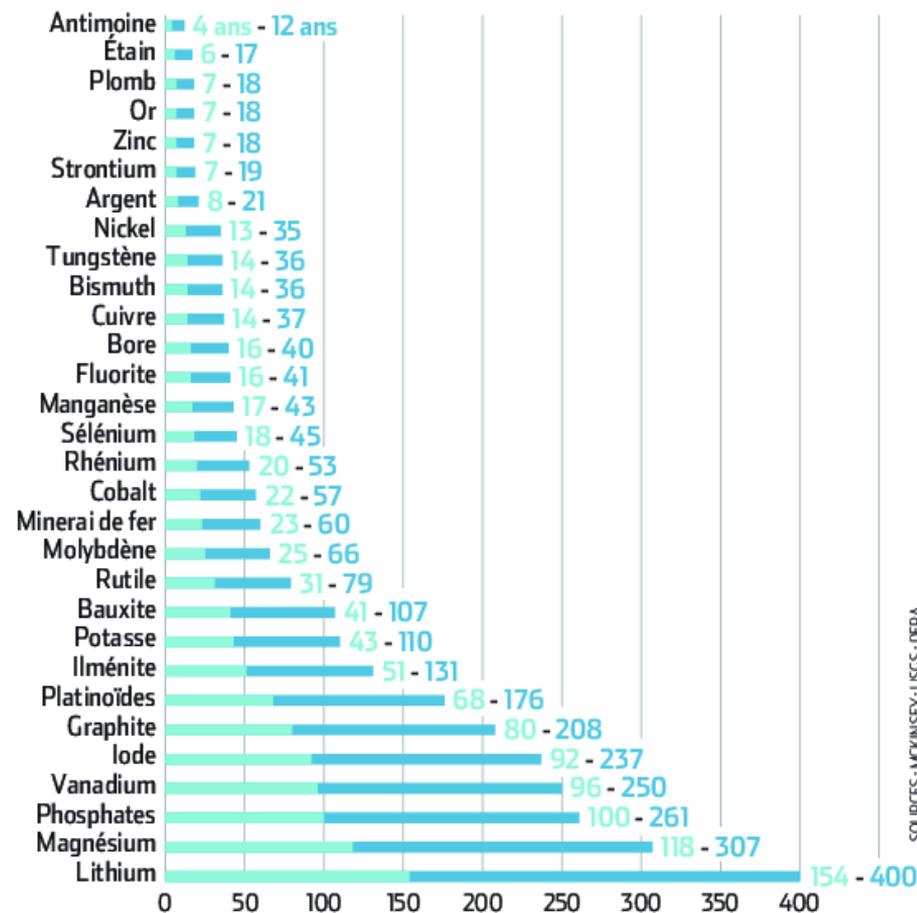
A phone's casing can be made from numerous alloys, including magnesium compounds, aluminium and plastics. Nickel can be included to help reduce electromagnetic interference. Magnesium is derived from magnesite or dolomite, while nickel is often found within laterites – a type of tropical weathered rock formation.



# État de nos réserves en matières premières...

## Durée de vie des réserves rentables (en années d'exploitation)

■ En cas de boom (demande accrue de 10% pendant dix ans)  
■ Au rythme actuel de production



SOURCES : MCKINSEY ; USGS ; DERA

# Extraction, fabrication (et fin de vie) : traitements néfastes pour l'environnement



Une mine d'extraction de métaux rares dans la région de Baotou dans le nord de la Chine. Photo prise le 6 juillet 2010. — AP/SIPA



Lac toxique de Baotou (Chine)  
David Gray / Reuters



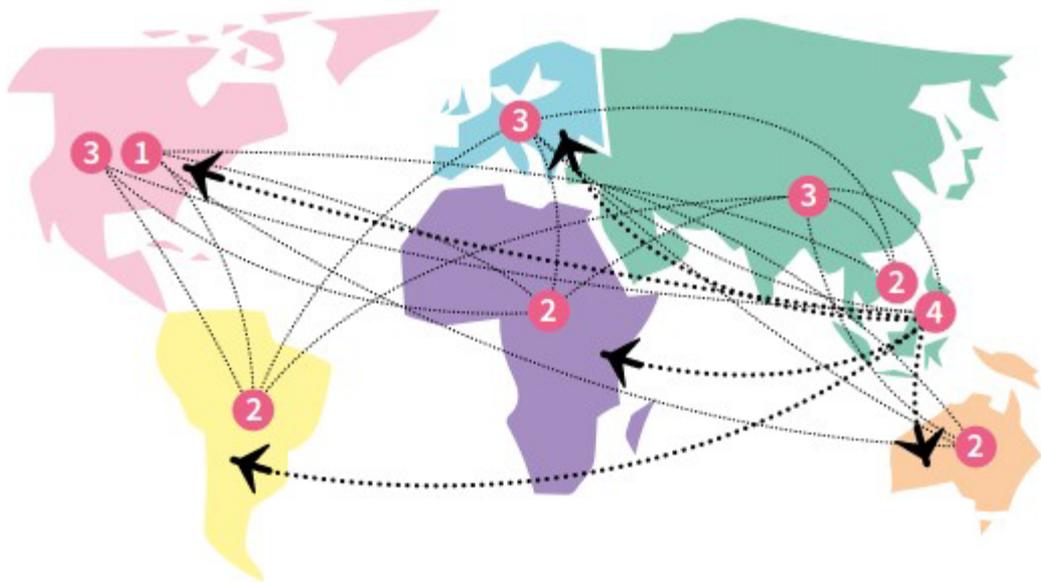
Une femme et un enfant cassent de la roche extraite d'une mine de cobalt à Lubumbashi, dans la province du Katanga, en RDC, le 23 mai 2016. (JUNIOR KANNAH / AFP)



Mine de chrome, Kazakhstan, crédit photo :  
businessmir.kz.

## QUATRE TOURS DU MONDE POUR FABRIQUER UN SMARTPHONE

# Transport : tours du monde d'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

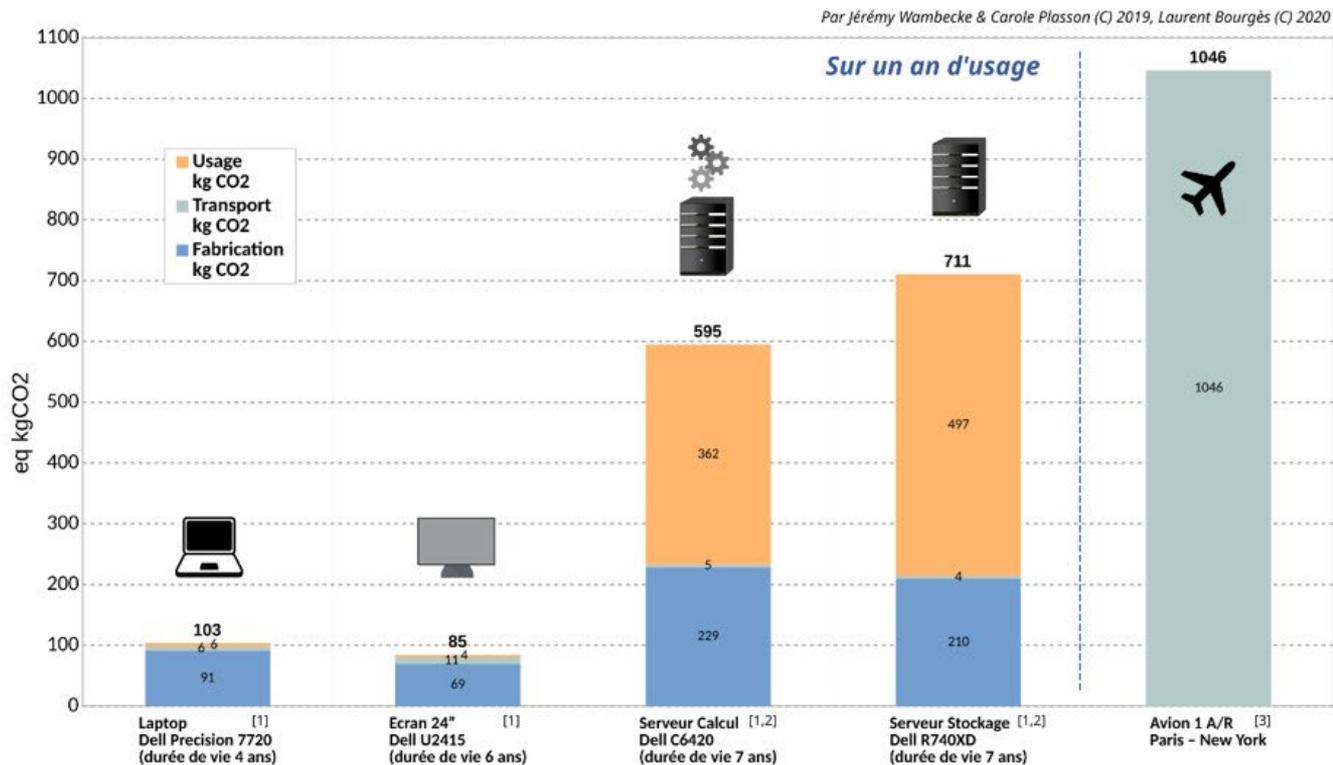
**3. Fabrication des principaux composants** en Asie, aux États-Unis et en Europe

