

Les effets secondaires du numérique

Jacques COMBAZ

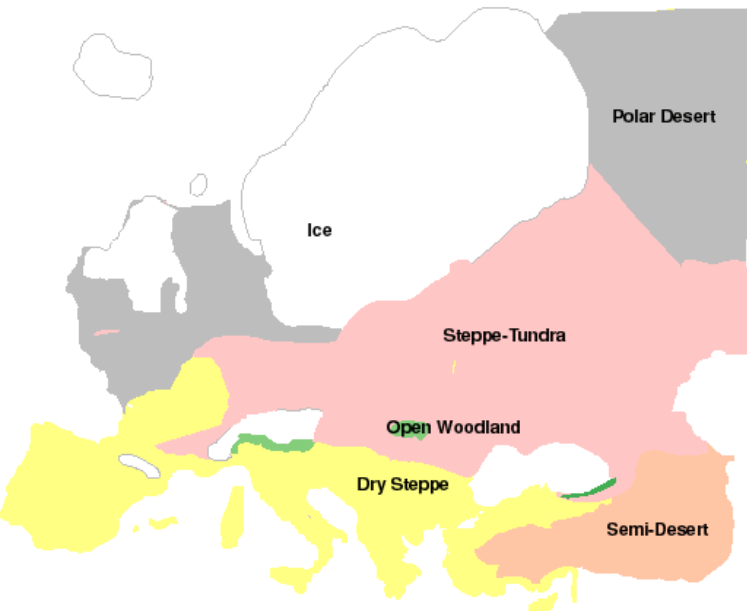
Jacques.Combaz@univ-grenoble-alpes.fr

ecoinfo.cnrs.fr



Réchauffement climatique : les enjeux

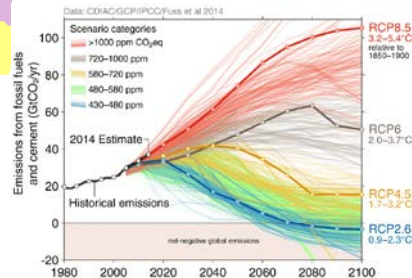
22,000 – 14,000 ¹⁴C years ago



Present Potential Vegetation



?



-20 000
-5°C

~ 0,1°C / siècle (max)

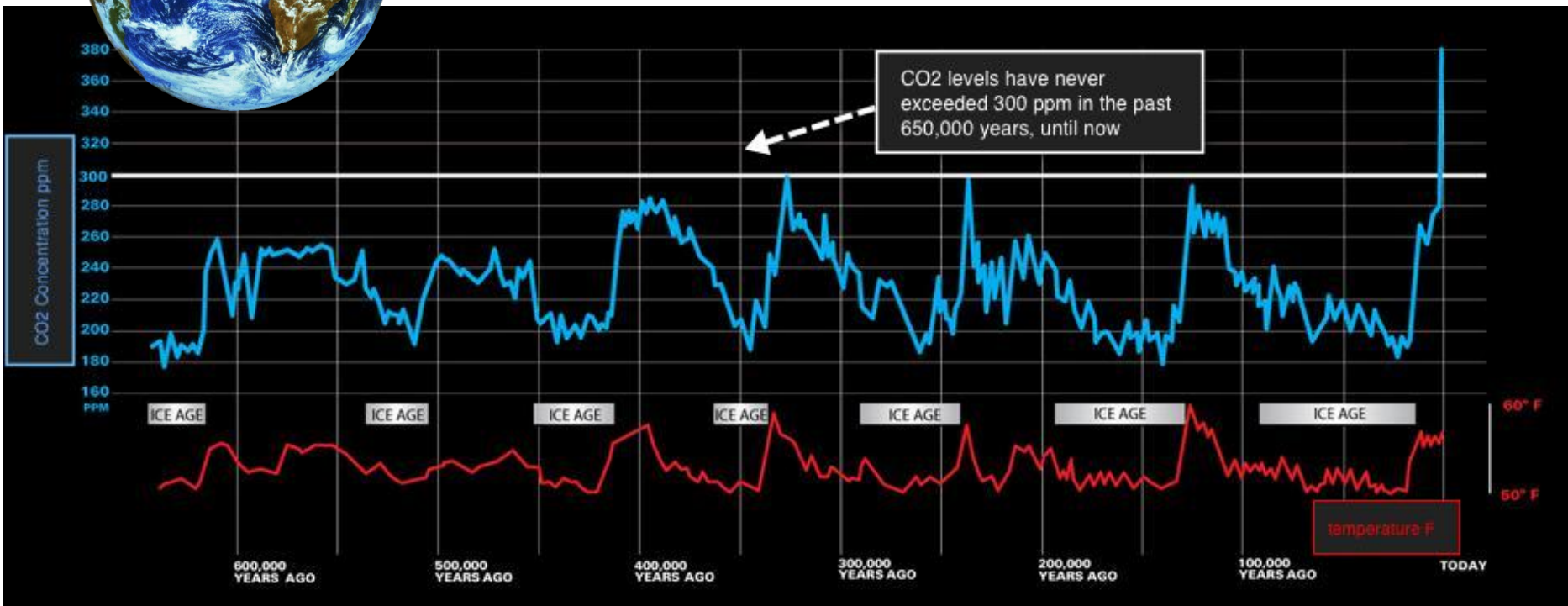
2019
0°C

~ 2°C / siècle (actuel)

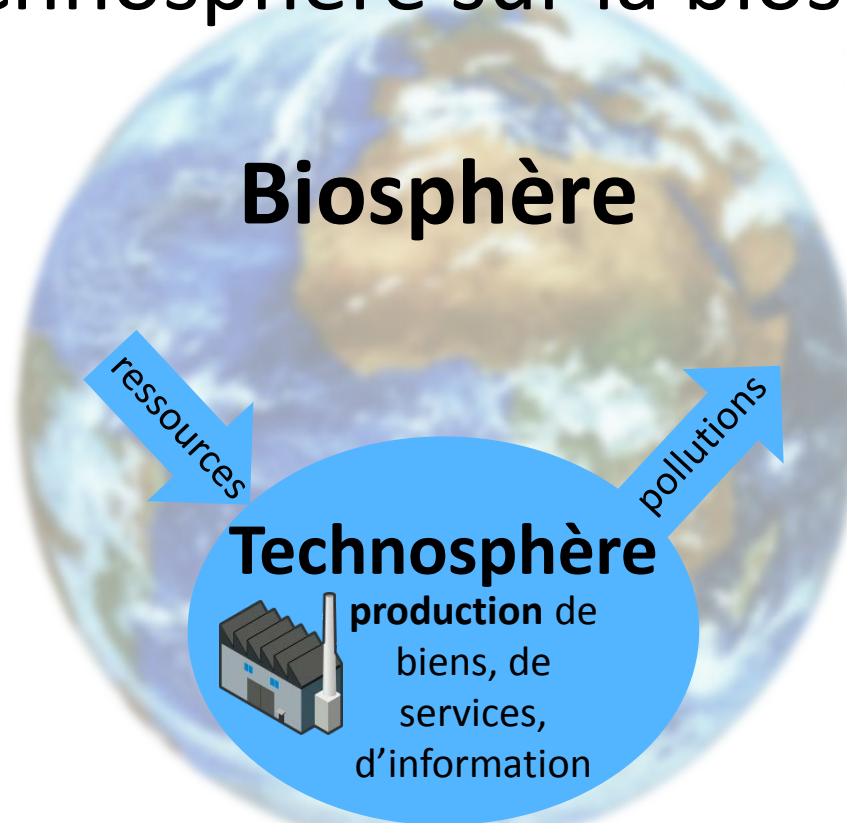
2100
+5°C ?



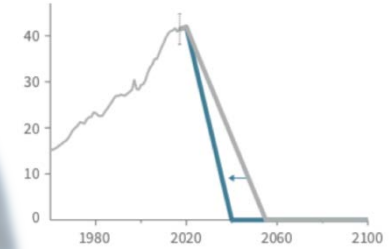
Origine humaine du réchauffement



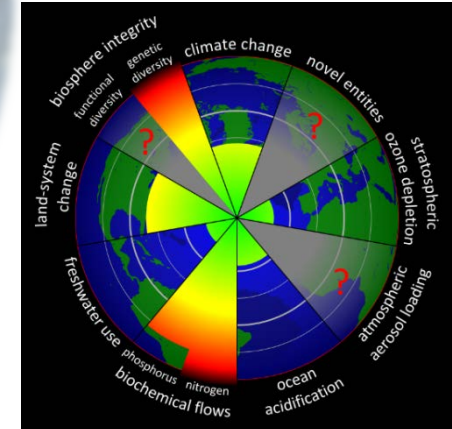
Nécessité de diminuer les impacts de la technosphère sur la biosphère



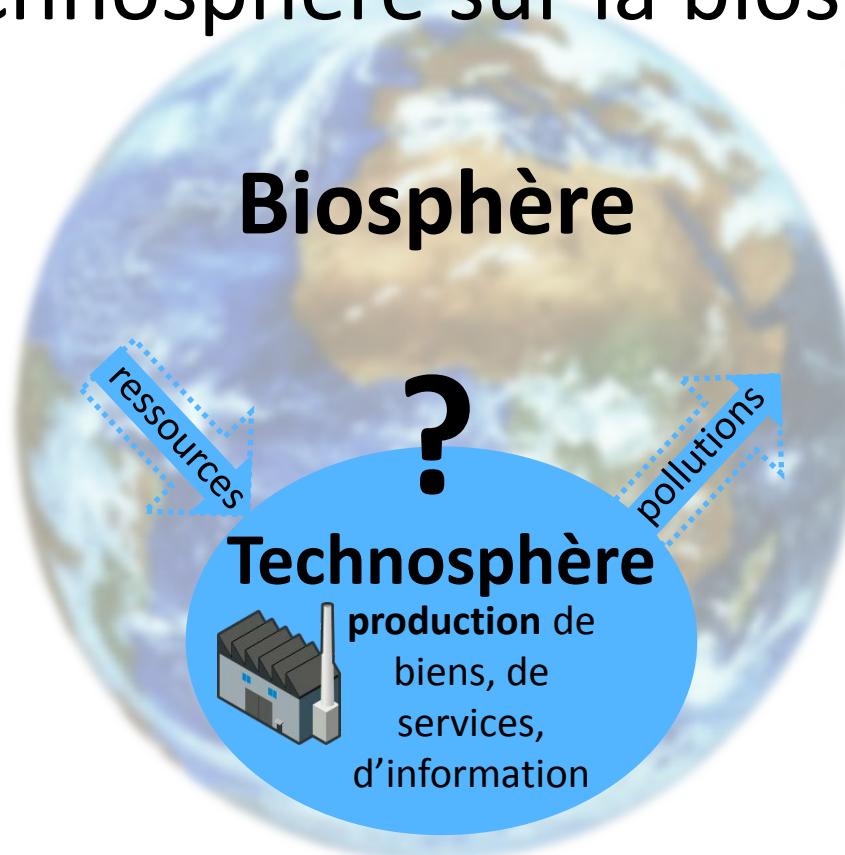
Trajectoires stylisées des émissions de CO₂ mondiales
(en GtCO₂/an)



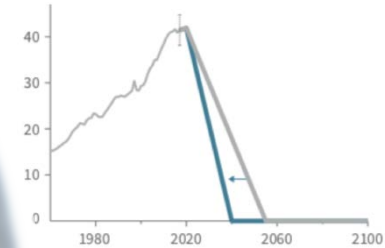
source: GIEC (rapport spécial 1,5°C)



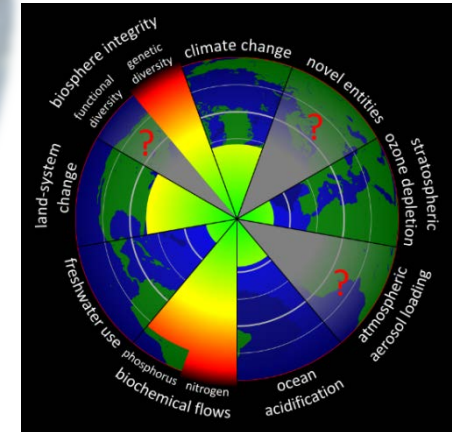
Nécessité de diminuer les impacts de la technosphère sur la biosphère



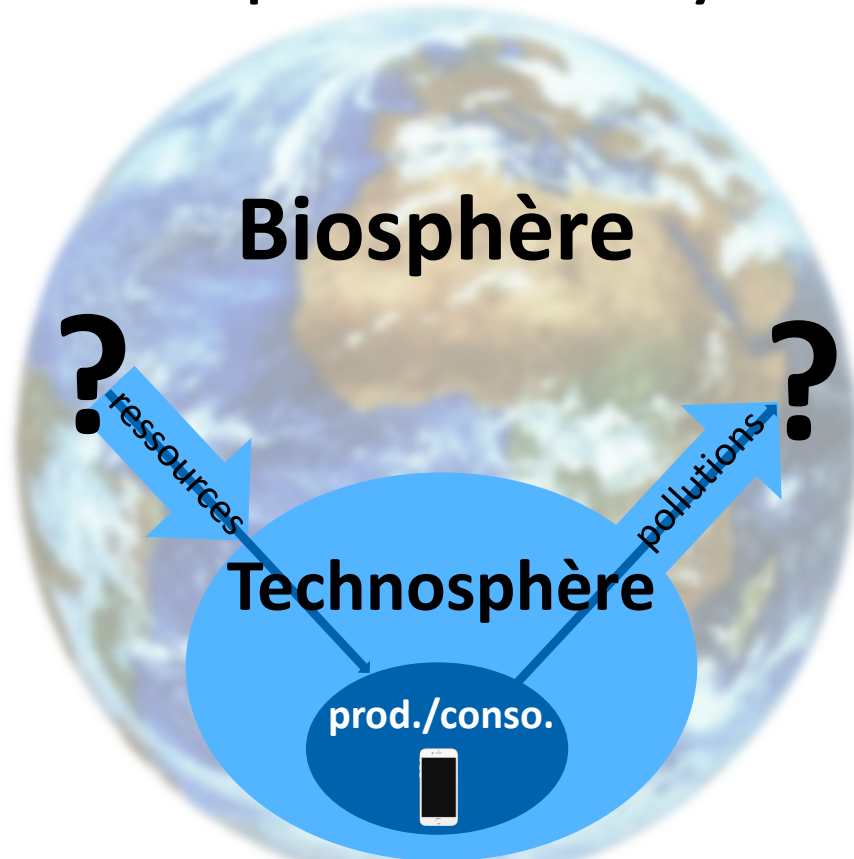
Trajectoires stylisées des émissions de CO₂ mondiales (en GtCO₂/an)



source: GIEC (rapport spécial 1,5°C)

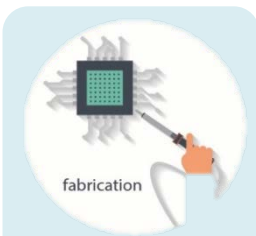


Evaluation des impacts : analyse de cycle de vie



- ACV : évaluer les impacts d'une sous-partie de la *technosphère* sur la *biosphère*
- Correspond aux impacts « *directs* »
- Notions d'*attribution* et de *périmètre*

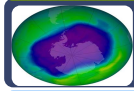
Impact environnemental des TIC



Consommation d'énergie primaire



Changement climatique



Destruction de la couche d'ozone



Toxicité humaine

Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un **risque potentiel pour l'homme**



Ecotoxicité aquatique

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



Déplétion des métaux

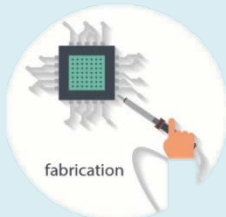


Consommation d'eau

Impact environnemental des TIC



extraction
des ressources



fabrication



transport



usage



gestion
de fin de vie



Consommation d'énergie primaire



Changement climatique



Destruction de la couche d'ozone



Toxicité humaine

Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour l'homme



Ecotoxicité aquatique

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



Déplétion des métaux

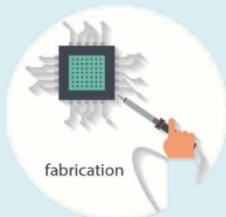


Consommation d'eau

Impact environnemental des TIC



extraction
des ressources



fabrication



transport



usage



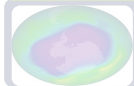
gestion
de fin de vie



Consommation d'énergie primaire



Changement climatique



Destruction de la couche d'ozone



Toxicité humaine

Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour l'homme



Ecotoxicité aquatique

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



Déplétion des métaux



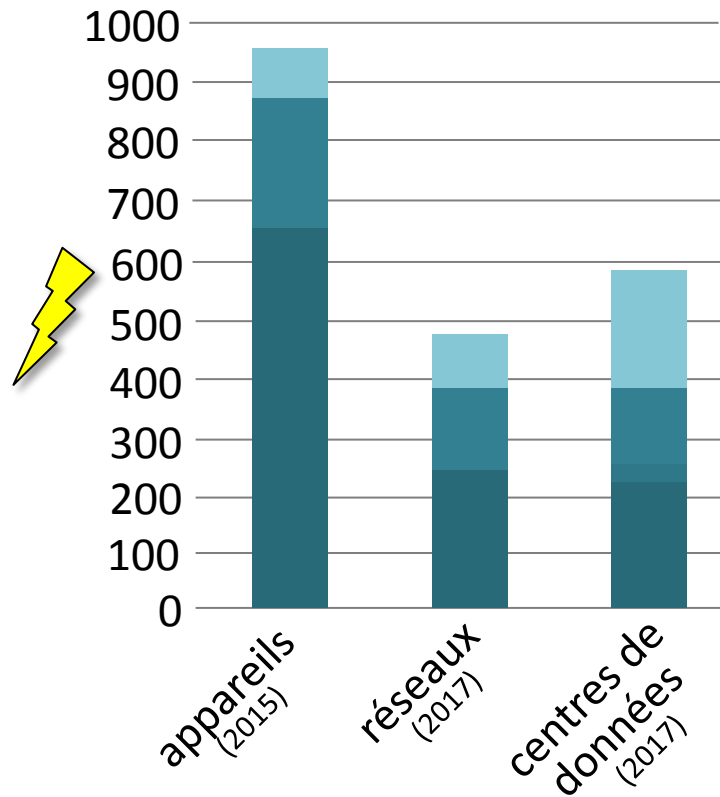
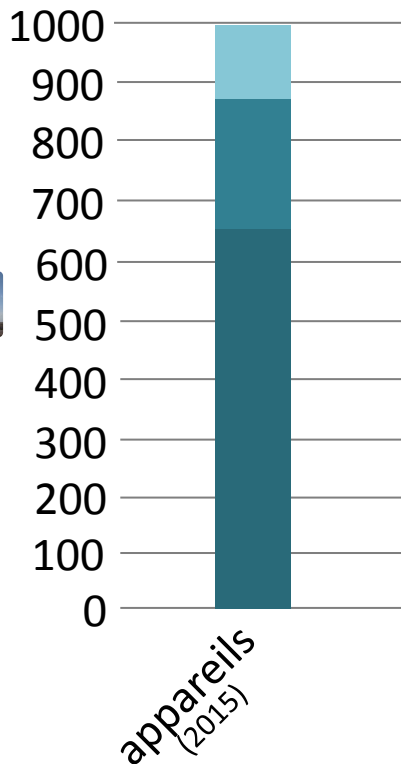
Consommation d'eau



