

# Impact environnemental du Numérique : fabrication des matériels

Emmanuelle Frenoux,  
EcoInfo, LIMSI-CNRS, Polytech Paris-Saclay  
[Emmanuelle.Frenoux@limsi.fr](mailto:Emmanuelle.Frenoux@limsi.fr)



# Quelques définitions (1/2)...

---

**TIC** : Technologies de l'information et de la communication techniques de l'informatique, de l'audiovisuel, des multimédias, d'Internet et des télécommunications permettant de communiquer, accéder aux sources d'information, stocker, manipuler, produire et de transmettre l'information sous différentes formes.

- Équipements terminaux (PC, laptop, tablette, smartphone, ...)
- écrans
- serveurs et leur environnement (Datacentres)
- équipements réseaux passifs et actifs (filaire, WIFI, GSM, xG, ...)
- TV, TV connectées
- IOT, Numérique embarqué (véhicules etc.)

Source : Wikipedia

# Quelques définitions (2/2)...

---

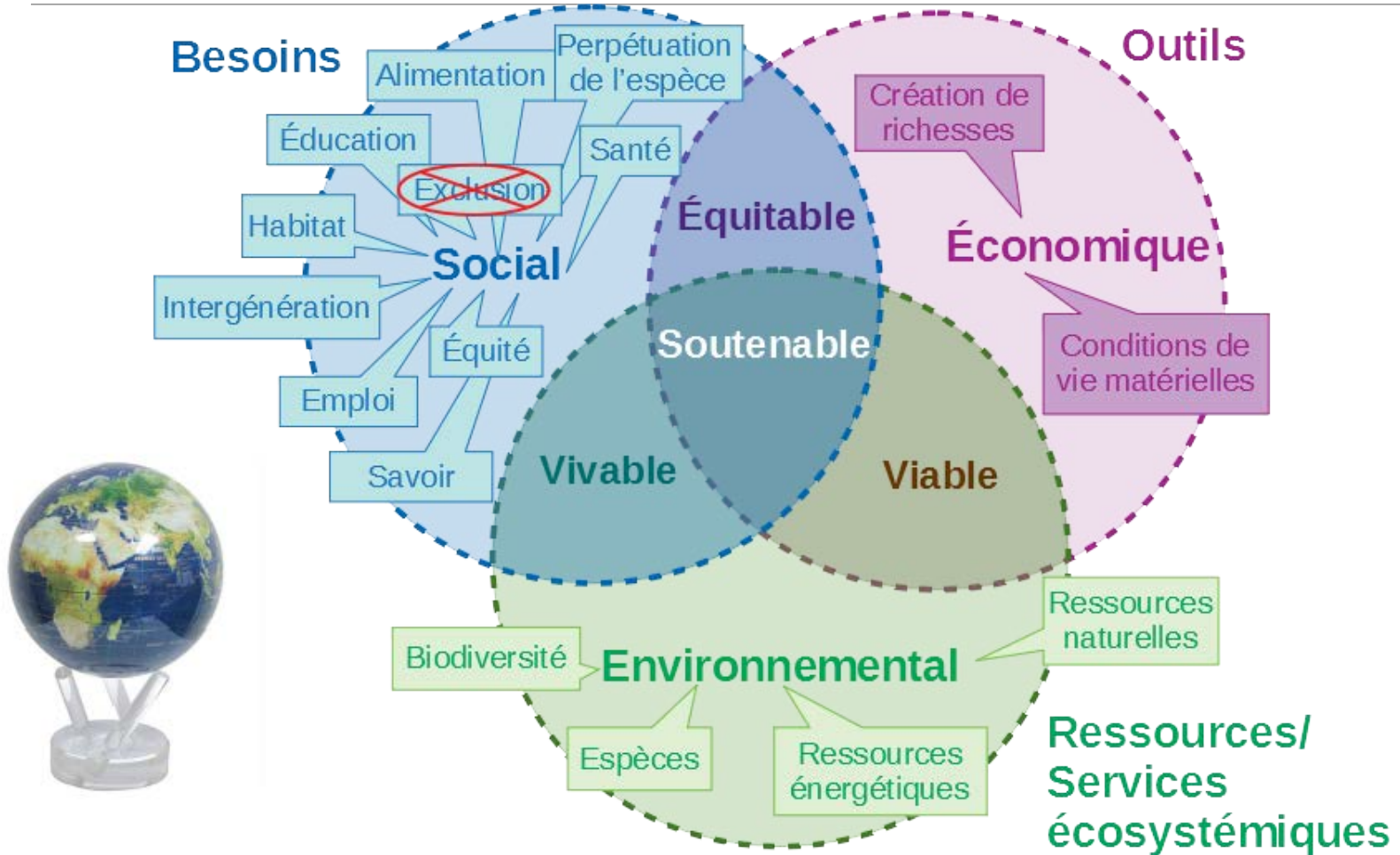
**Développement « Durable »** : défini pour la première fois dans le rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies (rapport Brundtland, 1987)

**« un développement qui répond aux besoins du présent  
sans compromettre la capacité des générations  
futures de répondre aux leurs »**

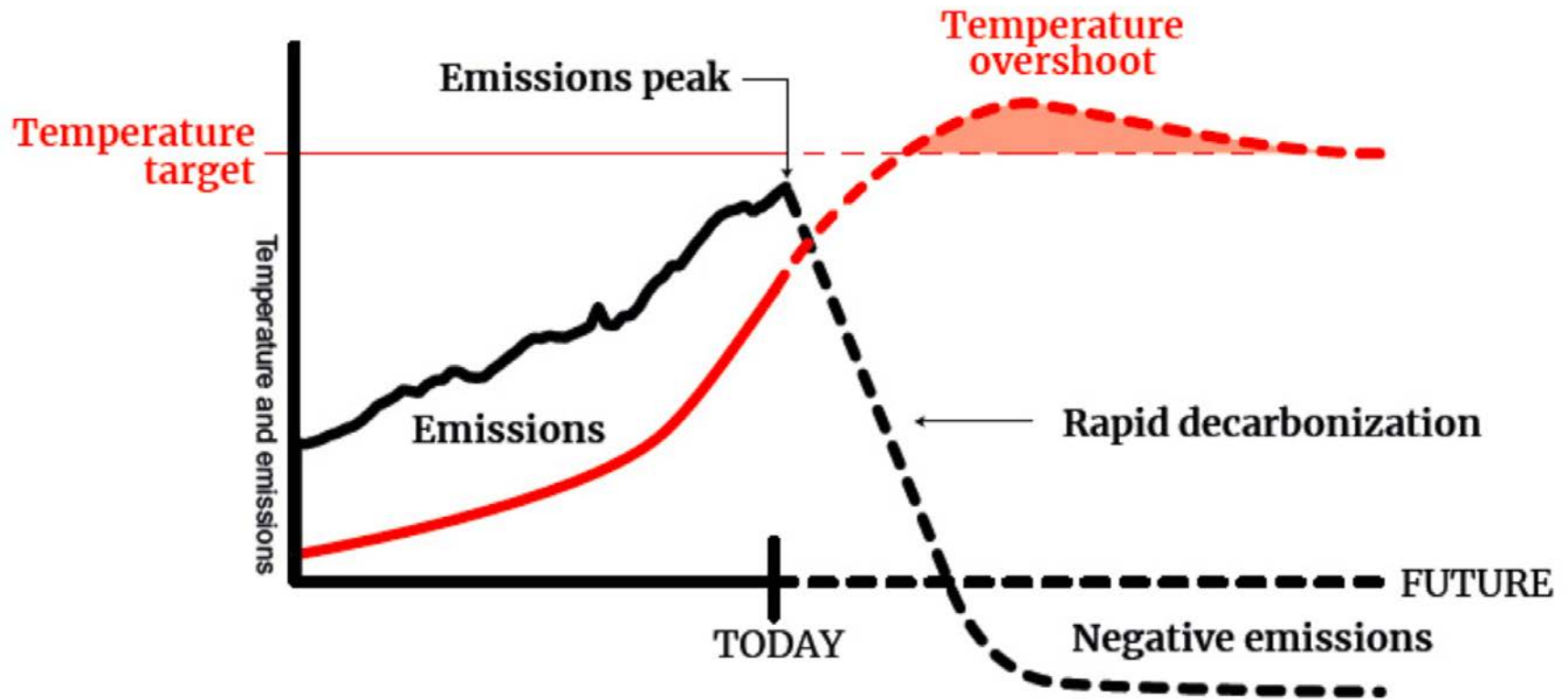
=> je préfère le terme de Développement **Soutenable** (Sustainable Development)... et éviter le terme de *croissance*.