**4. Assemblage** en Asie du Sud-Est

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

source : ADEME and France Nature Environnement

# Fabrication vs utilisation

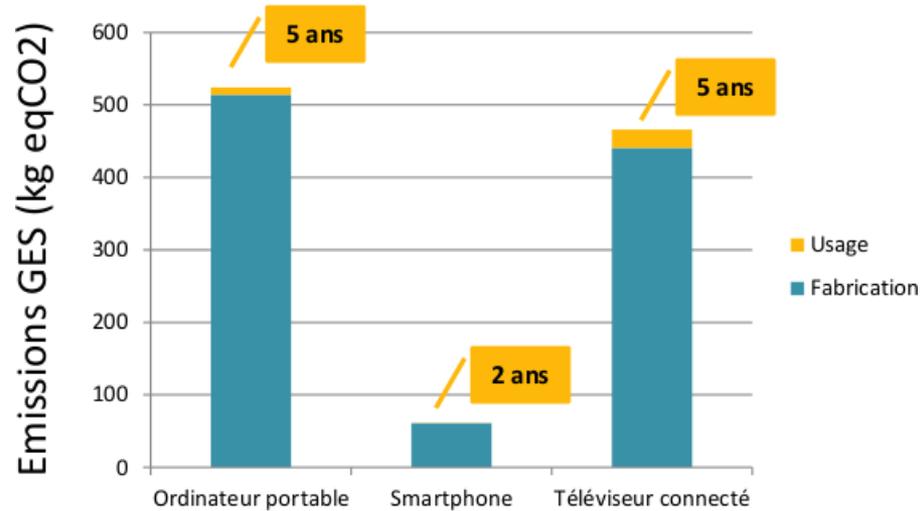


[1] Données Fiches Dell (usage corrigé pour usage FR) : [https://www.dell.com/learn/us/en/uscorp1/corp-comm/environment\\_carbon\\_footprint\\_products](https://www.dell.com/learn/us/en/uscorp1/corp-comm/environment_carbon_footprint_products)

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

[3] <https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/>  
Facteur d'impact : 0,108 kgCO2e/kWh (FR)

# Fabrication vs utilisation



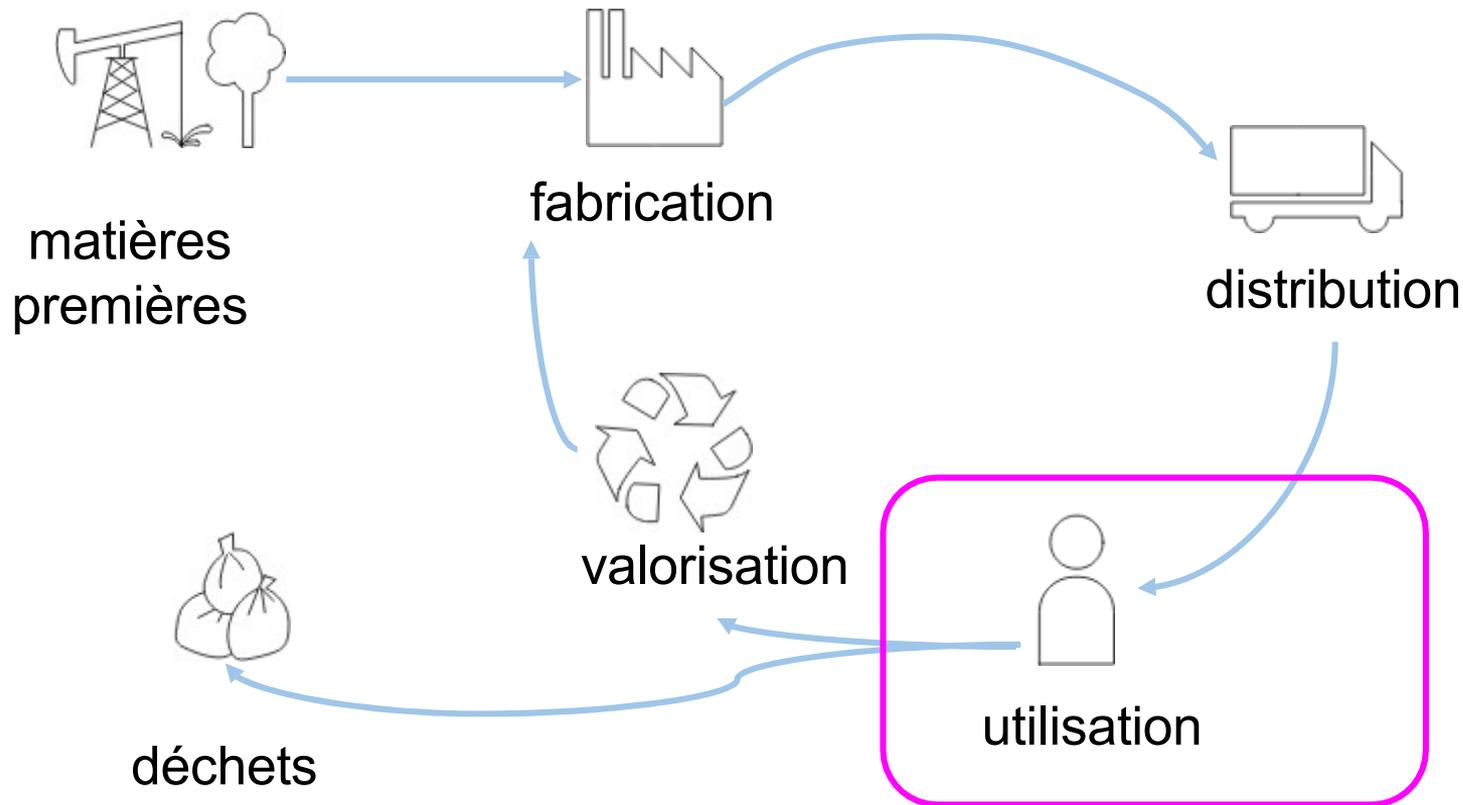
Fabrication en Chine, usage en France hors internet  
Avec internet pour smartphone : 50/50

# Limitation de l'empreinte de la production : quelques bonnes pratiques

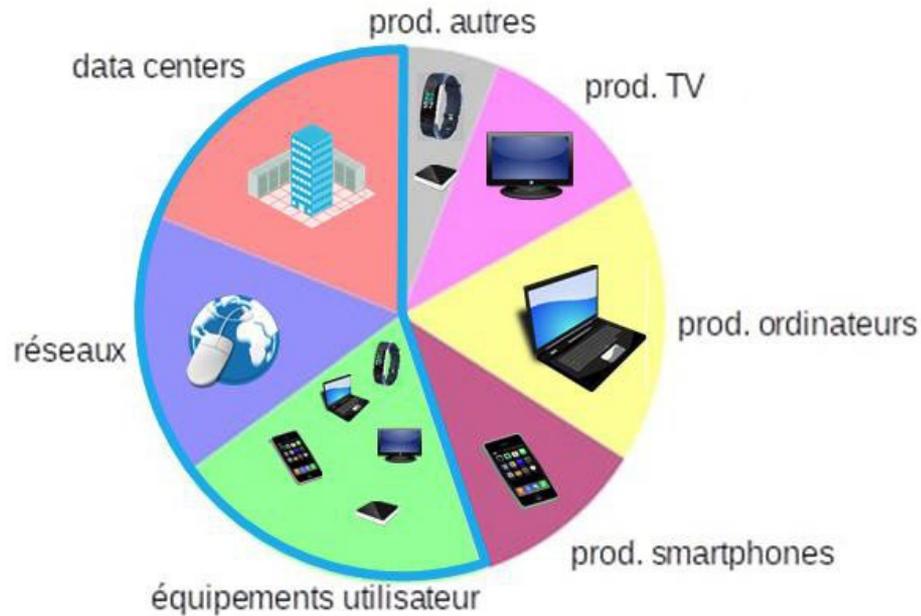
## **acheter moins et mieux**

- Prolonger la durée de vie des matériels, acheter moins
  - Acheter du matériel raisonné, garanti longtemps, réparable longtemps ou reconditionné
  - Prendre en compte des critères d'achat responsable
- 
- Louer
  - Mutualiser

# Cycle de vie des équipements numériques



# Énergie en fonction du cycle de vie et du tiers



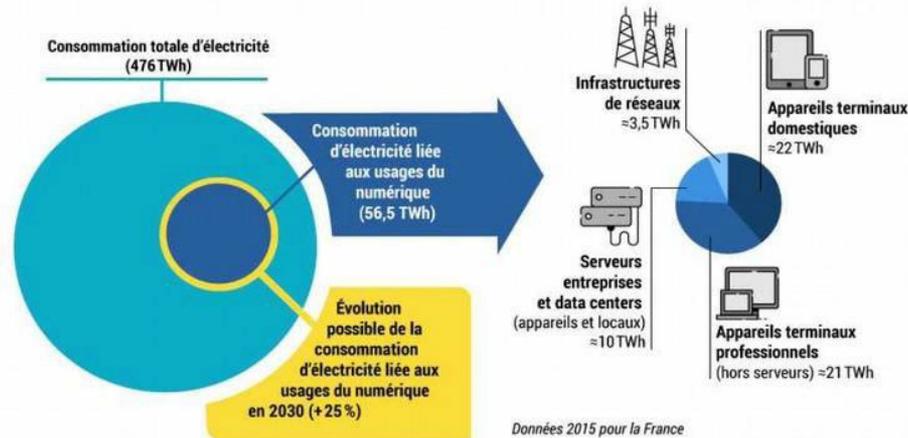
Facteurs d'émission de la production d'électricité :