Consommation énergétique des TIC

production (énergie primaire en TWh)

usage (électricité en TWh)

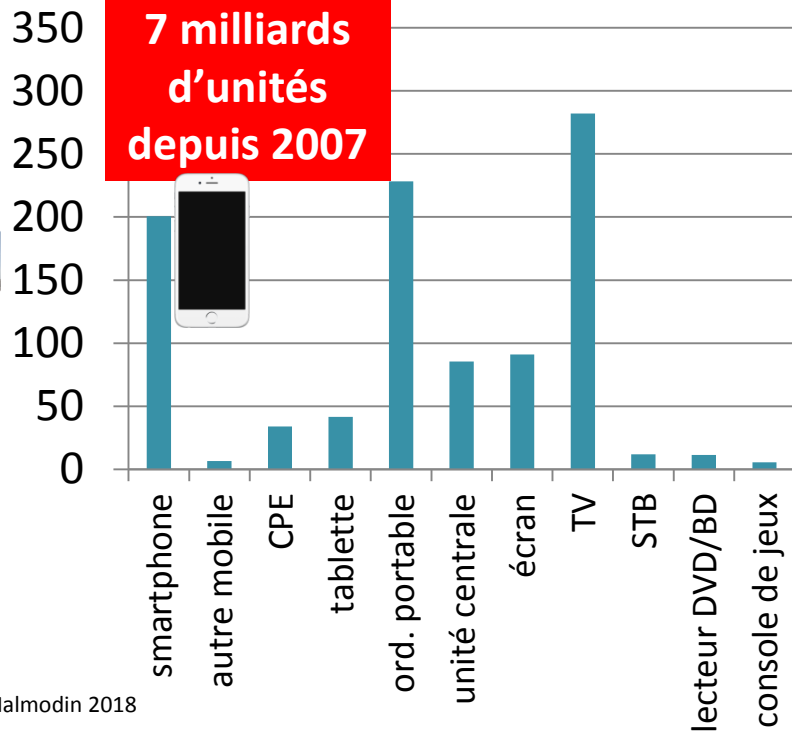


sources: Lean ICT Shift Project 2018,
Andrae 2015, Andrae 2019, IAE 2017
Digitalization&Energy, Malmodin
2018, IAE 2017 Digitalization&Energy

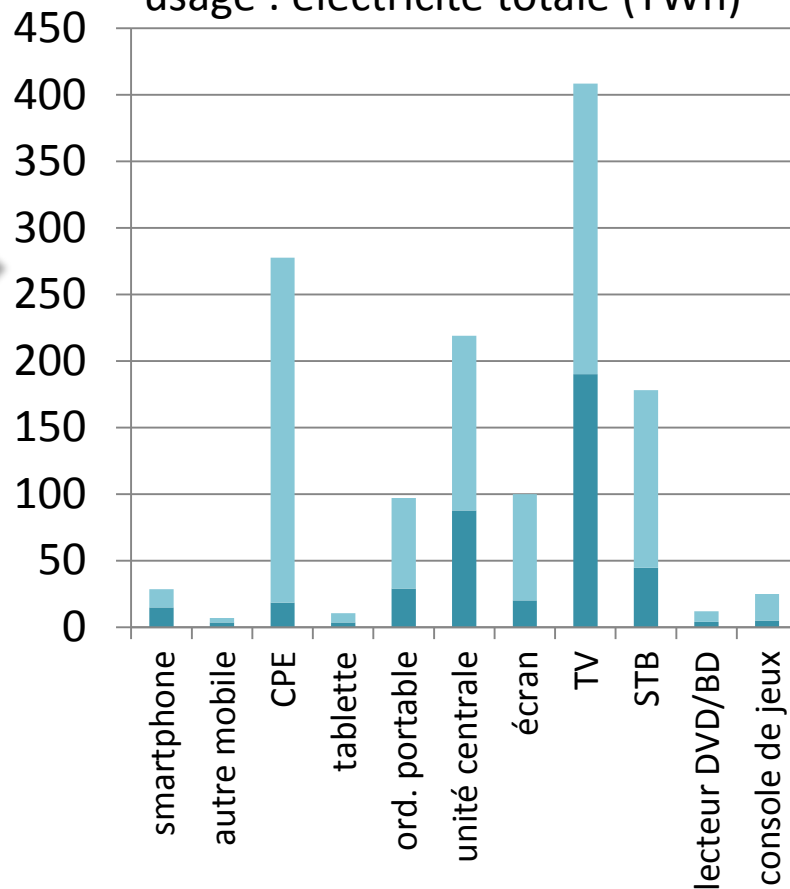
Les appareils : énergie en 2015



fabrication : énergie primaire totale (TWh)

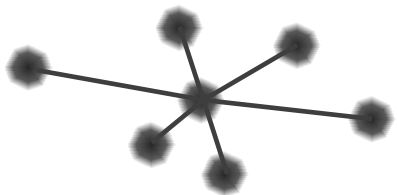


usage : électricité totale (TWh)

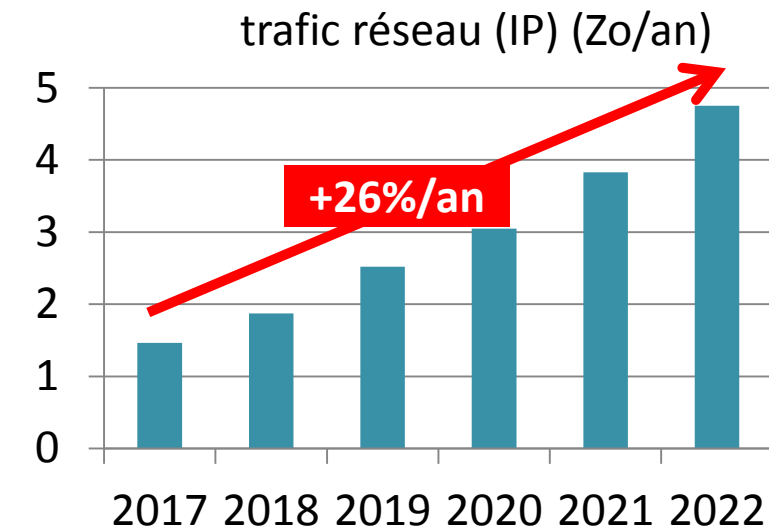
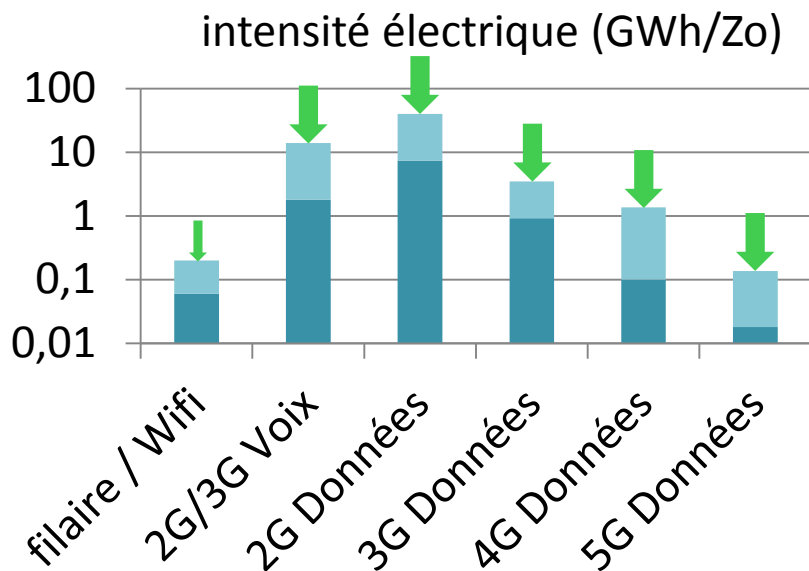


source: Malmodyn 2018

source: établi à partir d Shift 2018, Ademe 2018, Urban&Roth 2017, Ademe 2008

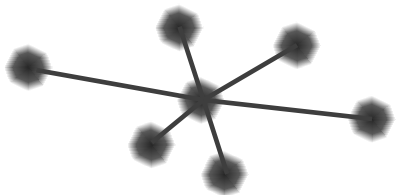


Les réseaux : usage

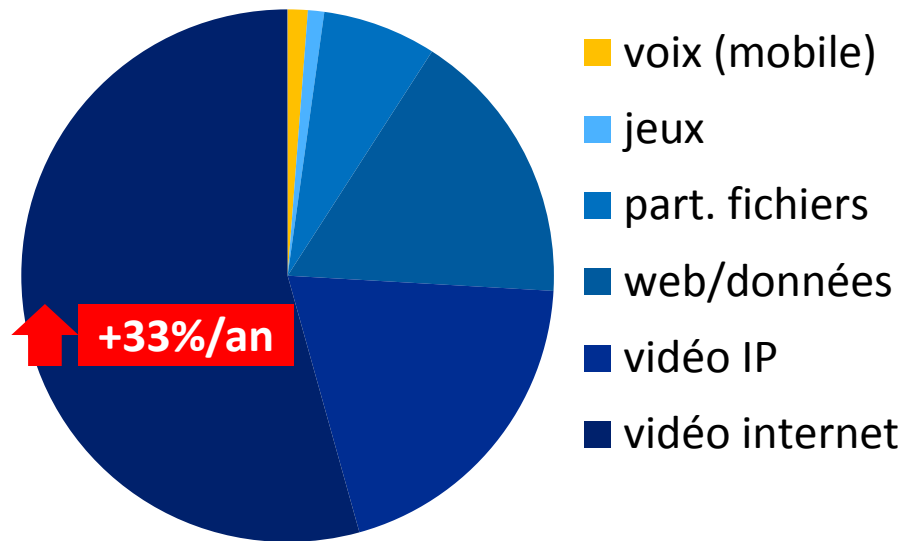
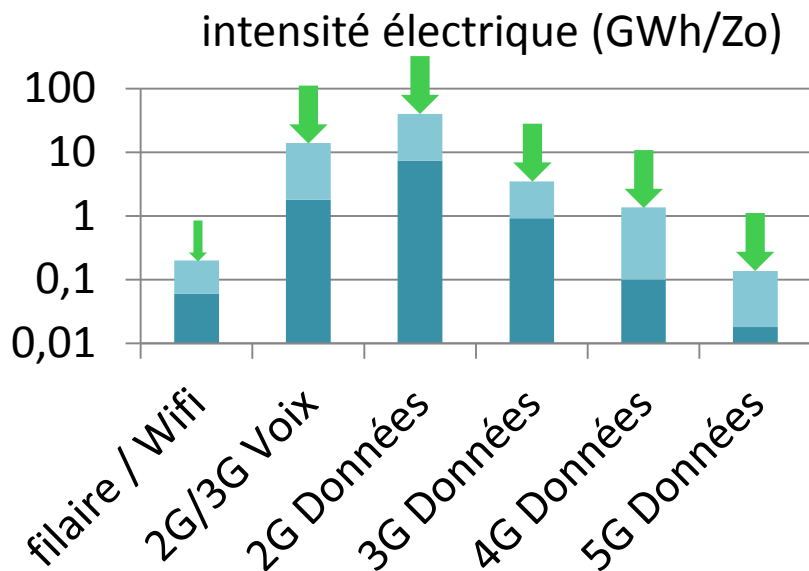


sources: Cisco 2019

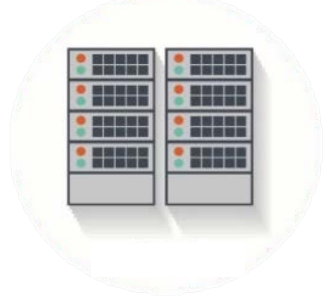
sources: calculé à partir de Andrae 2015 et IAE 2017 Digitalization&Energy



Les réseaux : usage

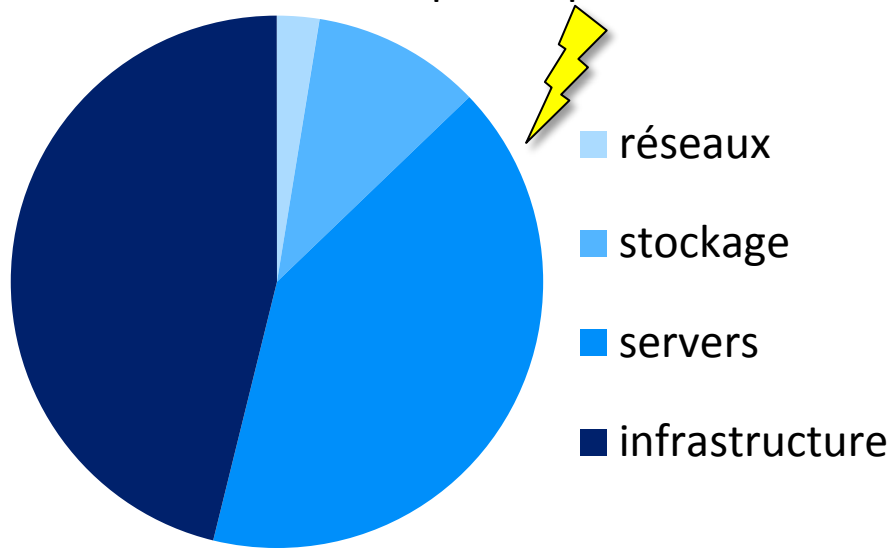


sources: calculé à partir de Andrae 2015 et IAE 2017 Digitalization&Energy



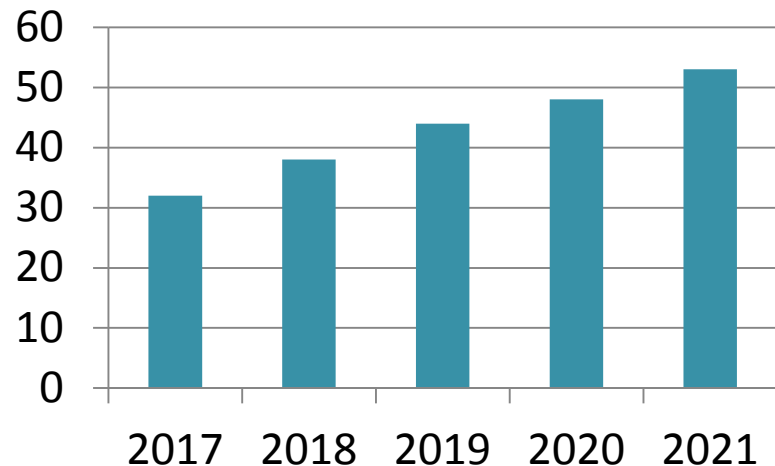
Centres de données : usage

consommation électrique : répartition en 2014

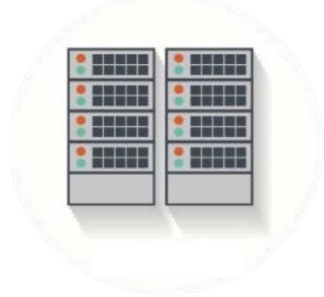


source : IAE 2017 Digitalization&Energy

taux de centres *hyperscale* (%)

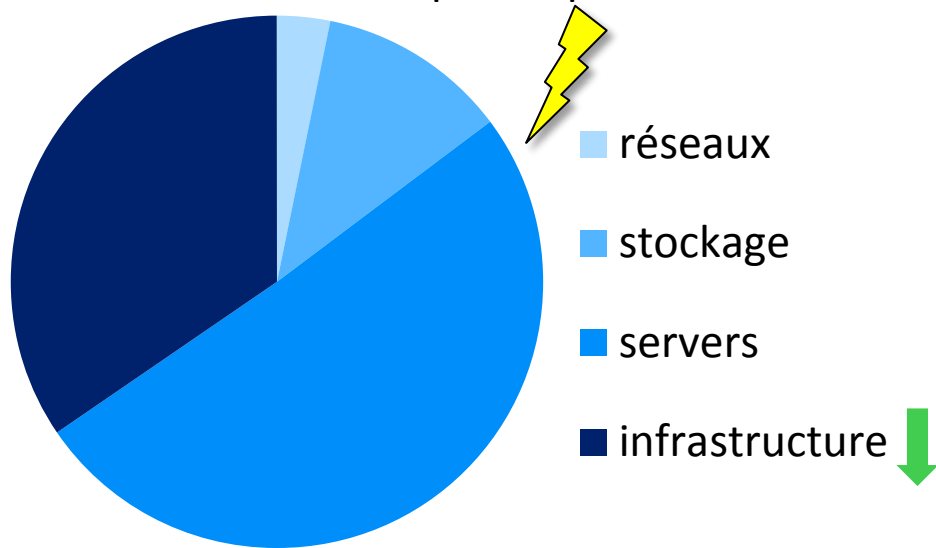


sources: Cisco 2018



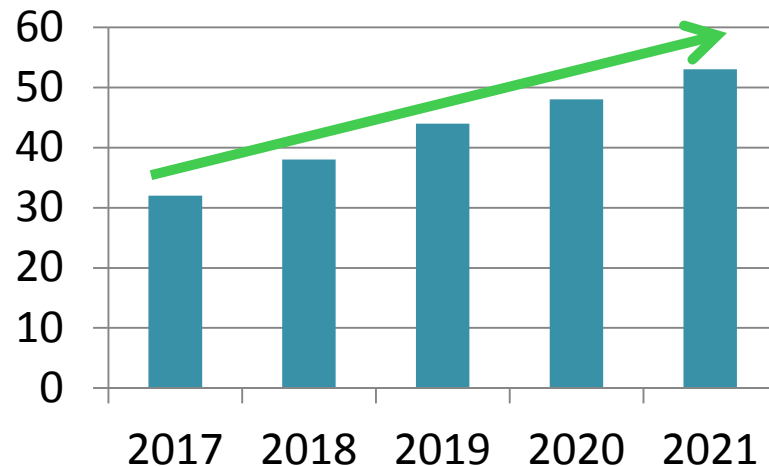
Centres de données : usage

consommation électrique : répartition en 2020

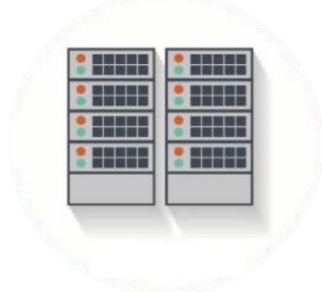


source : IAE 2017 Digitalization&Energy

taux de centres *hyperscale* (%)

