



CNRS - INP - UT3 - UT1 - UT2J

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse



# Numérique et changement climatique

**Georges Da Costa**

[georges.da-costa@irit.fr](mailto:georges.da-costa@irit.fr)

<https://www.irit.fr/~Georges.Da-Costa/>





# Changement climatique et énergie



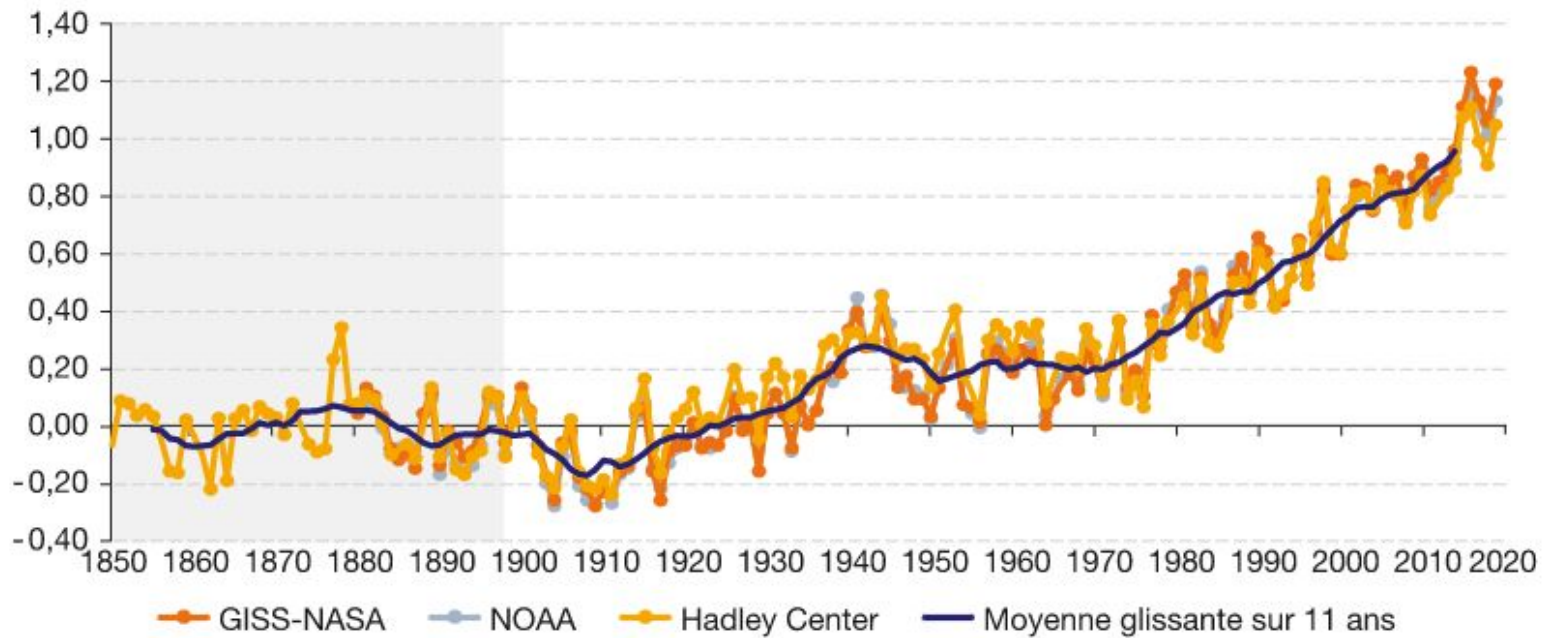


# Un changement climatique en cours

ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE MONDIALE DE 1850 À 2019

En °C

Anomalie des températures (référence 1850-1900)



Note : en grisé la période préindustrielle 1850-1900.

Sources : NASA ; NOAA ; Hadley Center



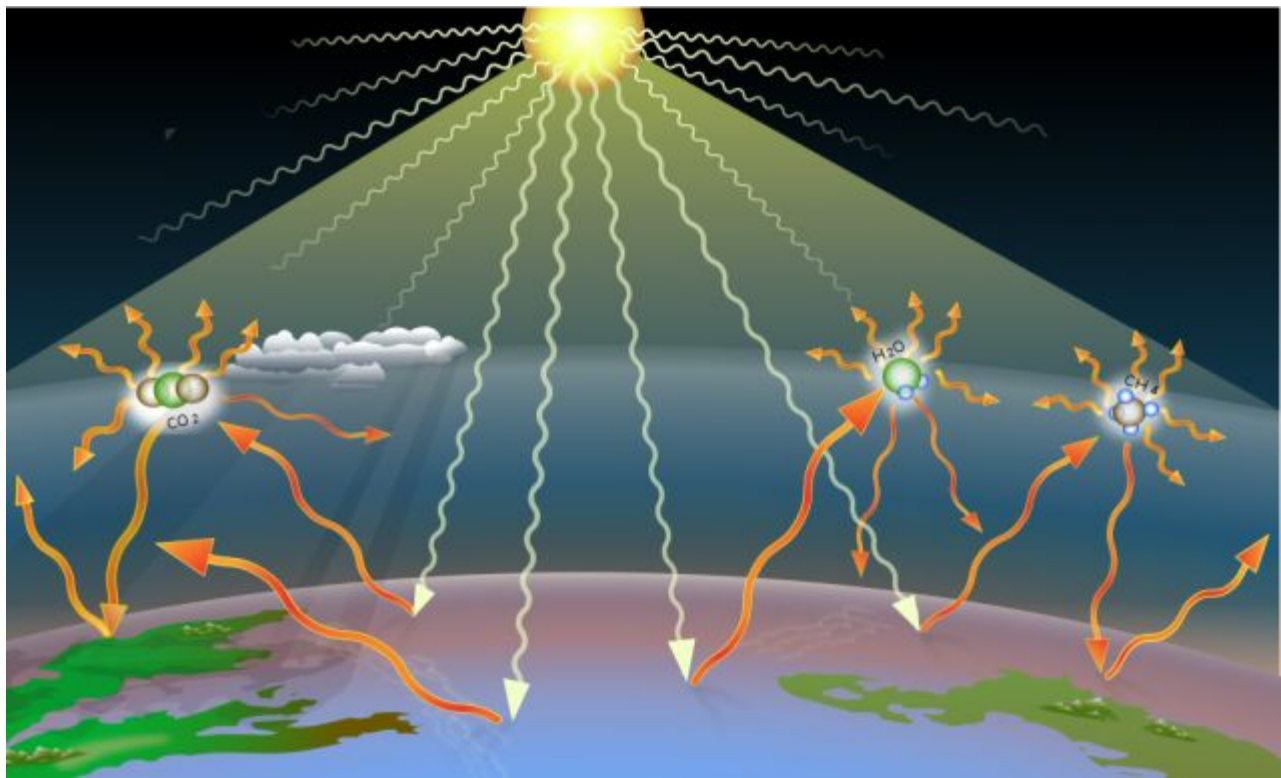
# Une source principale simple et connue

L'effet de serre

Principalement

- $\text{CO}_2$
- $\text{H}_2\text{O}$
- $\text{CH}_4$

A loose necktie on  
Wikimedia Commons





# Un équilibre précaire

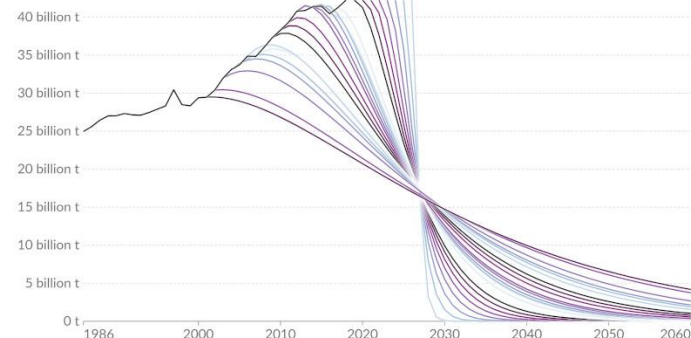
Historiquement : 750 GTonnes/an émis et absorbés

- $H_2O$  et  $CO_2$
- Méthane  $CH_4$ , protoxyde d'azote  $N_2O$  et ozone  $O_3$
- $CO_2$ ,  $CH_4$  et  $N_2O$  couvrent 96% des 7 GES pris en compte dans le cadre du protocole de Kyoto

Longue durée

- 100 ans pour  $CO_2$ , 9 ans pour méthane

CO<sub>2</sub> reductions needed to keep global temperature rise below 1.5°C  
Annual emissions of carbon dioxide under various mitigation scenarios to keep global average temperature rise below 1.5°C. Scenarios are based on the CO<sub>2</sub> reductions necessary if mitigation had started - with global emissions peaking and quickly reducing - in the given year.