Lien vers le rapport Brundtland complet :  
<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>

# Les piliers du Développement Durable

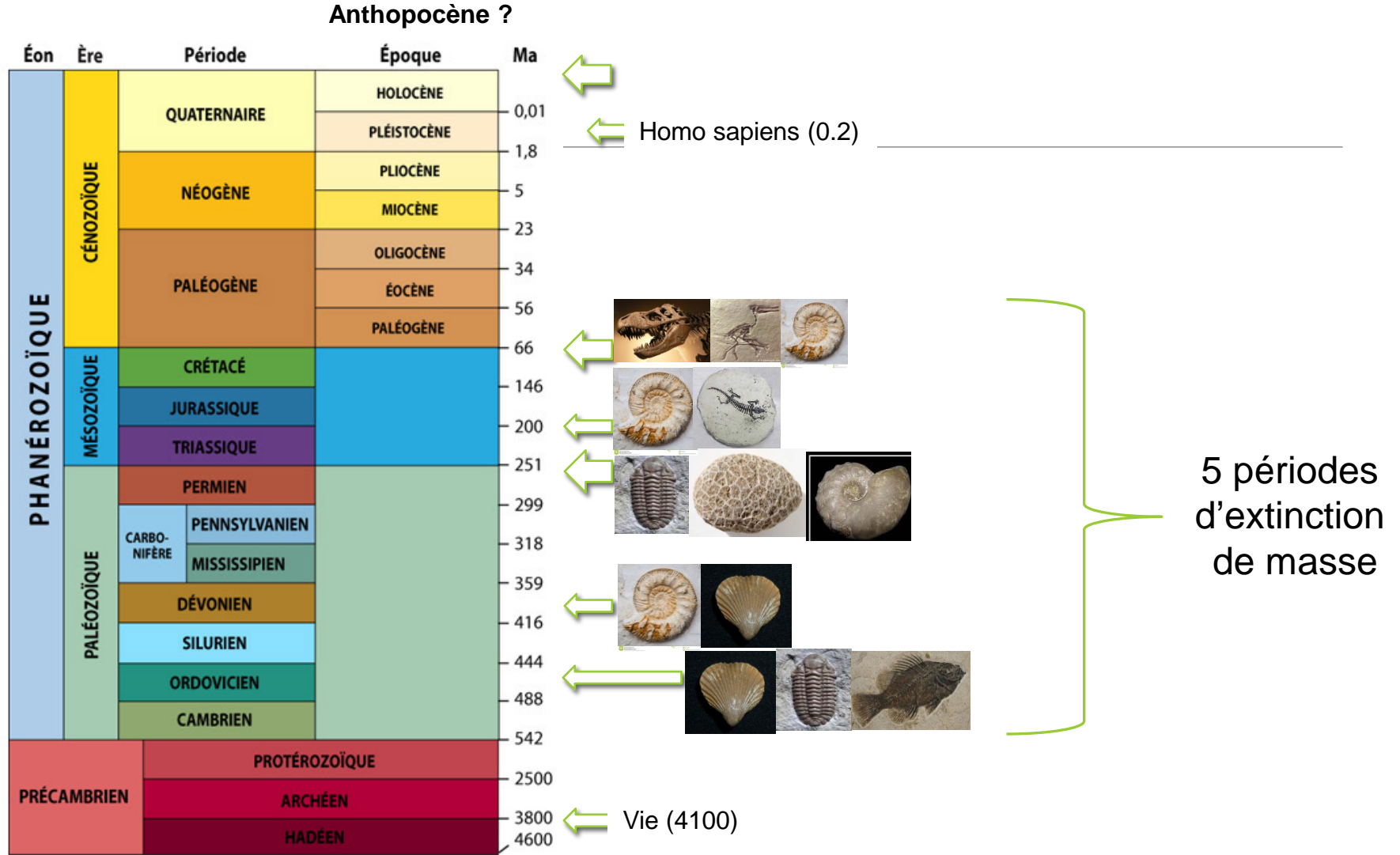


# Éléments de contexte : ça chauffe...



Source : rapport de l'IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Nations Unies) sur le réchauffement global, 2018 : <https://www.ipcc.ch/sr15/>