- France 0.108 kg/kWh
- Vietnam 0.432 kg/kWh

Source : Ademe, base carbone 2011

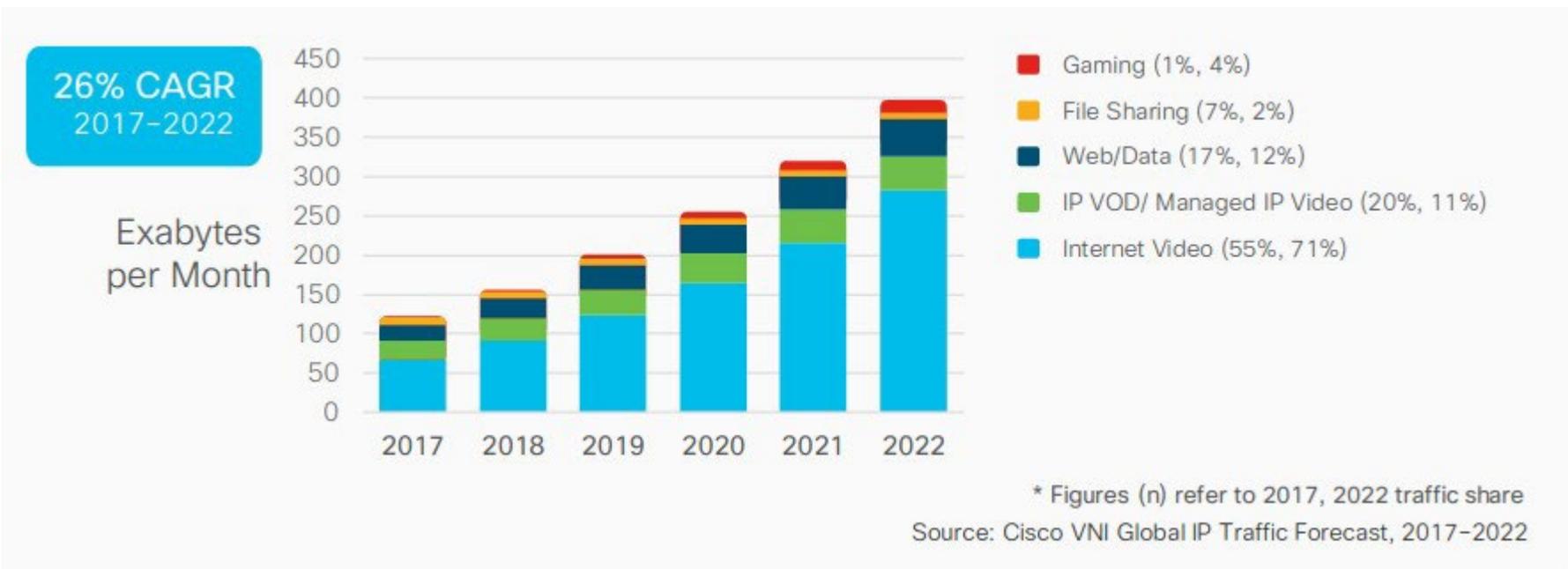
# Usages

- **Usage** : consommation d'énergie (+9 % par an, soit un doublement en 8 ans), déchets, pollution indirectes et directes, impacts sociaux (addictions, ...)



# Transfert de données

## Quelles données sur les réseaux ?



# De la complexité de donner des recommandations précises...

extrêmement difficile d'estimer de manière fiable les coûts environnementaux des différentes actions numériques de notre quotidien (mail, visio, cloud, achats...)

risque : donner conseils totalement contre productifs

ex : trier ses mails ou non ?



voir [article EcoInfo «Agir vers la sobriété numérique»](#)

# Quelques principes généraux

**Éteindre** (ce qui n'est pas utilisé)

les appareils : ordinateurs, serveurs...

les services : machines virtuelles...

**Éviter** (ce qui est inutile)

- les transferts de données (mails, vidéo, visio...)
- le stockage de données
- le calcul
- (+ les impressions)

ou **réduire l'impact**

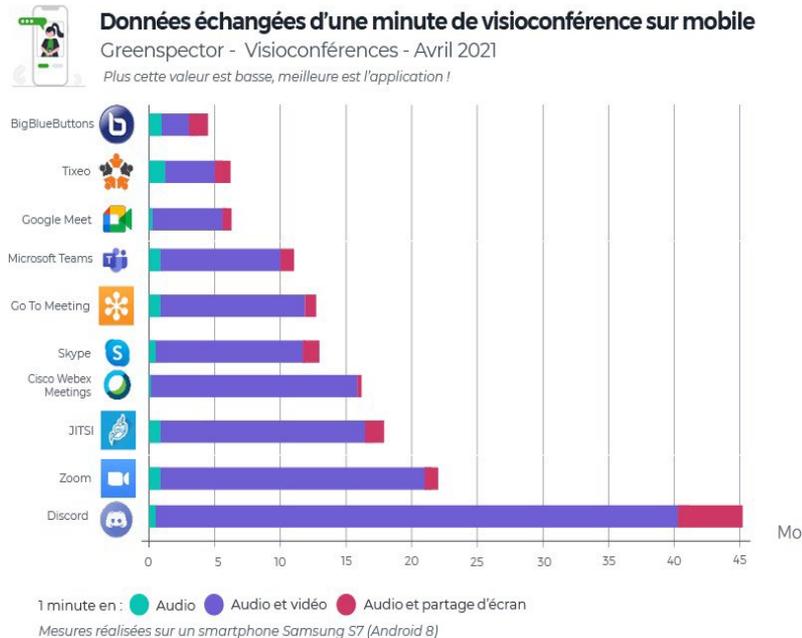
# Quelques bonnes pratiques

## Vidéos

- **réduire** streaming et téléchargement
- si nécessaires,
  - **télécharger** pour regarder hors ligne
  - **diminuer résolution**
- désactiver **autoplay**
- publicité : **bloquer**
  - avec un **bloqueur**
  - en **trompant le navigateur**
- visio : **couper la caméra** lorsque non nécessaire

## Réseau

filaire > wifi > 4G



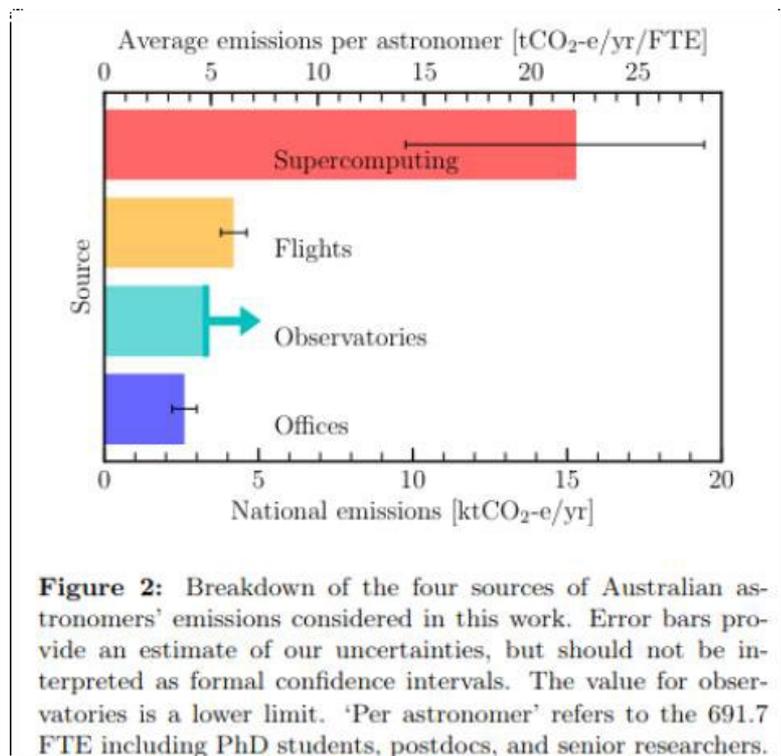
# Quelques bonnes pratiques

- ne stocker que ce qui présente un intérêt
- éviter les pièces jointes
  - pointer la source originale si elle existe (web)
  - utiliser un site de dépôt (interne, filesender de renater, wetransfer)
  - ou transmission physique (clé usb)



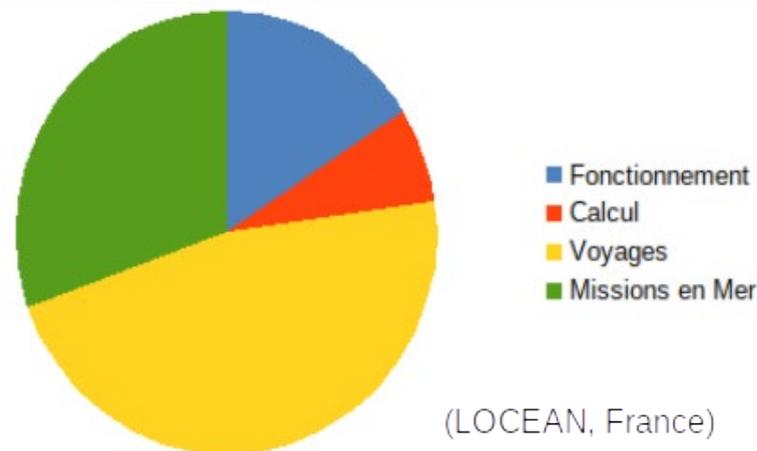
# Les TIC c'est aussi du code !