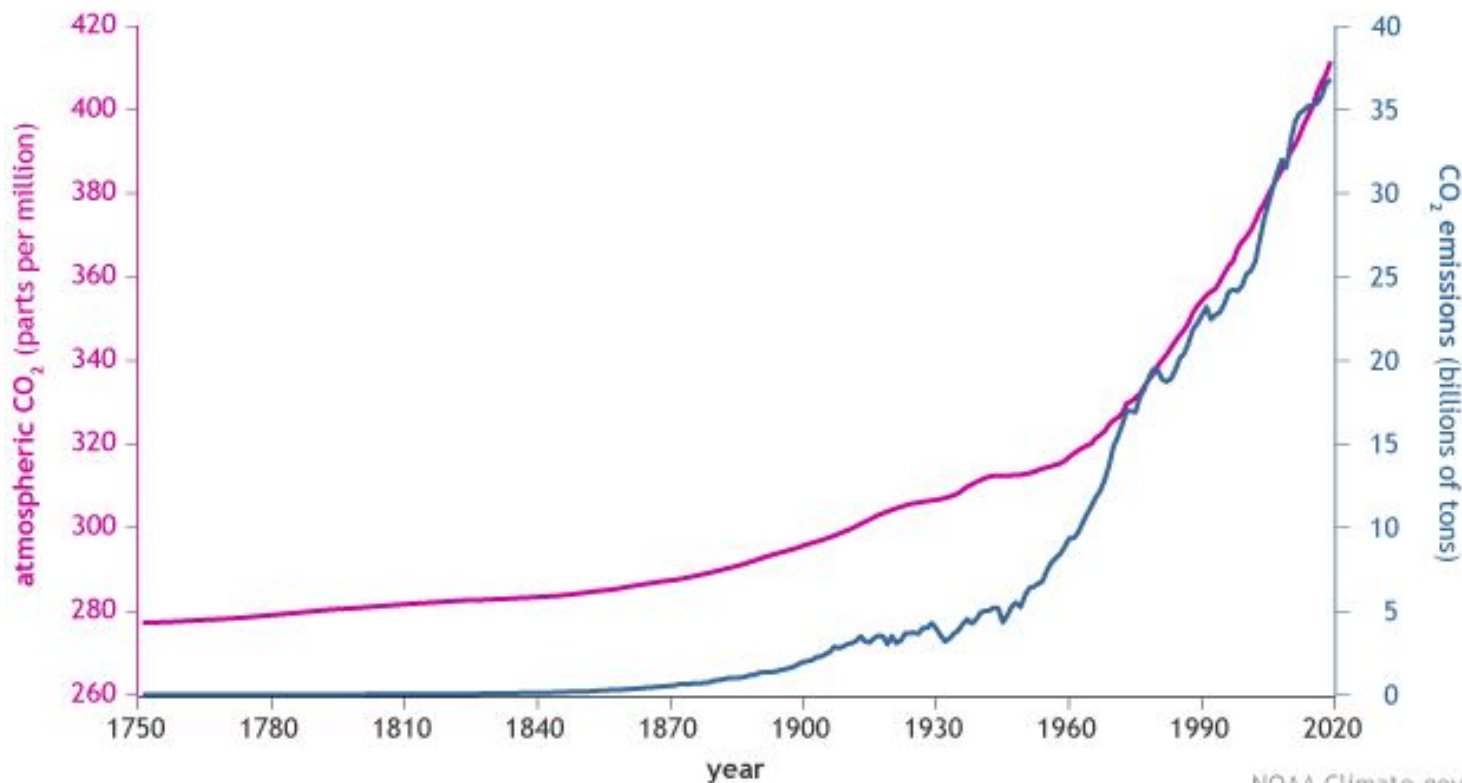


Source: Robbie Andrews (2019); based on Global Carbon Project & IPCC SR15  
Note: Carbon budgets are based on a ~66% chance of staying below 1.5°C from the IPCC's SR15 Report.  
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY



# CO<sub>2</sub> et révolution industrielle

CO<sub>2</sub> in the atmosphere and annual emissions (1750-2019)

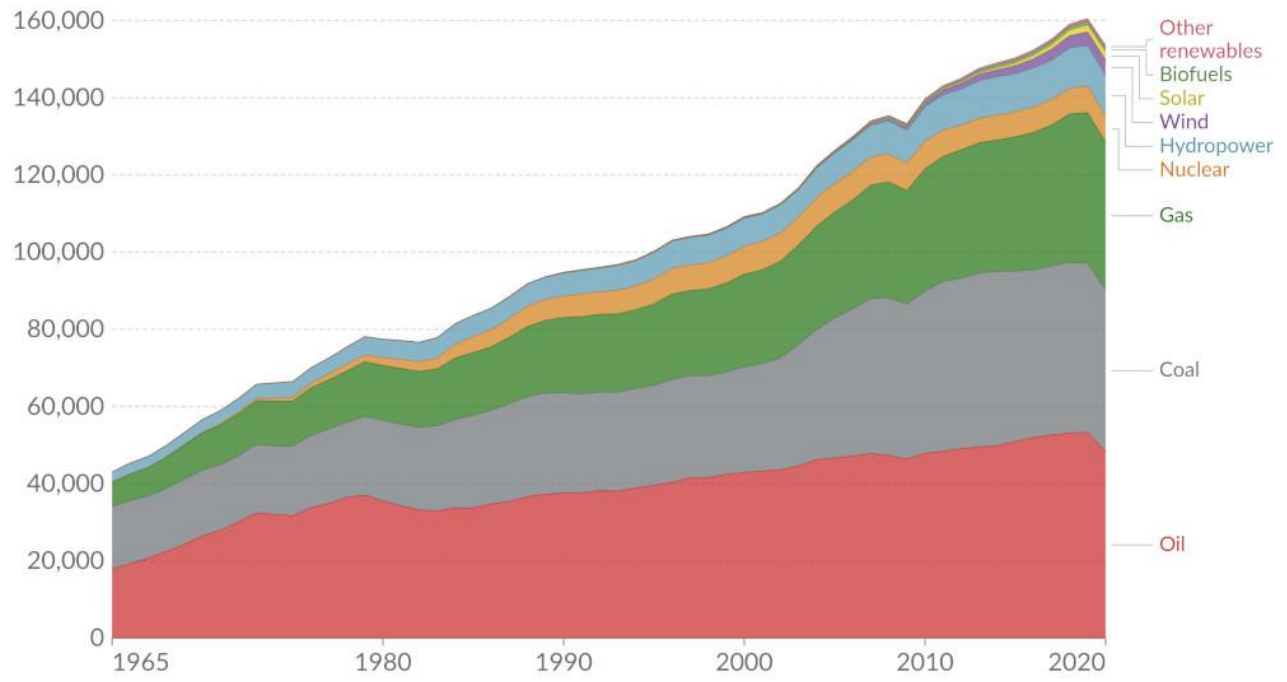




# Mix énergétique global

## Energy consumption by source, World

Primary energy consumption is measured in terawatt-hours (TWh). Here an inefficiency factor (the 'substitution' method) has been applied for fossil fuels, meaning the shares by each energy source give a better approximation of final energy consumption.



Source: BP Statistical Review of World Energy  
Note: 'Other renewables' includes geothermal, biomass and waste energy.





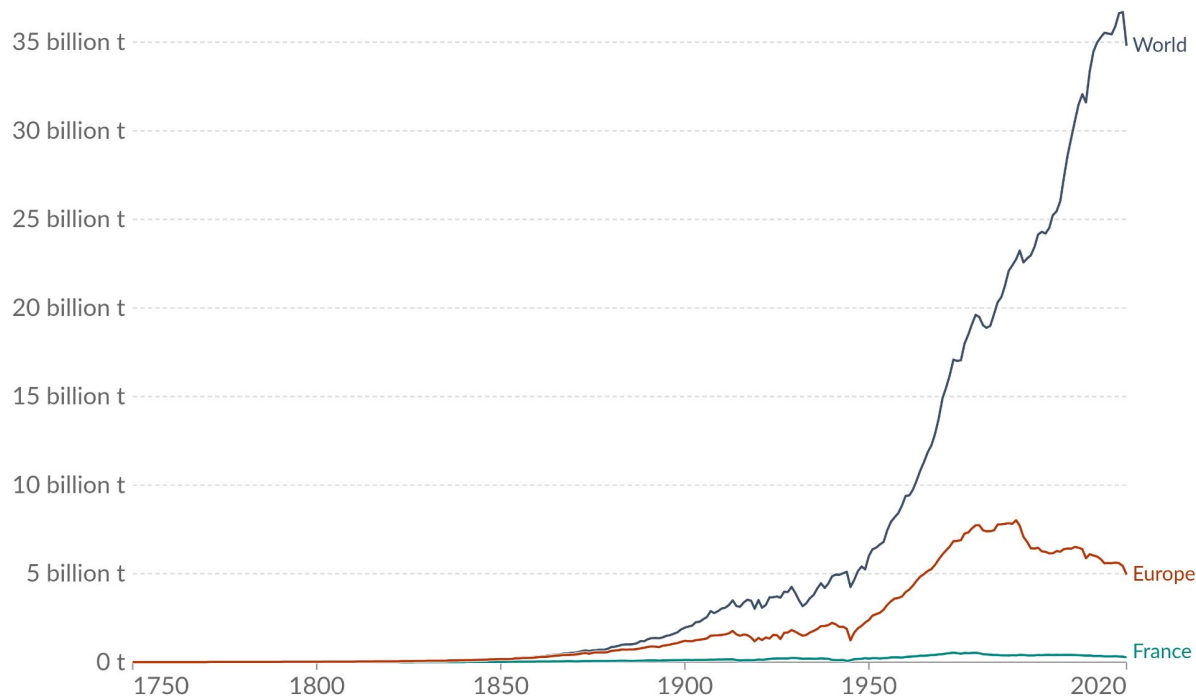


# Production de CO<sub>2</sub> lié à l'énergie

## Annual CO<sub>2</sub> emissions

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from the burning of fossil fuels for energy and cement production. Land use change is not included.

