

Les effets secondaires du numérique

Jacques COMBAZ

Jacques.Combaz@univ-grenoble-alpes.fr

ecoinfo.cnrs.fr



Le Monde

Le cri d'alarme de 15 000 scientifiques pour sauver la planète

IL SERA BIENTÔT TROP TARD...

- L'ampleur de l'initiative est inédite : 15 000 scientifiques issus de 184 pays signent une alerte solennelle sur l'état de la planète. « Le Monde » publie
- « Pour éviter une mise généralisée et une perte catastrophique de biodiversité », les scientifiques appellent l'humanité à changer radicalement
- Réchauffement climatique, biodiversité, déforestation... Tous les indicateurs montrent une dégradation continue de l'environnement
- Après trois années de stagnation, les émissions mondiales de CO₂ sont reparties à la hausse en 2017, portées notamment par la Chine



Manifeste étudiant pour un réveil écologique

L'AFFAIRE DU SIÈCLE

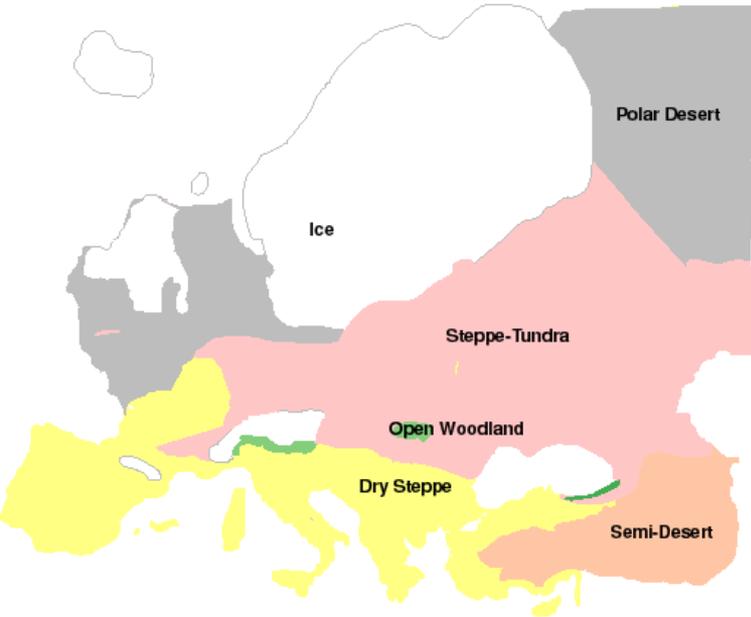


#UrgenceClimat

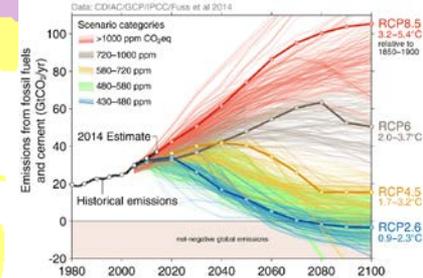


Est-ce si inquiétant ?

22,000 – 14,000 ¹⁴C years ago



Present Potential Vegetation



-20 000
-5°C

~ 0,1°C / siècle (max)

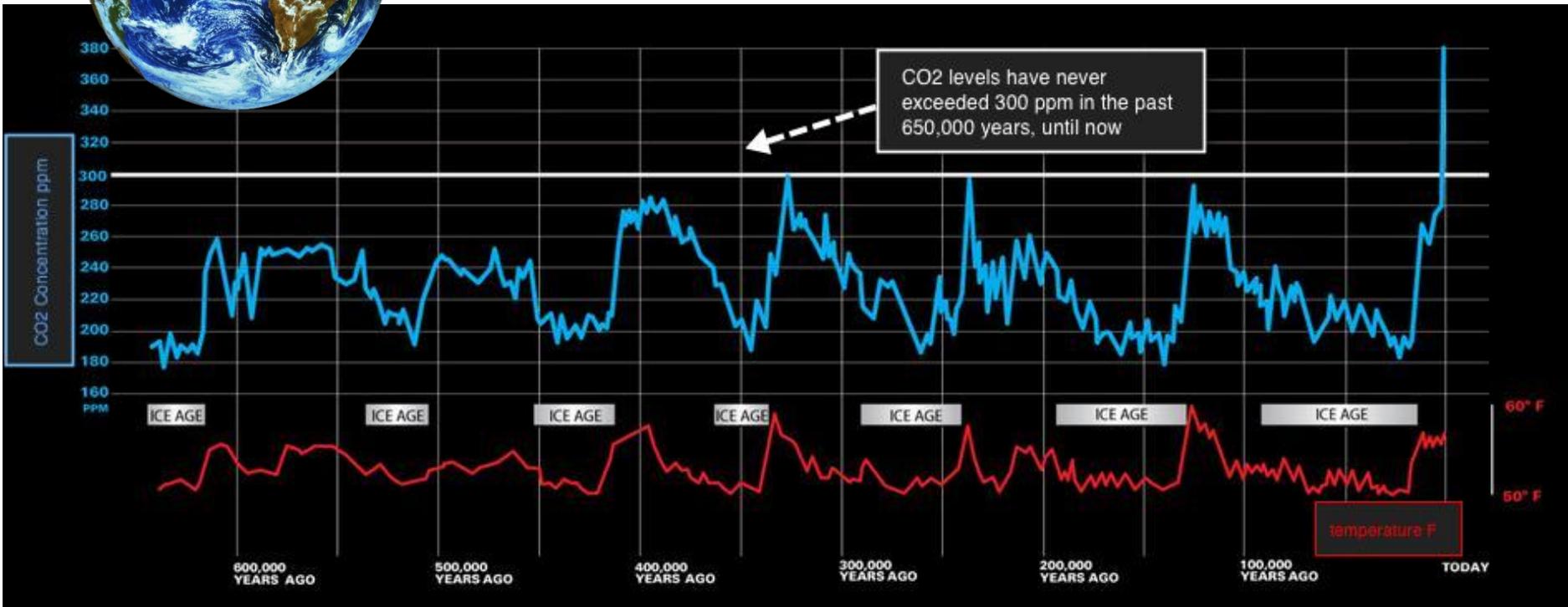
2019
0°C

~ 2°C / siècle (actuel)

2100
+5°C ?

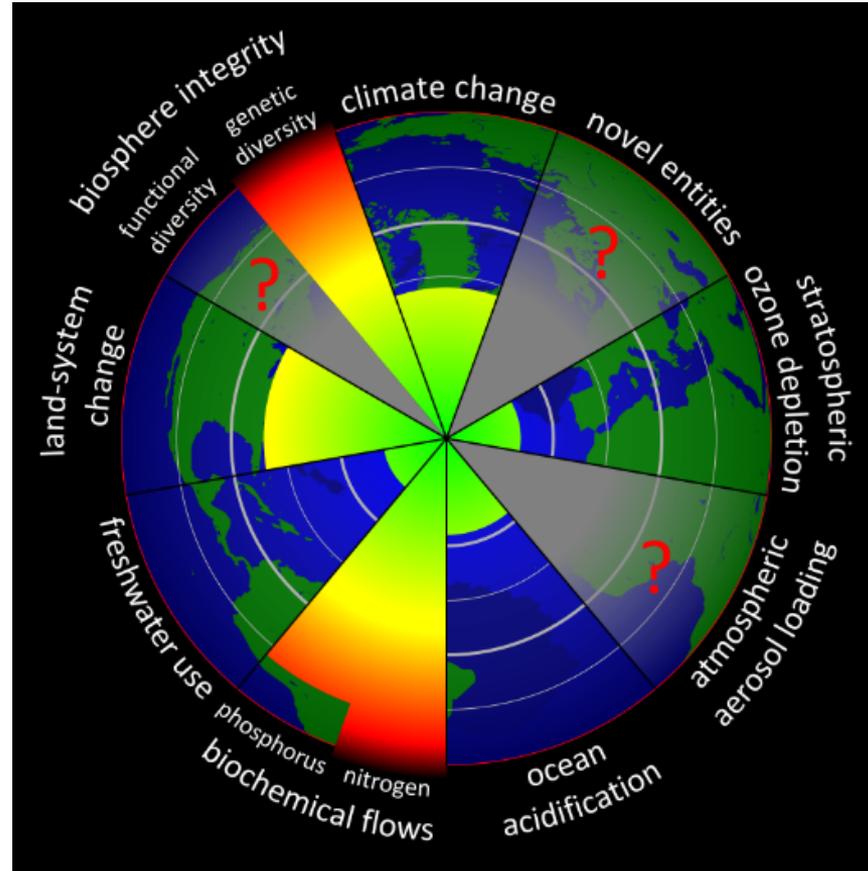


Origine humaine du réchauffement

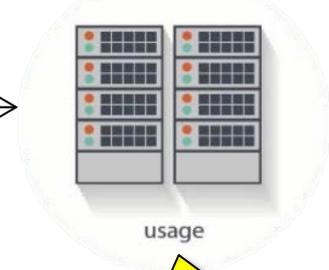


Atmospheric CO₂ and temperature data taken from Vostok Ice Cores. Birch Aquarium, Scripps Institute of Oceanography, UCSD. CO₂ data (in blue) is in parts per million (ppm).