# Éléments de contexte : 6<sup>ème</sup> extinction ?



# Jour du dépassement

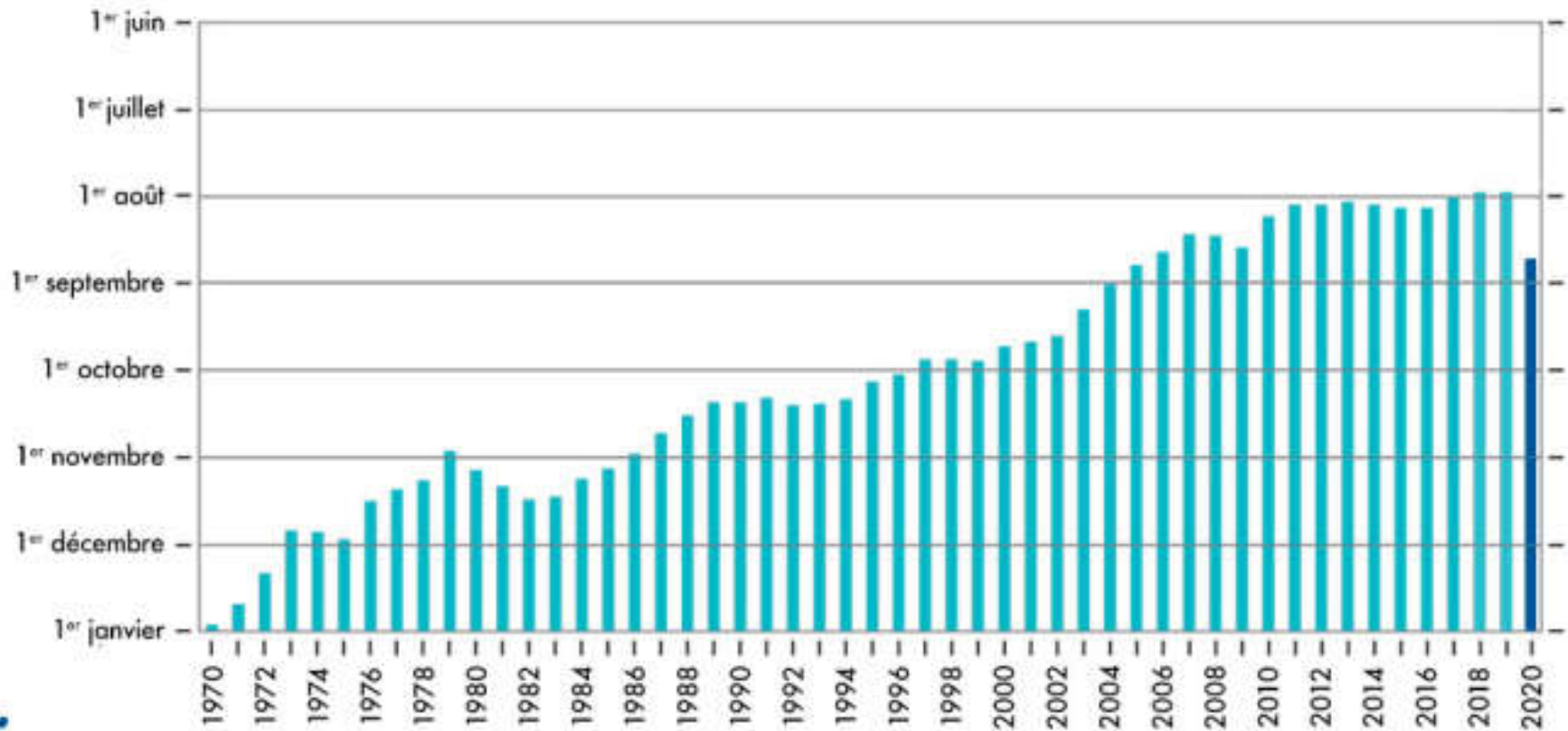


1 planète Terre

## Jour du Dépassement Mondial 1970 - 2020



1,6 planète Terre



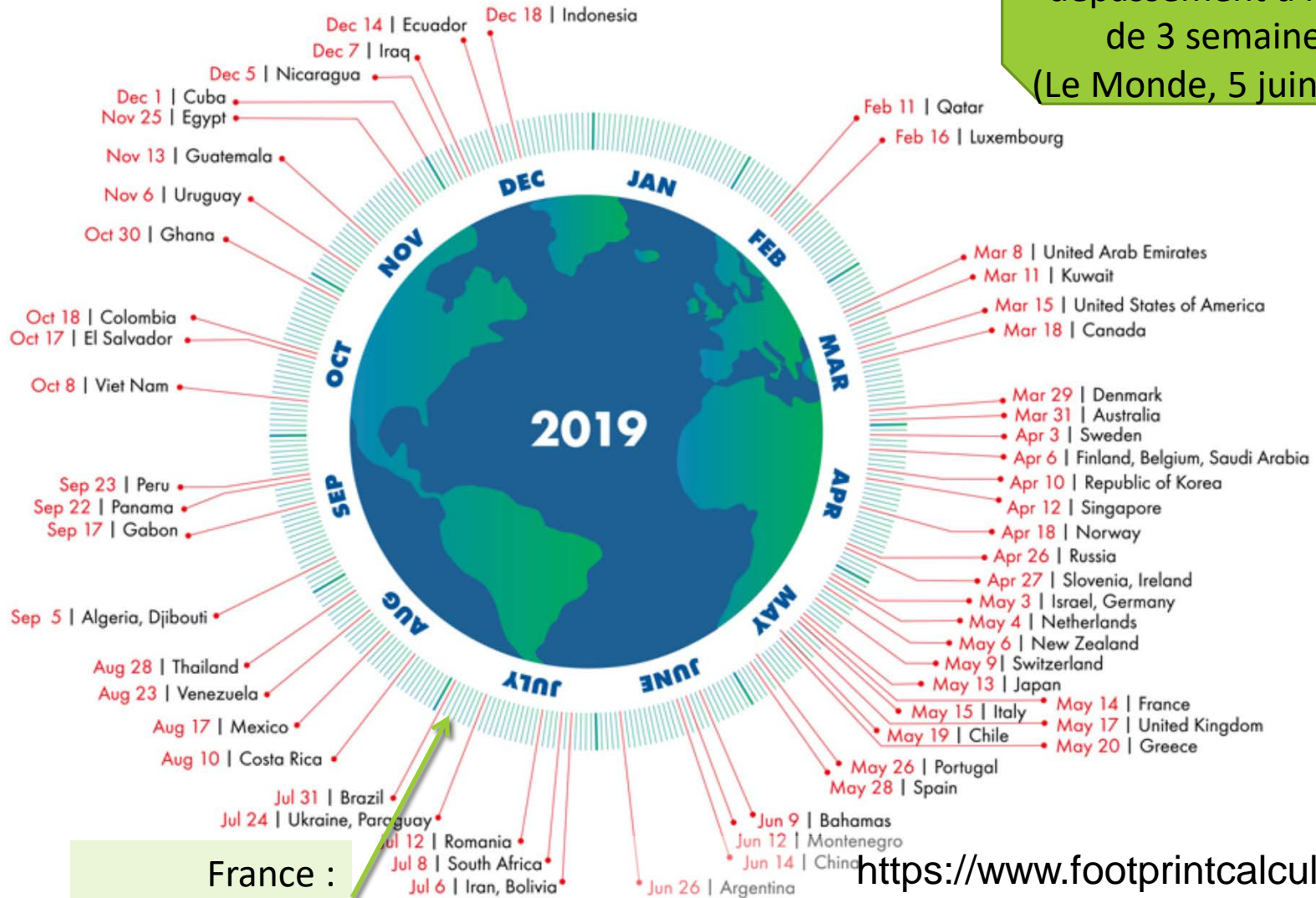
Source: Global Footprint Network National Footprint and Biocapacity Accounts 2019



# Jour du dépassement

2020 : Confinement dû au COVID => le jour du dépassement a reculé de 3 semaines.

(Le Monde, 5 juin 2020)