Y compris du calcul scientifique



**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.

(Stevens et al, 2020)

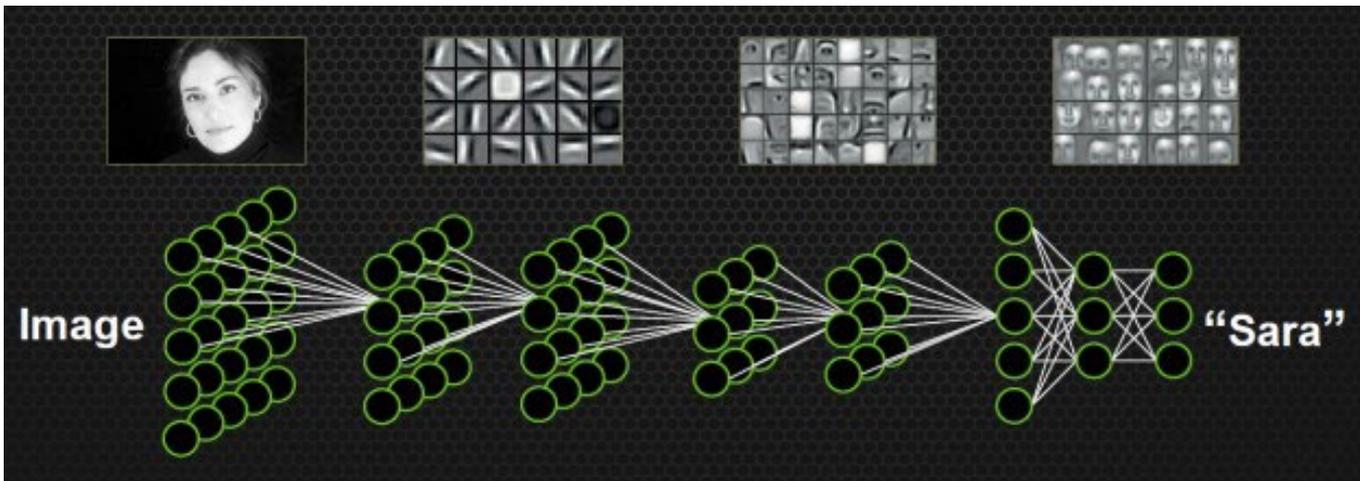


(LOCEAN, France)

# Réseaux de neurones profonds

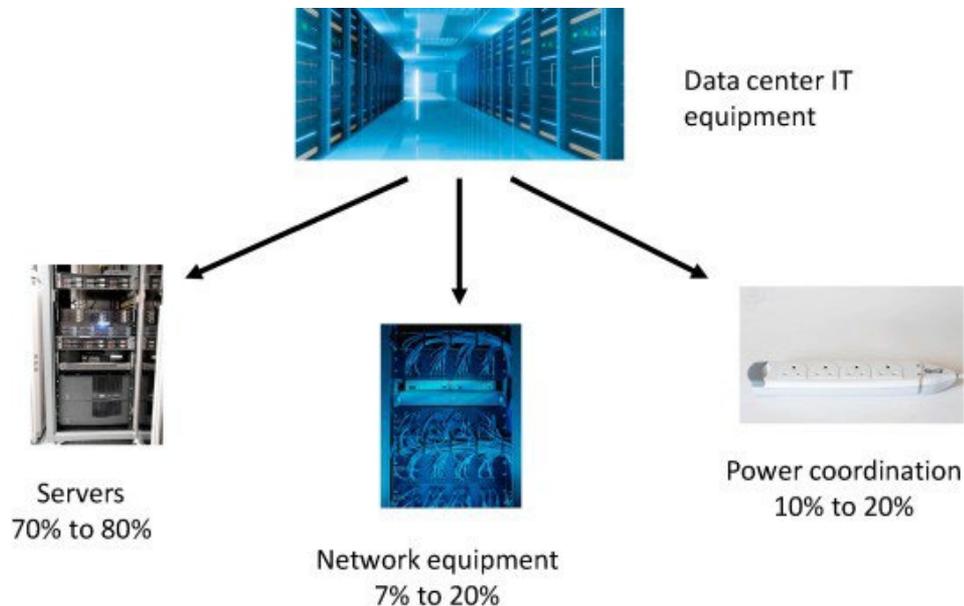
Récents développements logiciels et matériels, notamment calcul sur GPU → rendu possible l'entraînement de ces modèles

- en un temps raisonnable
- sur du matériel relativement basique



# Qu'est-ce qui consomme quand on fait tourner un programme d'IA ?

Le serveur et son environnement



[[Cheung et al., 2018](#)]

Qu'est-ce qui consomme quand on fait tourner un programme d'IA ?

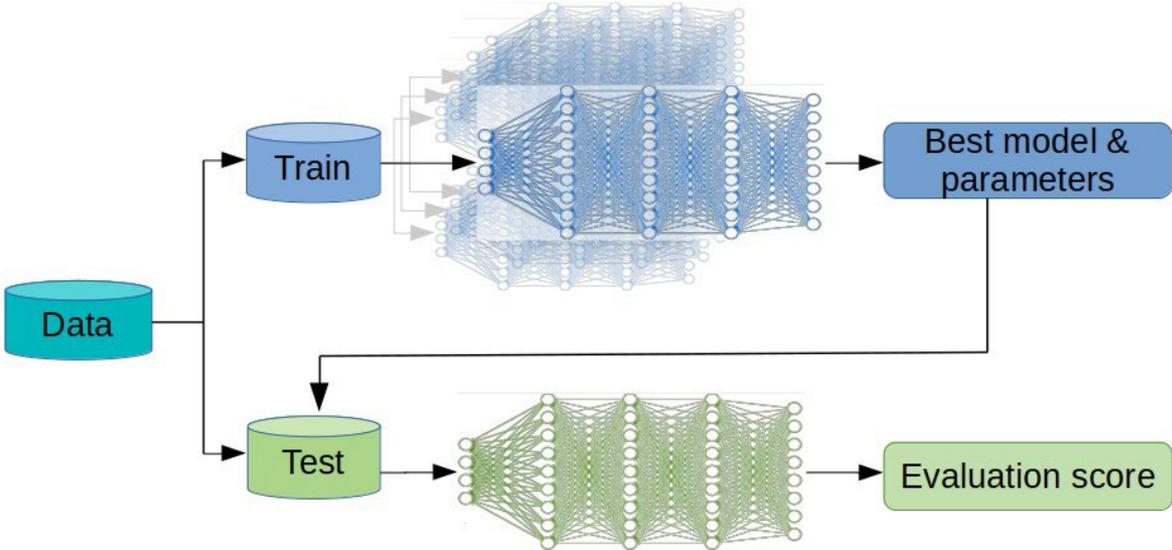
Serveur sur lequel le programme tourne

ce qui consomme

- : CPU
- GPU
- DRAM
- autres

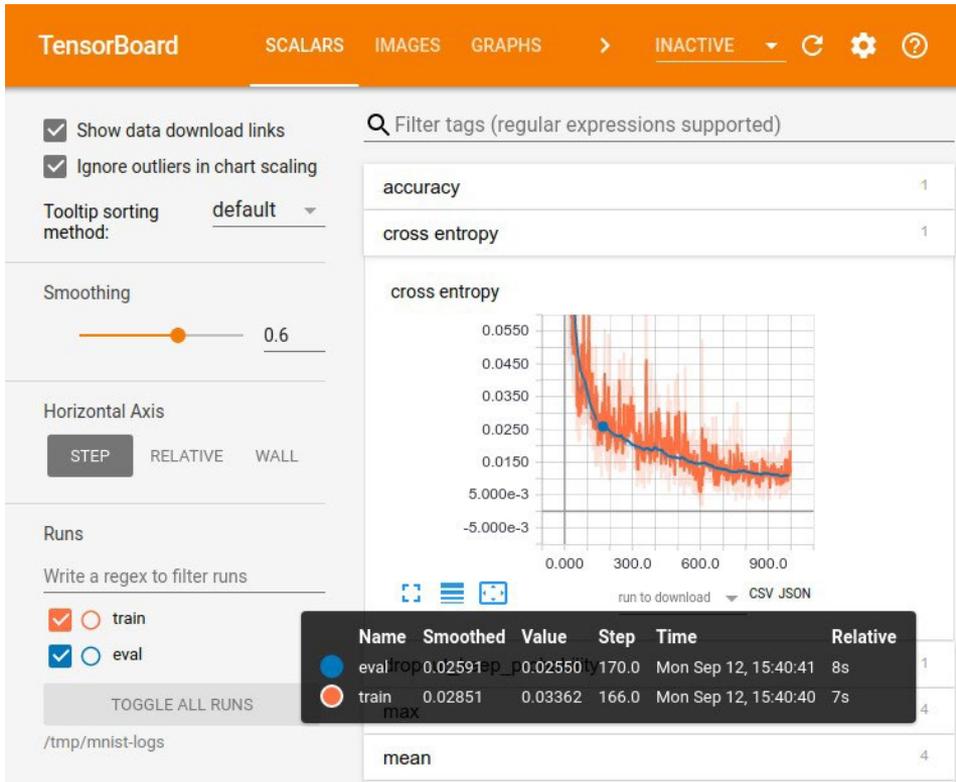


# Qu'exécute-t-on sur le serveur ?



# Phase d'apprentissage

Courbe d'apprentissage rend compliqué de savoir quand s'arrêter



# Quelques exemples d'outils

## Green Algorithms

How green are your computations?

### Details about your algorithm

To understand how each parameter impacts your carbon emissions, check out the formula below and our [pre-print](#).

Runtime (hours and minutes)

Number of cores

Memory requested (in GB)

Select the platform used for the computations

Local server

What type of core are you using

CPU

Xeon E5-2683 v4

Select location

North America

United States of America

Any

Do you know the real usage factor of your processing core?

Yes  No

Do you know the Power Usage Efficiency (PUE) of your local datacentre?

Yes  No

Do you want to use a Pragmatic Scaling Factor?

Yes  No

**1.03 kg CO<sub>2</sub>e**  
Carbon footprint

**2.28 kWh**  
Energy needed

**113 tree-months**  
Carbon sequestration

**5.91 km**  
in a passenger car

**2 %**  
of a flight Paris-London

### Computing cores VS Memory

Category	Percentage
Memory	20.9%
Computing cores	79.1%

### How the location impacts your footprint

Location	Emissions (kgCO <sub>2</sub> e)
Switzerland	~10
Sweden	~50
France	~150
Canada	~300
USA	~600
United Kingdom	~600
Your algorithm	~1000
India	~1500
Australia	~2000

# Etude de cas : NLP [Strubell et al., 2019]

4 modèles état de l'art en traitement automatique des langues (TAL/NLP)

Estimation du coût énergétique software-based

## Résultats

### Entraînement

- quelques jours à quelques semaines
- émissions : entre 18kg eqCO<sub>2</sub> et 284 000 kg eqCO<sub>2</sub>
- modèle le plus utilisé alors : 652 kg eqCO<sub>2</sub>, soit

*un aller Paris Hong Kong en avion environ  
ou 2 500km en voiture*

développement du modèle : ~ environ 60 GPU tournant en permanence pendant 6 mois...