Autres limites planétaires



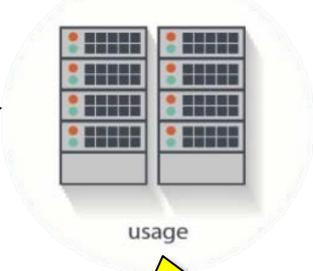
Consommation électrique des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication)



Consommation d'énergie électrique

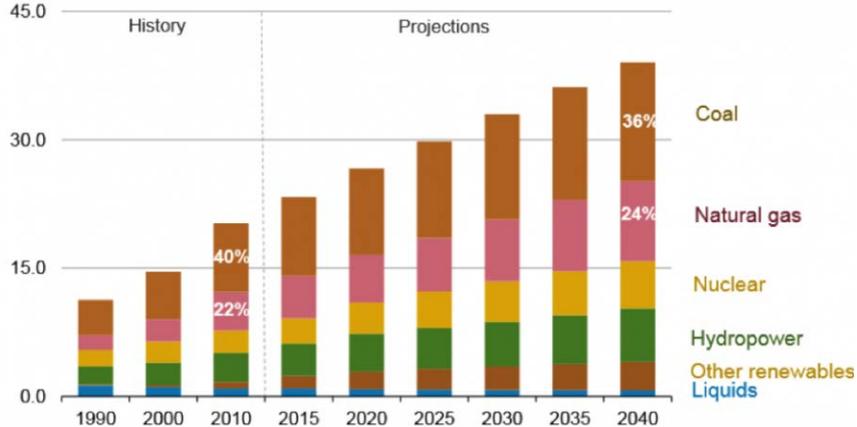


Consommation électrique des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication)

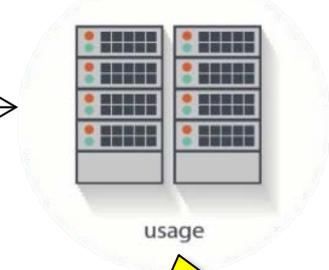


Consommation d'énergie électrique ⚡

world electricity generation by fuel
billion kilowatthours



Consommation électrique des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication)



Consommation d'énergie électrique



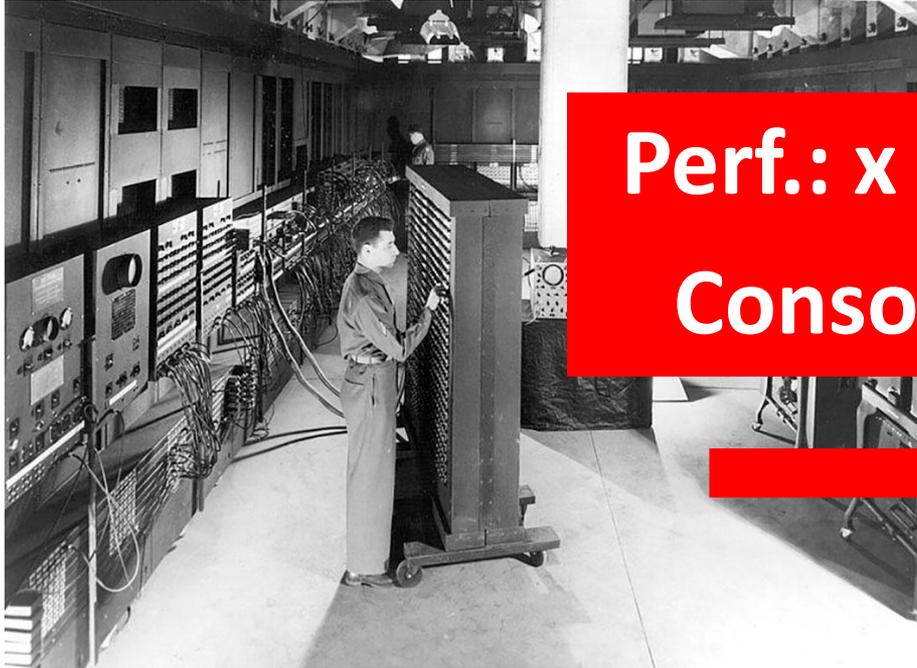
Consommation d'énergie primaire



Changement climatique



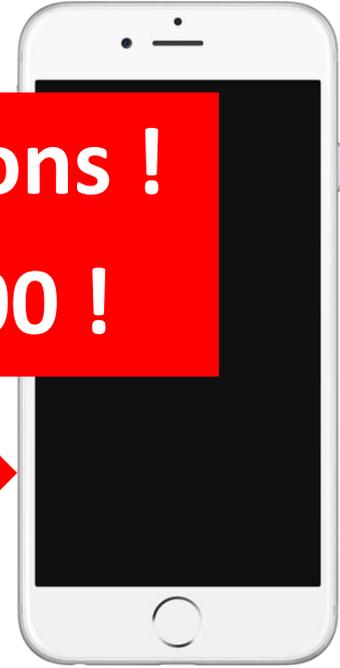
ENIAC (1945)



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



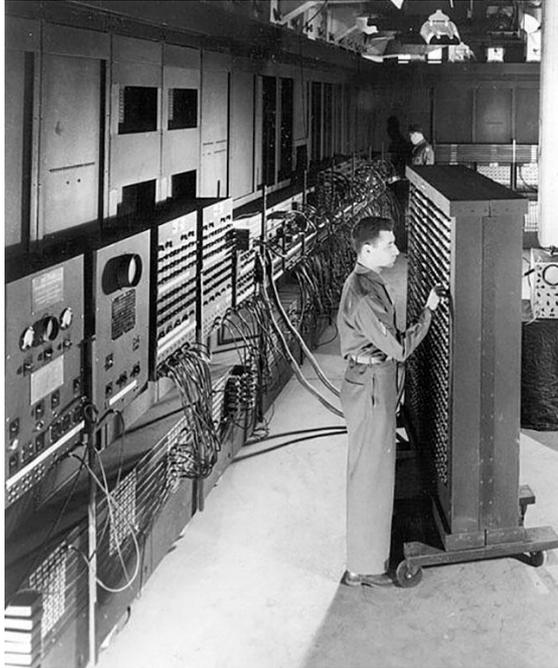
iPhone 6 (2014)



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

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

ENIAC (1945)

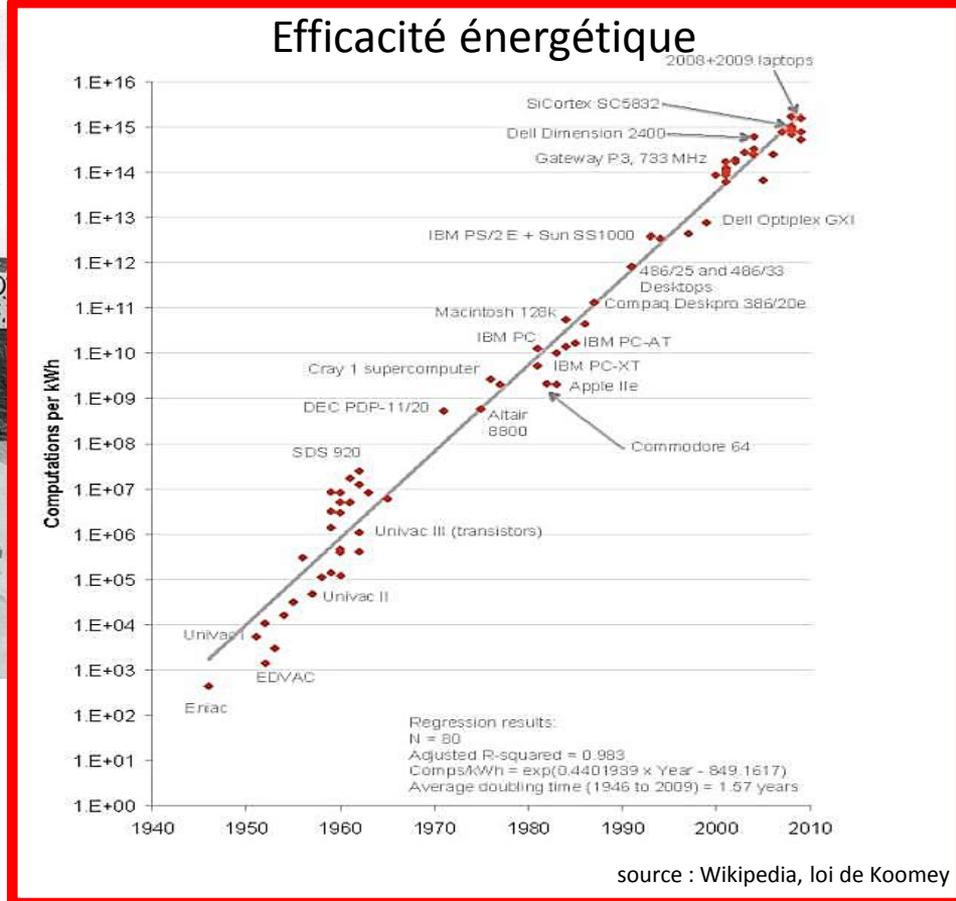


- Poids : 30 t
- Dim. : 30,5 m × 2,4 × 0,9
- Conso. : 150 kW
- Perf. : ~500 FLOPS

iPhone 6 (2014)

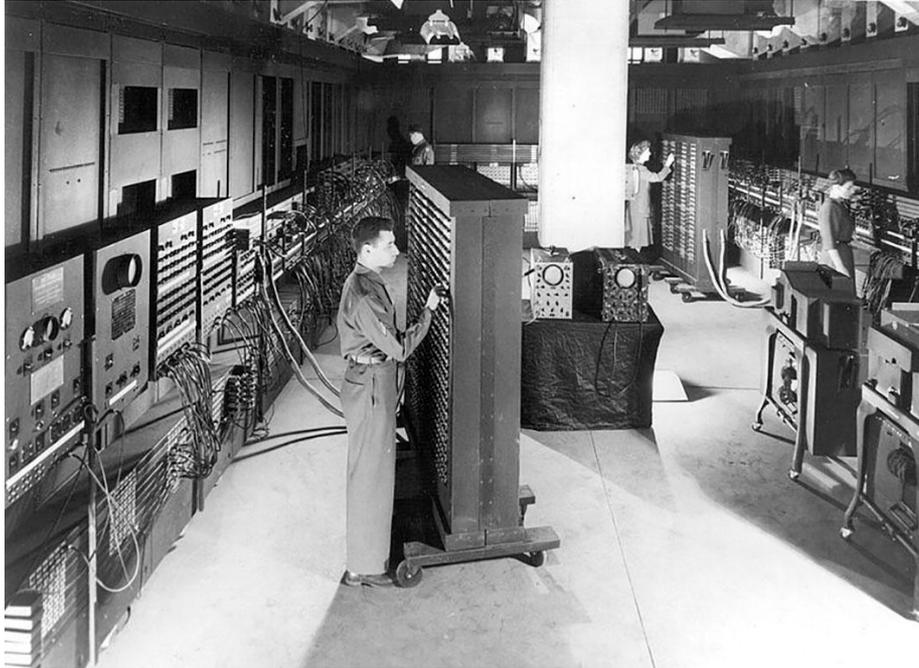


mm × 7,1 mm



- Perf. : ~130 GFLOPS

ENIAC

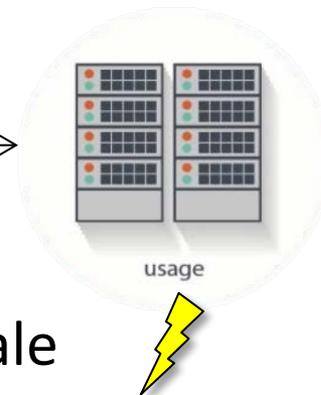


150 kW
(en fonctionnement)