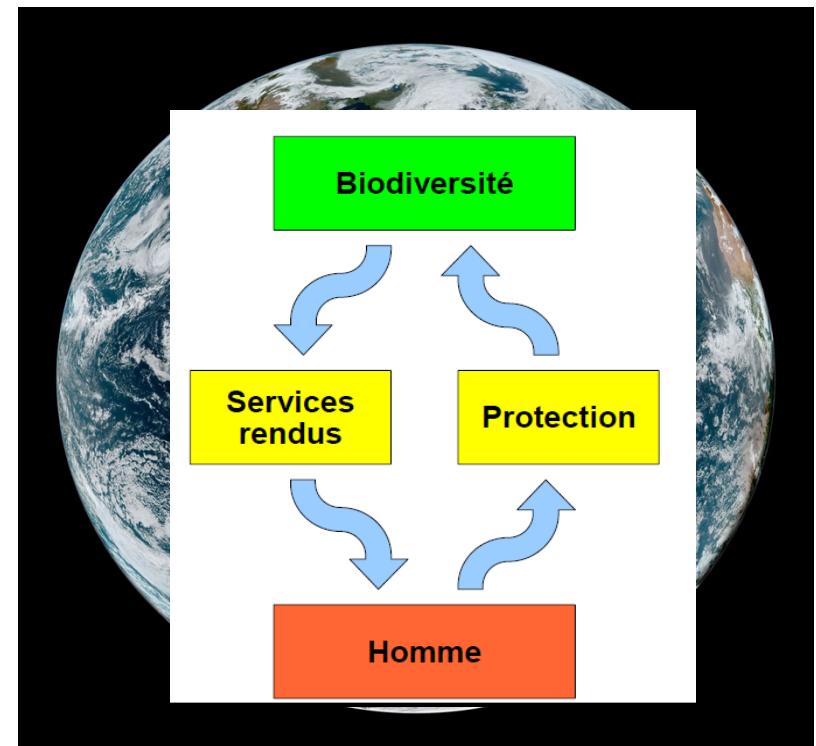
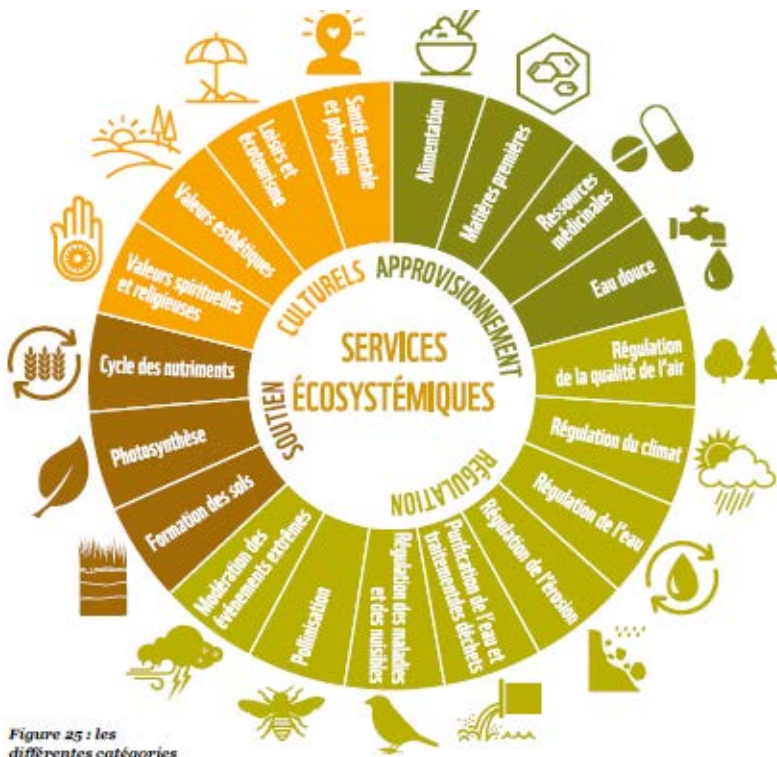


France :  
29 juillet 2019

<https://www.footprintcalculator.org/>  
<https://www.footprintnetwork.org/>  
<https://www.overshootday.org/2020-calculation/>



# Pourquoi est-ce important ?



Crédits : Jane Lecomte

Pour plus d'informations : Union Internationale pour la Conservation de la Nature  
<https://uicn.fr/publications/>

# Question

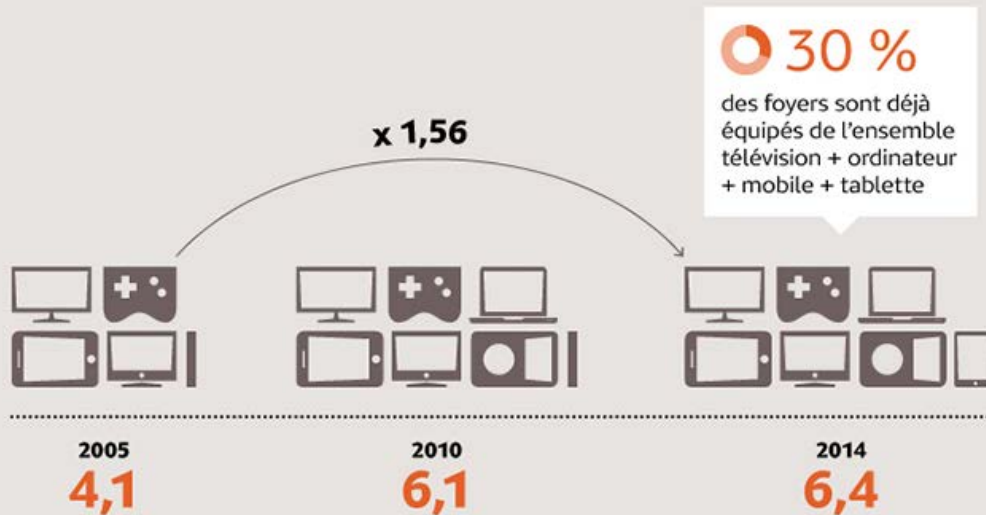
---

Selon vous, combien y a-t-il  
d'écrans par foyer en France ?

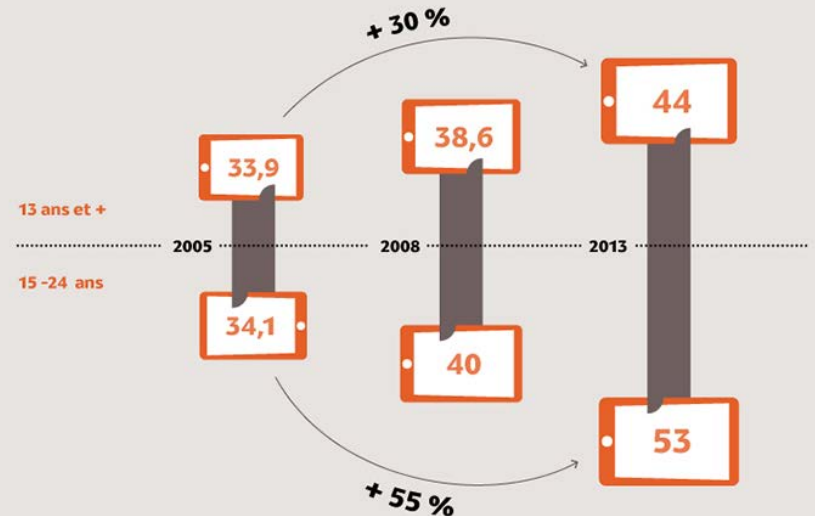
# Big Brother is watching you (l'informatique est partout)

Evolution des matériels informatiques entre 2005 et 2014 :

## Évolution du nombre d'écrans par foyer



## Contacts médias et multimédias par jour et par personne



Source : enquête Médiamétrie Home Devices, 2014

# Etat des lieux en France en 2016

En 2016, au premier semestre, toujours d'après Médiamétrie : 6,4 écrans par foyer.

Presque 95% des foyers ont un mobile (écran n°1)

84% ont un ordinateur

56% une télévision connectée

45% des foyers disposent d'une tablette (+12 points en 2 ans)

**78% des foyers ont au moins un téléviseur, un ordinateur et un téléphone mobile ou une tablette !**

	T1 2016
Nombre moyen d'écrans total par foyer	6,4
Télévision	1,6
Ordinateur	1,4
Console TV	0,5
Console portable	0,3
Baladeur fonction vidéo	0,1
Téléphone mobile (dont <i>smartphone</i> : 1,3)	1,9
Tablette tactile	0,6

Chiffres : CSA,  
1<sup>er</sup> trimestre 2016

# Et dans le monde en 2018...

---

D'après le ShiftProject, en 2018 :

- Un américain possédait environ **10 périphériques** numériques connectés et a consommé **140 Go de données/mois**
- Un indien possédait **1 seul périphérique** numérique connecté et a consommé **2Go de données/mois**.

Les projections faites en 2015 pour les habitants de l'OCDE ne sont pas optimistes : de plus en plus d'objets connectés/intelligents vont faire leur apparition dans nos foyers.