Our World  
in Data



Source: Global Carbon Project

OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY





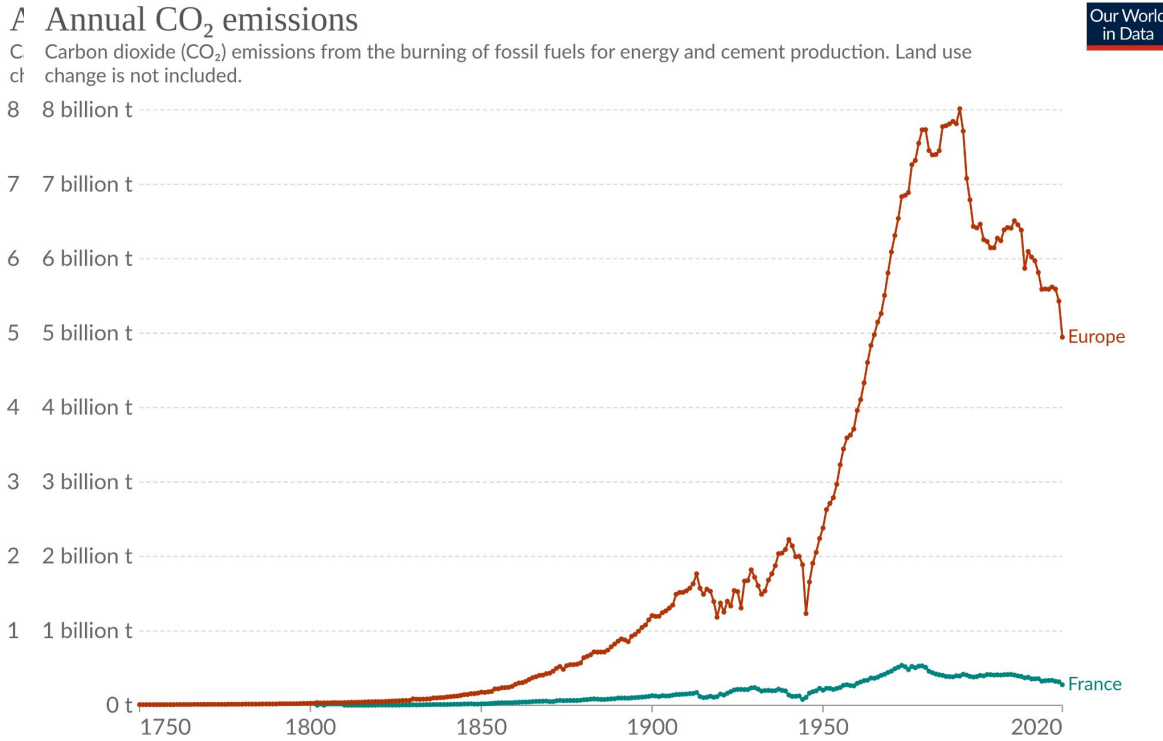


# Zoom en Europe et en France

## CO<sub>2</sub> par personne

- France : 4.6
- EU : 6.4

WorldBank



Our World in Data

Sc Source: Global Carbon Project

OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY



# La difficulté du 100% renouvelable

Sources non contrôlables

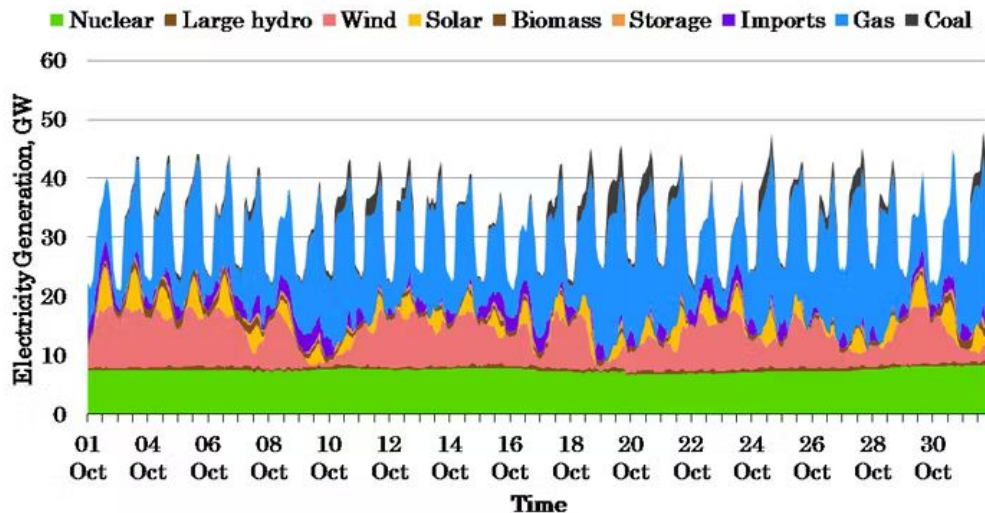
- Renouvelable

Source constante

- Nucléaire

Source d'appoint

- Hydraulique, fuel, charbon, ...



Carbon Emissions	Electricity from Low Carbon Sources	Electricity from Gas
248 gCO <sub>2</sub> eq./kWh	52%	41%

British electricity generation in Oct. 2018

Dr Andrew Crossland/MyGridGB





# Sources d'énergie

Rien n'est neutre en carbone

	Charbon	Diesel	Gaz naturel	Éolien	Photovoltaïque	Nucléaire	Géothermique	Hydrolique
g CO2 eq/kWh	1000	780	443	14.5	44	66	38	12

Durée de vie, production, transport, installation, maintenance

[https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?renouvelable.htm](https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?renouvelable.htm)



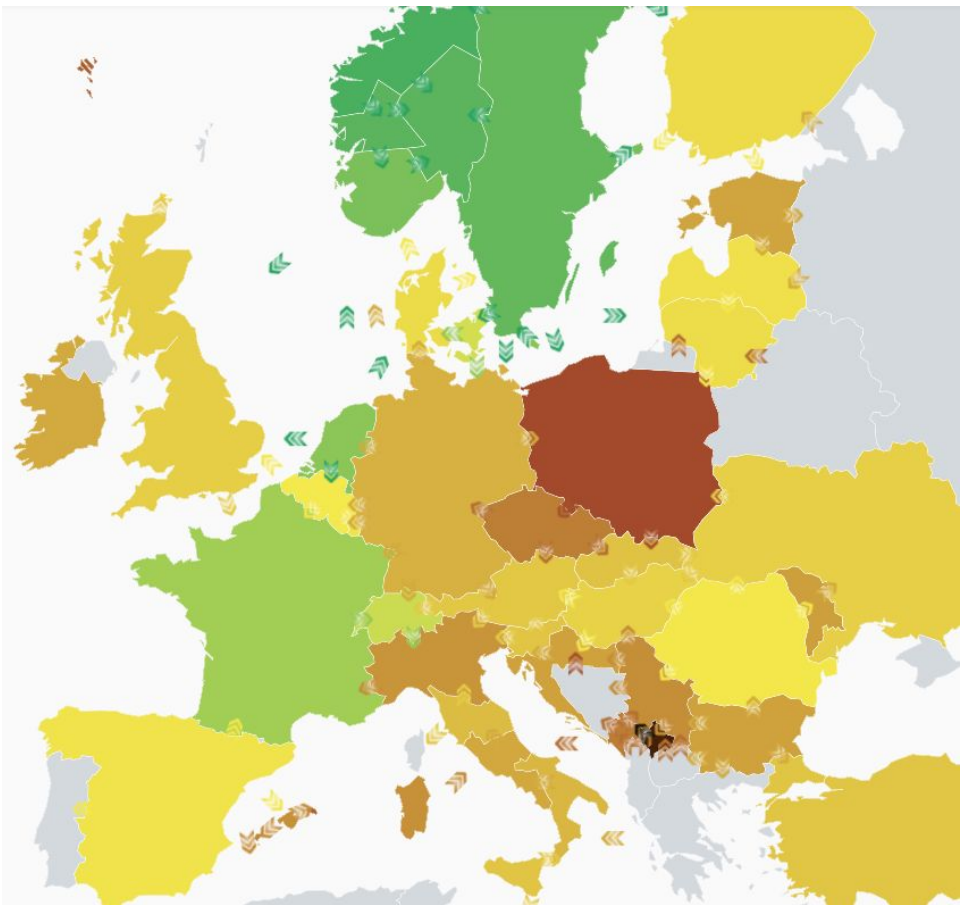


# Un système interconnecté

À différents niveaux :

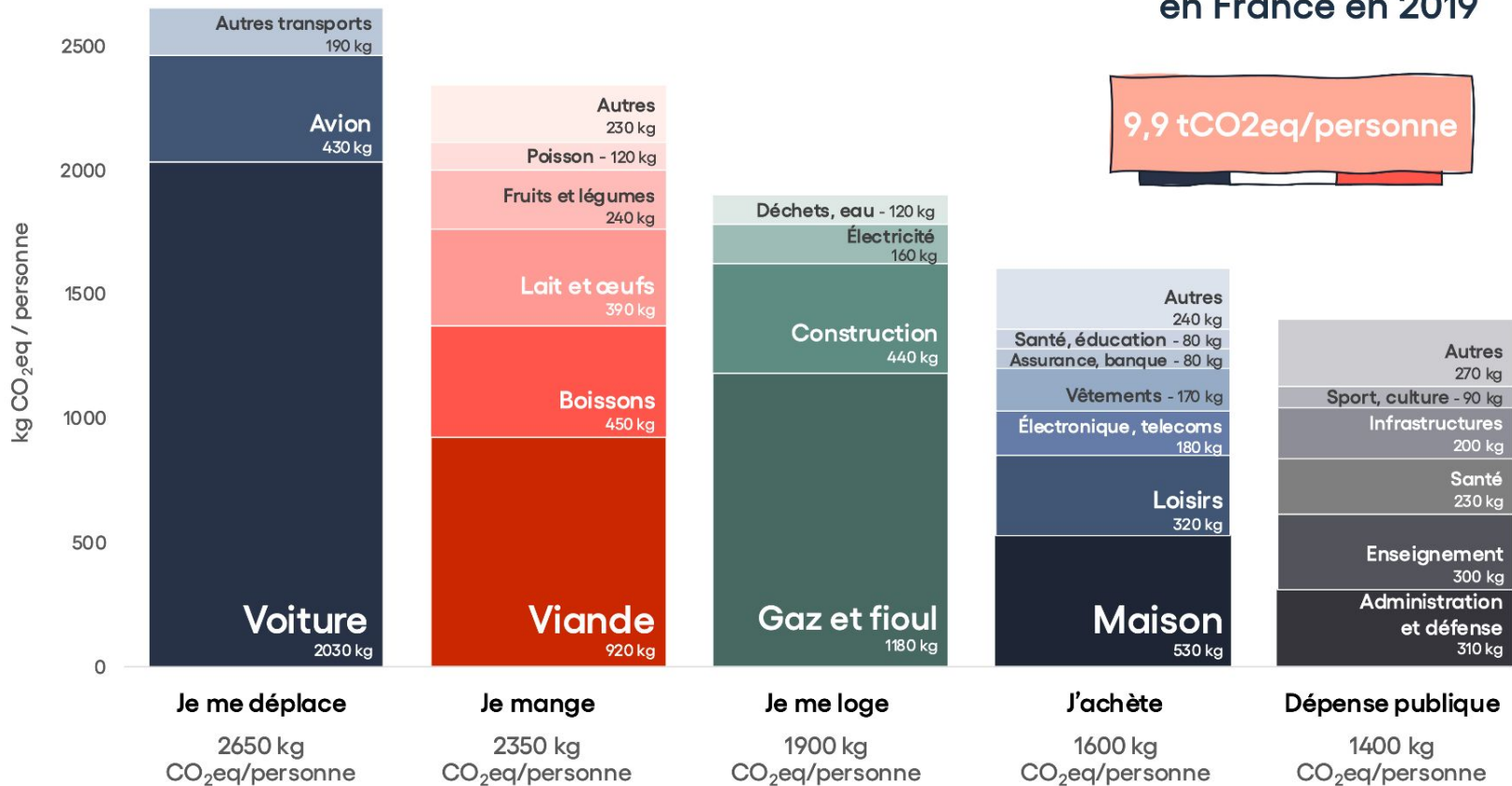
- Régional
- Européen

<https://app.electricitymap.org/map>



# Empreinte carbone moyenne en France en 2019

9,9 tCO<sub>2</sub>eq/personne



Gaz inclus : CO<sub>2</sub> (hors UTCATF France), CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, SF<sub>6</sub>, PFC, H<sub>2</sub>O (trainées de condensation).

Source : MyCO<sub>2</sub> par Carbone 4 d'après le ministère de la Transition écologique, le Haut Conseil pour le Climat, le CITEPA, Agribalyse V3 et INCA 3.



# Consommation visible et invisible

## Energy Slaves



Chiffrez votre effort en pourcentage de réduction ?  
Quelle est la part en pourcentage du numérique ?