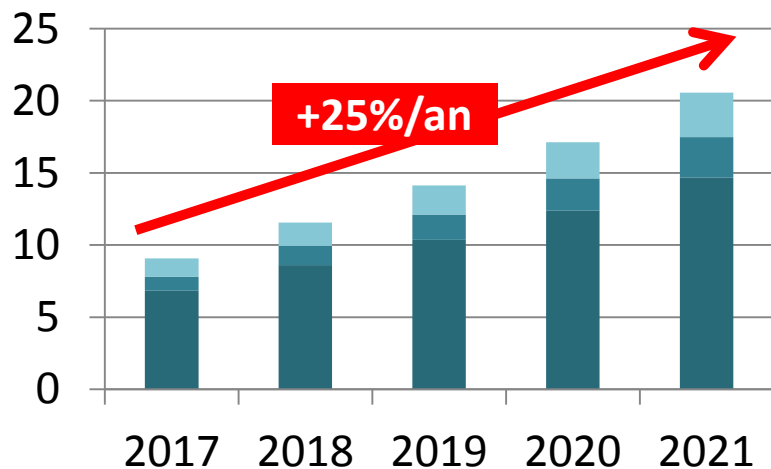


sources: Cisco 2018



Centres de données : usage

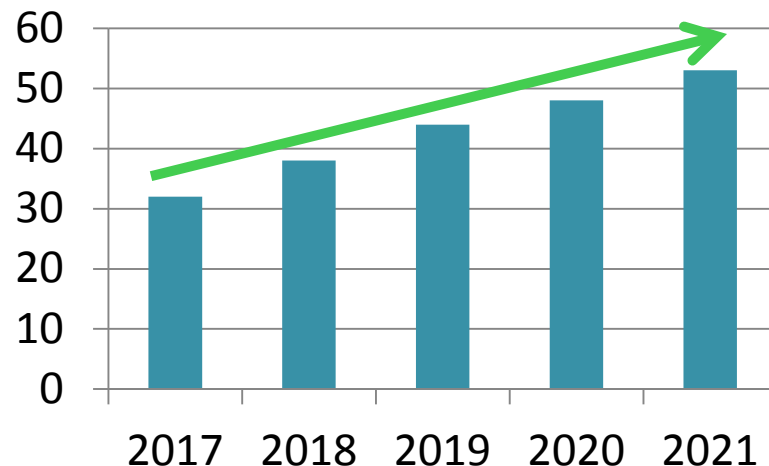
trafic centres de données (Zo/an)



sources: Cisco 2018

- centres à utilisateurs
- centres à centres
- à l'intérieur des centres

taux de centres *hyperscale* (%)

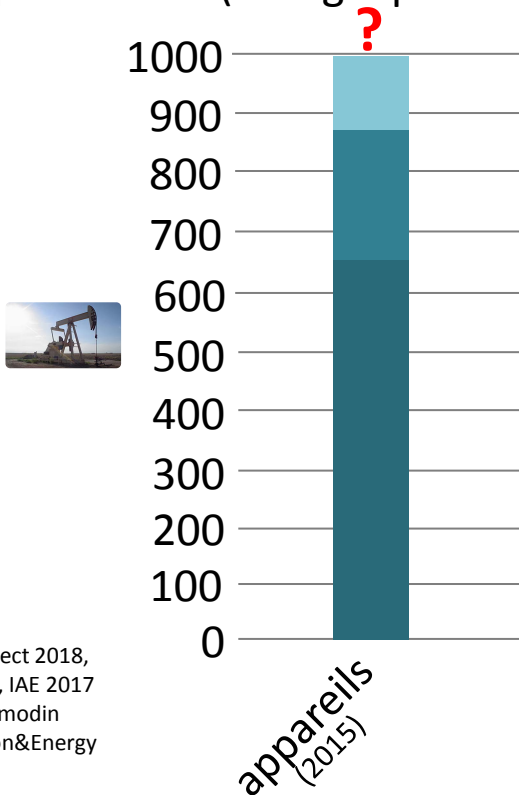


sources: Cisco 2018

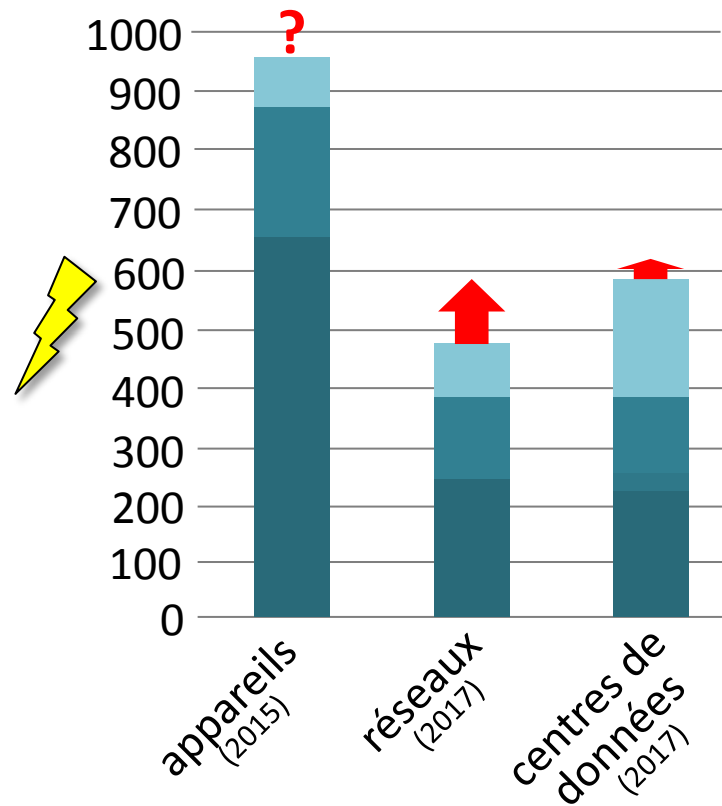


Consommation énergétique des TIC

production (énergie primaire en TWh)



usage (électricité en TWh)



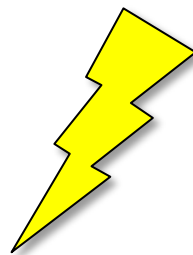
sources: Lean ICT Shift Project 2018,
Andrae 2015, Andrae 2019, IAE 2017
Digitalization&Energy, Malmödin
2018, IAE 2017 Digitalization&Energy

Consommation énergétique des TIC



TIC
2017

≈



6-12%

de la consommation
électrique mondiale



3-4%

de la consommation
d'énergie primaire
mondiale



+8%/an

Contribution des TIC aux émissions de gaz à effet de serre (GES)



>



TIC
2017

3-4% des GES mondiaux



+8%/an

aviation civile
2017

2% des GES mondiaux



+5%/an

Contribution des TIC aux émissions de gaz à effet de serre (GES) - *projections*

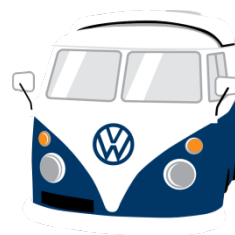


TIC

2025 (projections)

8%

des GES mondiaux

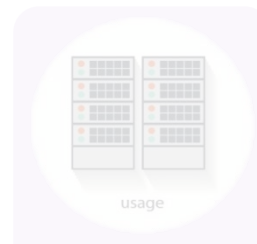
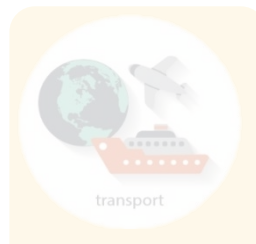


automobile

2017

8% des GES mondiaux

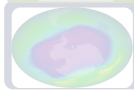
Impact environnemental des TIC



Consommation d'énergie primaire



Changement climatique



Destruction de la couche d'ozone



Toxicité humaine

Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour l'homme



Ecotoxicité aquatique

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

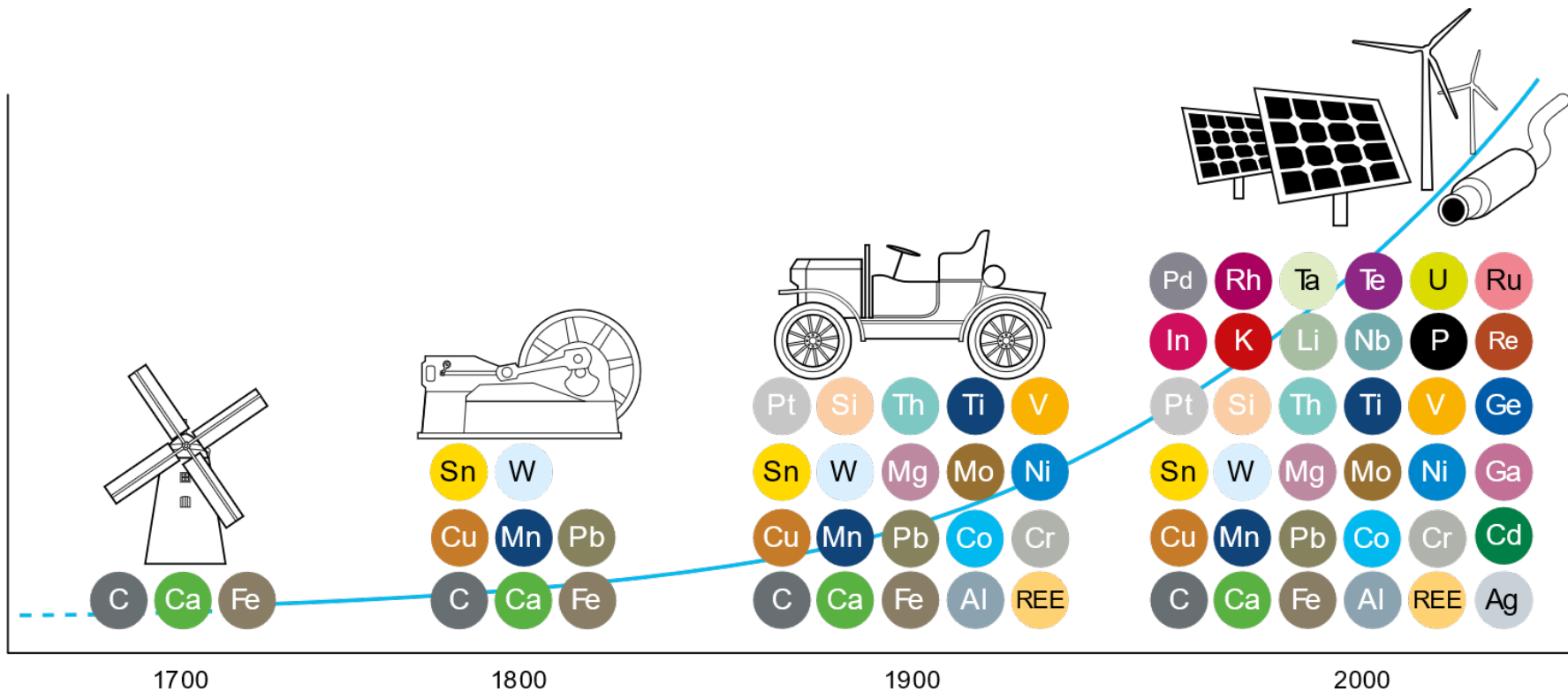


Déplétion des métaux

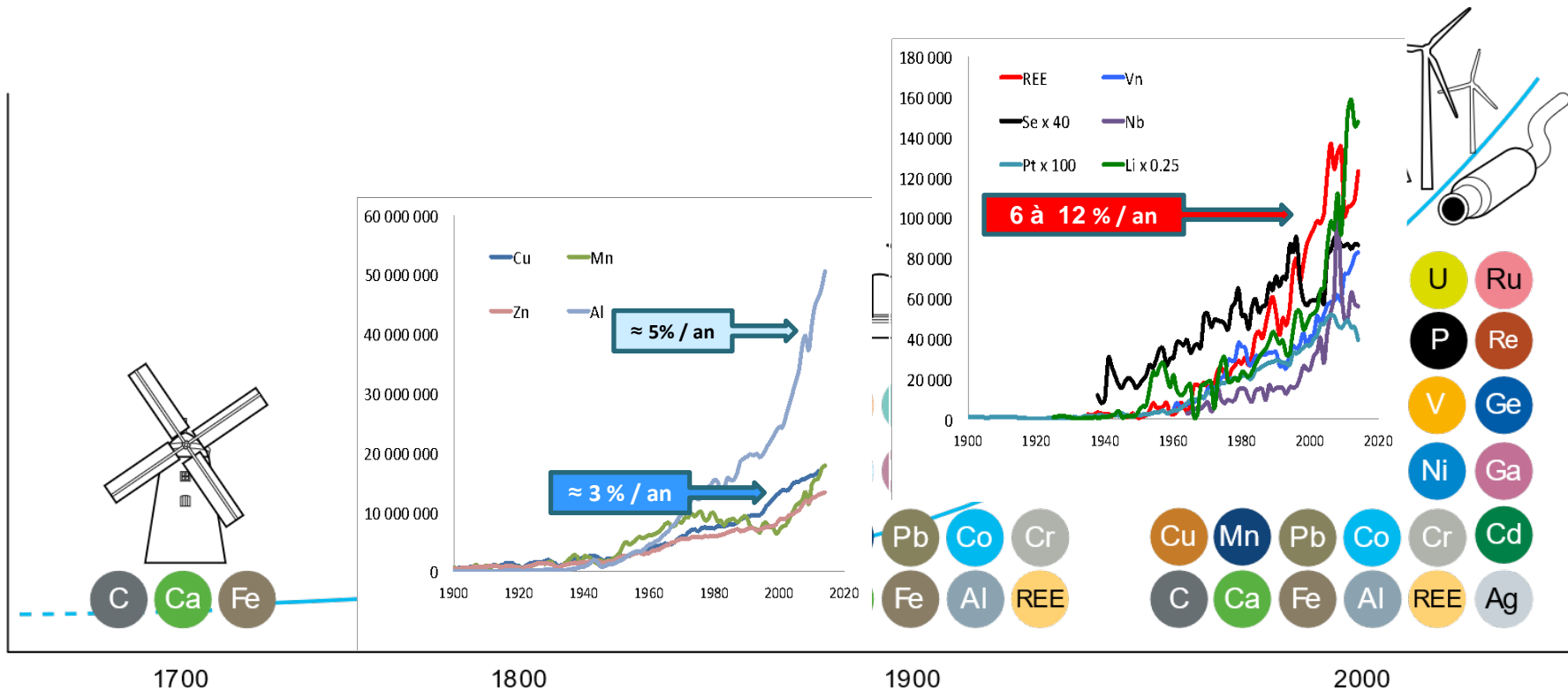


Consommation d'eau

Les métaux dans les TIC

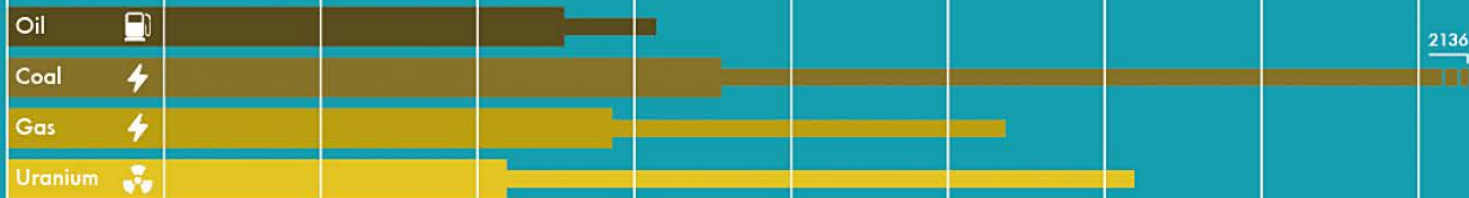


Les métaux dans les TIC



Né en 2010 :