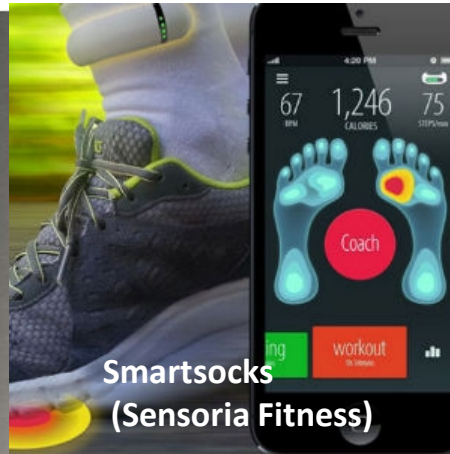
Sources :

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

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

# Big Brother is watching you (l'informatique est partout)

Réfrigérateur intelligent  
(ici Samsung)



Smartsocks  
(Sensoria Fitness)

Véhicule intelligent  
(laboratoire IFFSTAR)



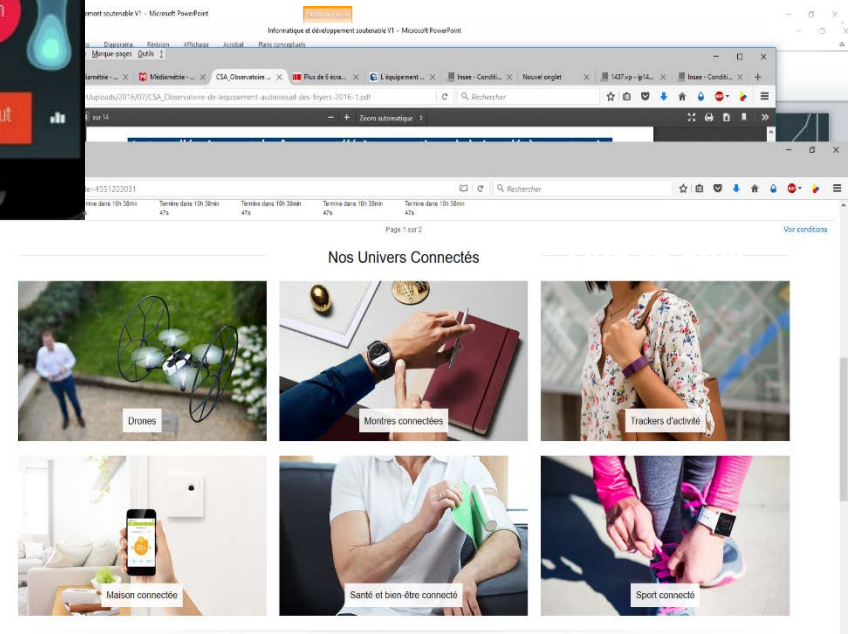
connectés  
Brosse à dents connectée  
Fourchettes connectées  
Cigarette électronique connectée  
Biciclette IoT  
Éclairage connecté

Sport Connecté  
Facteurs d'adhésion  
Podomètres connectés  
Cardio-rythmographes  
Moniteurs de sommeil/GPS  
Compteurs de vitesse  
Analyseurs de swing  
Électro-stimulateurs et ceintures de massage  
Caméras d'action

Montres Connectées  
Toutes les montres connectées

Afficher les résultats pour  
High-Tech  
Objets Connectés  
Cordes et accessoires (142)  
Bricolage (57)  
Média (17)  
Lumières et énergie (10)  
Jardin et plantes (11)  
Détente (15)  
Santé (17)  
Sport (13)  
Auto et véhicules (12)  
Smartwatch (36)

Affiner par  
Filtres d'actualisation





# Quel est le lien entre cette prolifération et l'environnement ?

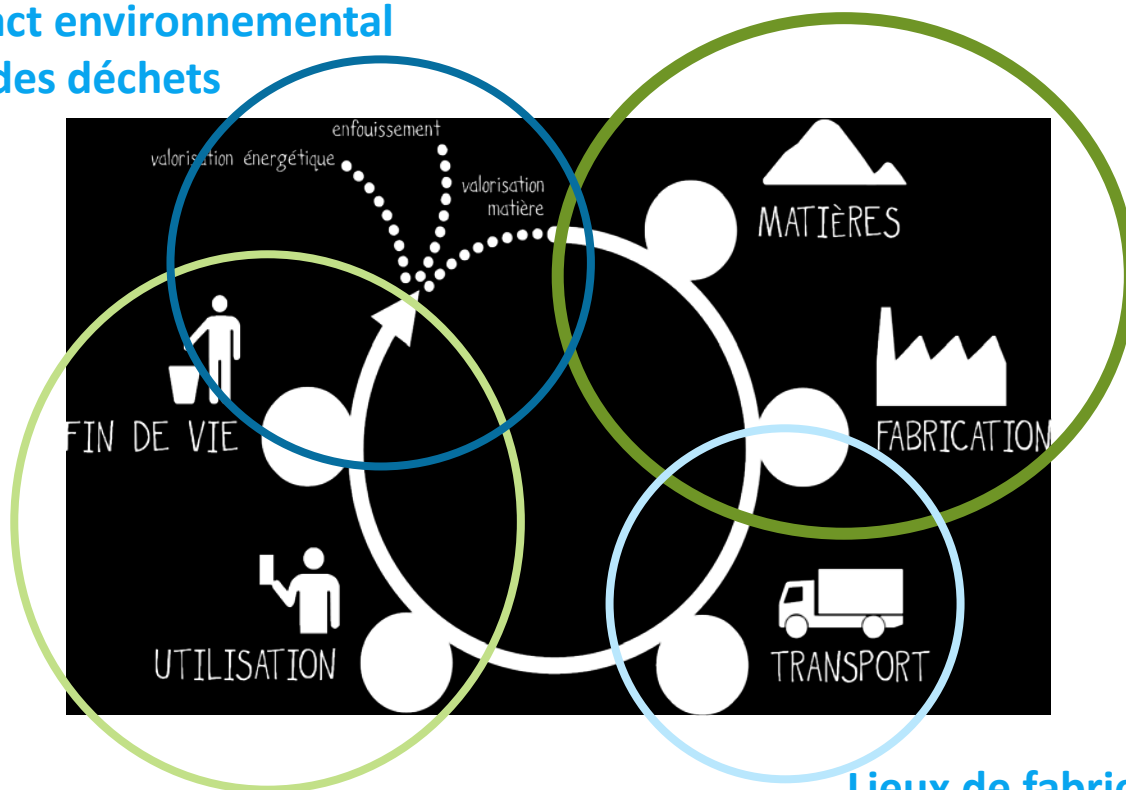
---

Points communs entre tous ces objets :

- Composants électroniques omniprésents
- Connection internet, échange de données,
- Impact sur les ressources écologiques
  - **Avant usage (fabrication)**
  - Pendant l'usage (consommation)
  - **Après usage (déchets et recyclage)**