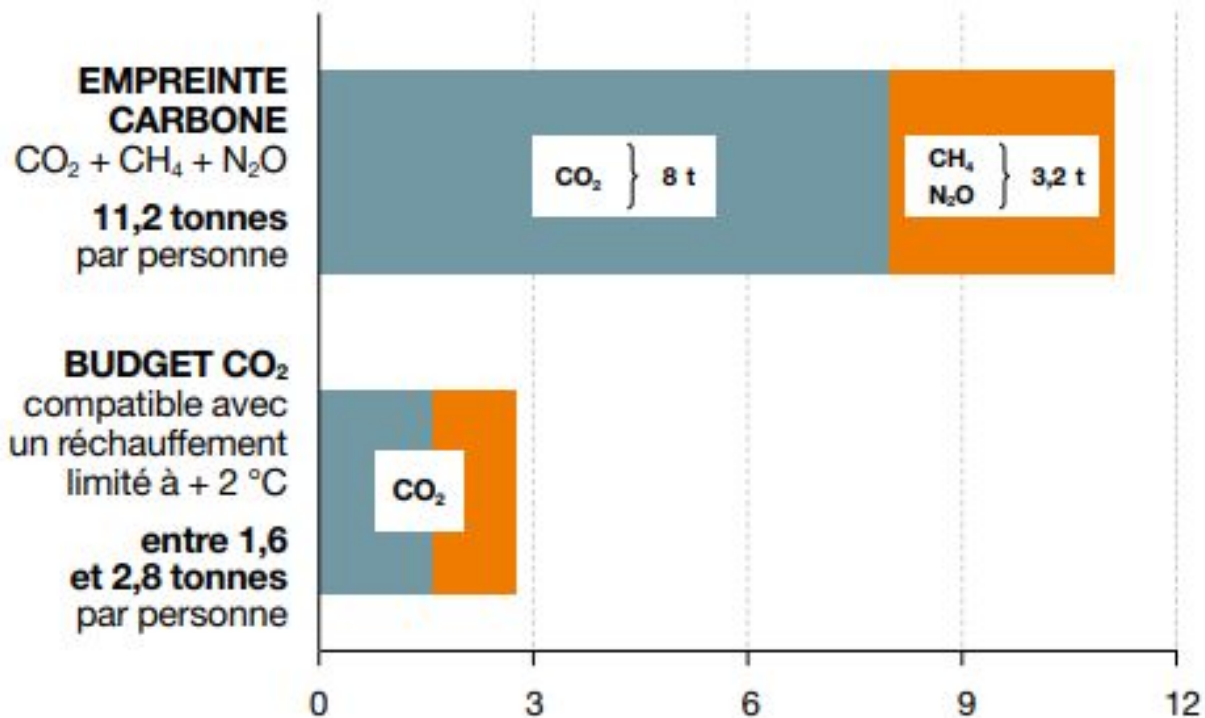
# Mais pas que l'énergie

## Objectif

- Diviser par 6

## Part du Numérique actuel

- 0.8 t sur les 11.2  
GreenIT 2019



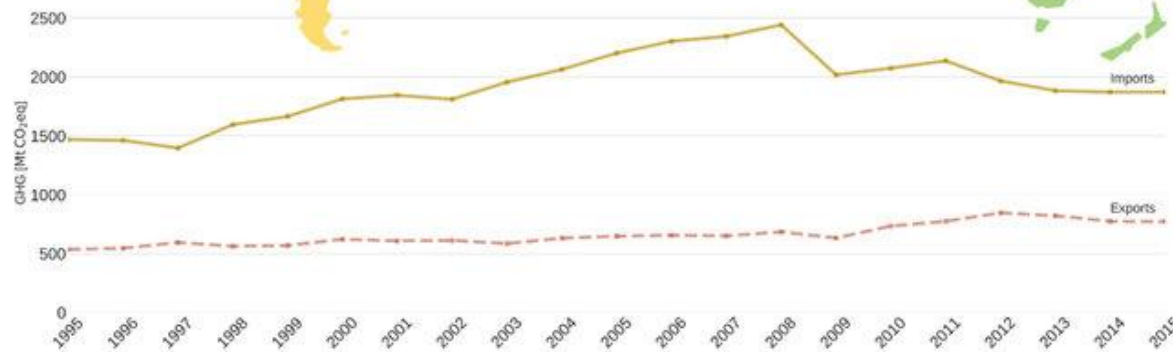
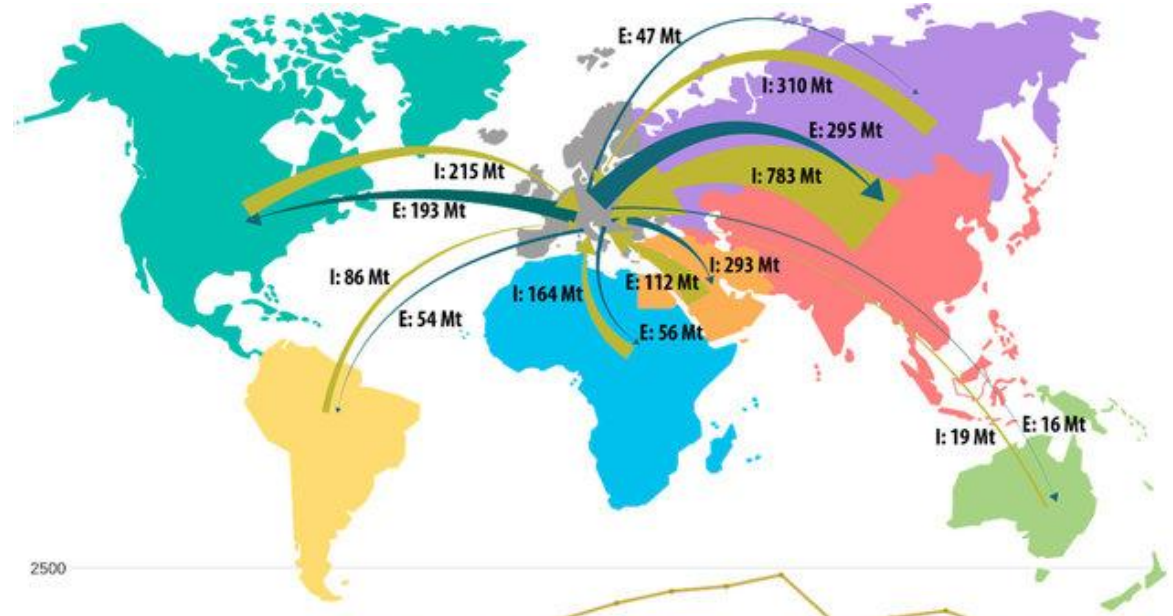
Champ : France métropolitaine + Drom (périmètre Kyoto).  
Sources : GIEC ; Citepa ; AIE ; FAO ; Douanes ; Eurostat ; Insee.  
Traitements : SDES, 2019





# Empreinte d'importation : Europe

Un problème global



Richard Wood et al. 2019



# L'impact du numérique

Partie 1 : Le monde numérique





(c) Rawpixel / Pixabay



Combien un Européen possède-t-il d'appareils numériques

1. Moins de 6
2. 6 à 10
3. Plus de 10

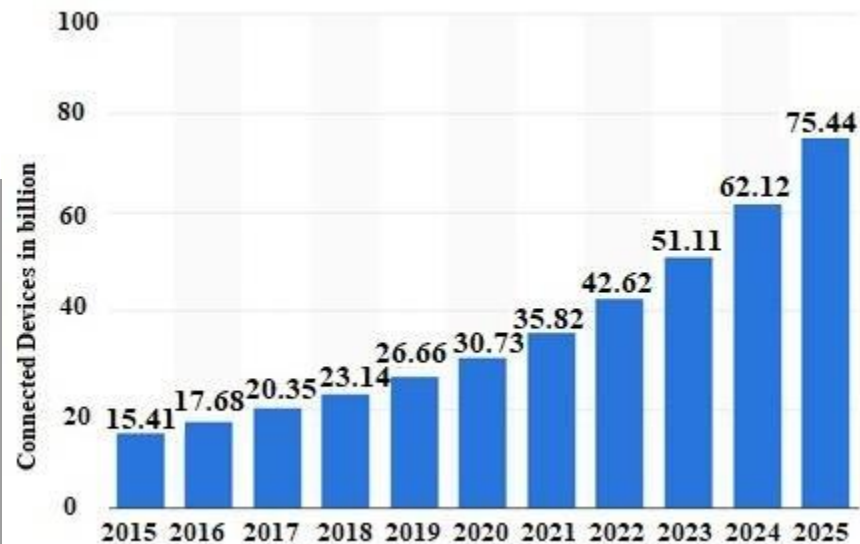




# Les objets connectés

Hors ordinateurs et smartphones

	Monde	France
Equipement	34 milliards	651 millions
Utilisateurs	5 milliards	58 millions
Ratio	4	15
Utilisation journalière	6h42	4h38





# Les services en ligne dans les *nuages*

Site web, banque, snapchat, amazon, ...

Mot clé : virtualisation / transparence

Independents :

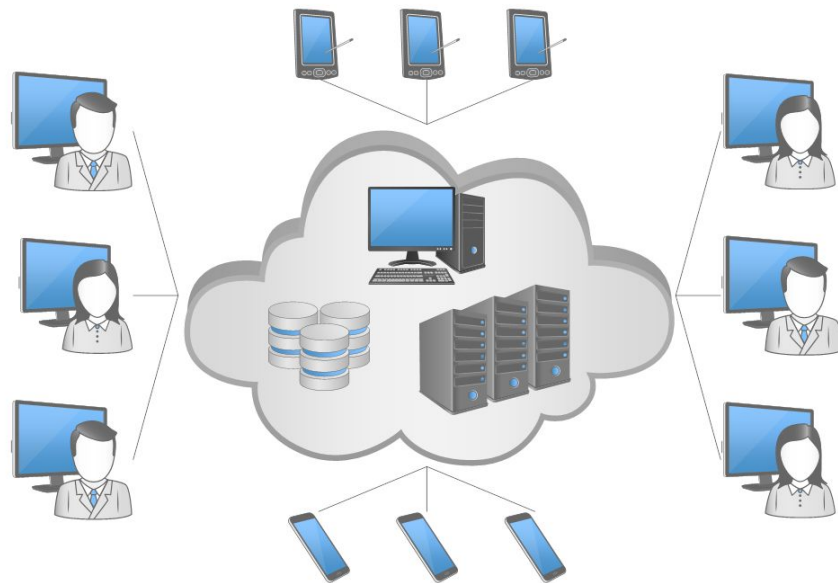
- Du lieu
- Du support

Infini



Comparaison de la lecture video

- En ligne
- En local





# Exemple de page

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr>

Aller sur cette page provoque

- 1 aller retour
- 1 à 9 allers retours
- Au moins 10 allers retours



Et implique

- 1 ordinateur distant
- 4 ordinateurs distants
- Impossible de savoir





# Exemple de page

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr>

- 1.50 g de CO2 par visite
- 46 fichiers
- 4.3Mb
- 1.15s de chargement complet

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







# Le coeur d'internet : les datacenters

Infrastructure physique

Des fermes d'ordinateurs  
Plusieurs services chaque

- Page web
- Moteur de recherche
- Texte des articles
- Autorisations
- Nom du site
- Banque d'images
- ...