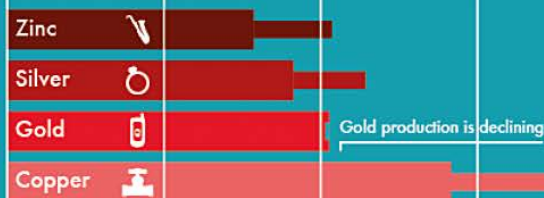
Energy



Metals used in renewable energy solutions



Other industrial metals



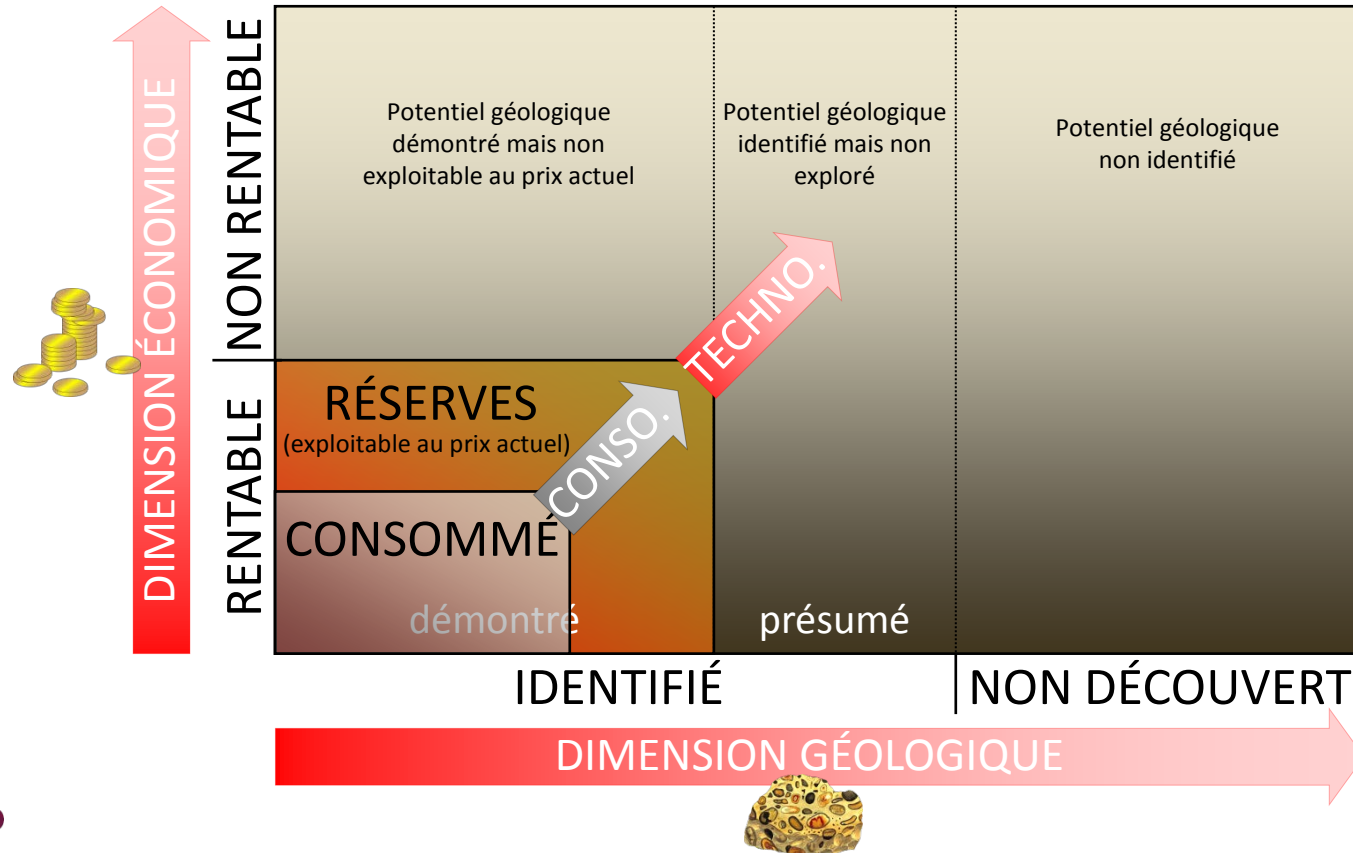
Calculations based on known reserves:

Reserves

Resources (undiscovered)

Resource base (to energy intensive to extract)

Attention à la notion de réserves



Energie d'extraction et limite thermodynamique (fer)

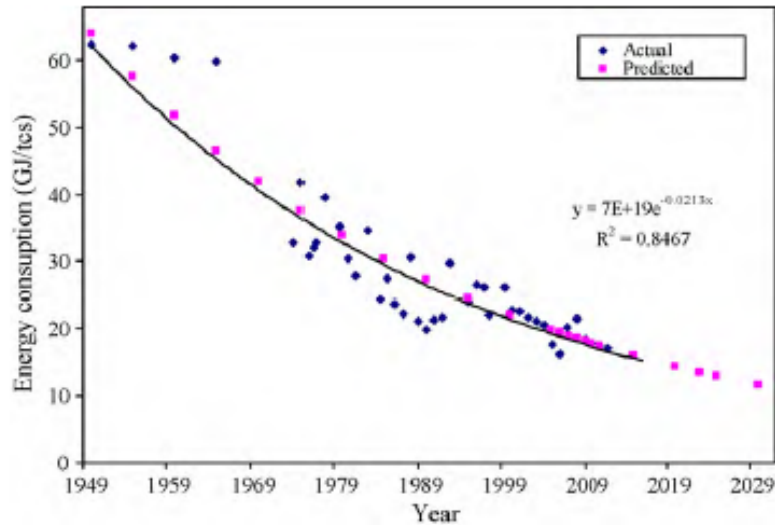
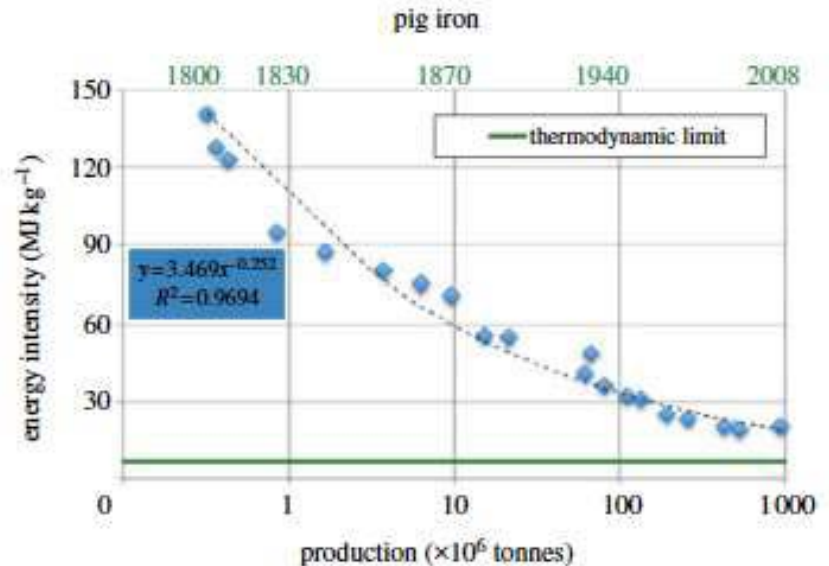
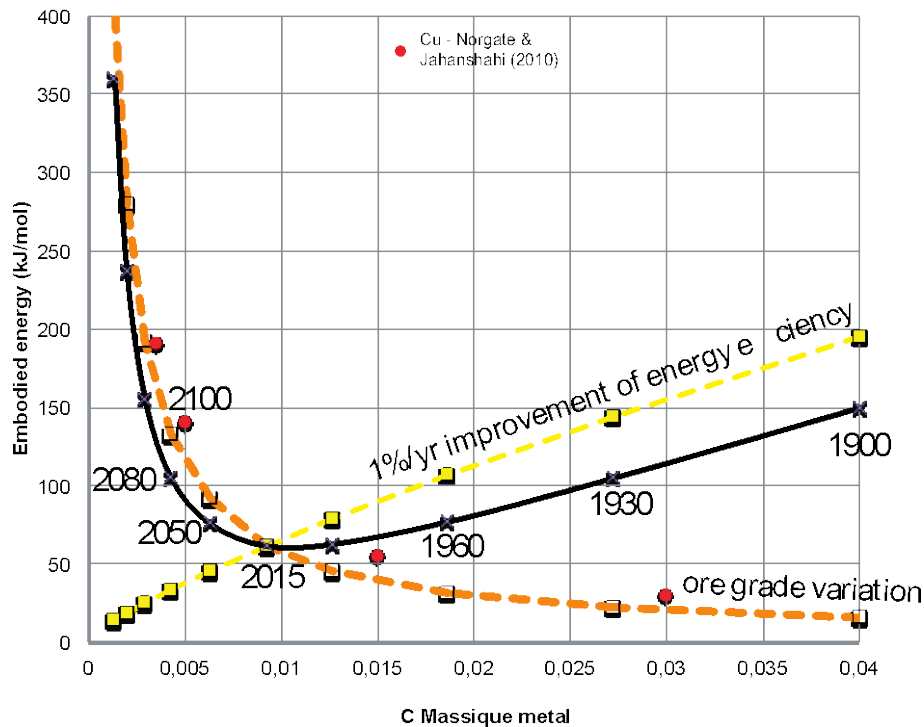
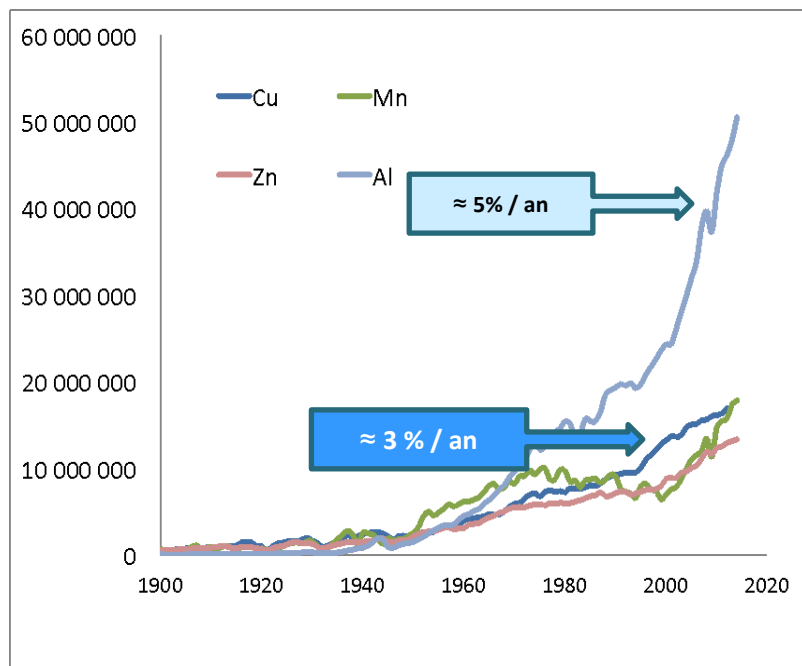


Fig. 5. Actual and projected specific energy consumption in the steel industry (world average).



Energie d'extraction (cuivre)



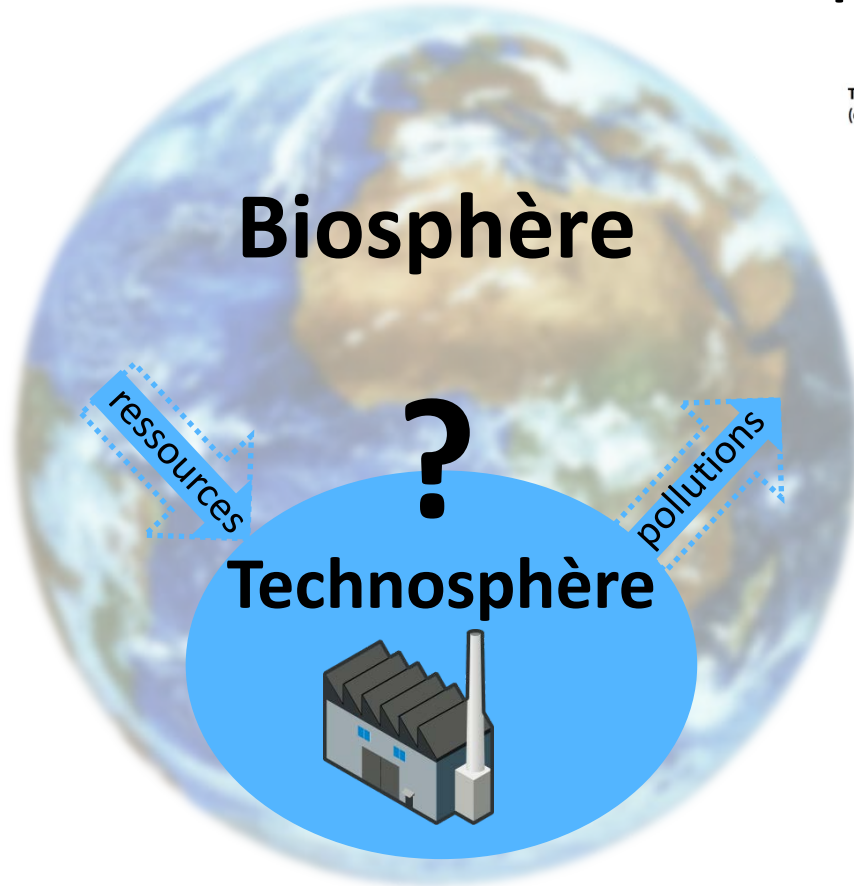
Source : Vidal, INRIA, 2019

D'autres impacts liés à l'extraction des métaux

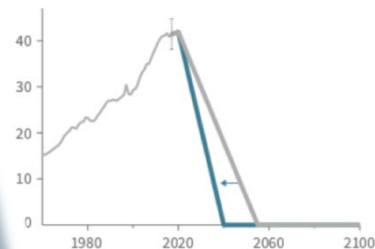
- Impacts sociaux, politiques :
 - conflits armés (RDC)
 - conflits d'usage de l'eau
 - Impacts environnementaux :
 - tarissement de l'eau
 - érosion des sols
 - fragmentation des territoires
 - pollution (eau, sol, air)
- ➔ perte biodiversité, problèmes de santé



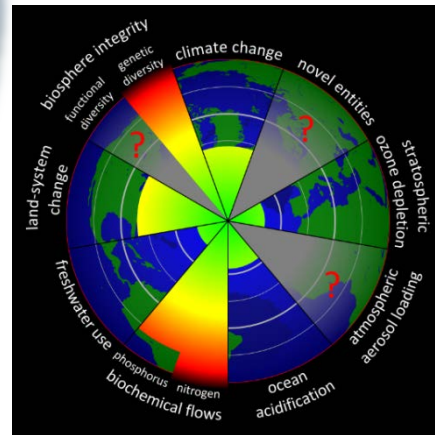
Comment réduire nos impacts ?



Trajectoires stylisées des émissions de CO₂ mondiales
(en GtCO₂/an)



source: GIEC (rapport spécial 1,5°C)



En optimisant plus ?

optimisation

>

croissance

Biosphère

ressources

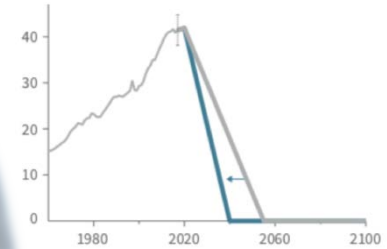
pollutions

efficacité

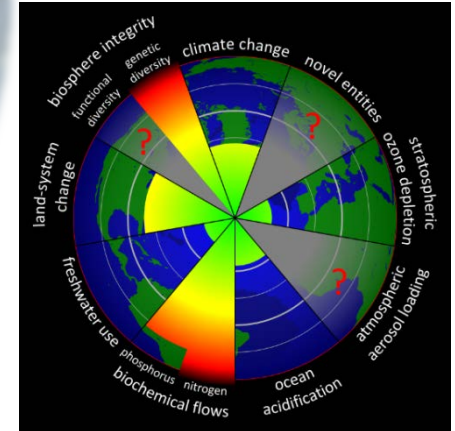
Technosphère



Trajectoires stylisées des émissions de CO₂ mondiales
(en GtCO₂/an)



source: GIEC (rapport spécial 1,5°C)



taux réduction impact

=

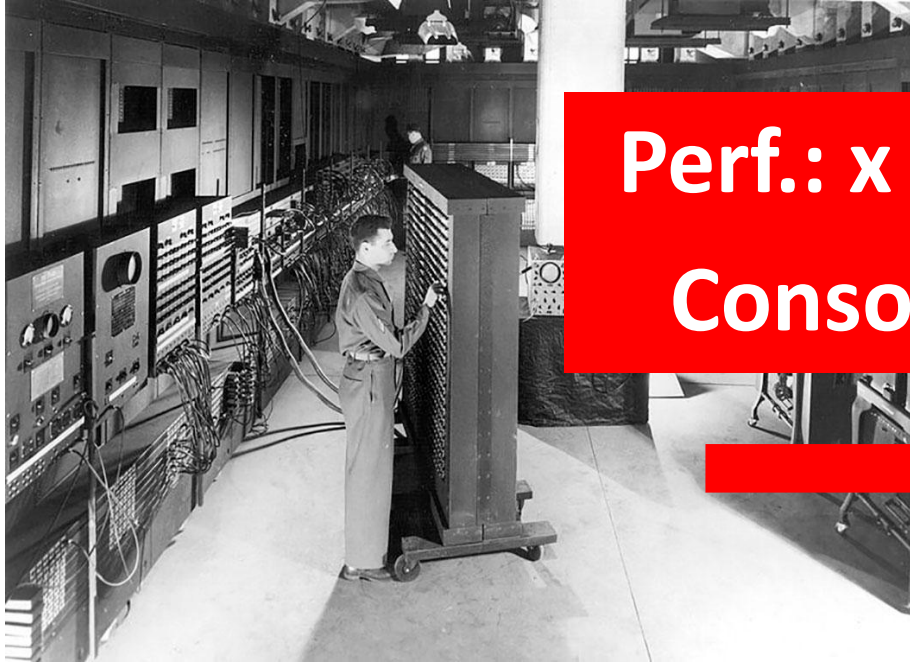
taux amélioration

efficacité

-

taux croissance

ENIAC (1945)



Perf.: x 260 millions !
Conso. : ÷ 75 000 !