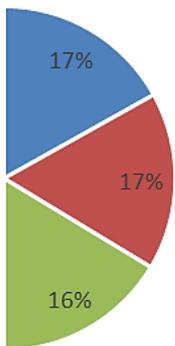


260 GW
(en continu)

Consommation électrique des TIC

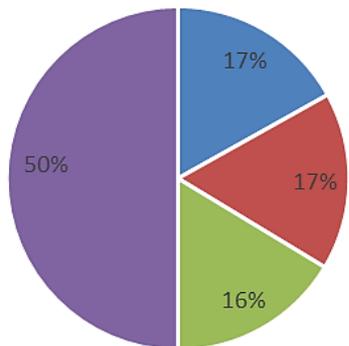


10 % de l'électricité mondiale
+8%/an



■ terminaux ■ réseaux ■ data centers

Consommation énergétique des TIC



Consommation d'énergie électrique

3-4% de la consommation d'énergie primaire totale
+8%/an

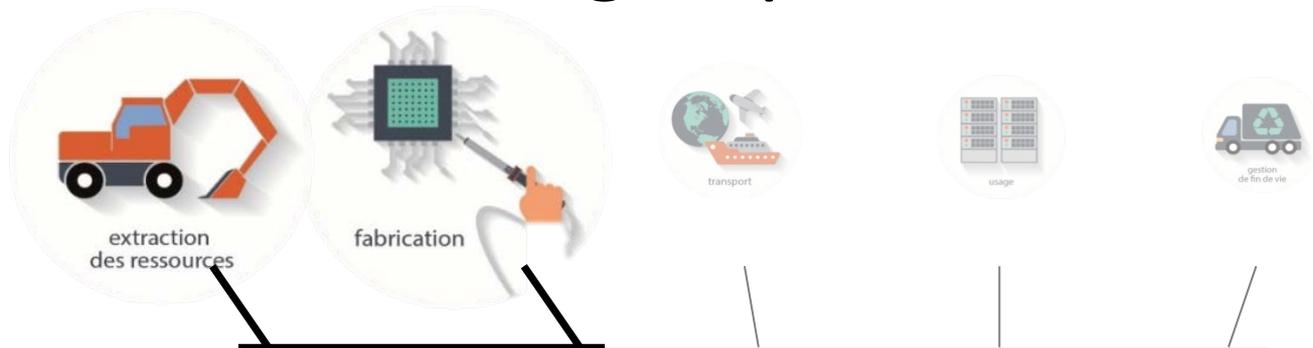


Changement climatique



■ terminaux ■ réseaux ■ data centers ■ production

Consommation énergétique des TIC



**smartphone gardé 2 ans :
90 % de la
consommation énergétique*
avant l'achat !**

* : hors réseau/data centers

Consommation d'énergie électrique



Consommation d'énergie primaire



Changement climatique



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

trafic réseau : +25%/an
trafic vidéo = 80%



TIC
2018

3-4% des GES mondiaux

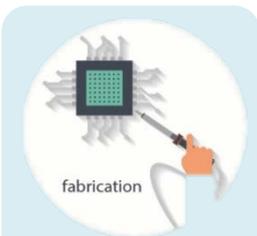
+8%/an

aviation civile
2013

+5%/an

automobile
2025
(projection)