# Analyse du Cycle de vie et TIC

**Fort impact environnemental  
des déchets**



**Impact de  
l'extraction des  
matières premières  
et des procédés de  
fabrication**

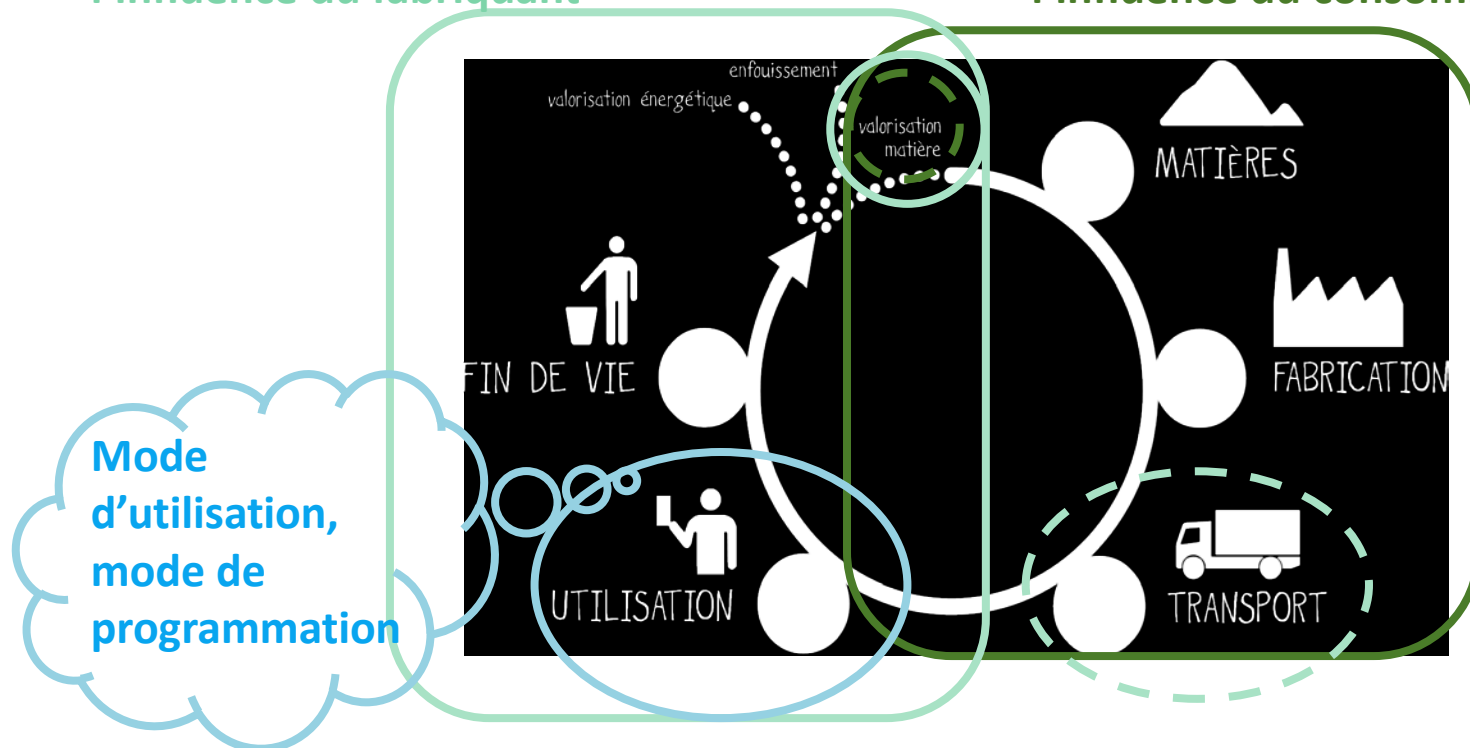
**L'usage conditionne la consommation  
Les programmes influencent la consommation**

**Lieux de fabrication ?  
Lieux de consommation ?**

# Cycle de vie des produits : spécificités de l'outil informatique

L'affaire du consommateur,  
l'influence du fabricant

L'affaire du fabricant... et  
l'influence du consommateur



# Première partie du cycle...









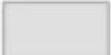
---

L'étape de fabrication des matériels nécessite :

- Extraction de matières premières
- Traitement chimique des matières premières
- Phases de transport
- Phases d'assemblage
- Énergie

# Les principaux métaux des TIC

Groupe → ↓ Période	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 (Terres rares)			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											

	Conducteurs, contacteurs, interrupteurs		Soudures		Optoélectronique
	Batteries		Condensateurs		Divers (autres)
	Retardateur de flamme		Divers (précieux)		Autres

Source : Philippe Bihouix

<https://ecoinfo.cnrs.fr/wp-content/uploads/2015/04/>

avril\_2015\_conference\_ecoinfo\_cnrs\_métaux\_dans\_les\_tic-img800q90.pdf

# Quelques constituants de nos smartphones



## Dalle tactile

- ✓ Indium (In) : film ITO

## Afficheur LCD - OLED

- ✓ Indium (In) : film ITO

## Batterie Li-ion

- ✓ Cobalt (Co) : électrode
- ✓ Lithium (Li) : électrode, électrolyte

## Carte électronique

- ✓ Argent (Ag) : crème à braser
- ✓ Cuivre (Cu) : pistes conductrices circuit imprimé
- ✓ Etain (Sn) : crème à braser
- ✓ Or (Au) : câblage circuits intégrés
- ✓ Platine (Pt) : électrode condensateur céramique
- ✓ Palladium (Pd) : idem
- ✓ Tantale (Ta) : électrode condensateur tantale, filtre SAW
- ✓ Terres rares : diélectrique condensateur céramique
- ✓ Tungstène (W) : contrepoids vibreur

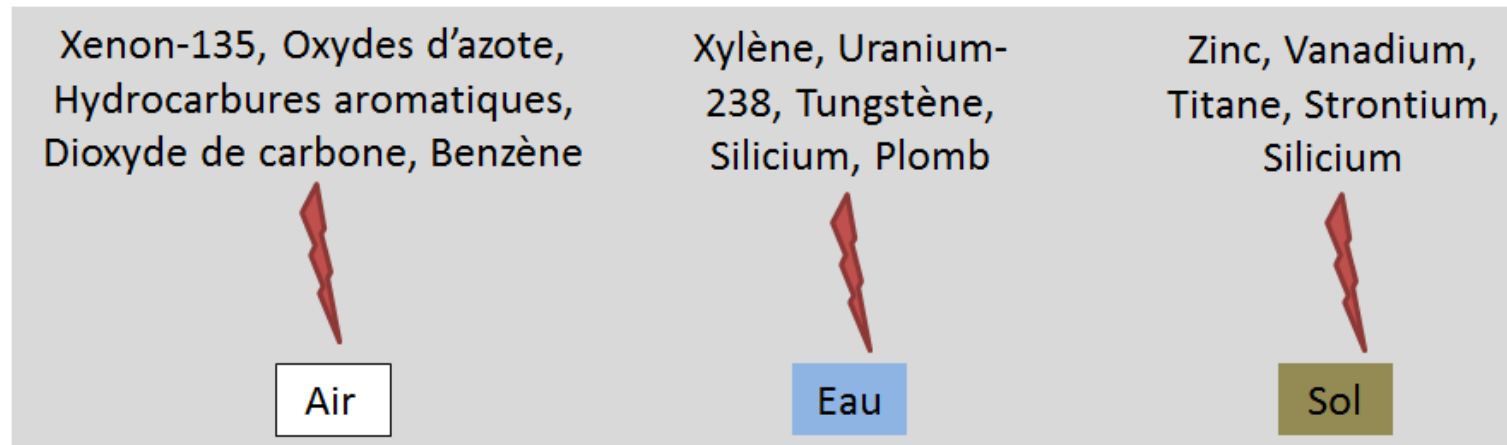
## Antenne NFC

- ✓ Cuivre : piste conductrice



# Fabrication des composants électroniques (hors écran)...

- Métaux rares, terres rares, traitements spécifiques...
- Traitements néfastes pour l'environnement lors de l'extraction, la fabrication ET la fin de vie (déplétion de la couche d'ozone, pollution des eaux, de l'air, épuisement des ressources, mais aussi diminution de la biodiversité, ...)