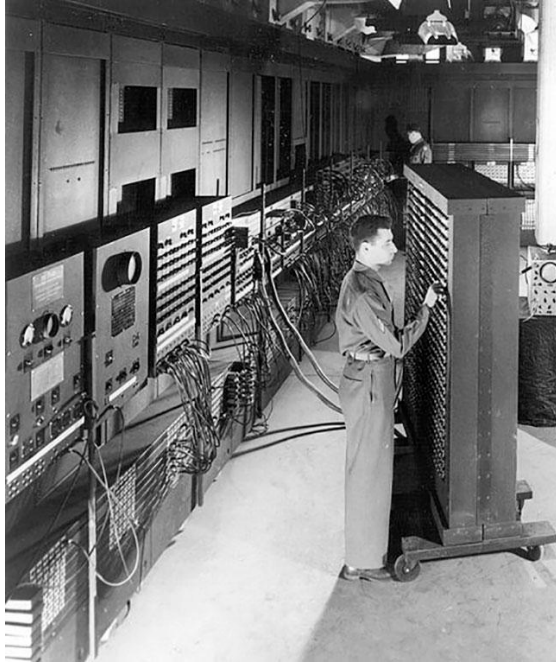
- Poids : 30 t
- Dim. : 30,5 m × 2,4 × 0,9 (167 m²)
- Conso. : 150 kW
- Perf. : ~500 FLOPS

iPhone 6 (2014)



- Poids : 130 g
- Dim. : 158,1 × 77,8 mm × 7,1 mm
- Conso. : ~2 W
- Perf. : ~130 GFLOPS

ENIAC (1945)



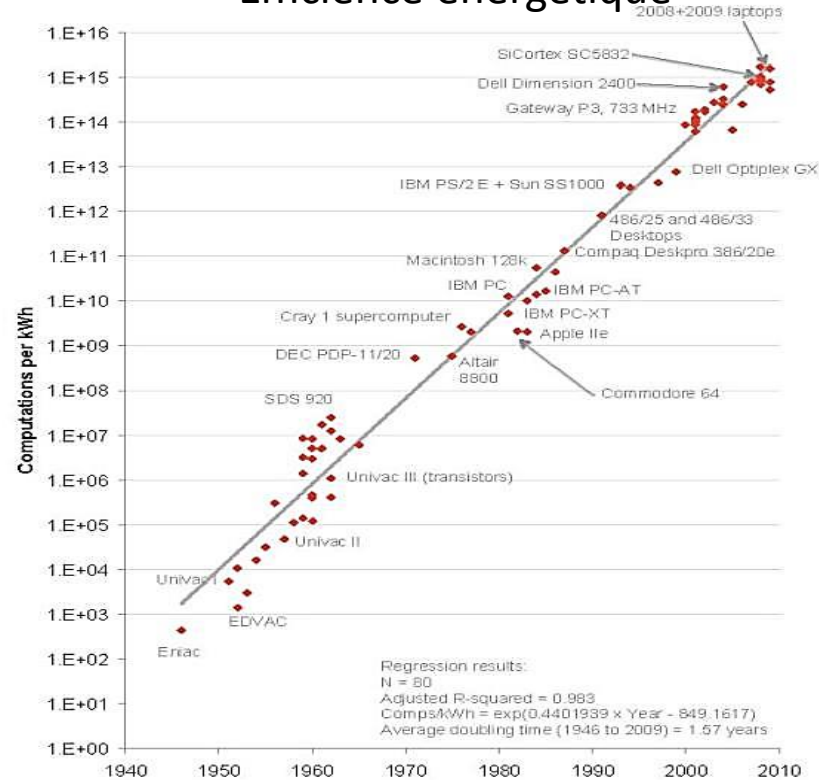
- Poids : 30 t
- Dim. : 30,5 m × 2 m
- Conso. : 150 kW
- Perf. : ~500 FLOPS

iPhone 6 (2014)



mm × 7,1 mm

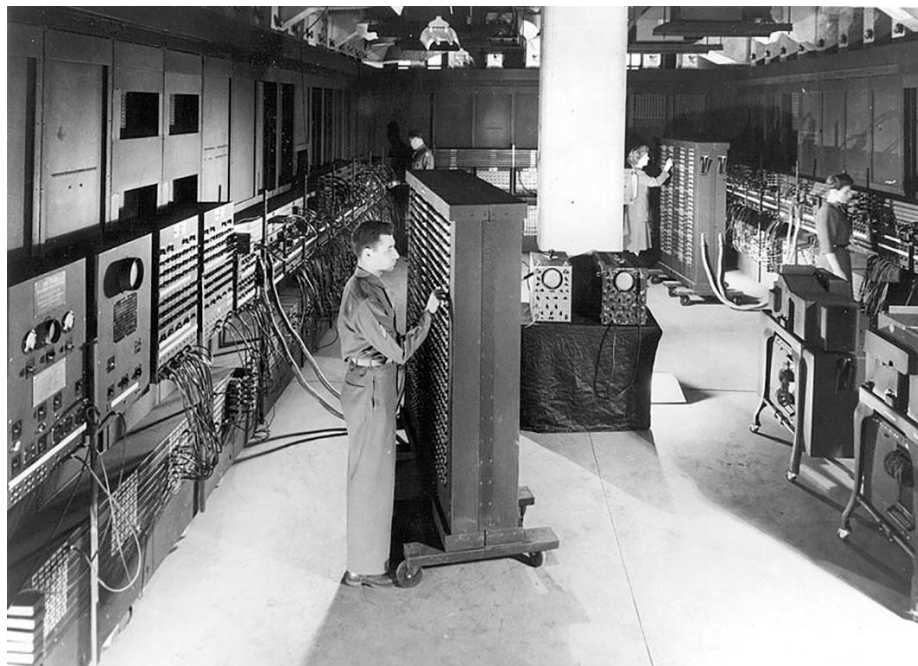
Efficiency énergétique



source : Wikipedia, loi de Koomey

- Perf. : ~130 GFLOPS

ENIAC



150 kW

(en fonctionnement)



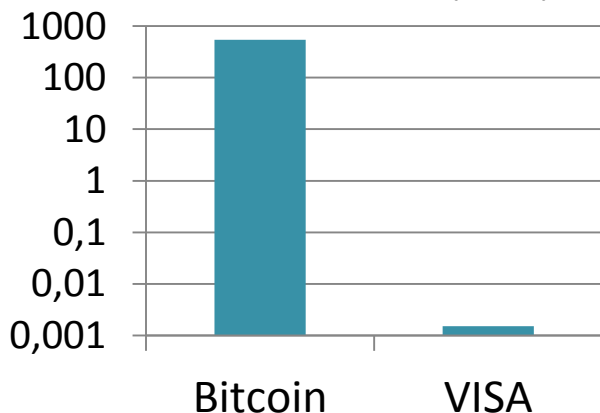
260 GW

(en continu)

Optimisations : pas partout !



coût d'une transaction (kWh)

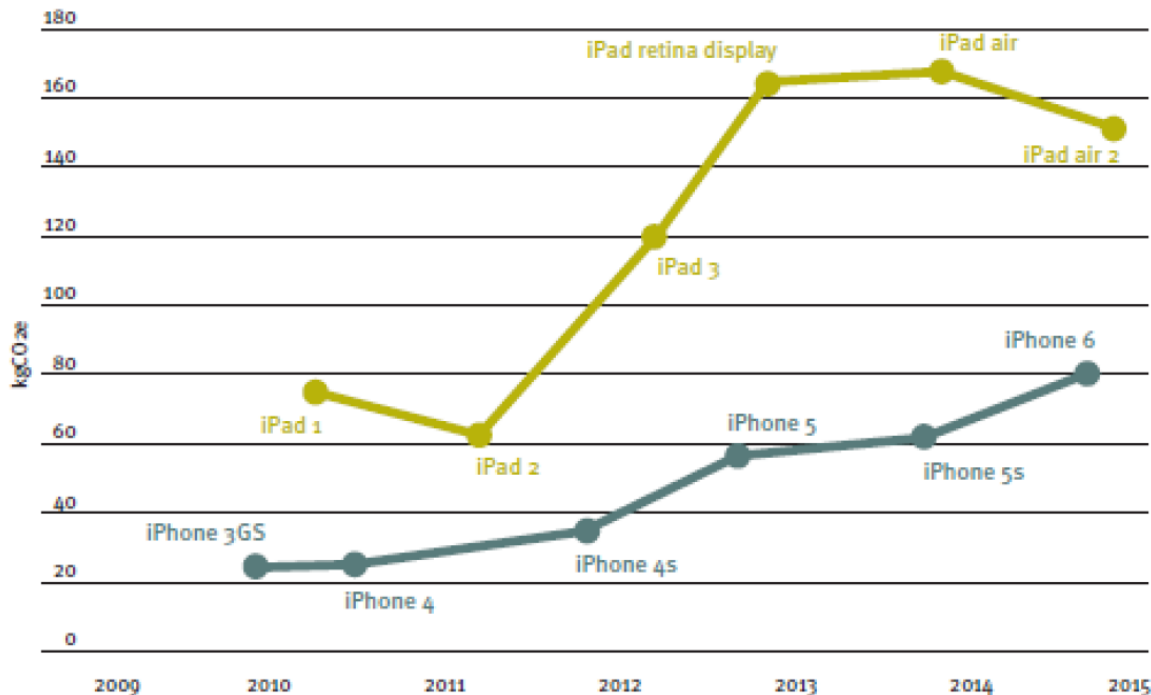


30-75 TWh/an !

Source: Digiconomist



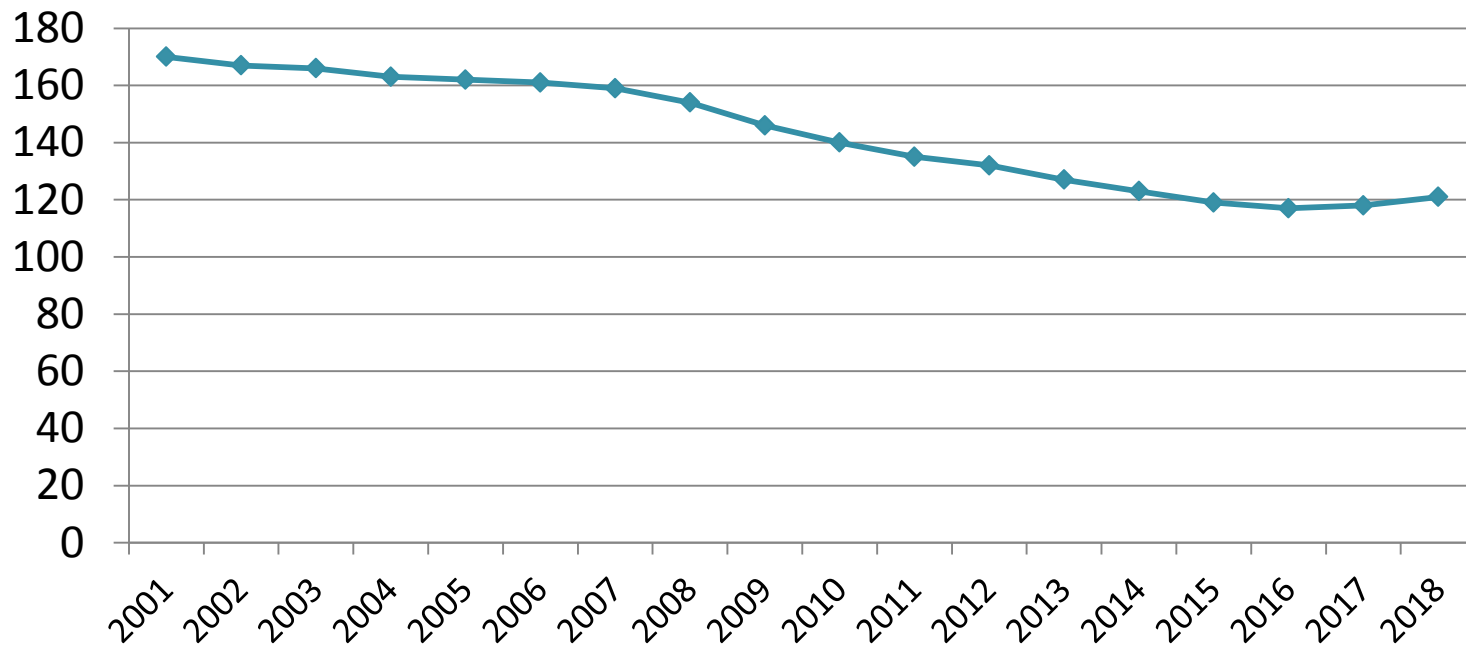
Embodied carbon of Apple devices rises as specifications increase



source: (Benton, Hazell, & Coats, 2015)

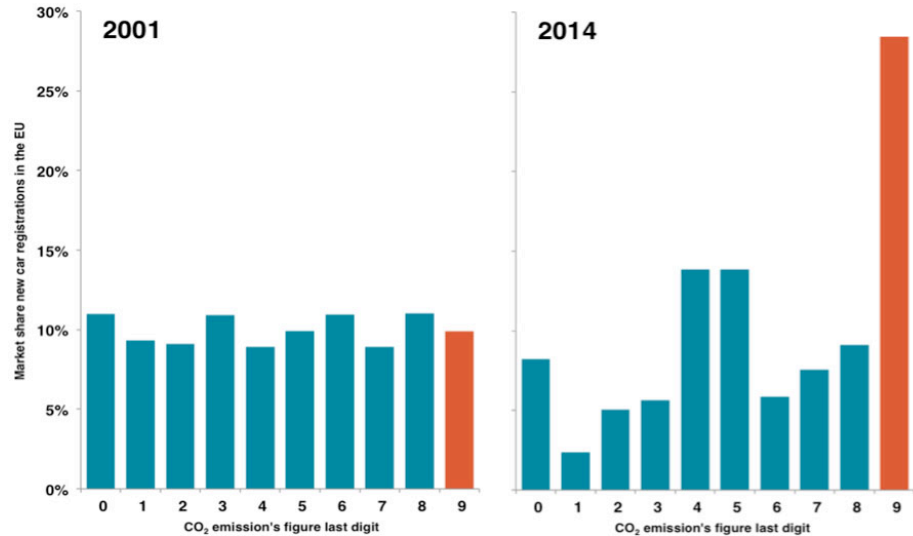
Effet des politiques publiques sur le secteur automobile

émissions de CO₂ moyennes par les voitures en Europe (g CO₂/km)