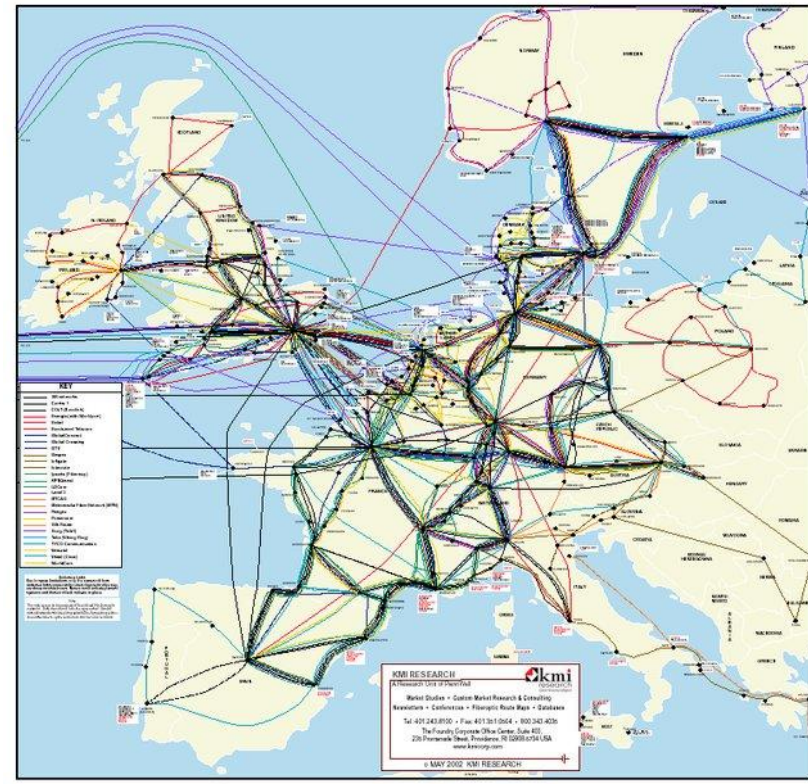
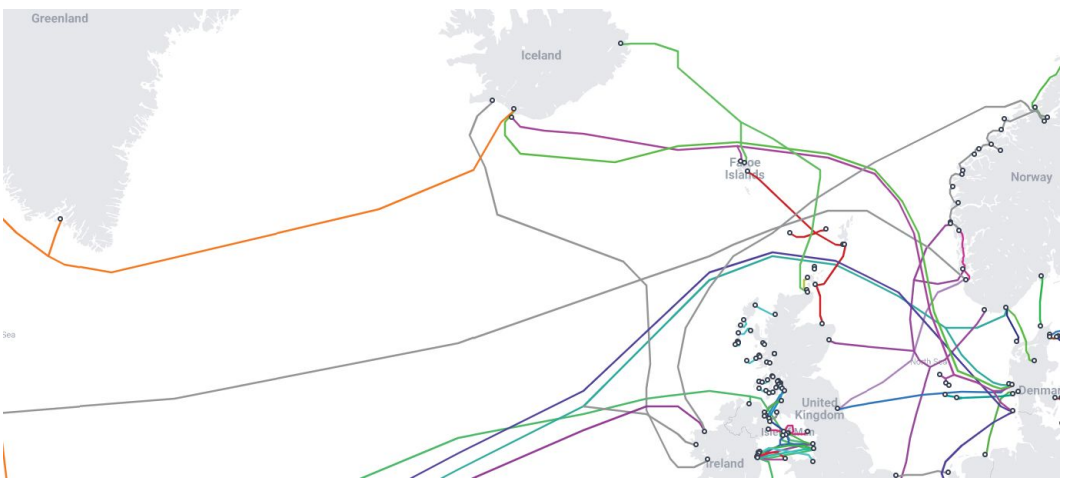


# Internet : Coopération mondiale des DC

Infrastructure physique

Colonne vertébrale d'internet :

- Réseau international de fibre
- Enjeu géopolitique



Laura A. Schintler et al. 2005

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



# Des logiciels complexes

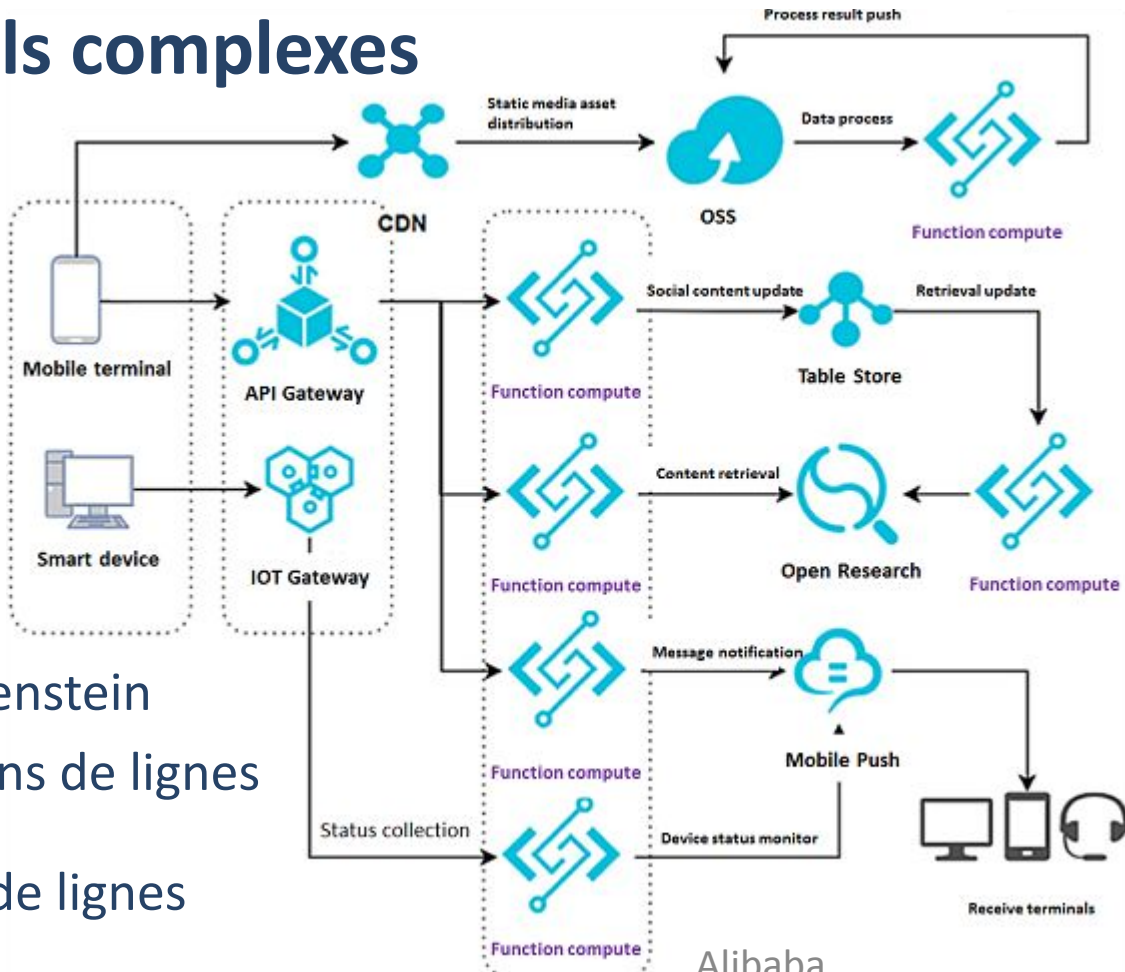
Infrastructure logique

## Des logiciels découpés

- En sous-tâches
  - Simplification
  - Délégation
- Dupliquées
  - Vitesse, résilience

## Le monstre du Dr. Frankenstein

- Facebook : 50 millions de lignes de code
- TikTok : 15 millions de lignes





# L'impact du numérique

Partie 2 : L'impact du numérique





# Mini-quiz

Mon empreinte est surtout liée

1. Aux data centers et à leur consommation électrique ?
2. Au réseau intermédiaire (fournisseur d'accès, fibre optique, colonne vertébrale) ?
3. Au matériel que je possède directement ?



Cette empreinte vient de

1. Mon usage effectif ?
2. La fabrication du matériel ?
3. D'autre(s) source(s) ?



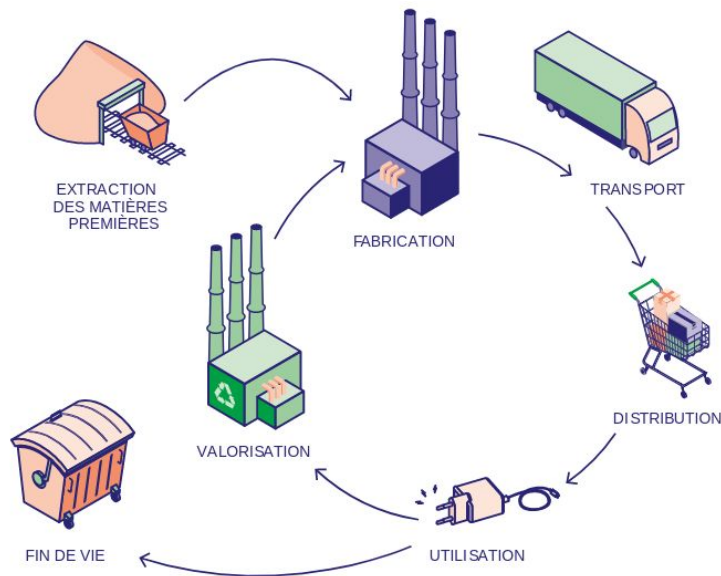




# AVC : Analyse en Cycle de Vie

Au delà de la seule énergie

- Ressources abiotiques
  - kg équivalent antimoine
- Impact climatique
  - kg équivalent CO2
- Consommation d'eau
  - l ou m2 d'eau
- Energie primaire
  - Wh





# Répartition de l'utilisateur au datacenter

Datacenter :

- Forte efficacité
- Pas d'écran
- Toujours actif
- Haute efficacité calcul par Watt

	Utilisateurs 34Mds	Réseaux 1.5Mds	Datacenter .07Mds
Energie	60	23	17
GES	63	22	15
Eau	83	9	7
Electricité	44	32	24
Ressources	75	17	8