(source : Groupe ÉcoInfo, CNRS, Données de Base Ecolinvent V2)

# Métaux rares, une définition

---

- Mélangés aux métaux abondants dans l'écorce terrestre, en proportions infimes
- Très petites productions annuelles (e.g. 160 000T/an de Terres Rares contre 2 milliards de T/an de fer)
- Très chers (cf. point 2)
- Propriétés magnétiques, catalytiques et optiques exceptionnelles permettant de limiter notre empreinte carbone
- Propriétés semi-conductrices indispensables aux NTIC
- Souvent non substituables
- Indispensables aux énergies bas carbone et au numérique
- Quasi-monopole par la Chine

# Métaux rares, une idée des proportions...

---

Présents à dose infime dans la nature

- 8,5 tonnes de roche => 1kg de vanadium (catalyseur, batteries à flux, moteurs de dispositifs médicaux, ...)
- 16 tonnes de roche => 1kg de cérium (lanthanide, Terre Rare, pierre à briquet, filtres à particules, fours auto-nettoyants, ...)
- 50 tonnes de roche => équivalent de 1kg de gallium (semi-conducteurs, LED, photo-détecteurs, ...)
- 1200 tonnes de roche => 1kg de lutécium (lanthanide, Terre Rare, catalyseur)

# Terres rares : principales utilisations industrielles

Tableau extrait de :  
La Guerre des Métaux Rares,  
Guillaume Pitron,  
Ed. Les Liens qui Libèrent, 2019.

Ressource	Utilisations
Lanthane	Composés supraconducteurs, lentilles, éclairages
Cérium	Pots catalytiques, raffinage pétrole, alliages métalliques
Praséodyme	Pierres à briquet, colorant, aimants
Néodyme	Aimants permanents, autocatalyseurs, raffinage pétrole, lasers
Prométhium	Composés luminescents
Samarium	Aimants de missiles, aimants permanents, motorisations électriques
Europium	Lasers, réacteurs nucléaires, éclairages, géochimie, phosphores rouges des tubes cathodiques
Gadolinium	Substance phosphorescente dans des tubes cathodiques
Terbium	Activateur des photophores verts pour tubes cathodiques, aimants permanents
Dysprosium	Aimants permanents, moteurs hybrides
Holmium	Lasers, magnétisme, composés supraconducteurs
Erbium	Réseaux de télécommunications optiques longue distance, médecine nucléaire
Thulium	Radiographie portable, lasers, supraconducteurs haute température
Ytterbium	Aciers inoxydables, ion actif pour cristaux laser, radiographie portable
Lutécium	Émetteur de rayonnement bêta
Scandium	Éclairage, marqueur, alliages d'aluminium
Yttrium	Photophores rouges des tubes cathodiques, alliages supraconducteurs, briques réfractaires, piles à combustible, aimants

# L'industrie électronique consomme chaque année...

---

- pour l'industrie électronique en général :
  - 320 tonnes d'or
  - 7500 tonnes d'argent
  - 22% de la consommation mondiale de mercure
  - 2,5% de la consommation mondiale de plomb
- rien pour les ordinateurs et les téléphones portables
  - 19% de la production globale de métaux rares (palladium)
  - 23% du cobalt
  - + une quarantaine d'autres métaux

NB : cela représente 2% de la masse totale de déchets générés sur le cycle de vie... et ne prend pas en compte les métaux consommés par les infrastructures réseau/électriques

# Lieux de fabrication/extraction...

---

La majorité des tablettes/smartphones/PC est produite de l'autre côté du globe (30% des imports viennent de Chine, selon les statistiques de l'ambassade de France en Chine) ; les composants et les matières premières viennent de différents pays...

Cela pose des problèmes éthiques :

- Droits Humains

<https://www.amnesty.org/fr/latest/campaigns/2016/06/drc-cobalt-child-labour/>

Mise en examen de Samsung en juillet 2019 :

[https://www.liberation.fr/depeches/2019/07/03/droits-humains-en-chine-la-filiale-francaise-de-samsung-mise-en-examen\\_1737705](https://www.liberation.fr/depeches/2019/07/03/droits-humains-en-chine-la-filiale-francaise-de-samsung-mise-en-examen_1737705)

- Gestion de l'environnement/responsabilité environnementale
- Conflits armés (e.g. guerre du Kivu, au Congo)
- Transfert de pollution/de responsabilité environnementale



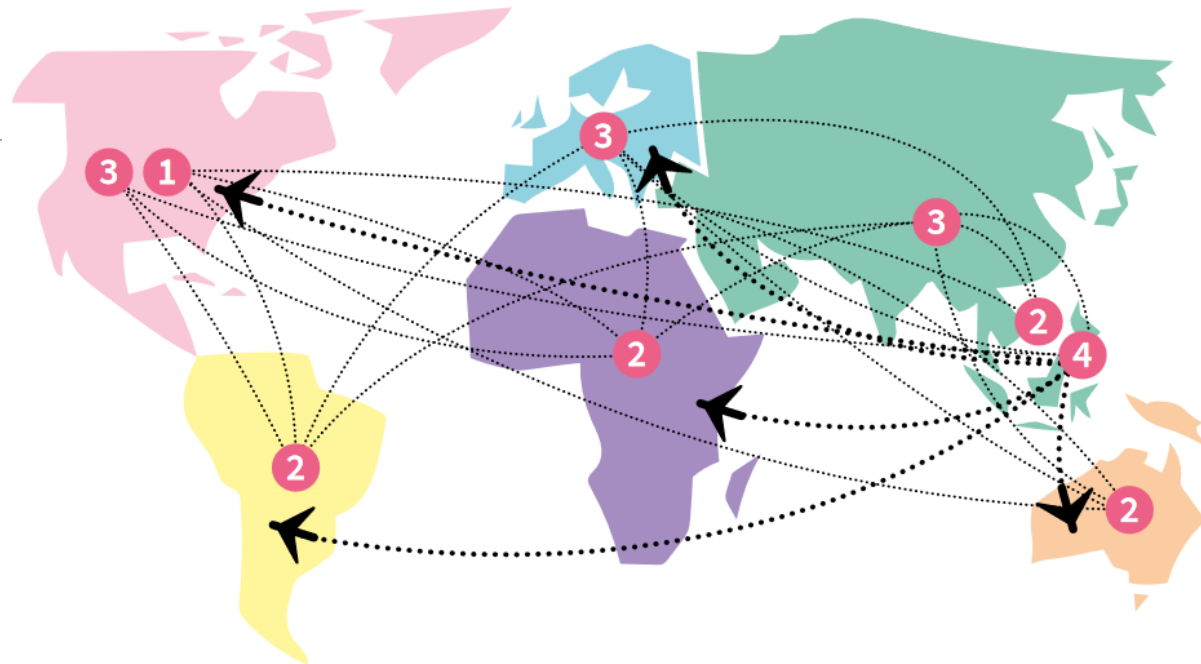
# Une petite question...

---

D'après vous, quelle distance votre smartphone a-t-il parcouru avant d'arriver dans votre poche ?

# Mon smartphone, ce pigeon voyageur...

## QUATRE TOURS DU MONDE POUR FABRIQUER UN SMARTPHONE



**1. Conception** le plus souvent aux États-Unis

**2. Extraction et transformation des matières premières** en Asie du Sud-Est, en Australie, en Afrique centrale et en Amérique du Sud

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

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

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

ADEME, guide pratique sur les impacts du smartphone

<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-impacts-smartphone.pdf>

# Question...

---

L'impact principal d'un matériel électronique est-il le transport ou bien l'extraction des matières premières qui le composent ?