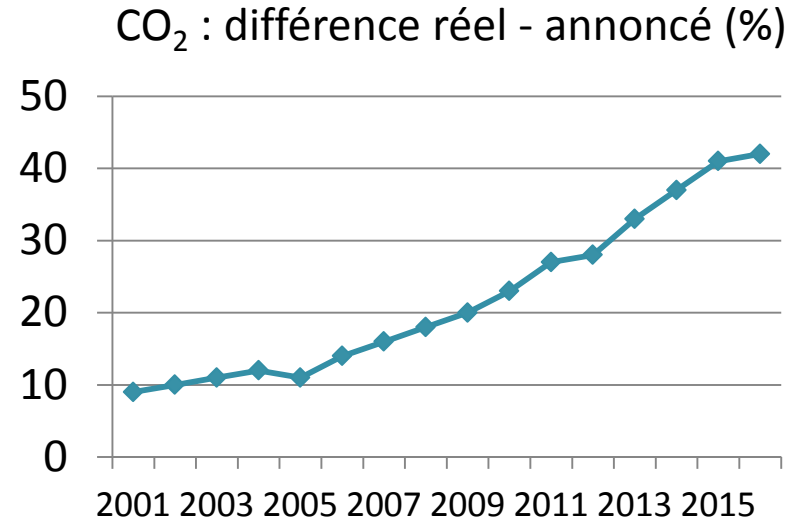


source: JATO

Effet des politiques publiques sur le secteur automobile



source: ICCT 2015

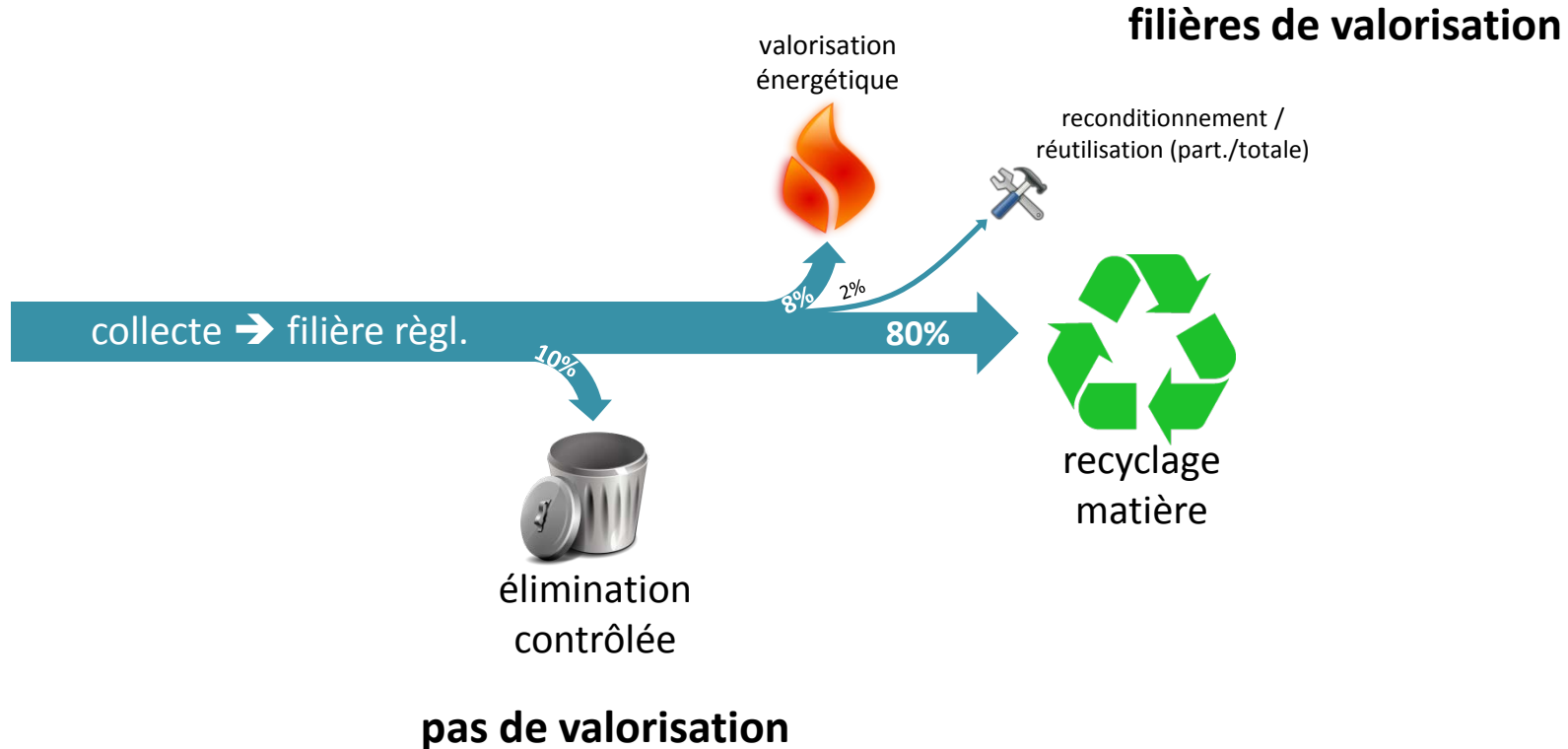


source: ICCT 2017

Effet des politiques publiques sur le traitement des DEEE

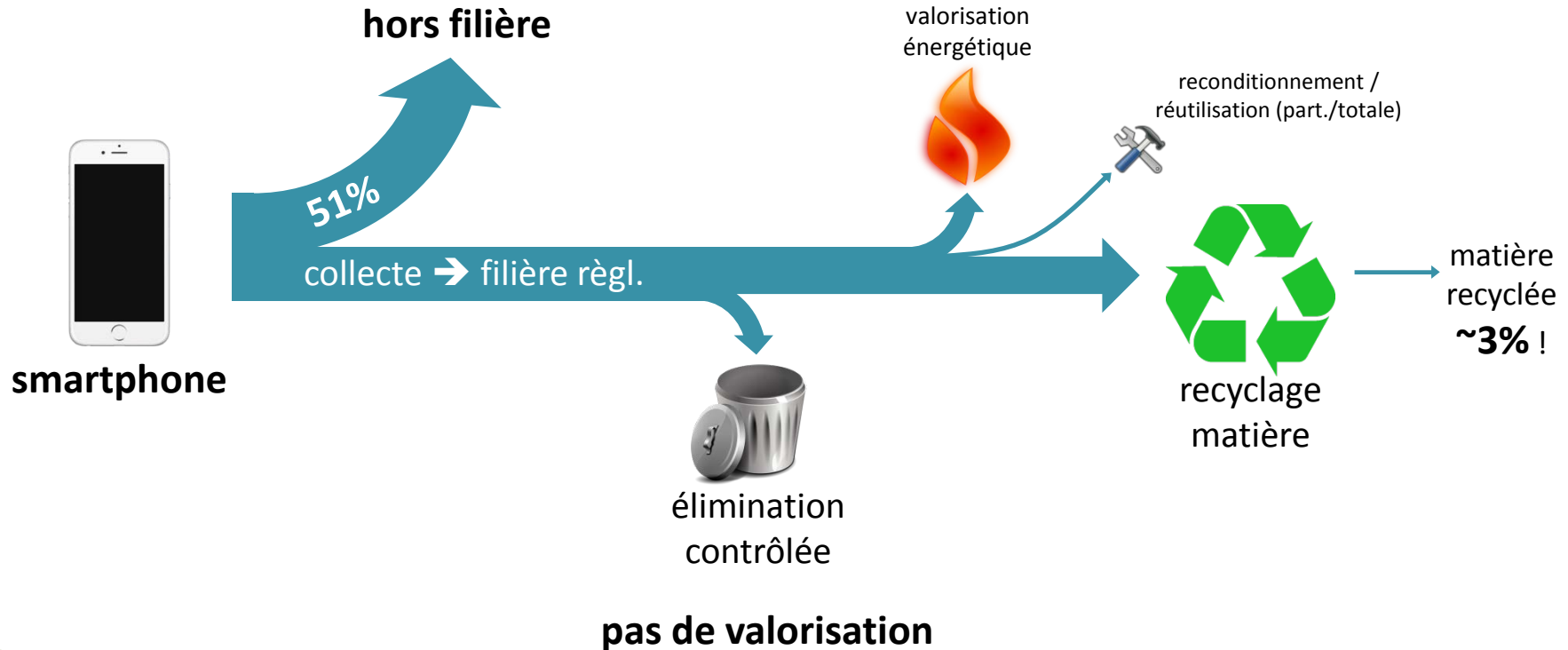


DEEE



source : registre DEEE, Ademe, 2016

Effet des politiques publiques sur le traitement des DEEE

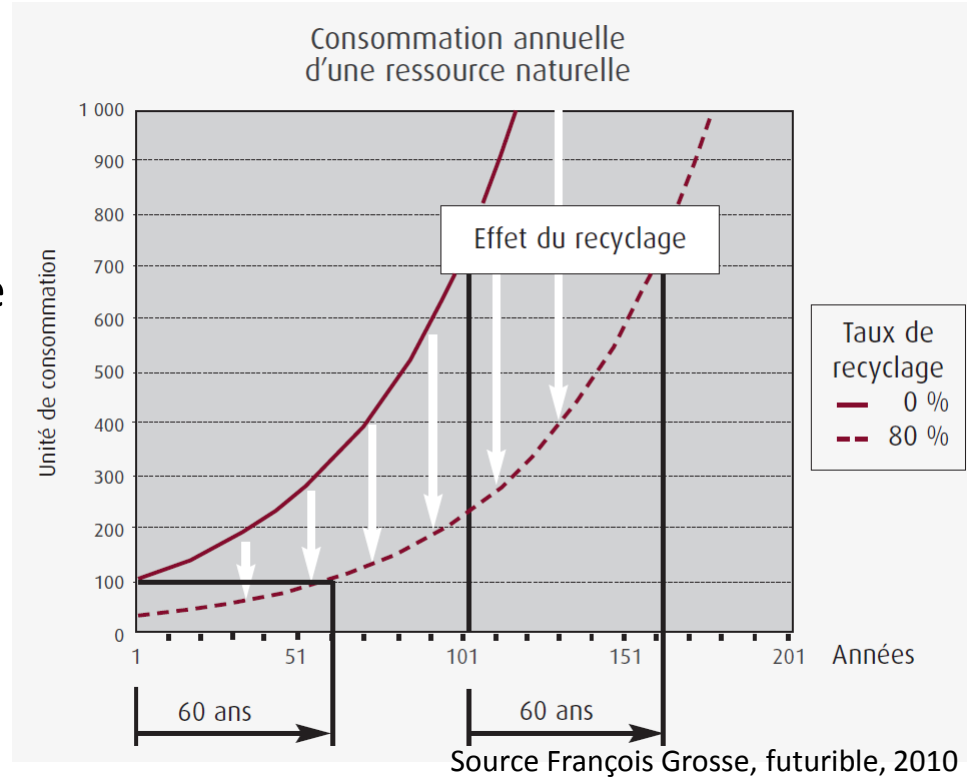


Effet du recyclage

Exemple : taux de croissance est de 2%, durée de rétention 7 ans.

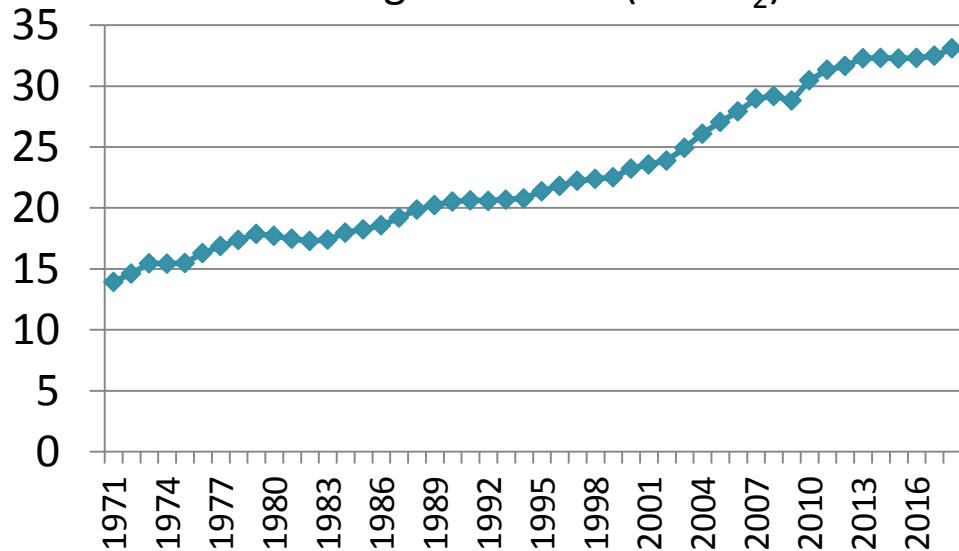
Demande exponentielle + recyclage :

- production = demande mais décalée
- même avec un taux de recyclage à 100% !

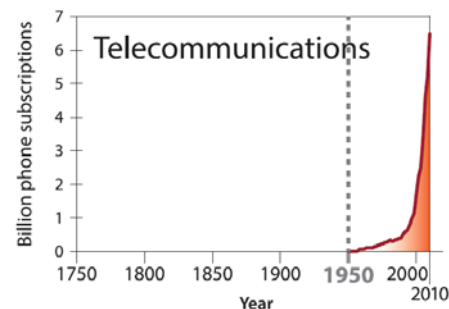
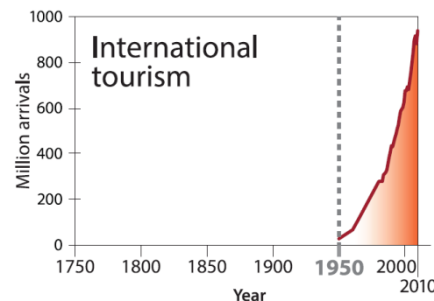
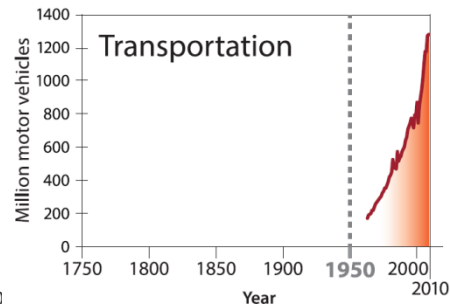
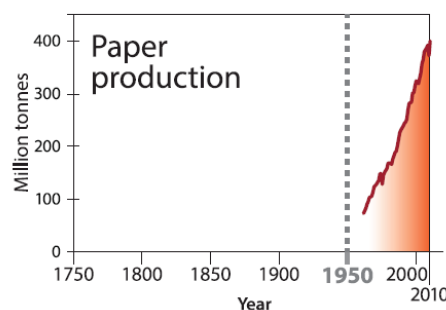


Découplage / dématérialisation ?

émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergies fossiles (Gt CO₂)

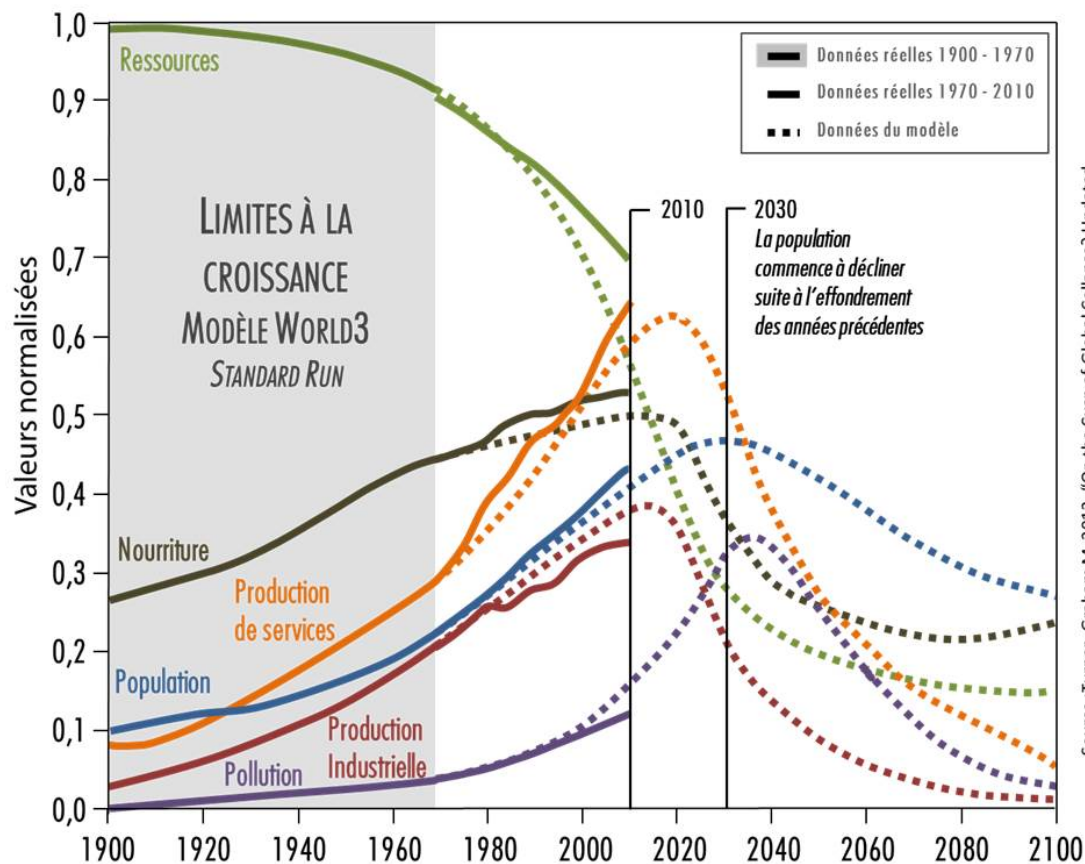


source: IAE

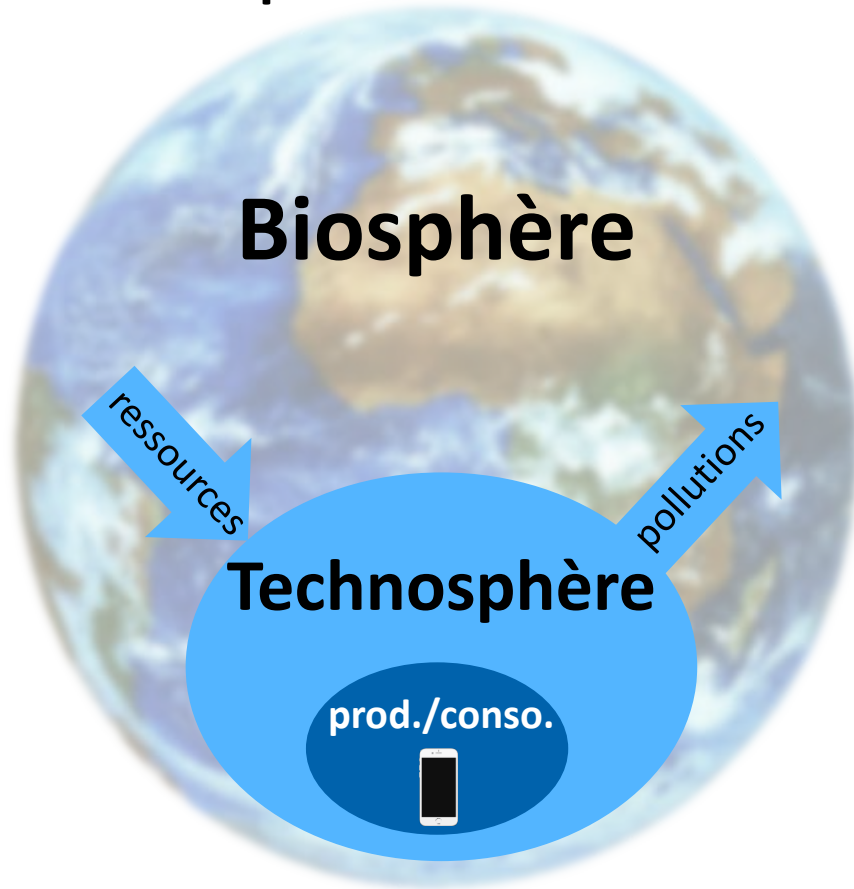


Source : The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration, 2015 Will Steffen & al

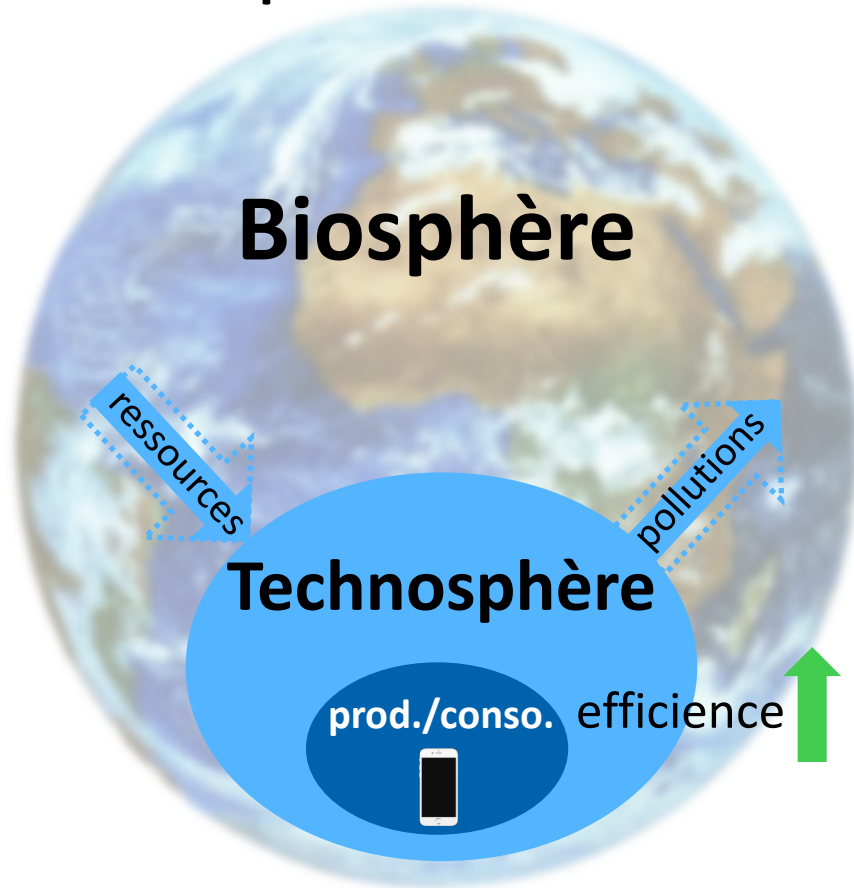
Découplage / dématérialisation ?