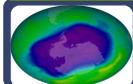
Impact environnemental des TIC



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

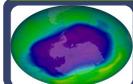
Impact environnemental des TIC



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

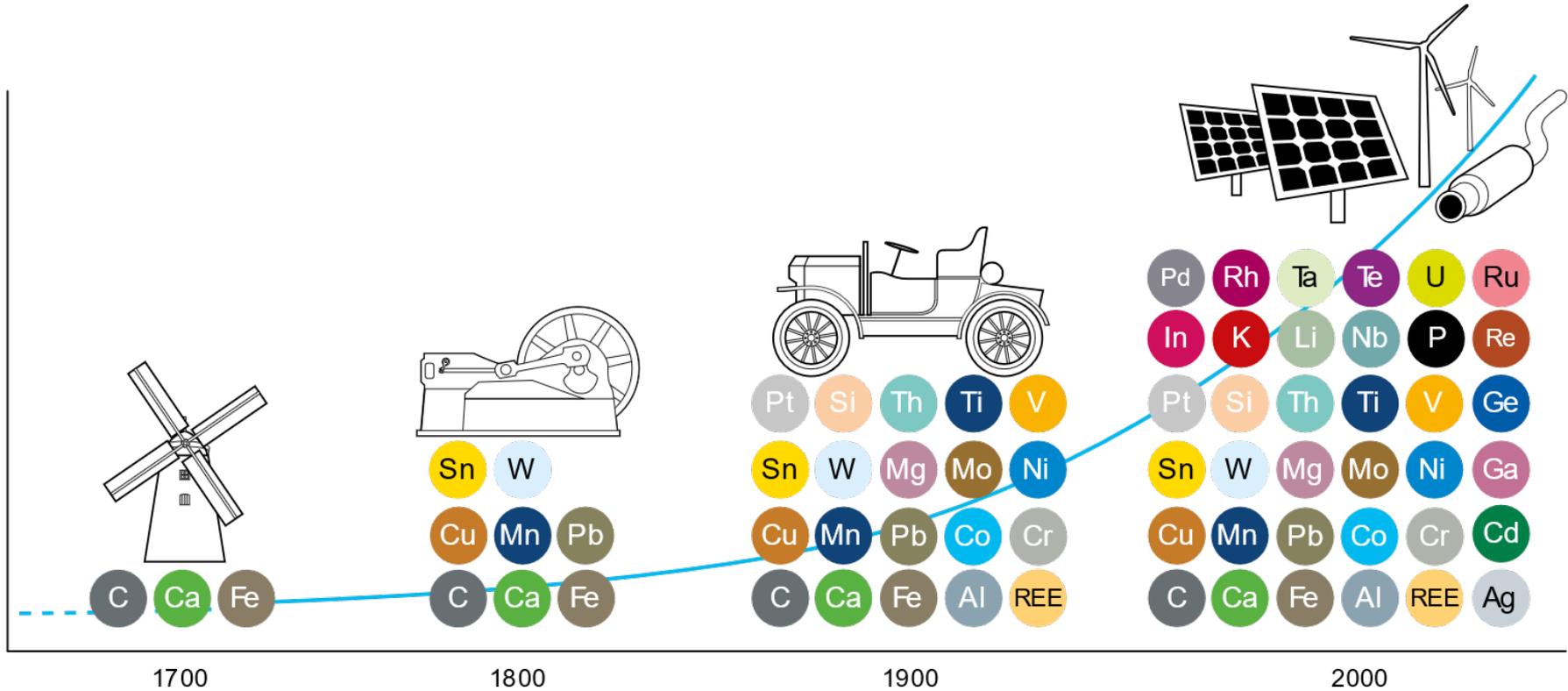


Déplétion des métaux

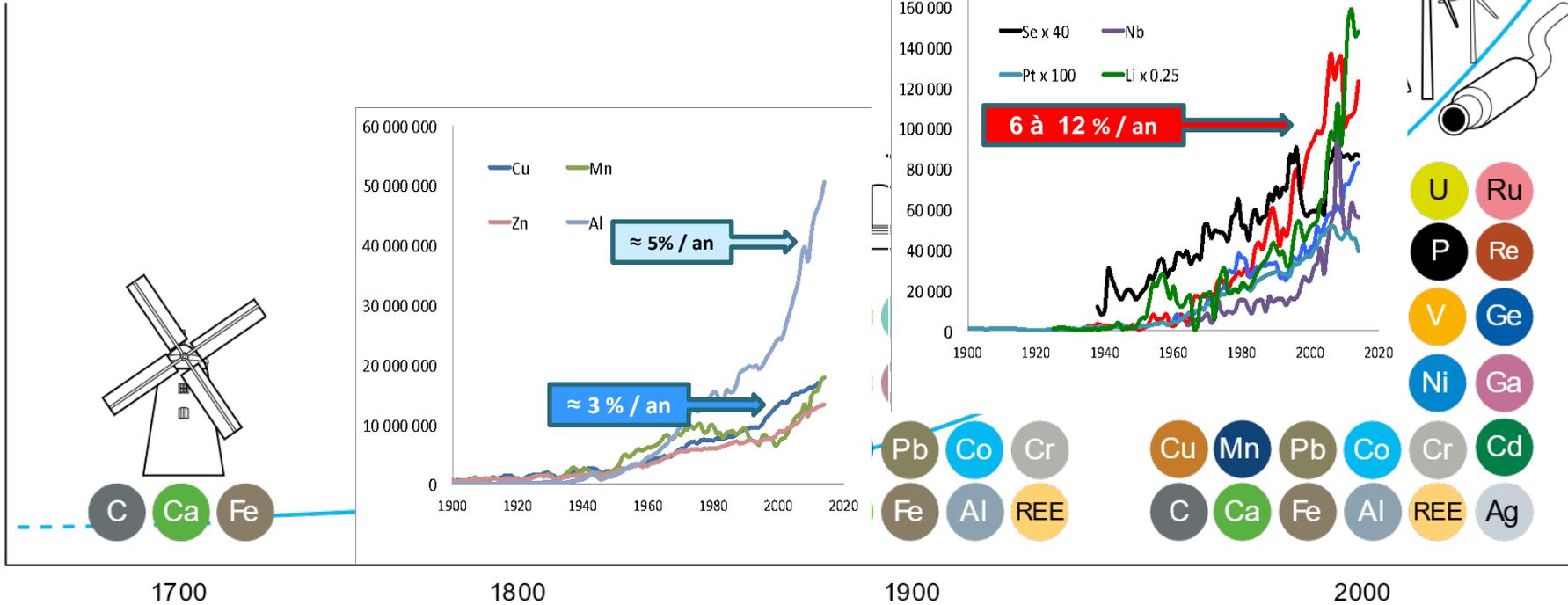


Consommation d'eau

Les métaux dans les TIC

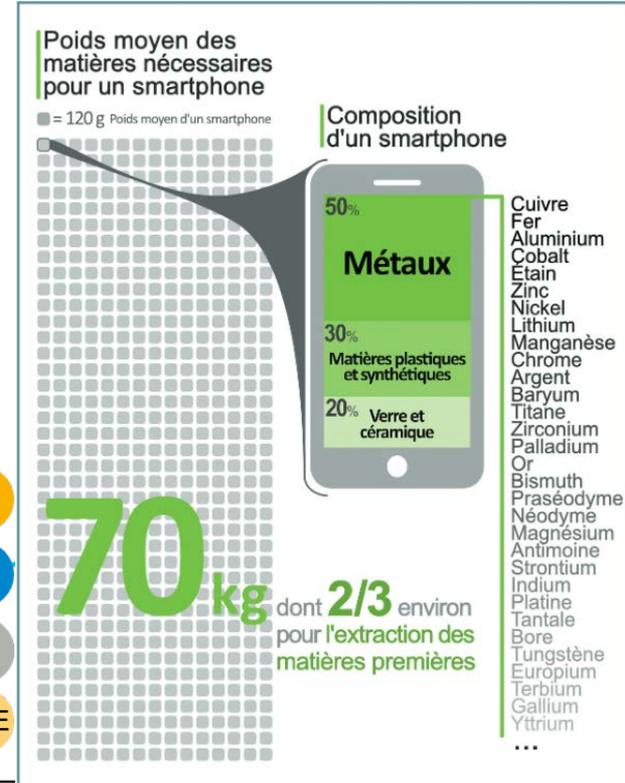
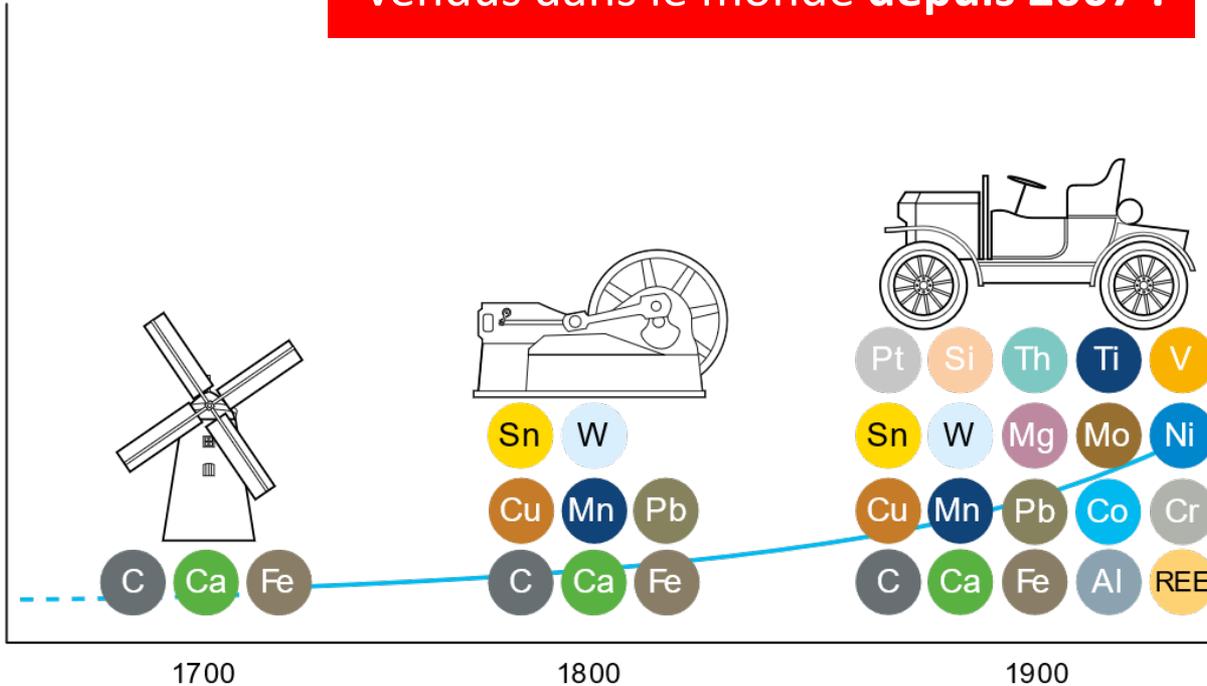


Les métaux dans les TIC



Les métaux dans les TIC

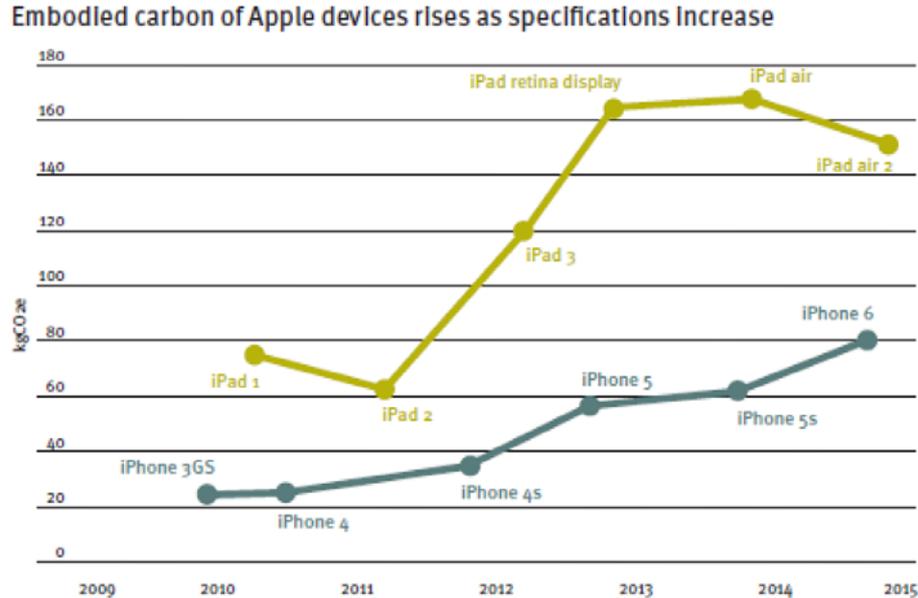
**7 milliards de smartphones
vendus dans le monde depuis 2007 !**



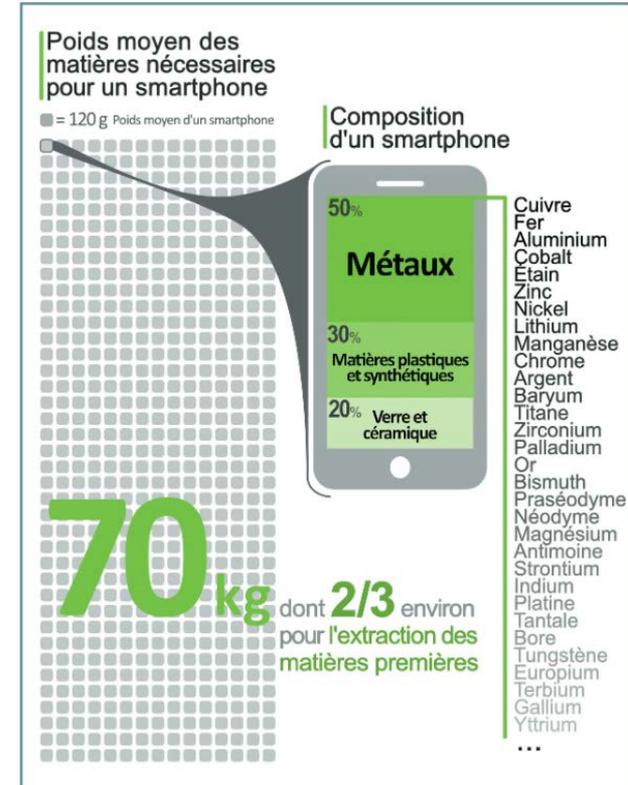
Sources : Ademe ; Sénat (rapport n° 850, 09/2016) ; Wuppertal Institut (2012) évaluation selon l'approche poids-matière de l'écologiste Friedrich Schmidt-Bleek
Infographie : Bertrand Galliet