# Etude de cas : NLP [Strubell et al., 2019]

## Conclusions des auteurs

Nécessité de faire une analyse coût/bénéfice des modèles

- coût : temps d'entraînement et ressources nécessaires, et sensibilité aux hyperparamètres
  - mesure indépendante du matériel pour le temps d'entraînement (FPO) idem pour sensibilité
- bénéfice : précision du modèle

Ressources de calcul publiques et mutualisées pour (tous) les universitaires au lieu de devoir passer par Google cloud, Amazon...

développement de matériel et d'algorithmes moins consommateurs

- notamment pour l'optimisation des hyperparamètres : intégration dans les bibliothèques standard de DL

## Petit exemple d'application

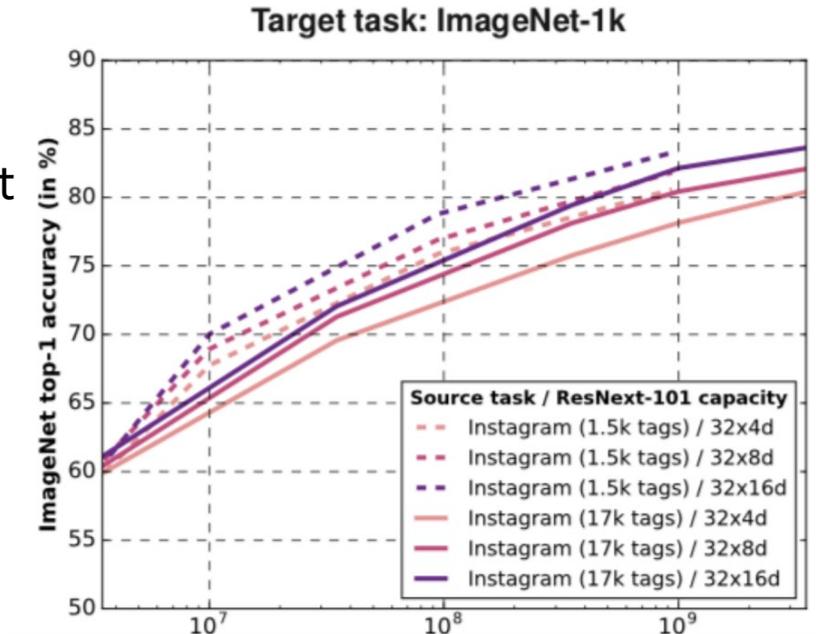
donné par [Henderson et al., 2020]

*(...) consider a Deep RL class of 235 students. For a homework assignment, each student must run an algorithm 5 times on Pong. The class would save 888 kWh of energy by using PPO versus DQN, while achieving similar performance. This is roughly the same amount needed to power a US home for one month.*

# Red vs Green AI [Schwartz et al., 2019]

## Red AI

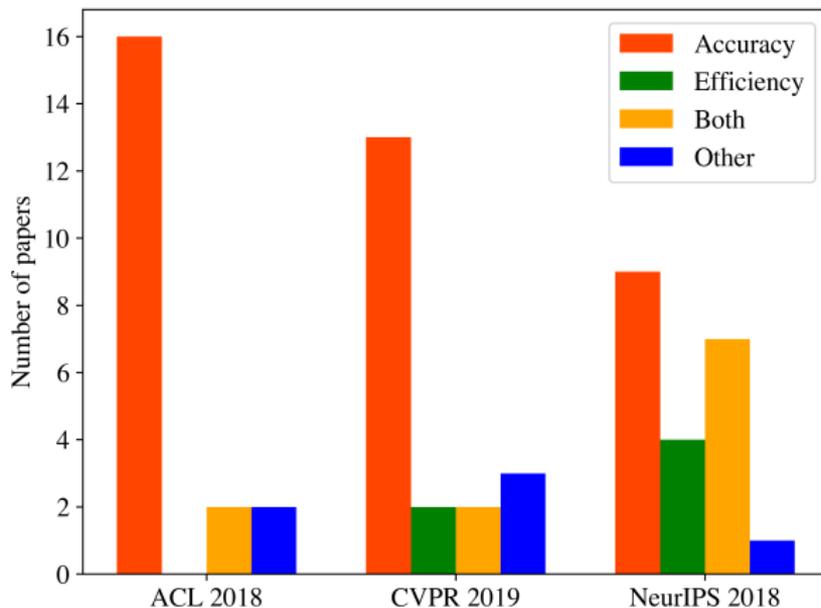
- Obtenir la meilleur précision possible en augmentant la puissance de calcul.
- Malheureusement relation logarithmique entre la précision et le nb de paramètres et la quantité de données d'entraînement.
- Le ticket d'entrée est de plus en plus grand
- Utile dans une certaine mesure mais ne doit pas rester l'exclusivité



# Red vs Green AI [[Schwartz et al., 2019](#)]

## Green AI

- L'objectif est de produire de meilleurs résultats / aussi bon sans augmenter les coût de calcul, voir en les réduisant.
- L'efficacité, plutôt que la précision, devient la métrique d'évaluation prioritaire/



# References

- Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D., and Pineau, J. (2020). Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning. *Journal of Machine Learning Research*, 21(248) :1–43.
- Schwartz, R., Dodge, J., Smith, N. A., and Etzioni, O. (2019). Green AI. published in 2020.
- Strubell, E., Ganesh, A., and McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. In *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pages 3645–3650, Florence, Italy.
- Lannelongue, L., Grealey, J., and Inouye, M. (2020). Green algorithms : Quantifying the carbon footprint of computation.

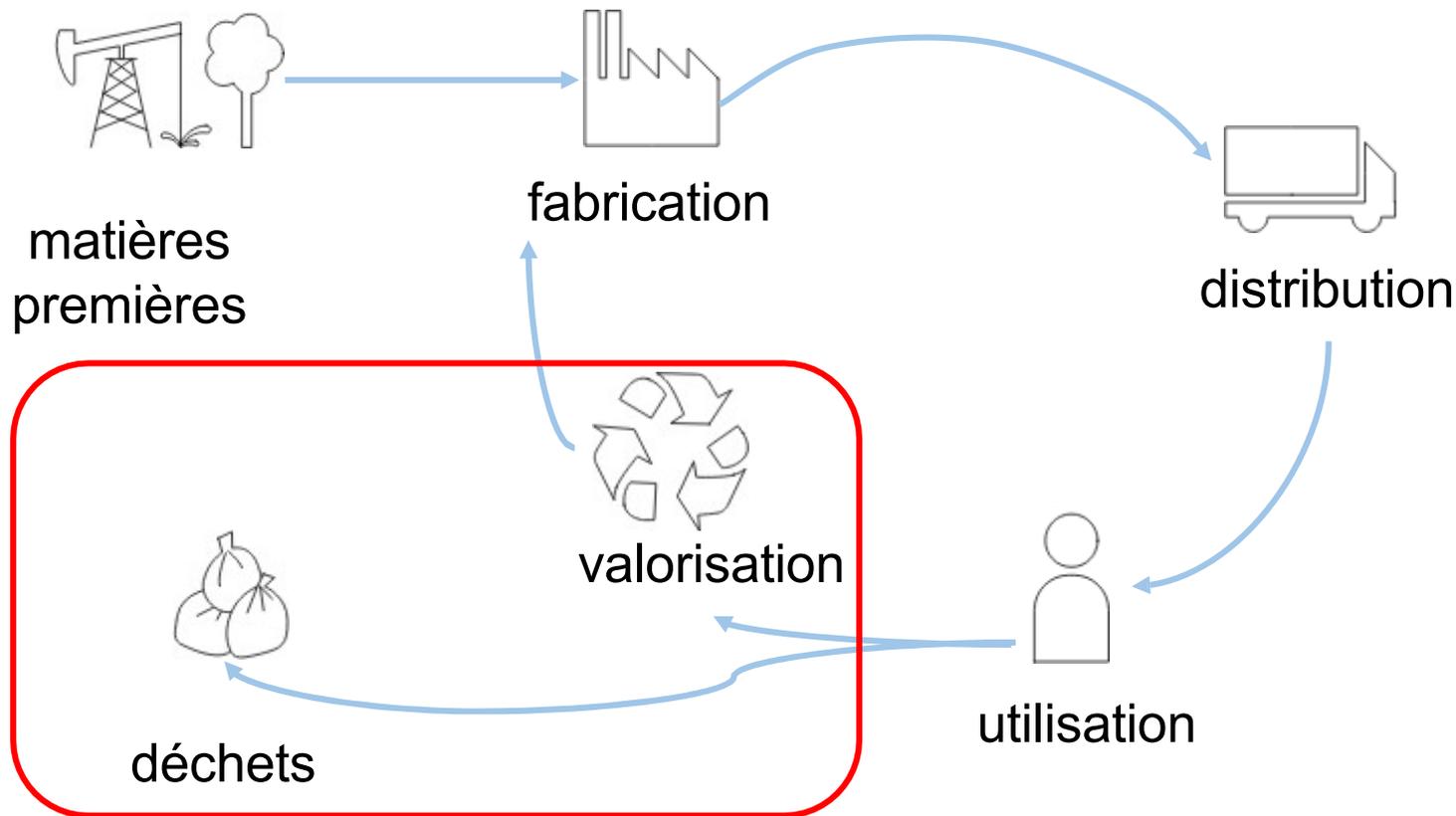
## Quelques bonnes pratiques à retenir...