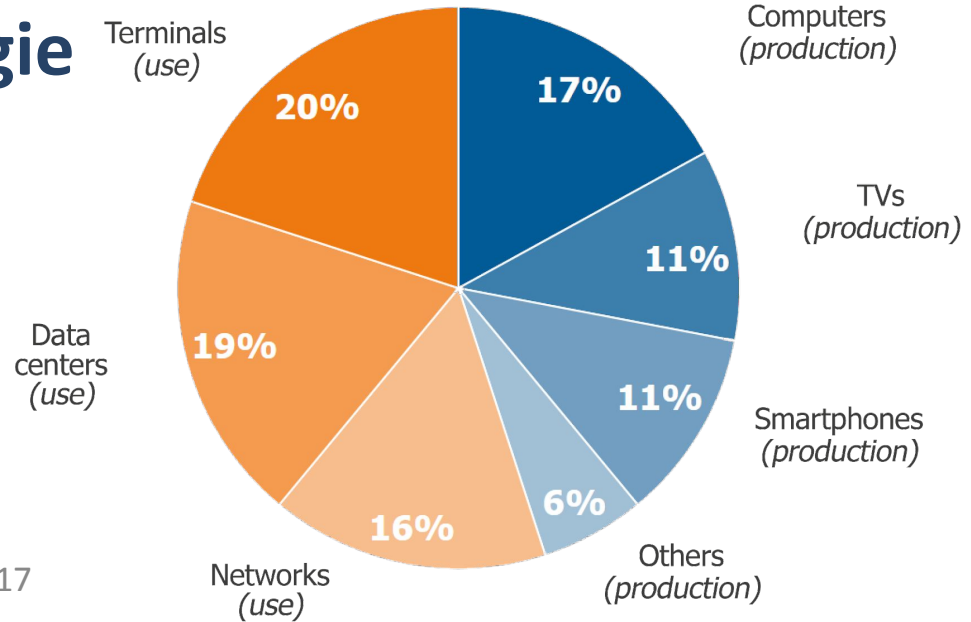


# Zoom sur l'énergie

## Étapes couteuses :

- Extraction et raffinage
  - 1 T cuivre = 100 T à extraire  
*Safe Drinking Water Foundation, 2017*
- Fabrication composants
  - Purification du silicium
    - 2MW par kg
    - 20l d'eau par cm<sup>2</sup>
    - 1% sans défaut
    - Produits toxiques, arsenic, antimoine, phosphore, peroxyde d'hydrogène, acides nitrique, sulfurique et hydrofluorique

ecoInfo 2010



**Distribution of the energy consumption of digital technologies for production (45 %) and use (55 %) in 2017**

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





# Tendance

Usage uniquement

Différents modèles :

- Méthode de calcul
- Degré de changement

Conclusions semblables :

- Explosion

Même la sobriété ne suffit pas à atteindre une réduction

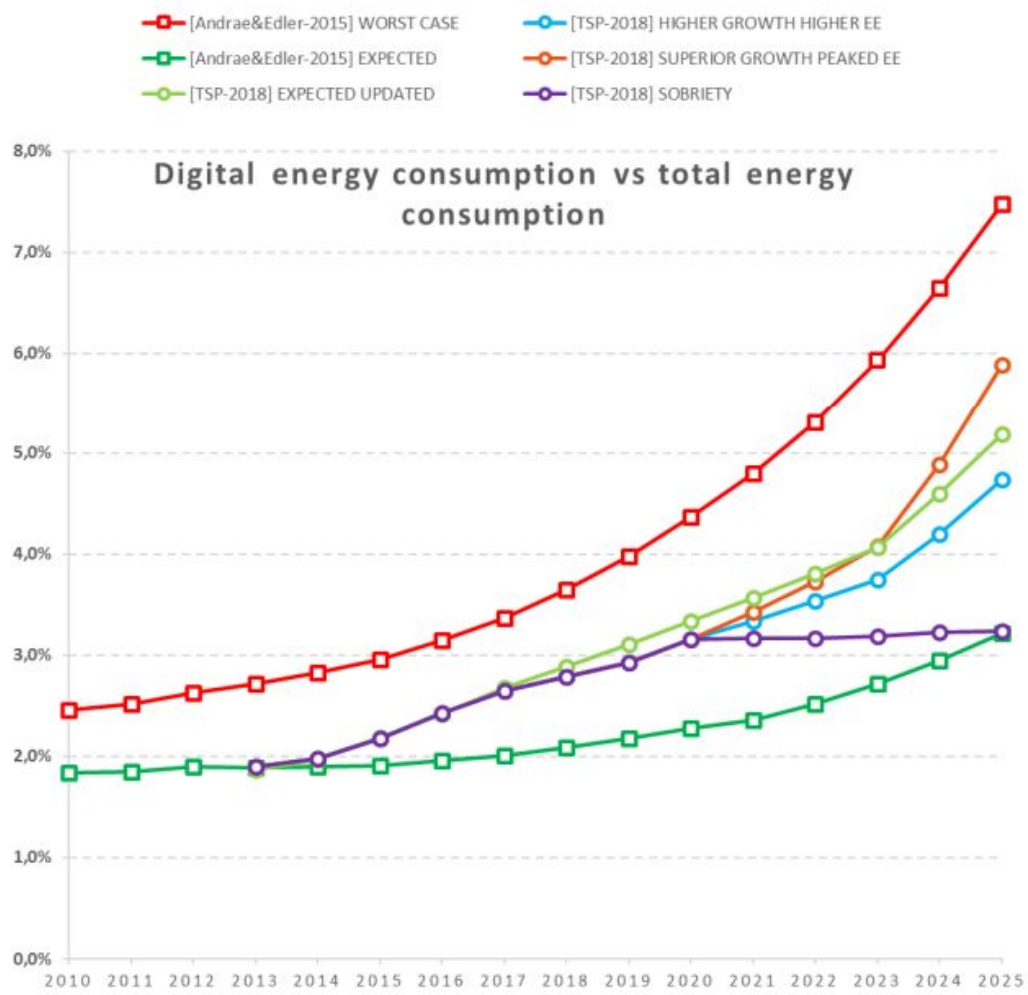
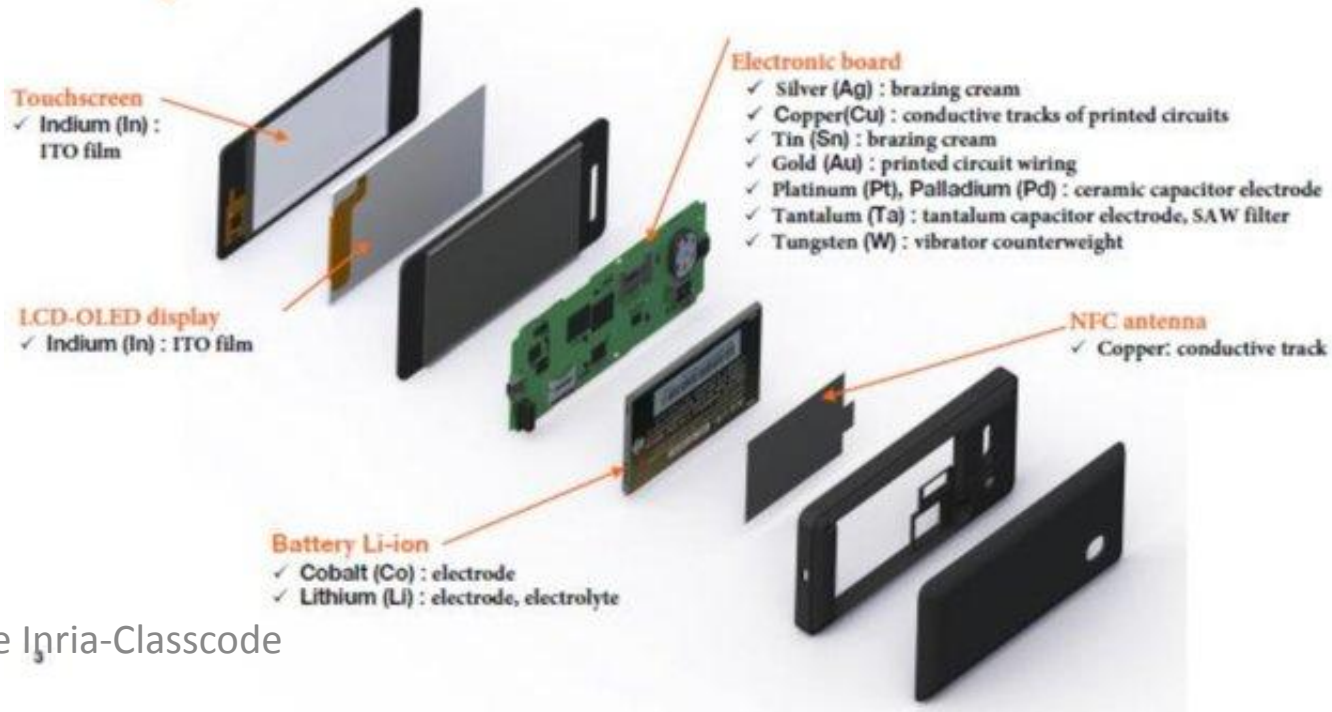


Figure 2: Evolution 2010-2025 of energy consumption of digital technology versus world energy consumption<sup>9</sup>. [Source: [Lean ICT Materials] Forecast Model. Produced by The Shift Project from data published by (Andrae & Edler, 2015)]



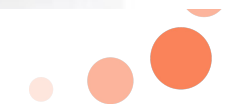
# Exemple : Le smartphone

## Smartphone: architecture and rare metals



## Smartphone Apple 12

- 83% production
- 2% transport
- 14% utilisation
- 1% fin de vie





# Utilisation de matériaux rares

Tensions géopolitiques

Ressources limitées

Tensions dans l'utilisation

The main metals of ICTs.