Les limites de l'optimisation : effets indirects

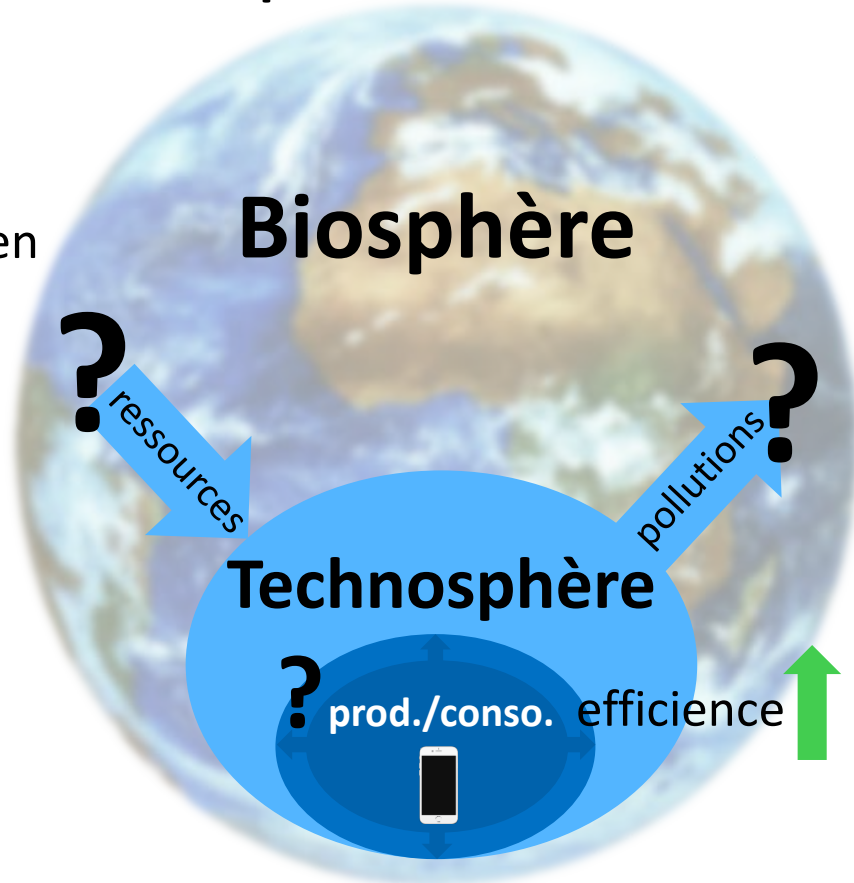


Les limites de l'optimisation : effets indirects



Les limites de l'optimisation : effets indirects

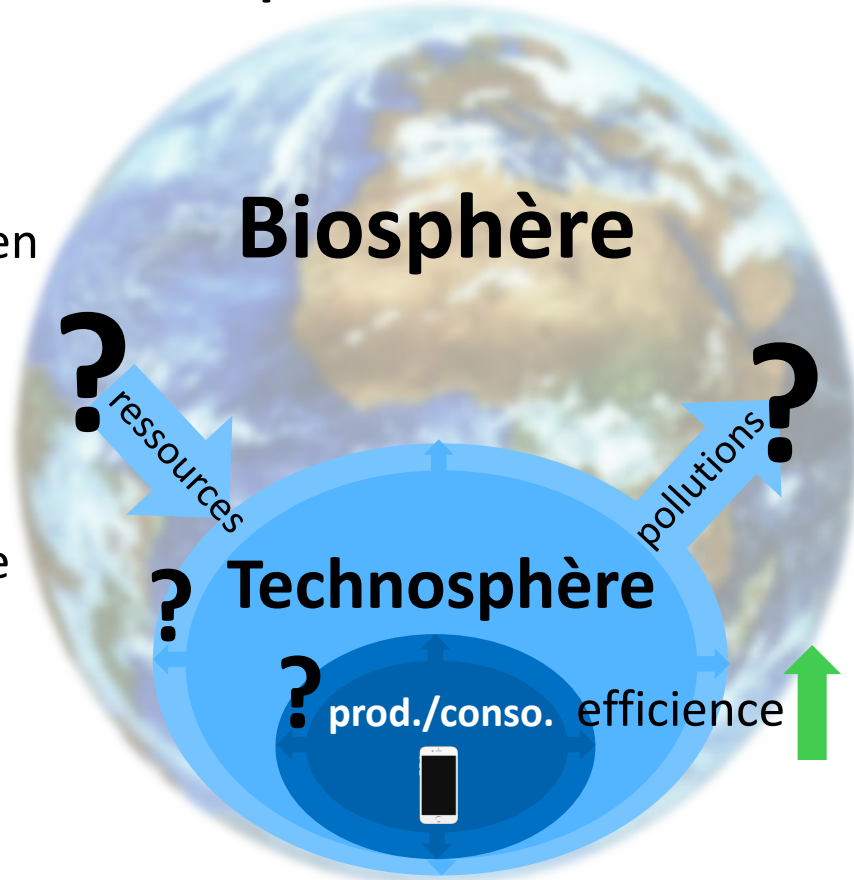
- Impact des gains en efficacité sur la technosphère ?



- Substitution
- Rebond direct

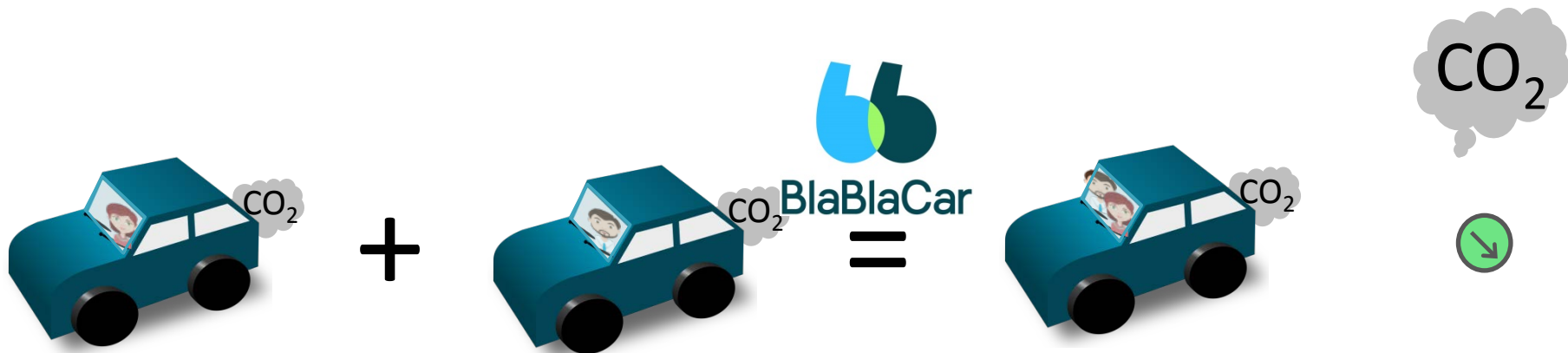
Les limites de l'optimisation : effets indirects

- Impact des gains en efficacité sur la technosphère ?
- Relation gains en efficacité et croissance ?

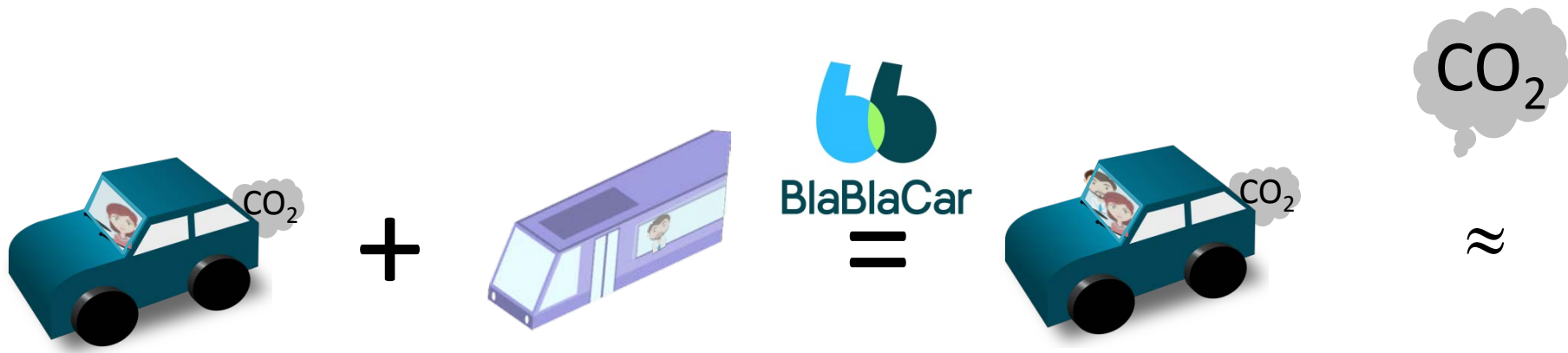


- Substitution
- Rebond direct
- Rebond indirect
- Macroéconomique
- Sociétaux

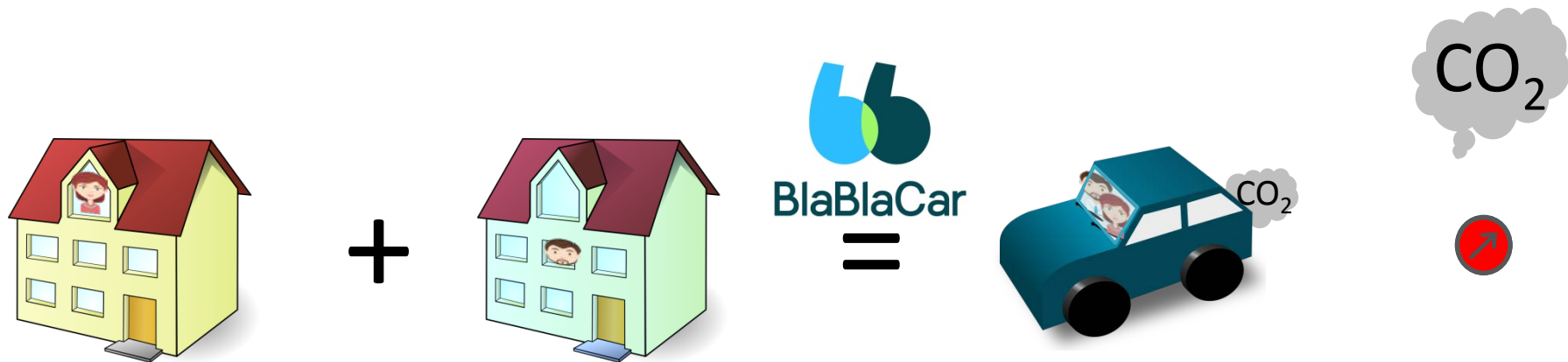
Effet indirects : exemple du covoiturage



Effet indirects : exemple du covoiturage



Effet indirects : exemple du covoiturage



Effet indirects : exemple du covoiturage

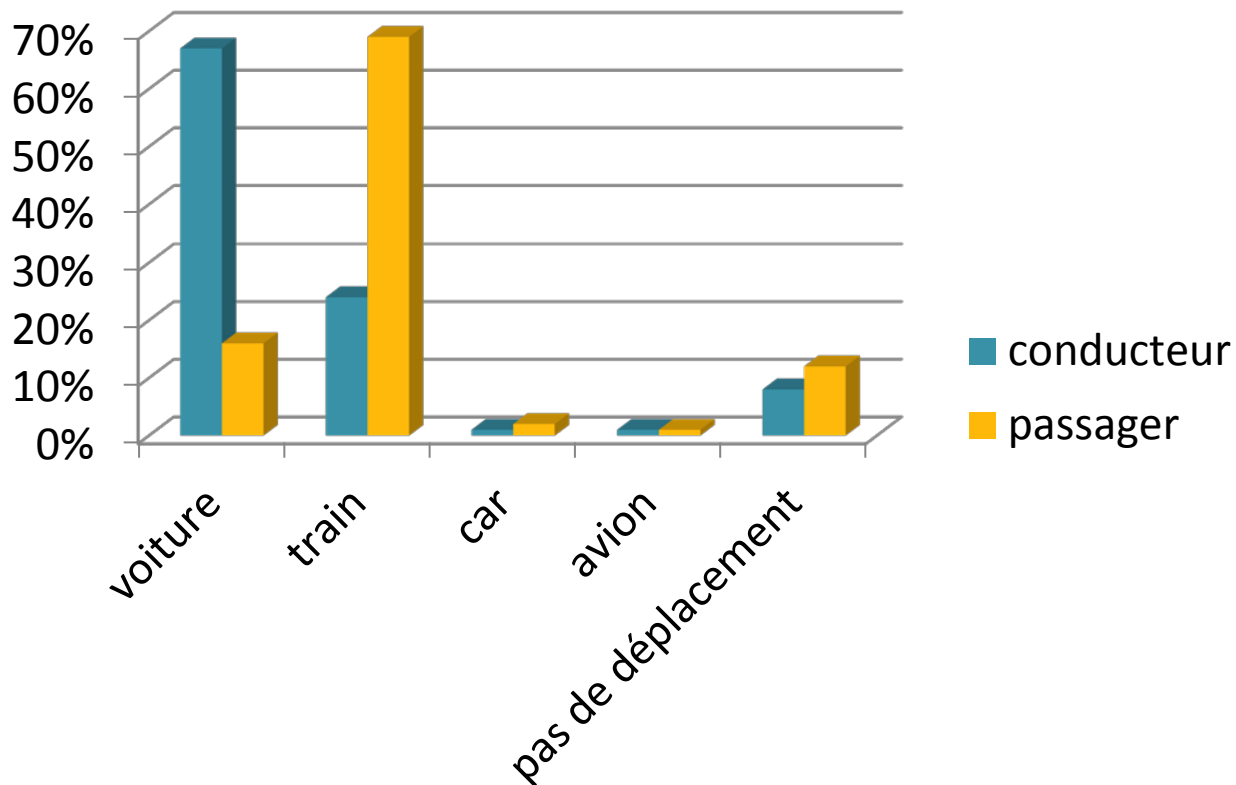


Trajet moyen : 364 km

Motivations principales :

- économies 69 %
- convivialité 87 %

Moyen de déplacement qui aurait été utilisé sans le covoiturage (longue distance)