- Calculer l'impact environnemental et communiquer dessus
- Faciliter les comparaisons et partager les codes et modèles (ré-utilisation de modèle)
- Diminuer l'impact : bien choisir son modèle, le matériel sur lequel il tournera, la localisation...
- hébergement mutualisé, local, privilégier mutualisation
- intégrer l'impact dans les librairies, plateformes... travaux de recherche pour réseaux plus efficaces

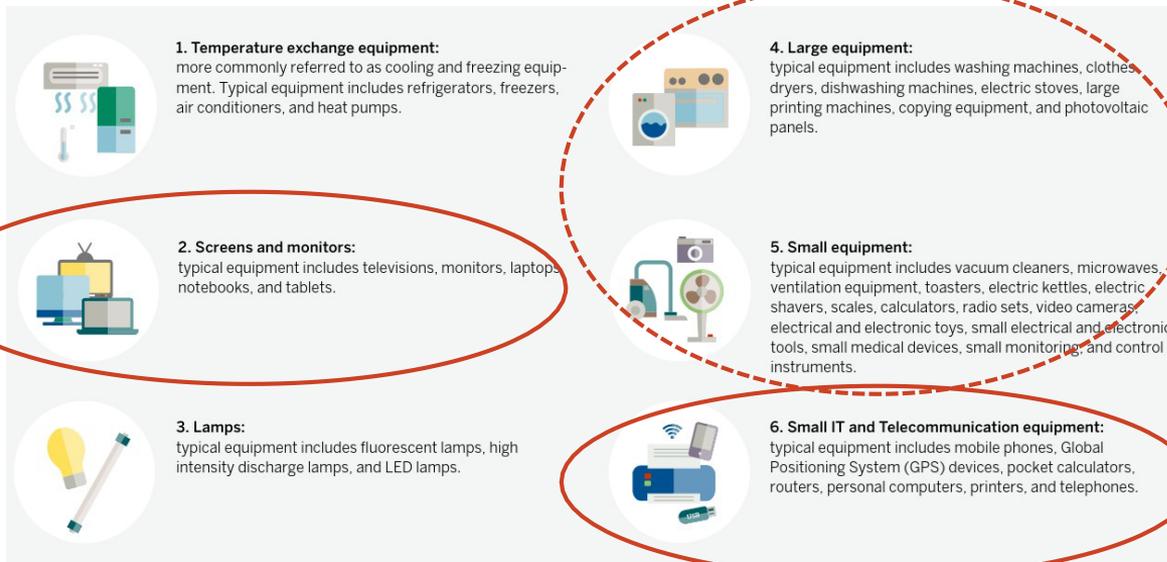
### **mais surtout :**

- utilisation raisonnée de ces méthodes
- analyse coût/bénéfice

# Cycle de vie des équipements numériques



# Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE)

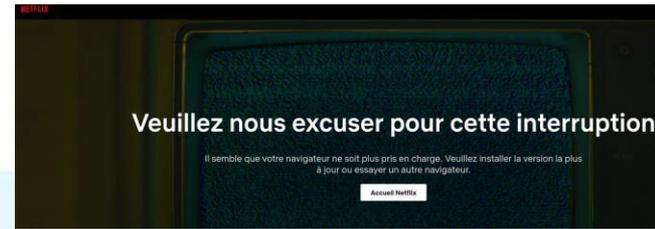


## Quand l'équipement devient-il déchet et pourquoi ?

# De l'EEE au DEEE...

Message from Skype

You may be unable to join this call because you're using an old version of Skype or you're on an unsupported device. Find out more at <https://go.skype.com/groupupgradefaq>



Différents types d'obsolescence :

- par **incompatibilité** (obsolescence du matériel liée au logiciel) : versions incompatibles de logiciels, fournitures...
- **technique** ou fonctionnelle : coût de réparation  $\approx$  coût de remplacement
- **psychologique** : fonctionnalités rendues indispensables...
- **écologique** : mise en avant des progrès en matière d'impact environnemental des nouveaux produits...

# Évolution de la quantité de DEEE

Repris de Francis Vivat et Anne-Laure Ligozat, 2021



Source : [Global E-wasteMonitor 2020](#), Forti, Baldé, Ruediger Kuehr, Garam Bel

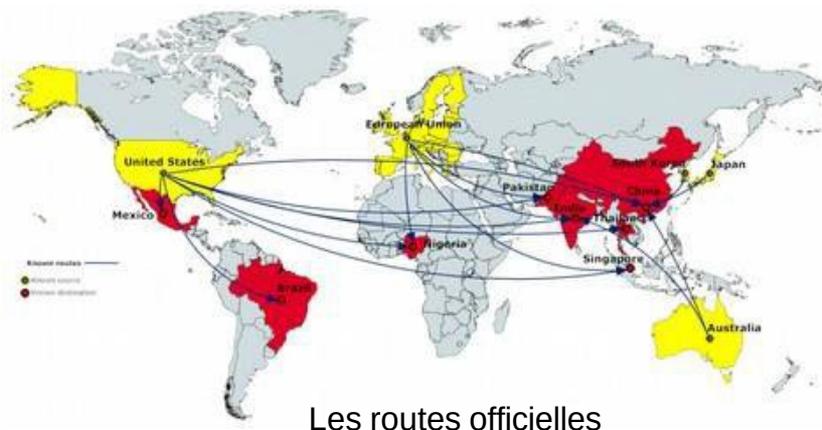
53,6 millions de tonnes  
= 5 300 tours Eiffel

## Le pire des cas : filière illégale



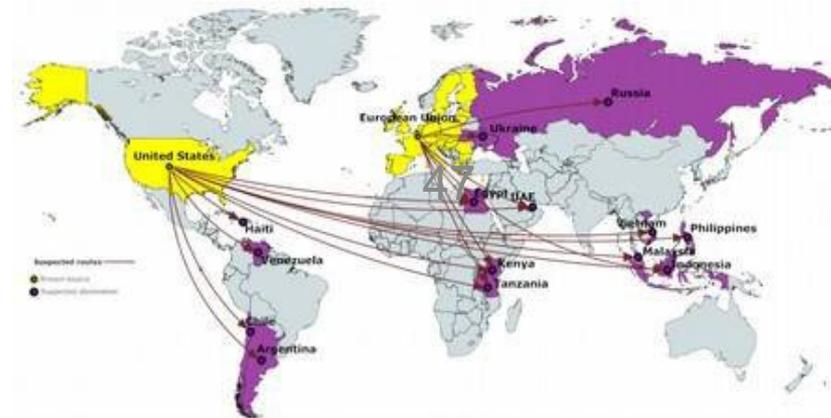
décharge d'Agbogbloshie, Accra, Ghana

# Routes de déchets



Les routes officielles

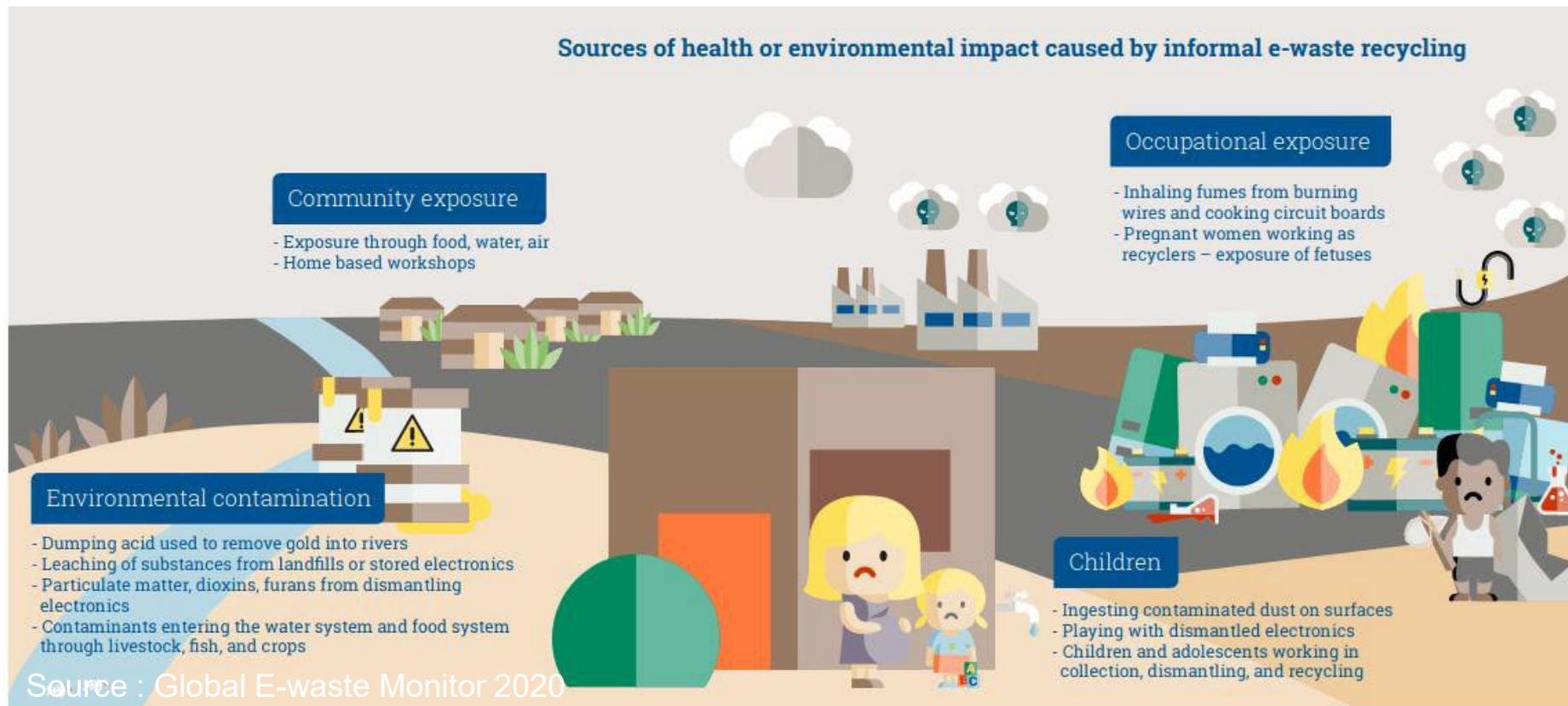
Les autres...