Bihoux P. , 2015

## The main metals of ICTs

Group → ↓ Périod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo		44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi			
7			**															
	*Lanthanides (Rare earths)			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd		62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
	**Actinides				90 Th		92 U											

 Conductors, contactors, switches	 Welds	 Optoelectronics
 Batteries	 Capacitors	 Misc (others)
 Flame retardant	 Misc (precious)	 Multiple



# Un recyclage difficile

Réserves rentables  
épuisées dans 30 ans  
(greenIT)

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	(117) (Uus)	118 Uuo

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

<1%
  1-10%
  >10-25%
  >25-50%
  >50%

Challenges in Metal Recycling  
2012







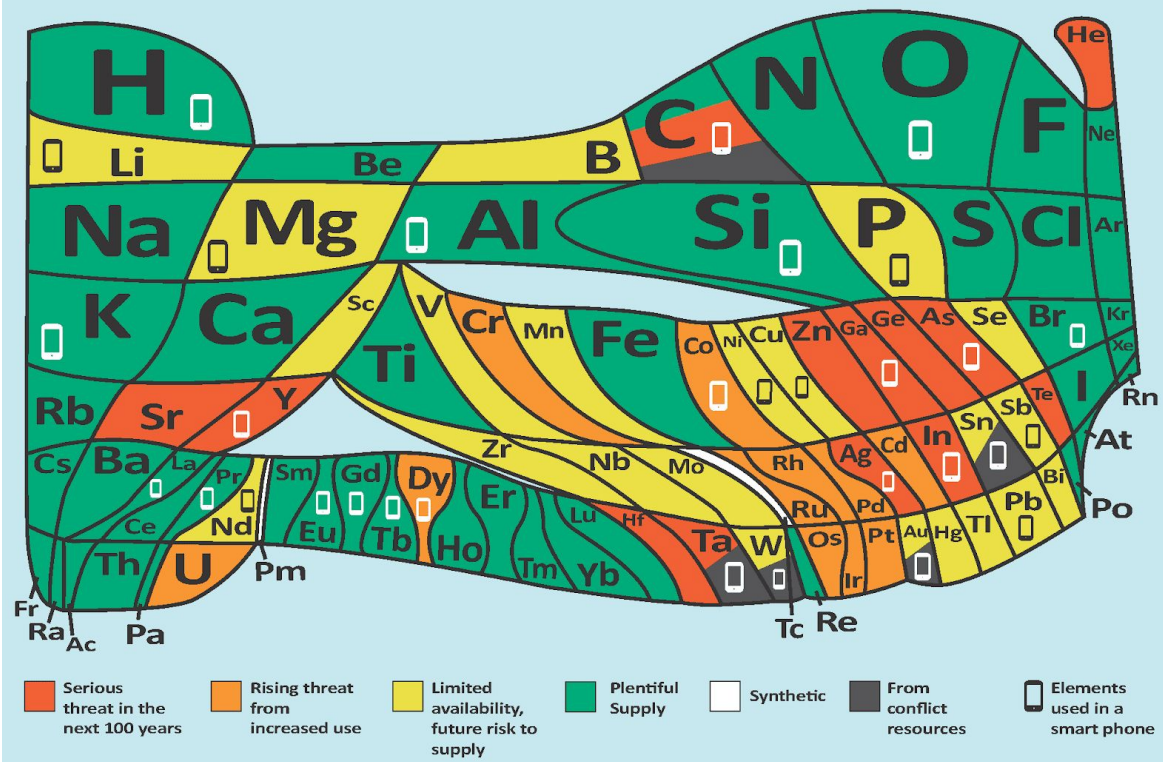
# The 90 natural elements that make up everything

*How much is there? Is that enough? Is it sustainable?*

Taille : Présence

- Atmosphère
- Croute terrestre

[Lien](#)



Read more and play the video game <http://bit.ly/euchems-pt>





# ACV Service

- Fabrication terminal utilisateur

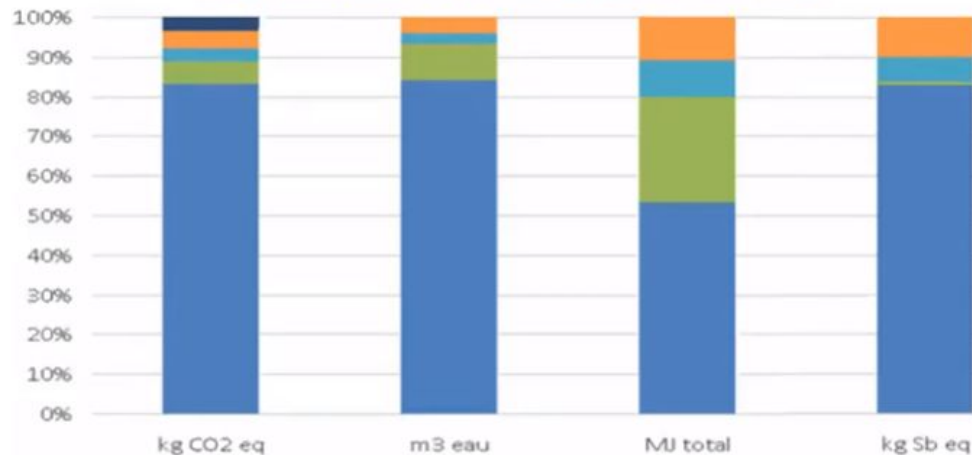
Les coûts sont avant

- Construction
- Même allumage

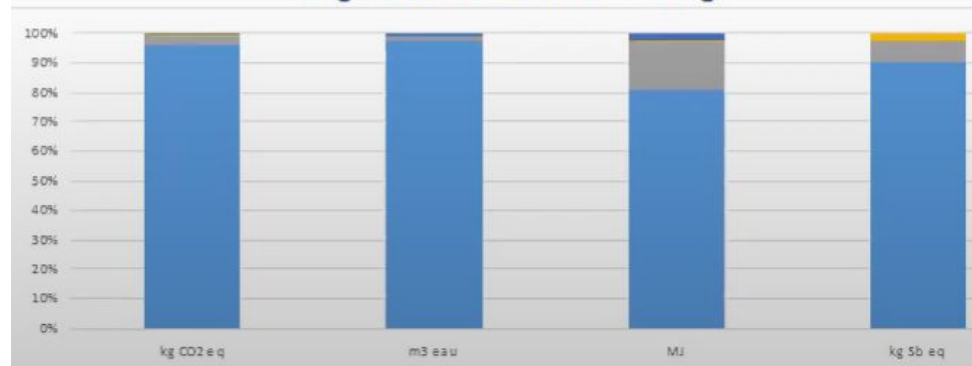
Mais important

- Réduire obsolescence
  - Du matériel personnel
  - D'Internet

### Trouver l'horaire d'un train depuis un site web



### Regarder un film en streaming







# L'impact du numérique

Partie 3 : Passer à l'action





# Le passage à l'action

Au niveau personnel

- Ne pas augmenter le taux d'équipement
  - Mutualisation (smartphone = couteau suisse) et partage
- Allonger la durée de vie
  - Réemploi, réparation
  - Occasion
  - À regarder dès l'achat
- Éteindre les objets non utilisés
  - Box internet (7 à 10W, équivalent frigo efficace)
- Usage sobre
  - 4G consomme 23 fois plus que le WiFi (surtout dans un avion)
- Collecter les déchets
  - Réutilisés, réparés, recyclés et dépollués

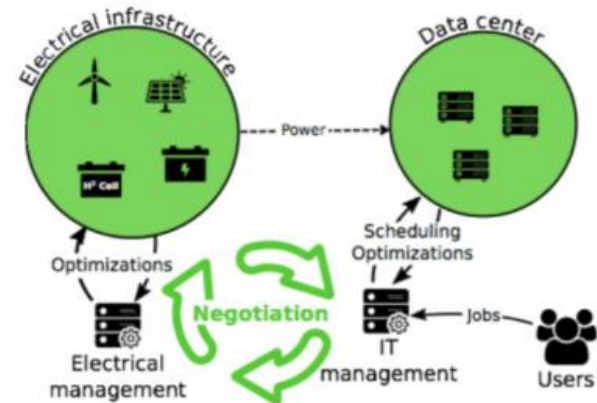




# Le passage à l'échelle

Au niveau institutionnel (professionnel, universitaire, ...)

- Réduire le taux d'équipement
  - Un seul ordinateur fixe ou portable suffit, idem écran
  - Réutiliser en fin de vie
- Gestion des trajets
  - Covoiturage, transport en commun, flotte de **véhicules** de prêts
- Viser l'éco-conception
  - En tenir compte dans son activité
  - Viser comme **activité** de le réduire
  - Viser la flexibilité
- Gérer les consommables
  - Papiers recyclés, électricité verte
- Mesurer / évaluer
  - ACV d'une activité (pas d'un logiciel)





# Quelques ouvertures

I.A.

?





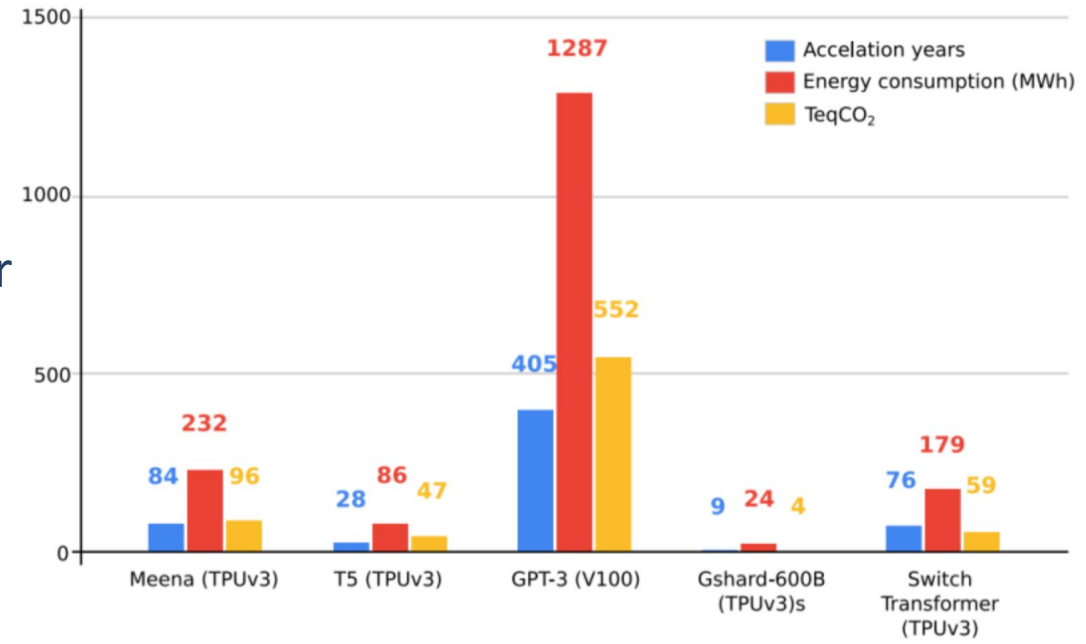
# Intelligence artificielle

Deep Learning

## GPT-3

- Création et synthèse de documents
- 1TeqCO<sub>2</sub> = 1 aller-retour Paris-New York
- 100k€ d'électricité

Mais utilisation "gratuite"





# Quelques ouvertures

Internet Low Tech

?