Les métaux dans les TIC

**7 milliards de smartphones
vendus dans le monde depuis 2007 !**



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



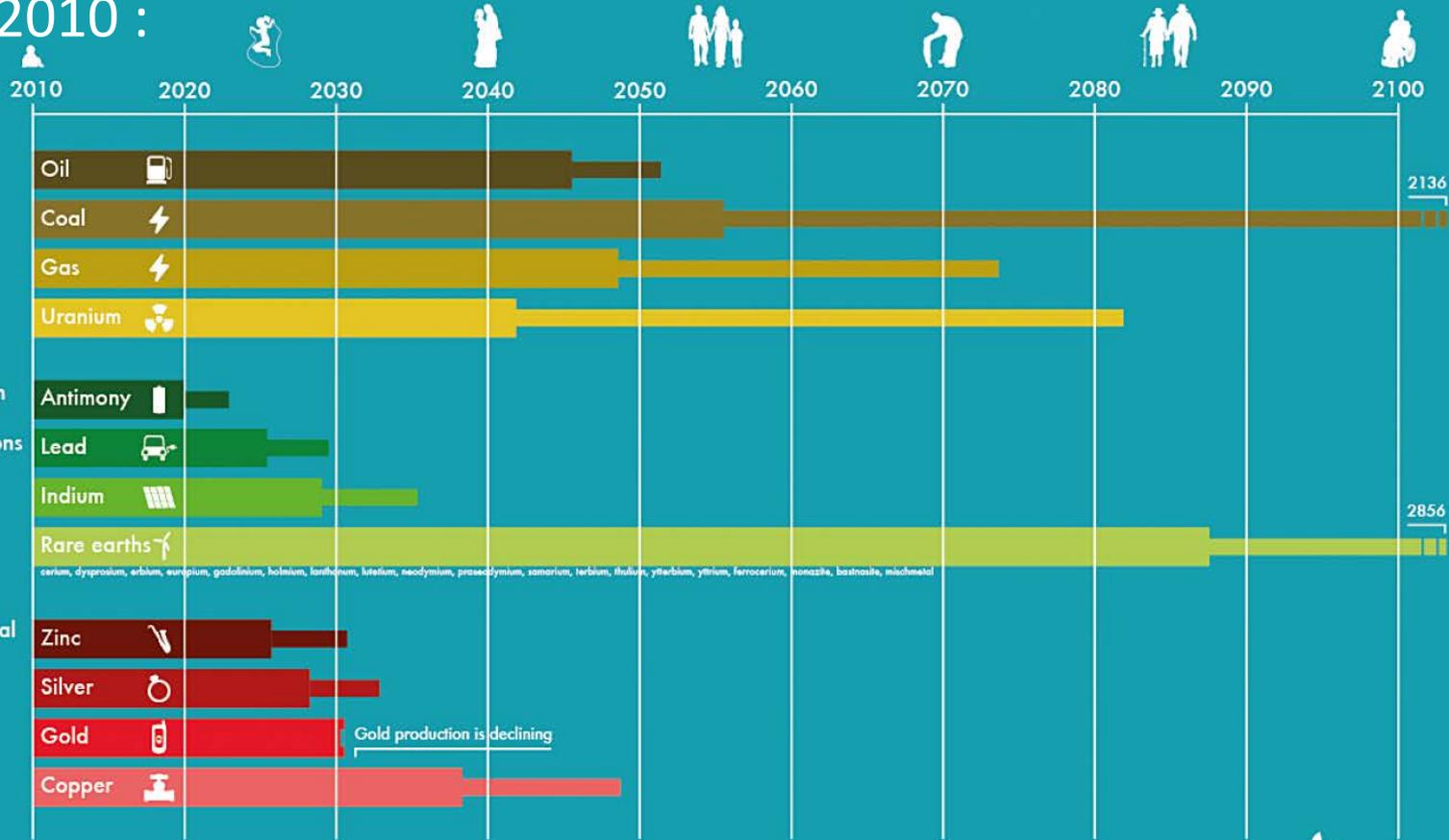
Sources : Ademe ; Sénat (rapport n° 850, 09/2016) ; Wuppertal Institut (2012) évaluation selon l'approche poids-matière de l'écologiste Friedrich Schmidt-Bleek
Infographie : Bertrand Galliet

Poids des TIC dans la demande mondiale

Métal	Production minière mondiale 2013 (*)	Consommation totale du secteur électronique % de la demande (**)	Commentaires
Cuivre	18,7 millions t	~ 6 %	3% équipements, 3% infrastructure télécom
→ Etain	296.000 t	- 35%	
Antimoine	160.000 t	< 20 %	Total retardateur de flammes ~ 35%
Argent	26.000 t	~ 20 %	
Or	2.860 t	~ 10 %	
Platine	160 t	~ 2 %	
Palladium	190 t	~ 12 %	
→ Ruthénium	~ 30 t	- 55 %	
→ Tantale	~ 1400 t	- 60 %	
→ Indium	~ 800 t	- 80 %	
→ Gallium	~ 440 t	- 90 %	
→ Germanium	~160 t	30 - 50%	
Bismuth	8.500 t	~ 15 %	
Sélénium	~ 2.300 t (hors USA)	~ 10%	Inclus photovoltaïque
Tellure	~ 450 t (?)	< 10 %	Principalement photovoltaïque
Lithium	36.000 t	~ 20 %	
→ Cobalt	112.000 t	- 35 %	

Source : (*) USGS 2015, (**) Demande totale = Production minière + Recyclage + Déstockage

Né en 2010 :

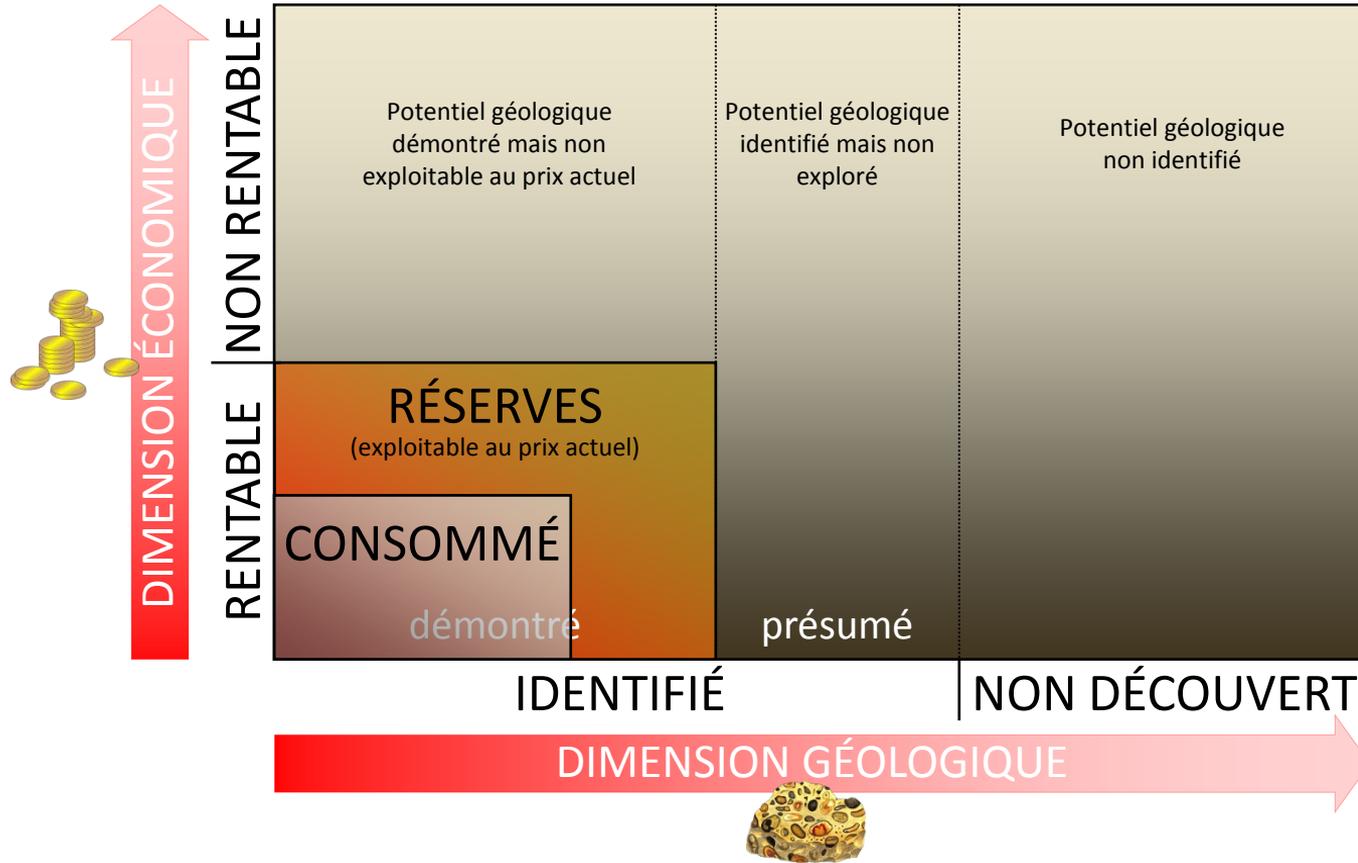


Calculations based on known reserves:

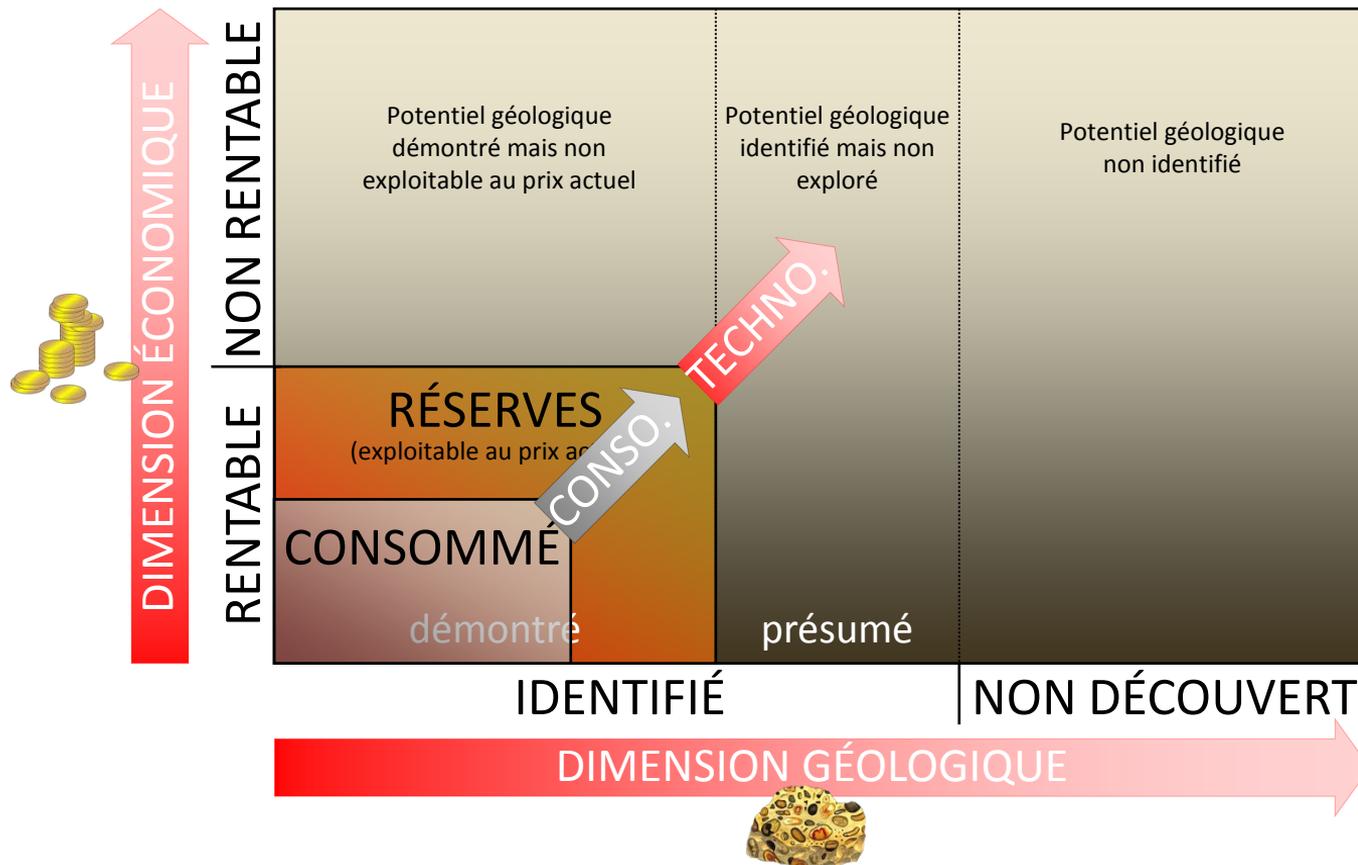


Source: US Geological Survey, Adani Resources, World Bureau of Metal Statistics, International Copper Study Group, World Gold Council, Mincrometals.com, Rodell Metal Report, Cordell et al (2009), S&P (2006), Silver Institute, World Nuclear Association, International Lead and Zinc Study Group, Witkopse. Source (last link): BP Statistical Review of World Energy 2010.

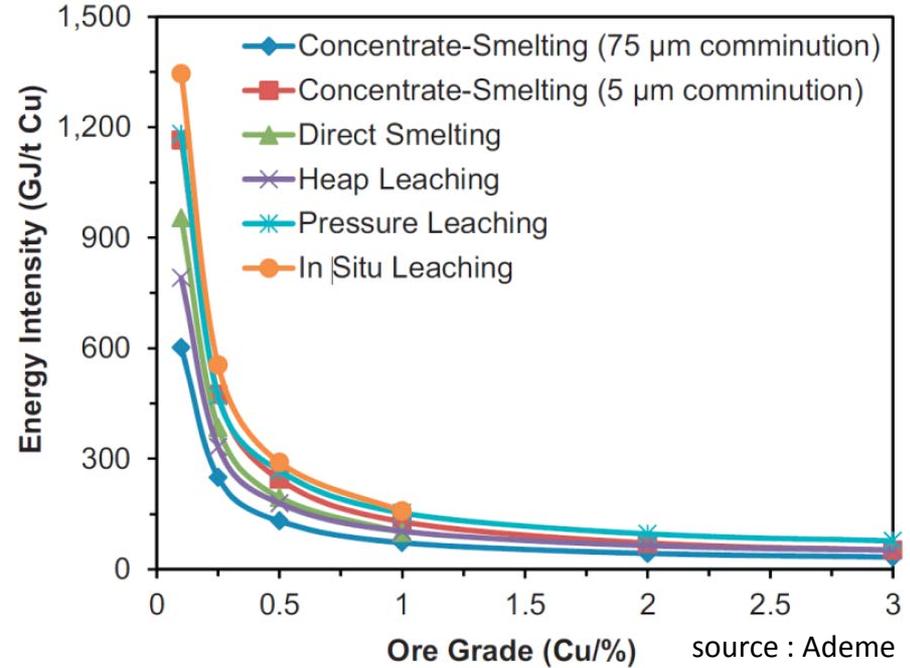
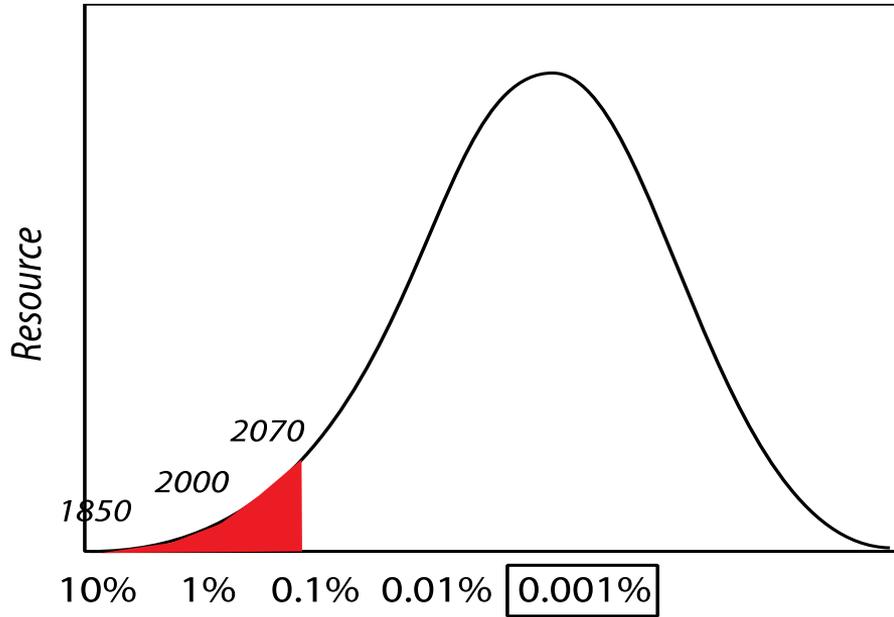
Attention à la notion de réserves



Attention à la notion de réserves



Concentration / Énergie (Cuivre)



Energie d'extraction et limite thermodynamique (fer)

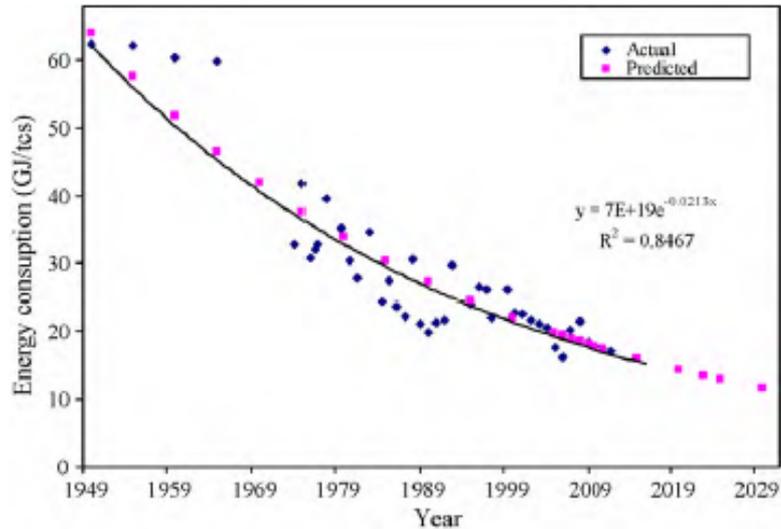
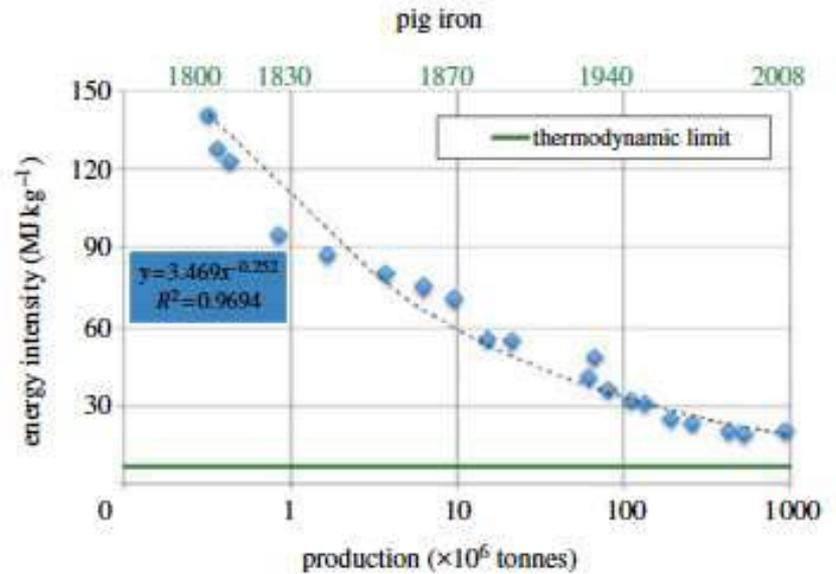
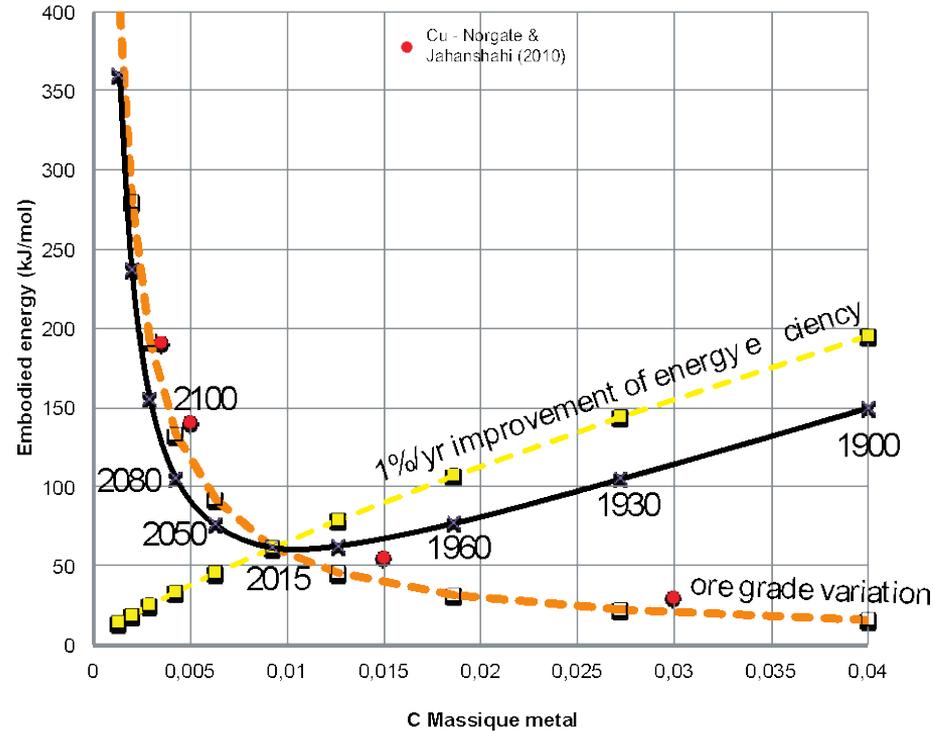


Fig. 5. Actual and projected specific energy consumption in the steel industry (world average).