Ref : Int. J. Environ. Res. Public Health 2016, 13(8), 789;  
Quantifying the Effect of Macroeconomic and Social  
Factors on Illegal E-Waste Trade Loukia Efthymiou,  
Amaryllis Mavragani and Konstantinos P. Tsagarakis \*  
(ORCID)

Business and Environmental Technology Economics Lab, Department of Environmental Engineering, School of  
Engineering, Democritus University of Thrace, Vas. Sofias 12, Xanthi  
67100, Greece

# Impacts sociaux et environnementaux



# En résumé



# Fin de vie : quelques bonnes pratiques

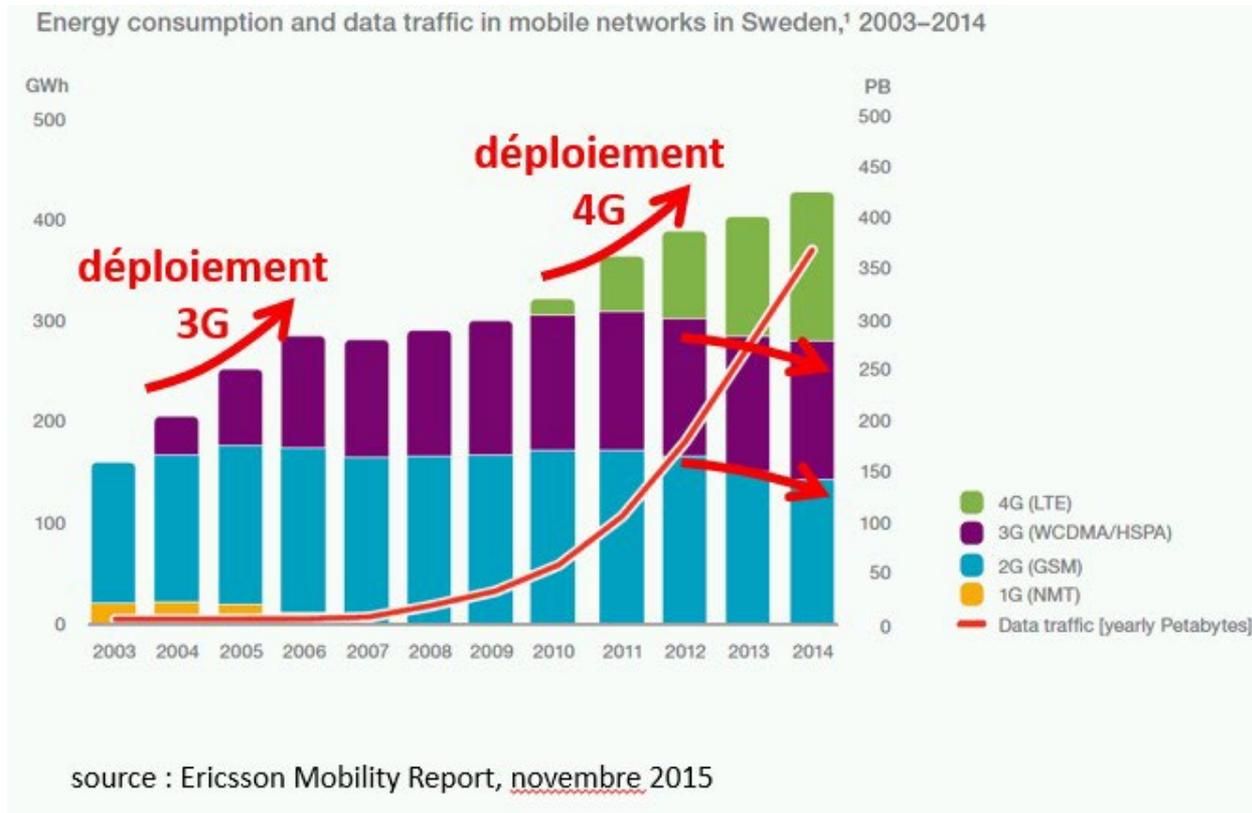
- Le meilleur DEEE est celui qu'on ne produit pas
  - Prolonger la durée de vie au-delà de 5 ans : acheter des extensions de mémoire, réparer
  - Favoriser le réemploi
- Lorsque le matériel est hors d'usage, s'adresser à des filières ou associations spécialisées et agréées

Éléments de réflexion sur nos usages

## Un débat d'actualité : la 5G

De nombreux points de controverses, en particulier sur la hausse de la consommation d'énergie.

<https://gauthierroussilhe.com/ressources/la-controverse-de-la-5g>



# Un débat d'actualité : la 5G

**Controverse énergétique** : + de données, + d'infrastructure, + de terminaux

**Controverse économique** : Coût très important pour les opérateurs → hausse du prix des forfaits, aggravation des inégalités dans les zones rurales

**Controverse foncière**: un maillage d'antennes très dense doit être déployé (4 à 5 fois plus de stations 5G pour la même couverture que la 4G, en pratique, multiplication par 20)

**Controverse sanitaire** : effets des radiofréquences et des micro-ondes sur la santé. Aujourd'hui on ne peut pas assurer qu'il n'y en a pas. Aucune étude spécifique, les opérateurs avancent à l'aveugle

**Controverse Géopolitique** : Il existe 5 grands groupes capables de produire des infrastructures 5G : Ericsson (Suède), Nokia (Finlande), Huawei (Chine), ZTE (Chine) et Samsung (Corée du sud).

→ souveraineté, sécurité, espionnage, etc..

# Un débat d'actualité : la 5G

*Top des vendeurs globaux d'équipements 5G*

## 5G Key Global Vendors

Vendor	Country	Technology sectors primary	Technology sectors secondary	Notes
Ericsson	Sweden	Network equipment, integration	Fiber backhaul	Joint work on end-to-end services with Fujitsu
Nokia	Finland	Network equipment, integration	Fiber backhaul, edge devices	
Huawei	China	Network equipment, integration	Fiber backhaul, edge devices	
ZTE	China	Network equipment, integration	Fiber backhaul, edge devices	
Samsung	South Korea	Network equipment, integration	Edge devices	Joint development of base stations with NEC
LG	South Korea	Edge devices		
Qualcomm	US	Mobile chipsets, modems	Infrastructure semiconductors	
Intel	US	Mobile chipsets, modems		
Broadcom	US	Mobile chipsets, other ICs		
Cisco	US	Data center equipment, routers		
InterDigital	US	IoT devices		
NXP	Netherlands	IoT devices		
Alcatel Lucent	France	Fiber connectivity	Fiber backhaul	
Fujitsu	Japan	Edge devices, systems integration		
NEC	Japan	Network equipment		
NTT	Japan	Edge devices		
Panasonic	Japan	Edge devices		

## Et la 6G pour après ?

*"La 6G offrira des gains de performances selon les métriques habituelles de capacité, latence et fiabilité des connexions, mais aspire à bien plus que cela. Elle vise à entrer de manière plus étroite dans notre quotidien en créant **l'internet des sens**. La combinaison des capacités de détection multimodale avec les technologies cognitives rendra possible l'analyse des modèles de comportement, préférences et émotions des utilisateurs, **créant ainsi un sixième sens qui anticipe les besoins des utilisateurs**. Cela permettra des interactions avec le monde physique d'une manière beaucoup plus intuitive."*

[La 6G : vers une convergence des mondes humains, physiques et numériques ?](#)

Le numérique comme solution pour la transition écologique, oui mais...

# Plus de numérique pour améliorer d'autres secteurs ?

## Optimisation

- des flux de transport (personnes et marchandises)
  - augmente le trafic
  - créer un monde en flux tendu, quid de la résilience ?

## Dépendances

- à des outils complexes et difficiles à maîtriser
  - verrouillages socio-technologiques
- à des ressources non locales

**exacerbé  
par l'IA**

Intelligence artificielle: un plan de 2,2 milliards d'euros pour faire de la France « un champion » du secteur

AFP  
- 09/10/2020



# Ex. Agriculture-Numérique

## Livre blanc Agriculture-Numérique Inria-Inrae

- <https://www.inria.fr/livre-blanc-inria-agriculture-numerique>
- Chapitre 5 – Risques
  - 1) Compromettre la transition écologique de l'agriculture
    - Verrouiller la transition agroécologique, Distendre le lien de l'Homme à la nature, Contribuer à l'empreinte environnementale croissante du numérique
  - 2) Renforcement des inégalités et des rapports de forces
    - Des risques d'exclusion, Perte d'autonomie des agriculteurs, Contrôle par l'aval et par l'amont, Accès à l'information et à la formation, et quel rôle pour le conseil ?
  - 3) Perte de souveraineté
    - Perte d'autonomie dans la maîtrise de l'alimentation, Confiscation des données agricoles, Perte de maîtrise de l'outil de production, Un enjeu de cybersécurité
  - 4) Accentuation de vulnérabilités et rendements négatifs
    - Vulnérabilités du système agroalimentaire, Complexification, rendements décroissants et risques associés



# Loi Réduire Empreinte Environnementale du Numérique (2021)

Repris de Gael Guennebaud, 2022

- **Enseigner la sobriété numérique**
- **Limiter le renouvellement des terminaux (*pratiques commerciales vertueuses*)**
- ***Plus d'interdictions liées à l'obsolescence programmée (matérielle et logicielle)***
- **Promouvoir le « reconditionné » et faciliter le travail des reconditionneurs** (l'article interdit de limiter l'accès aux pièces détachées, informations ..)
- **Augmenter les objectifs de recyclage par catégorie** (Les objectifs de recyclage, réemploi et réparation des éco-organismes (ou systèmes individuels agréés) sont « déclinés de manière spécifique pour certains biens comportant des éléments numériques », au plus tard au 1<sup>er</sup> janvier 2028.)
- **Création d'un observatoire des impacts environnementaux du numérique** pour « analyser et quantifier les impacts directs et indirects du numérique sur l'environnement ainsi que la contribution apportée par le numérique, notamment l'intelligence artificielle, à la transition écologique et solidaire. Il élabore une définition de la sobriété numérique. » Il est placé auprès de l'Ademe et de l'Arcep

Voir : <https://label-nr.fr/decryptage-loi-reen/>

# Qu'en penser ?

## **Des premiers pas dans la bonne directions**

- Favorise (un peu) l'allongement de la durée de vie des équipements
  - Lutte contre l'obsolescence (mais aussi des freins au reconditionné)
- Responsabilisation d'une partie des acteurs institutionnels et des producteurs (recyclage)
- Formation

## **Mais aucune mesure vraiment contraignante ou limitante, rien sur :**

- Durée de garantie sérieuse
- Réduire les publicités
- Lutter contre l'obsolescence logiciel
- Maîtriser les volumes de données
- Réduire le nombre d'équipements importés
- Limiter le nombre d'écrans (ils sont partout et toujours plus)
- Limiter le développement de nouvelles techno superflues
- ...