Effet indirects : exemple du covoiturage

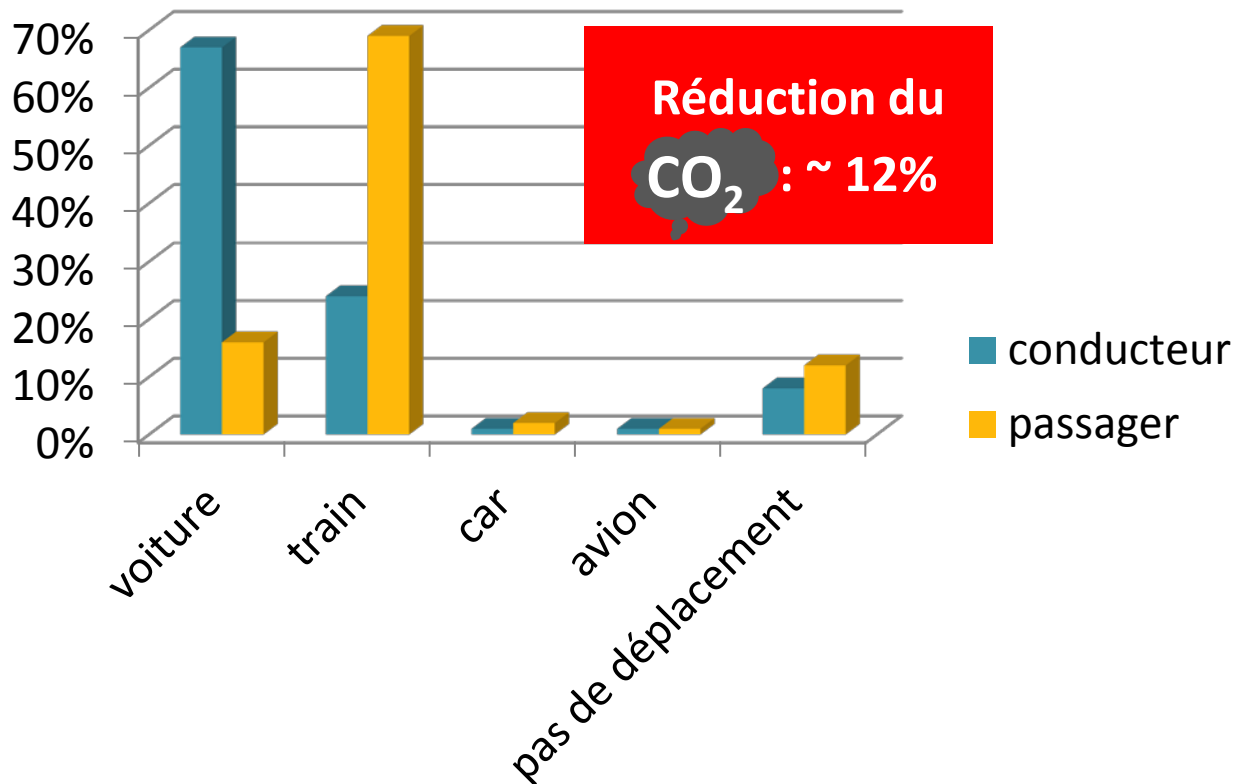


Trajet moyen : 364 km

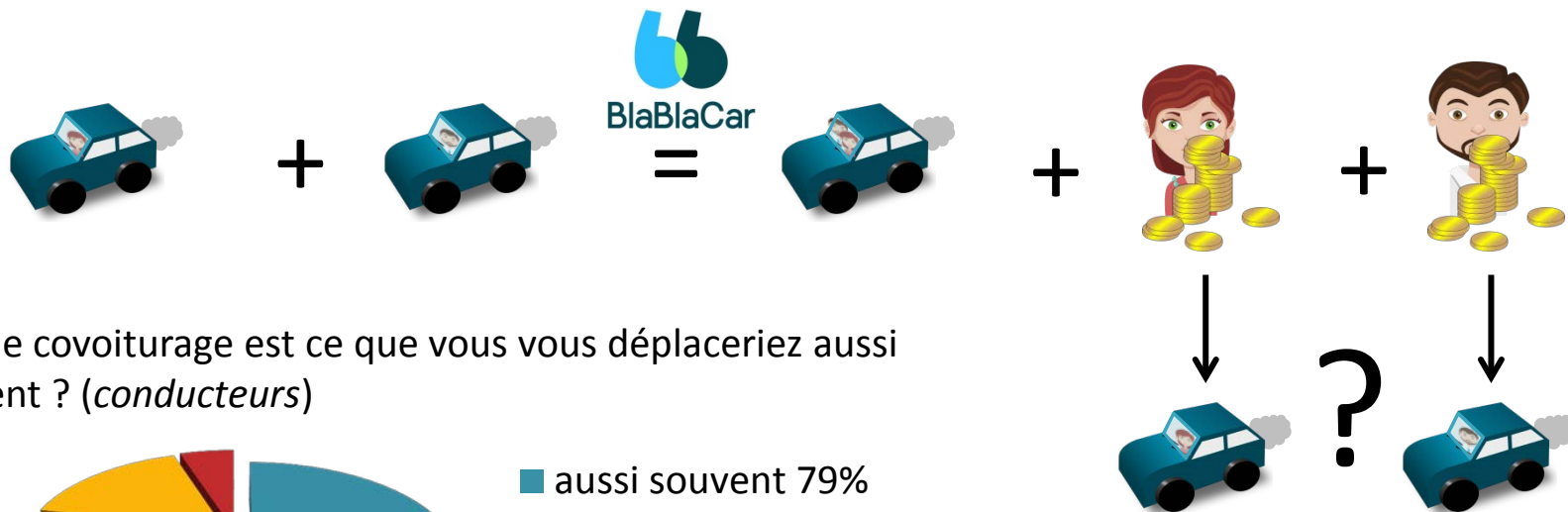
Motivations principales :

- économies 69 %
- convivialité 87 %

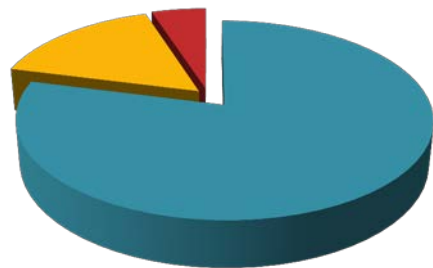
Moyen de déplacement qui aurait été utilisé sans le covoiturage (longue distance)



Effet indirects : exemple du covoiturage



Sans le covoiturage est ce que vous vous déplaceriez aussi souvent ? (*conducteurs*)

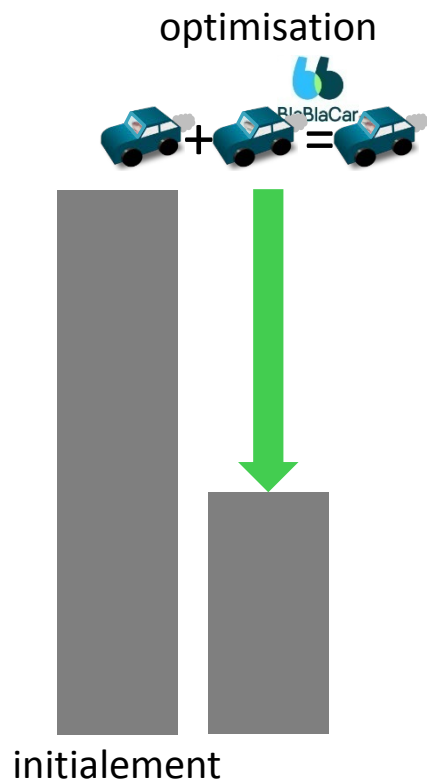


- aussi souvent 79%
- moins souvent 16%
- bcp moins souvent 5 %

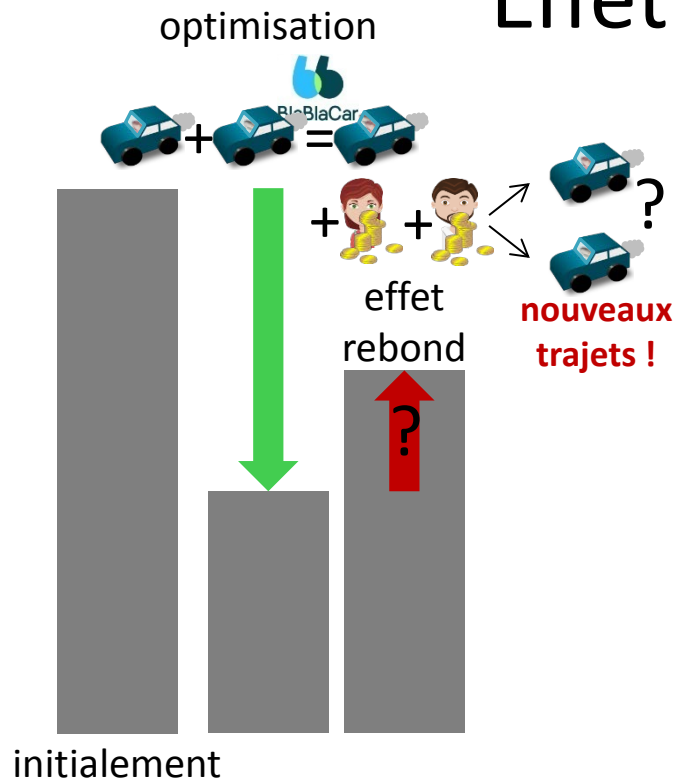
Nouveaux trajets !

pas pris en compte dans le calcul des 12 % de réduction de CO₂

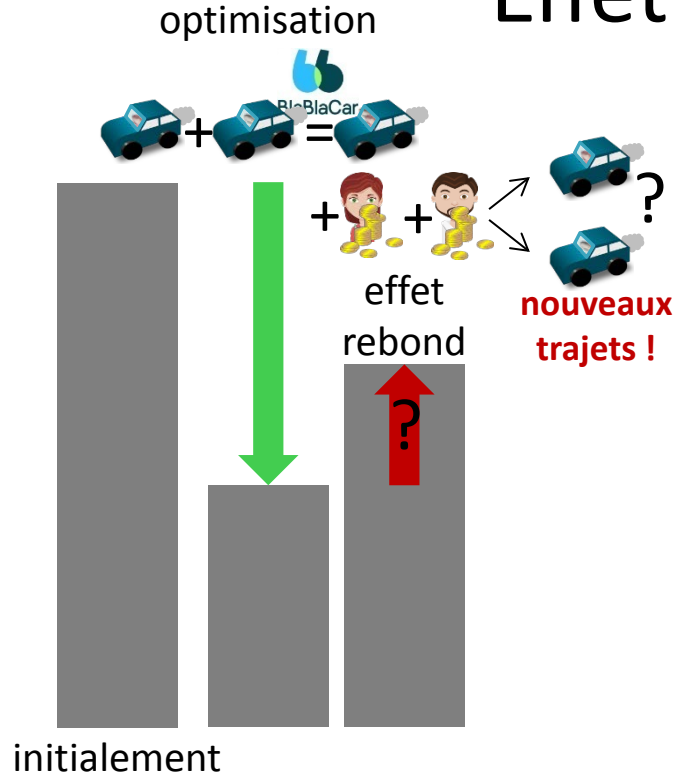
Effet rebond



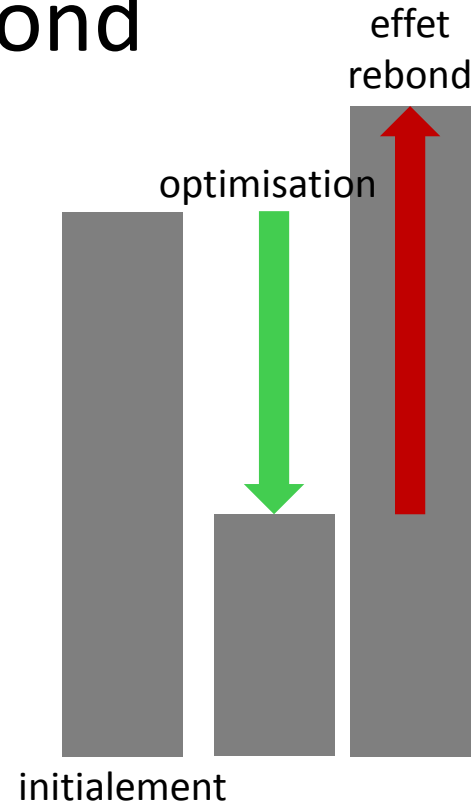
Effet rebond



Effet rebond



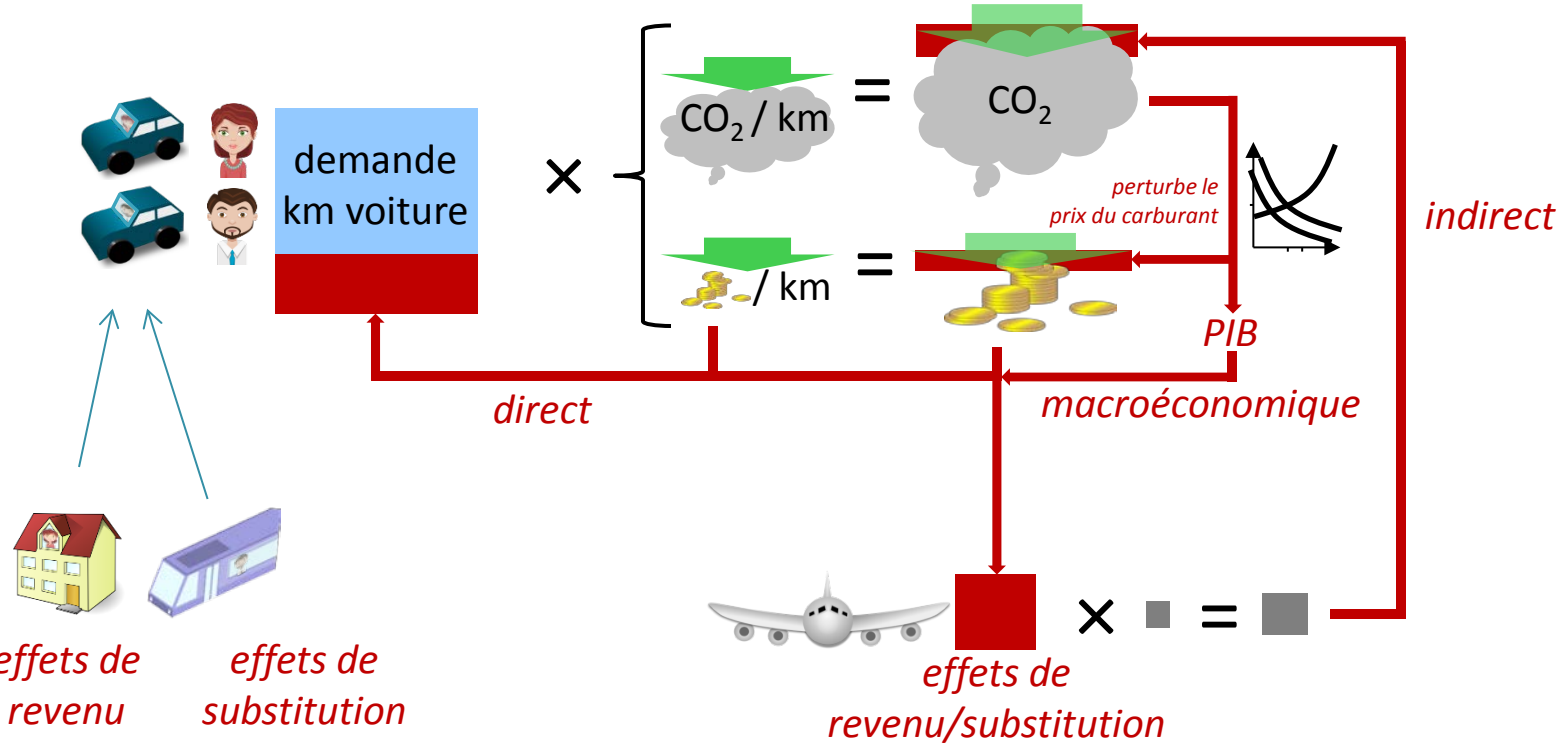
effet rebond $\leq 100\%$



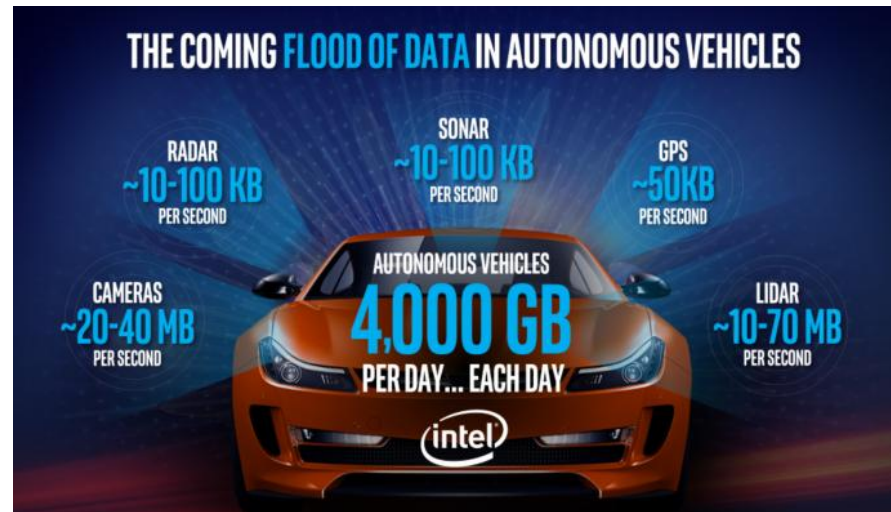
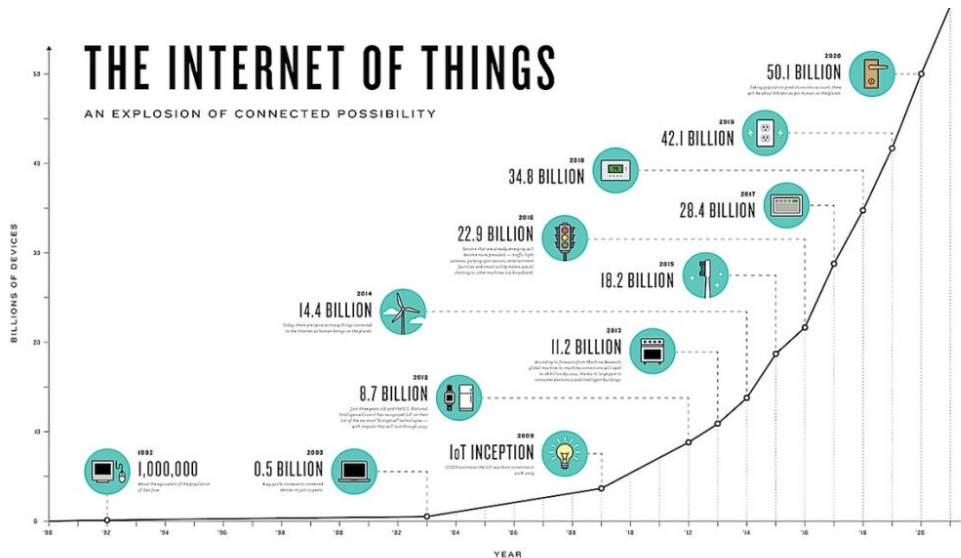
effet rebond $> 100\%$
(backfire)

Effet rebond

covoiturage
(optimisation unitaire)

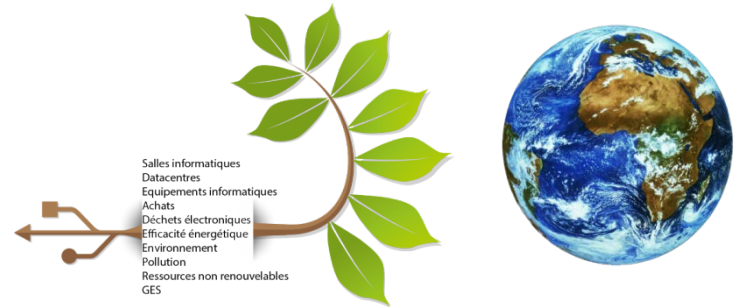
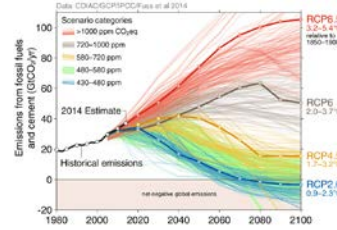


Effets (in)directs des (futures) technologies ?



Conclusion

- Puissance des outils numériques :
 - clé pour analyser la complexité
 - formidable accélérateur des processus (qu'ils soient vertueux ou néfastes)
➔ il faut mieux comprendre les effets (directs, indirects, ...) des technologies
- Illusion de dématérialisation : cloud, virtualisation, etc.
- Agir ?
 - vers la sobriété :
 - taux de renouvellement
 - lutter contre l'obsolescence
 - éco-conception (attention aux effets rebond !)
 - vers la résilience : se passer des TIC pour les besoins de base ?



Merci !