Energie d'extraction (cuivre)



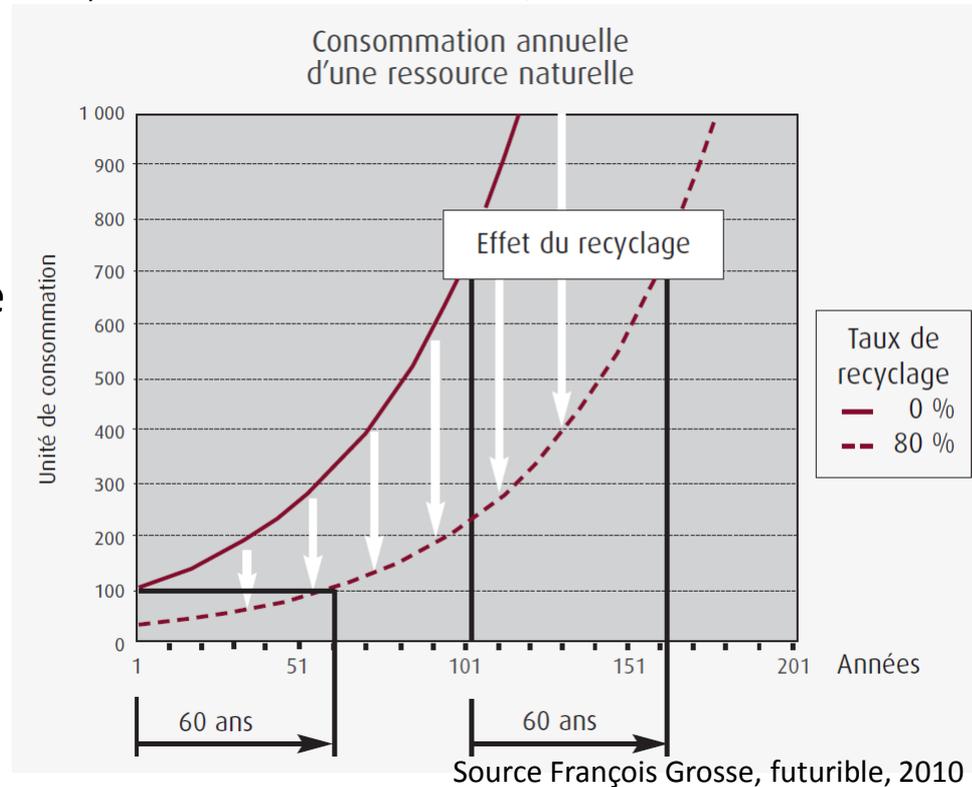
Source : Vidal, INRIA, 2019

Effet du recyclage

Demande exponentielle + recyclage :

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

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



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



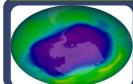
Impact environnemental des TIC



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

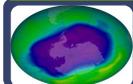
Impact environnemental des TIC



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



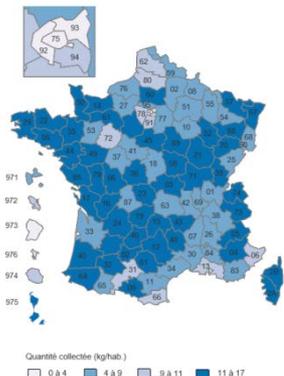
Déplétion des métaux



Consommation d'eau

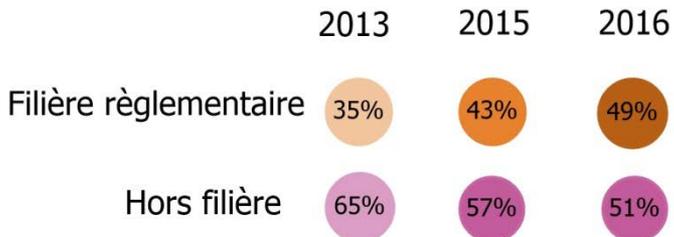


Les déchets électriques et électroniques (DEEE)



17 à 24 kg DEEE par habitant

Taux de collecte

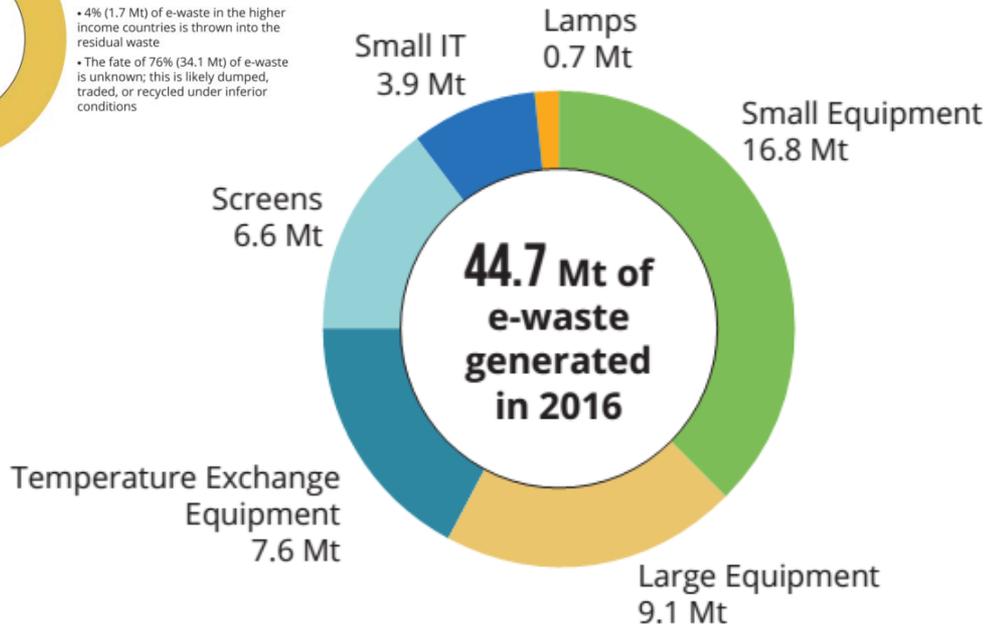


20% (8.9 Mt) of e-waste is documented to be collected and properly recycled



80% (35.8 Mt) of e-waste is not documented

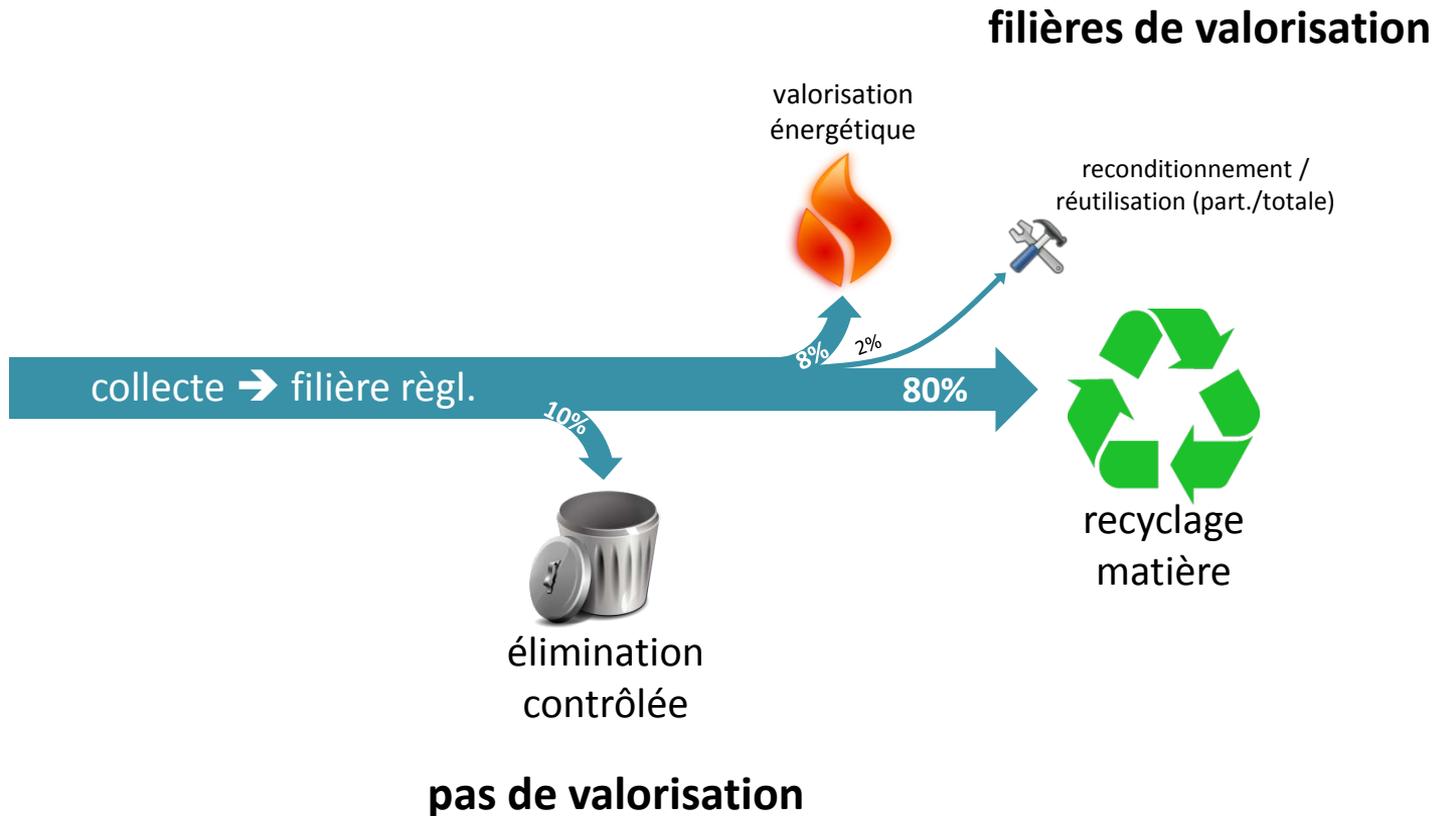
- 4% (1.7 Mt) of e-waste in the higher income countries is thrown into the residual waste
- The fate of 76% (34.1 Mt) of e-waste is unknown; this is likely dumped, traded, or recycled under inferior conditions