# Faire simple et fonctionnel

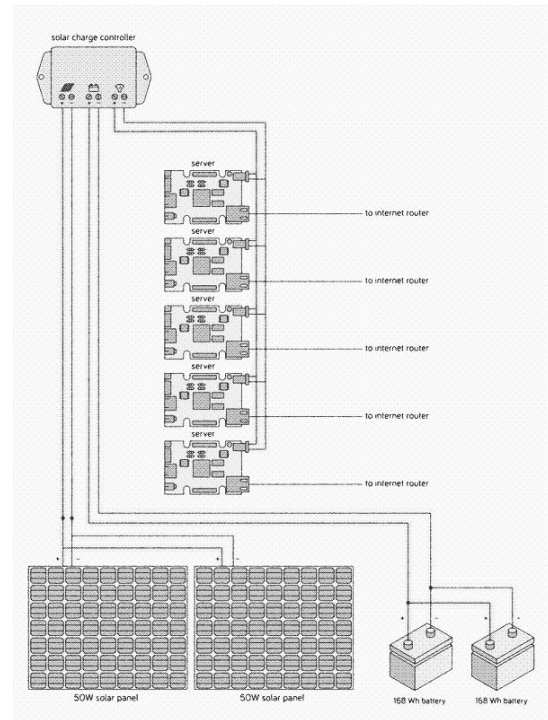
Low tech magazine

## Optimisation

- Logicielle
- Matérielle

## Simplification

- Capacité
- Attentes



### LOW ← TECH MAGAZINE

Ce site fonctionne à l'énergie solaire, et se retrouve parfois hors-ligne \*  
MENU

Le site imprimé : premier volume en français

Lisez Low-tech Magazine sans avoir besoin d'un ordinateur, d'internet ou d'une alimentation électrique – ou quand le site internet solaire est hors service à cause d'une mauvaise météo.

March 2022



Les Matelas-Fascines : la Vannerie se Déchaîne

Tissot de la page 620 BRK D



Comment fabriquer un panneau solaire low-tech

<https://solar.lowtechmagazine.com/>





# Faire simple et fonctionnel

Résultats sportifs en direct

## Optimisation purement logicielle

- 23 matches
- 300kB transférés d'un seul ordinateur
  - Estimation pour un mail en moyenne 75kB
- 3 allers retours
- Simple à afficher (eq. 0g CO<sub>2</sub>)

<https://plaintextsports.com/>

Page loaded: 9:03:47 PM (~5 seconds ago)  
Data loaded: 9:03:36 PM (~20 seconds ago)

plaintextsports.com [Dark Mode](#)

< [Apr. 2](#) **Sunday, April 3** [Apr. 4](#) >

**Leagues:** [NBA](#) [NHL](#) [MLS](#) [NWSL](#)

**College:** [NCAA WB](#) [NCAA MB](#)

**NCAA Women's Basketball Tournament**

*Game links open ncaa.com in a new tab*

Fri	Final	Fri	Final
1 S CAR	72	1 STAN	58
1 LOUIS	59	2 UCONN	63

Sun 2:00 AM GMT+2	
1 S CAR	34-2
2 UCONN	30-5

[See all NCAA Women's Basketball games](#)

**National Basketball Association**

[Teams](#) [Standings](#)

	Q4 08:14		Q4 06:03
DAL	93	WAS	91
MIL	91	BOS	126

9:30 PM GMT+2		11:00 PM GMT+2	
DEN	46-32	DET	22-56
LAL	31-46	IND	25-53



# Quelques ouvertures

Effet rebond

?





# Effet rebond

amélioration efficacité charbon → augmentation consommation

Type d'effet	Niveau d'influence	TIC en tant que solution	TIC en tant que problème
De 1er ordre (directs)	TIC elles-mêmes	Fabriquer plus avec moins	Cycle de vie des TIC : Production, Utilisation, Fin de vie
De 2ème ordre (indirects)	Applications des TIC à d'autres secteurs	Effets d'optimisation, Effets de substitution	Effets induits
De 3ème ordre (systémiques)	Changement social	Profond changement structurel vers une économie dématérialisée	Effets rebond, Nouvelles infrastructures critiques d'information



Quels effets rebonds avez vous subi dans votre utilisation ?





# Quelques ouvertures

Bitcoin, blockchain, NFT

?

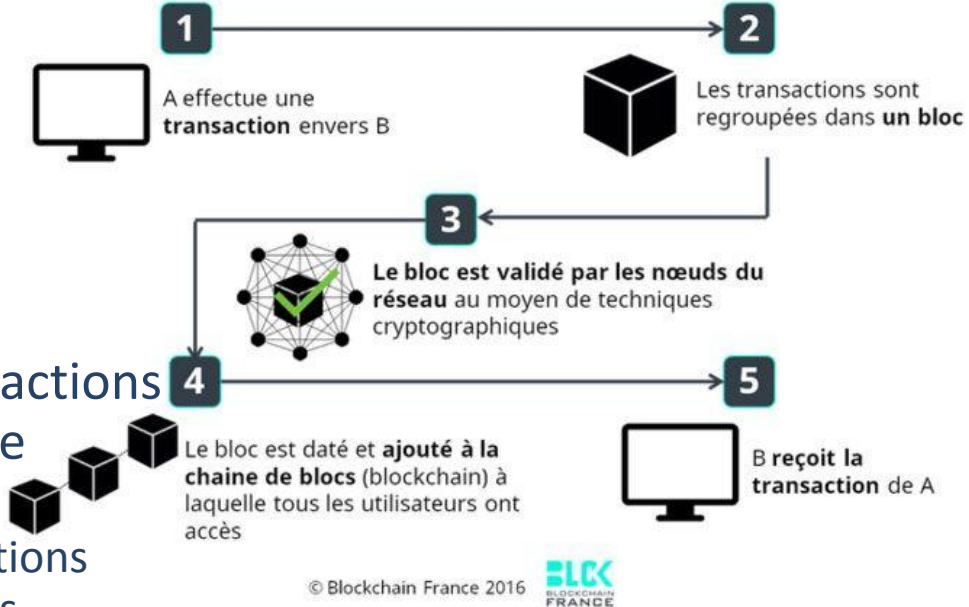




# Bitcoin / NFT

Principe de la Blockchain

- Stockage d'information/transactions
- Remplace le tiers de confiance
- Tous les participants
  - Enregistrent toutes les opérations
  - Vérifient toutes les opérations
  - Souvent "vérifier" permet un gain



Bitcoin :

- Opérations : transférer de la valeur interne (fractionnable)

NFT :

- Opération : transférer une adresse internet



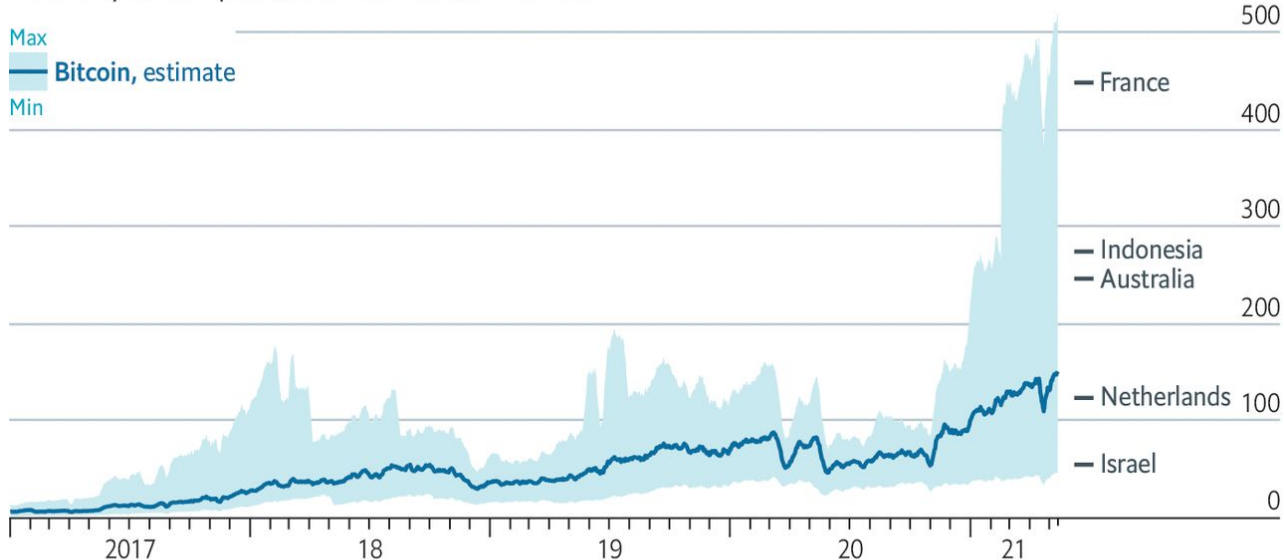


# Bitcoin / NFT

Bitcoin : 1,000,000 bitcoin miners

## Power hungry

Electricity consumption, terawatt-hours, annualised



Source: Cambridge bitcoin electricity consumption index

The Economist



Valeur interne

Création d'unicité

Valeur d'un

- BitCoin
- NFT





# Bitcoin / NFT

Donner de la valeur à ce qui est copiable gratuitement



Société de l'abondance, coût marginal nul

La culture : Ian M. Banks

- Pratiquement ressources infinies et colonialisme

L'Âge de diamant : Neal Stephenson

- Contrôle hiérarchique (noble) des ressources

Star Trek

- Réplicateur et vision altruiste et colonialisme

Dans le monde réel : Promesse de la fusion







# Quelques ouvertures

Jeu video





# L'essor du mobile

Une catégorie nouvelle, de nouveaux usages

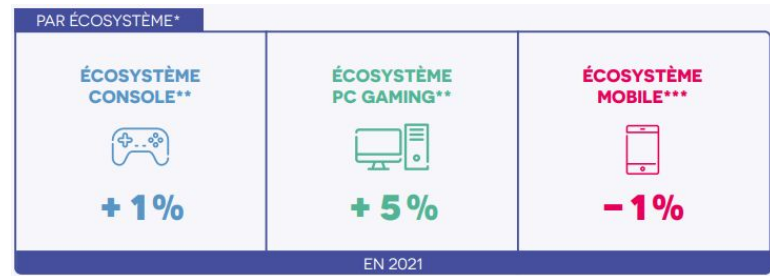
Globale stabilité du marché

- PC, Console

Forte augmentation du marché mobile

- x2 en 5ans

SELL 2021



ÉVOLUTION DU CHIFFRE D'AFFAIRES PAR ÉCOSYSTÈME\*\*\*\*





# Cloud gaming

Tout est fait dans un datacenter, seul l'affichage et l'interaction sont locaux

Sujet complexe

Positif

- Serveurs 100% utilisés
- Vision modulaire

Négatif

- Coût caché
- Surcoût réseau
- Effet rebond

2020 : 36m joueurs

2022 : marché de 3.2Md\$





# Réalité augmentée / Réalité virtuelle

Toujours aussi complexe

Positif

- Moins de matériaux qu'une grande télévision

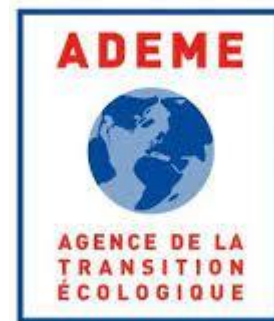
Négatif

- Doublement du calcul (résolution, latence)





# Remerciements



**green IT.fr**  
plus particulièrement  
Frédéric Bordage



POUR UNE INFORMATIQUE ÉCO-RESPONSABLE  
plus particulièrement Denis Trystram