# Bilan et recommandations

# Bilan

- Se méfier des chiffres en  $x$  kgCO<sub>2</sub>  
... et autres indicateurs d'efficacités.
- Le bilan énergétique et CO<sub>2</sub> du numérique est préoccupant, mais...  
... d'autres indicateurs environnementaux et sociétaux le sont bien plus.
- La « dématérialisation » cache une réalité bien matériel...  
... et tout est orchestré pour la dissimuler.
  - e.g., cloud, fausse gratuité, sur-dimensionnement, **no limit**, ...
- Effets rebonds
  - Les besoins vont continuer d'augmenter → sur-dimensionnement → appel d'air → l'usage augmente → ...

→ **Un numérique « raisonné », responsable ? Que faire à notre échelle ?**

# Réduire les impacts à la fabrication/fin de vie

## Fabrication

- Limiter le nombre
- Les garder longtemps (quid de l'obsolescence ?)
- Acheter de 2nde main / reconditionné
- Acheter des équipements éco-conçus :
  - Ecolabel Européen, EPET, Ange bleu, TCO et Ecolabel nordique
  - ex. fairphone, frankenphone, frame.work
- Éviter les livraisons par avion

## Fin de vie

- Les réparer, réemploie en interne
- Revendre/donner si fonctionnel / réparable
- Bien choisir sa filière de recyclage

# Fin de vie : déjouer l'obsolescence liée au logiciel

- Installer des systèmes compétitifs sur de « vieilles » machines
  - ex: Emmabuntüs, <https://emmabuntus.org/>
- Utiliser des logiciels libres
  - <https://reporterre.net/Contre-l-obsolescence-informatique>
- S'affranchir des GAFAM
  - Commown [propose depuis octobre 2018 un fairphone « dégafamisé »](#), maintenant sous [/e/OS pour les Fairphones 3 et 3+](#)
  - <https://iode.tech/> (dégafamisé et reconditionné)

# Réduire les impacts à l'usage

## Usage

- Éteindre les appareils, box
- Limiter l'utilisation du cloud, favoriser l'usage des données en local, faire le tri
- Privilégier les réseaux filaires (puis, wifi et enfin la 4G) [World Digital Cleanup Day](#)
- Mails : limiter les pièces jointes
- Limiter les recherches sur internet
  - **diminuer le nombre de pages consultées** en utilisant des mots clés
  - **saisir** quand c'est possible, directement **l'adresse du site** dans la barre de navigation

## Vidéos

- Limiter le streaming, couper les caméras lorsque non nécessaire
- Diminuer la qualité des vidéos
  - x10 entre 144p et 1024p, 360-480p souvent suffisant
  - Désactiver la lecture automatique ds vidéos (eg. Sur facebook)
- S'informer sur sa consommation en Go [Outil : Carbonalyzer]

# Quelques recommandations logicielles

## **Navigateur web**

- Brave (respect de la vie privée, pas de pub, rapide et léger, open-source)
- Firefox (+add-ons UBlock origin, ghostery)

Bloquer les pubs, les trackers

## **Moteur de recherche**

- Lilo (méta-moteur hébergé en France)
- Duck duck go

Privilégier les outils institutionnels pour les dépôts de fichiers (filesender) et planification de rdv (evento)

# En tant que développeur/ingénieur

- Démarche d'éco-conception, Green IT
  - <https://ecoconceptionweb.com/>
  - <https://www.eco-conception.fr>
  - [Déployer la sobriété numérique](#)
  - [référentiels de bonnes pratiques](#)
  - [https://collectif.greenit.fr/ecoconception-web/2019-05-Ref-eco\\_web-checklist.v3.pdf](https://collectif.greenit.fr/ecoconception-web/2019-05-Ref-eco_web-checklist.v3.pdf)
- Éviter le surdimensionnement
- Oeuvrer contre l'obsolescence logiciel et matériel
- Réfléchir avant de lancer des heures de calcul (simu, IA, etc.)
- Évaluer les impacts potentiels d'une techno avant un déploiement à grande échelle
- Bien choisir sa pile logicielle, son langage de programmation
- **Mesurer** les consommations,

# À regarder

- Le numérique : menace ou espoir pour l'environnement ? - Françoise Berthoud - Ecoinfo (2019)
  - <https://tube.nocturlab.fr/videos/watch/3fb56d1e-dc15-43d3-98a7-a359694f746a>
- La tragédie électronique, Arte (2014)
  - <http://download.pro.arte.tv/uploads/tragedie-electronique.pdf>
  - [https://boutique.arte.tv/detail/tragedie\\_electronique](https://boutique.arte.tv/detail/tragedie_electronique)
- Déchets électroniques, le grand détournement, France 5 (2019)
  - <https://www.youtube.com/watch?v=uZI99xZDVkg>
- Conf TEDxLille de Guillaume Pitron sur les métaux rares (2018)
  - <https://www.youtube.com/watch?v=LWUUDLBYb-Q&feature=youtu.be>
- La Face Cachée des énergies vertes, Arte (2020)
  - <https://www.arte.tv/fr/videos/084757-000-A/la-face-cachee-des-energies-vertes/>
- Discours de Denis Mukwege, prix Nobel de la paix, le 10 décembre 2018. Source : <https://www.youtube.com/watch?v=whsRdYLVmw4>  
(à partir de 9mn sur les ressources naturelles)

# À lire

- Impacts écologiques des technologies de l'Information et de la Communication, Groupe ÉcoInfo, 2012
- L'impératif de la sobriété numérique, l'enjeu des modes de vie. Fabrice Flipo, 2020
- La Guerre des Métaux Rares, Guillaume Pitron, 2019
- « L'Enfer numérique. Voyage au bout d'un Like » , Guillaume Pitron, 2021



The image shows a screenshot of the EcolInfo website. The header features the EcolInfo logo (a green flower) and the text 'EcolInfo' in purple, with the tagline 'POUR UNE INFORMATIQUE ÉCO-RESPONSABLE' below it. To the right of the logo is a decorative banner with various icons representing technology, environment, and communication. Further right is the 'cnrs GDS' logo. Below the header is a navigation bar with four items: 'SERVICES', 'THÉMATIQUES', 'RESSOURCES', and 'LE GDS'. The main content area is divided into two columns. The left column is titled 'EcolInfo' and contains the text: 'Agir pour réduire les impacts environnementaux et sociétaux négatifs des technologies du numérique. Cet espace est pour vous : enseignant, informaticien, décideur, acheteur, logisticien, en charge du développement durable, et tout particulièrement si vous travaillez dans le secteur de l'enseignement supérieur et de la recherche ou vous êtes simplement curieux ...'. The right column is titled 'Agir vers la sobriété numérique' and contains the text: 'EcolInfo souhaite ainsi vous accompagner dans l'action et même s'il est difficile de donner des conseils définitifs et absolus, nous allons voir ensemble comment il est possible d'agir suivant différents axes pour réduire les impacts des TICs sur notre environnement et appliquer ainsi une forme de sobriété numérique par des comportements et des choix éco responsables (qui tiennent compte des impacts environnementaux du numérique en cherchant à les

# À faire

The screenshot shows the FUN MOOC website interface. At the top, there is a search bar with the text 'Recherche de cours' and a magnifying glass icon. To the right of the search bar are buttons for 'INSCRIPTION', 'CONNEXION', and 'FAQ', along with a language dropdown menu set to 'Français'. Below the search bar is a navigation menu with links for 'Accueil', 'Actualités', 'Cours', 'GRADEO', 'Diplômes', and 'Etablissements'. The main content area has a dark blue background. At the top of this area, it says 'Vous êtes ici: Accueil > Cours > Impacts environnementaux du numérique'. Below this, there are two red tags: 'Environnement et développement durable' and 'Numérique et technologie'. The main title is 'Impacts environnementaux du numérique' in white, with the reference number 'Réf. 41025' below it. The course details are: 'Effort : 5 heures' and 'Rythme: Auto-rythmé'. A short description follows: 'Impact Num est un Mooc pour se questionner sur les impacts environnementaux du numérique, apprendre à mesurer, décrypter et agir, pour trouver sa place de citoyen dans un monde numérique.' To the right of the text is the 'Inria' logo and social media icons for Facebook, Twitter, LinkedIn, and YouTube. Below the social media icons, it says '2 sessions sont actuellement ouvertes pour ce cours' and a red button labeled 'Choisir maintenant'. In the center of the page is a video player showing a man looking at a smartphone. The video has a play button in the center. In the top left corner of the video, there is a logo for 'IMPACT • NUM' featuring a stylized robot head. In the top right corner of the video, there is a small French flag icon.

<https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/impacts-environnementaux-du-numerique/>