# Comment extraire les métaux rares ?

- La roche est composée de minerais agrégés où sont incorporés les métaux rares
- Procédés chimiques
- Raffinage :
  - Broyage de la roche
  - Réactifs chimiques (acide sulfurique, acide nitrique, ...)
  - Dissolution (eau, soude, ...)
  - Séparation par solvants
  - Chauffage (jusqu'à plus de 1000° C dans certains cas)
- Pour purifier (rinçage) 1T de terre rare, il faut 200m<sup>3</sup> d'eau  
170 000T de terres rares produites en 2018  
un foyer de 2,5 personnes en France en consomme 120m<sup>3</sup>/an
- Après utilisation, l'eau est chargée en métaux lourds et en acides

<https://ecoinfo.cnrs.fr/2010/08/06/les-terres-rares-la-separation-des-terres-rares/>

La guerre des métaux rares, Guillaume Pitron (cf. plus haut)

<https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/28326/1/34069.pdf>

<https://www.planetoscope.com/sols/1048-production-mondiale-de-terres-rares.html>

<https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/quels-sont-les-usages-domestiques-de-leau/>

# Métaux rares, terres rares : traitements toxiques

---

- Rejet de produits chimiques directement dans la nature
- Déchets toxiques stockés à ciel ouvert
- Empoisonnement des nappes phréatiques
- Empoisonnement des terres
- Gaz toxiques
- Pluies acides

Environmental disaster strains China's social fabric, The Financial Times, 26 avril 2006

Toxic mine spill was only latest in long history of Chinese pollution, The Guardian, 14 avril 2011  
<https://www.theguardian.com/environment/2011/apr/14/toxic-mine-spill-chinese-pollution>

La guerre des métaux rares, Guillaume Pitron (cf. plus haut)



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



La 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.





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



Mine de lithium, désert d'Atacama, Chili.  
Photo : Catherine Hyland



Extraction de coltan au Kivu (Congo).  
Source : <https://ejatlas.org/>

# En conclusion...

---

L'industrie minière serait la 2<sup>ème</sup> industrie la plus polluante du monde, derrière le recyclage des batteries au plomb et devant les teintureries, les décharges industrielles, les tanneries !

Rapport de Green Cross et de Pure Earth (Blacksmith Institute) :

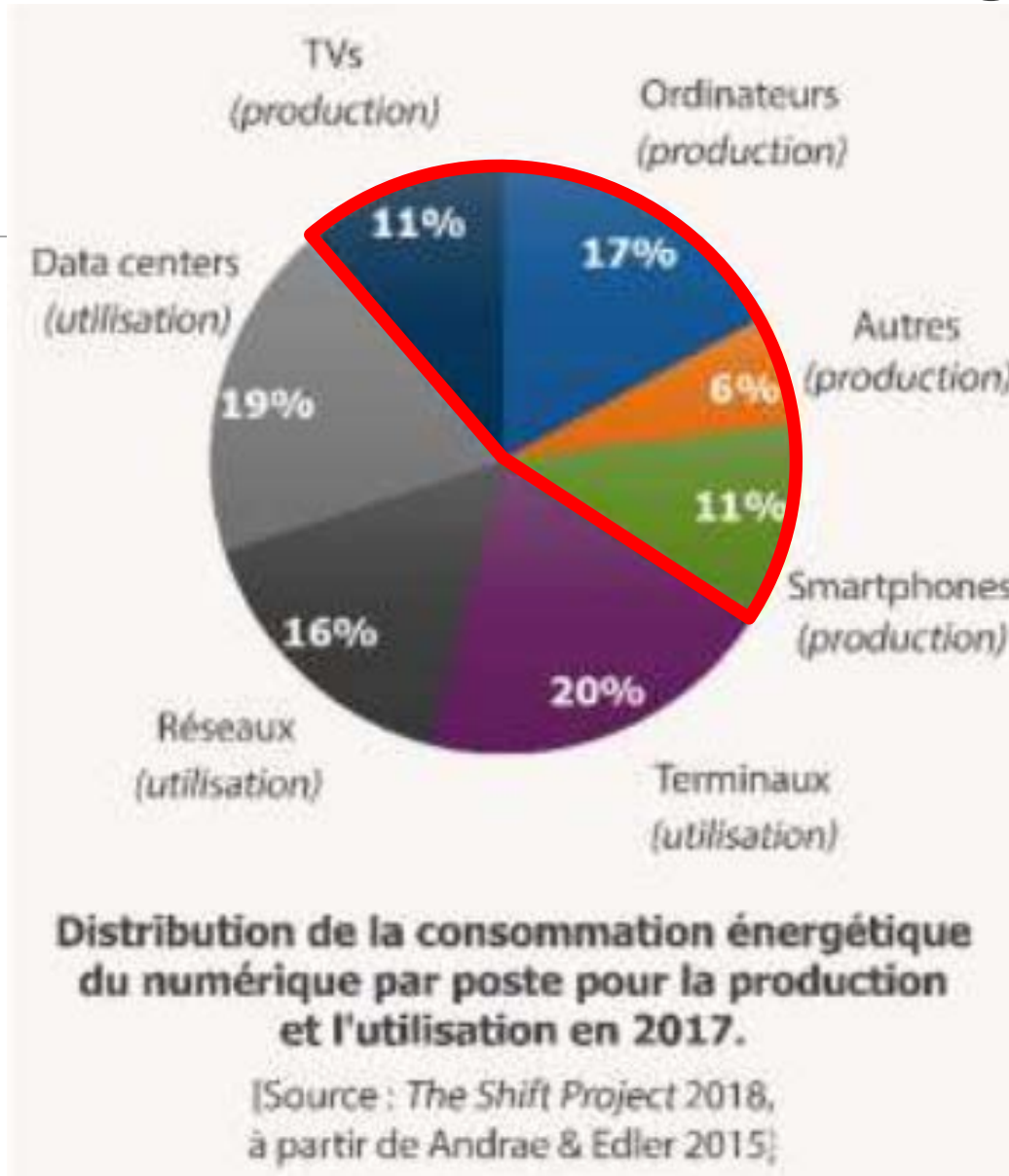
<https://greencross.ch/en/news-info-en/environmental-reports/ten-most-dangerous-sources-of-environmental-toxins-2016/>

# Fabrication, toujours, une question...

---

D'après vous, quelle est la proportion de l'énergie consommée par les (N)TIC servant à la fabrication des terminaux, sur toute la durée de vie du matériel ?

# La fabrication consomme de l'énergie aussi...



Source : « Pour une Sobriété Numérique », rapport du Shift Project, 2018.

À partir de l'article d'Andrae et Edler : <https://www.mdpi.com/2078-1547/6/1/117>

# Fabrication : est-ce une fatalité ?

---

En tant que consommateurs, nous pouvons :

- Choisir des fabricants faisant preuve de plus d'éthique, qui fabriquent plus près et dans le respect des droits humains :
  - Fairphone (<https://www.fairphone.com/fr/> )
  - Classement des fabricants GreenPeace :  
<http://www.greenpeace.org/international/en/campaigns/detox/electronics/how-the-companies-line-up/>
- Choisir d'acheter du matériel raisonné, garanti longtemps, réparable longtemps ou reconditionné :
  - Why (<https://whyopencomputing.ch/> )
  - Backmarket (<https://www.backmarket.fr/> )
  - <https://iode.tech/> (dégafamisé et reconditionné)
- Louer : <https://commown.fr/>
- Prolonger la durée de vie de nos matériels, acheter moins