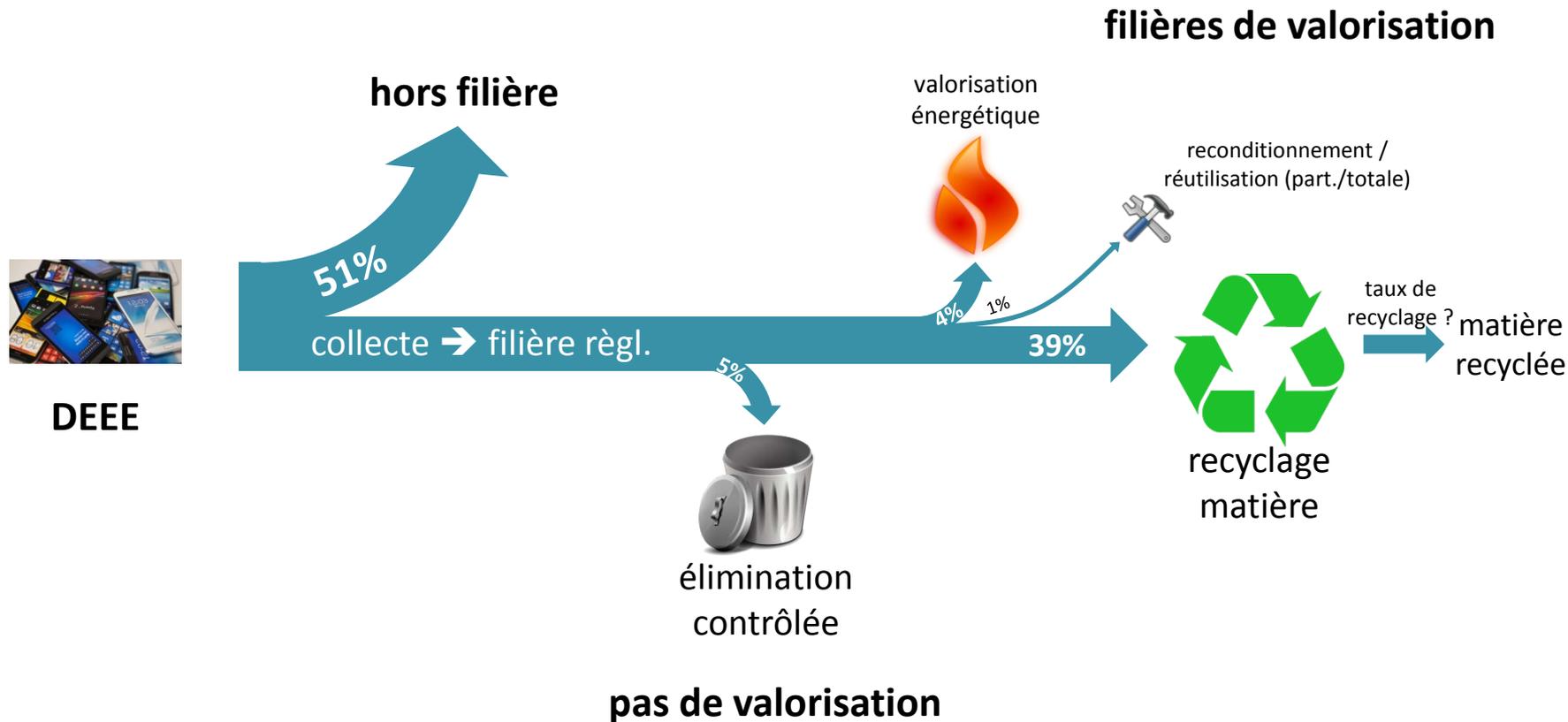
Traitement des DEEE



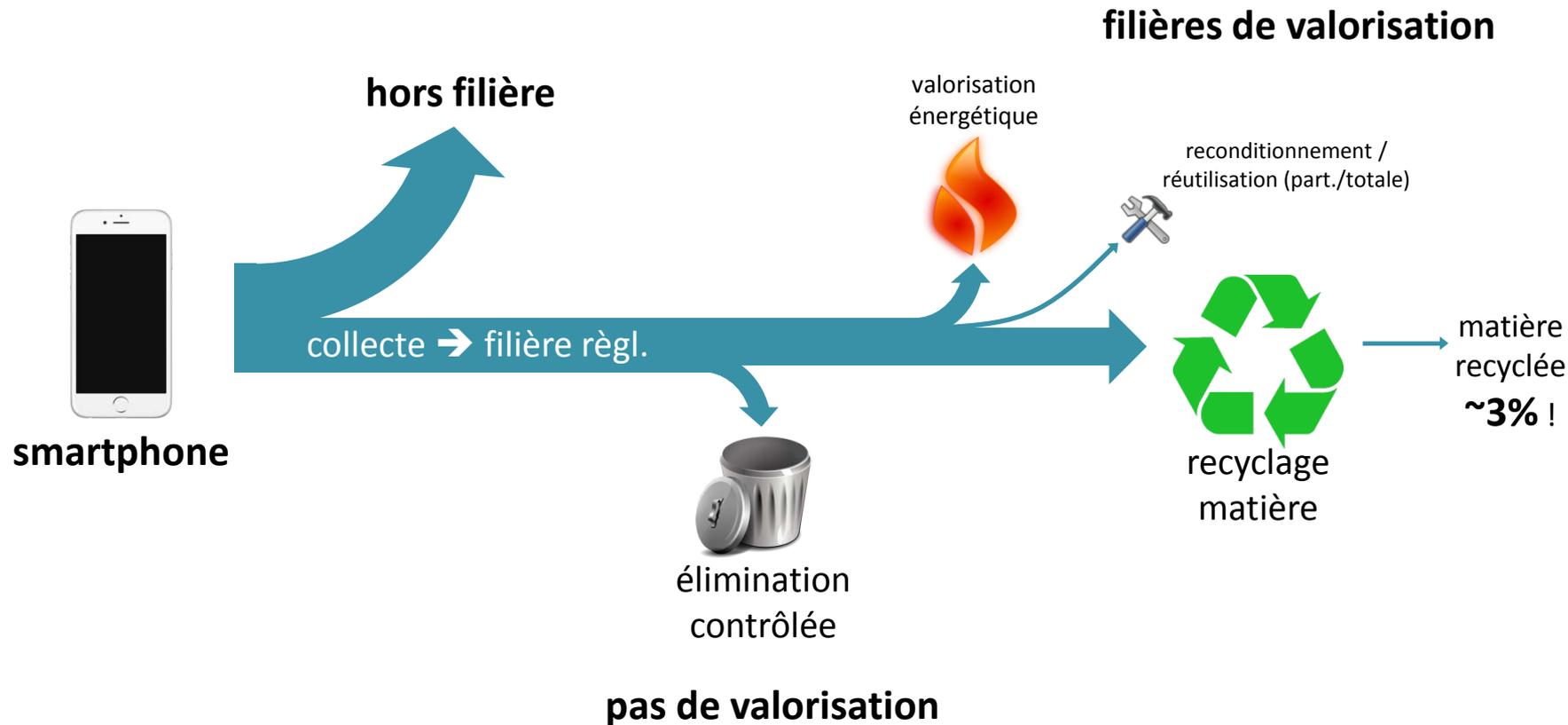
DEEE



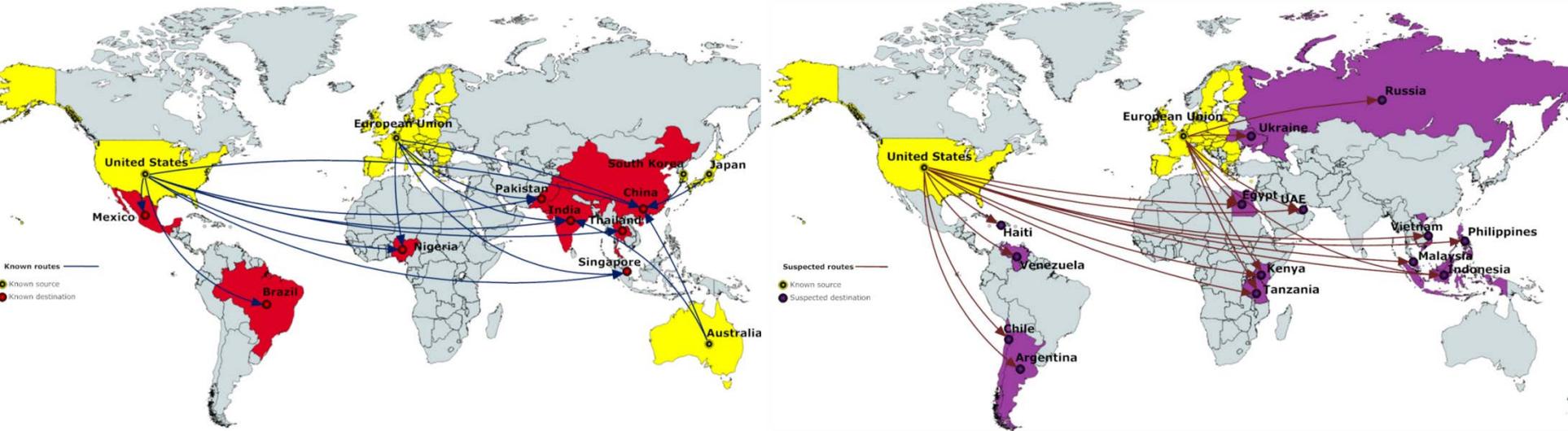
Traitement des DEEE



Traitement des DEEE



Traffic illégal & suspecté de déchets électroniques



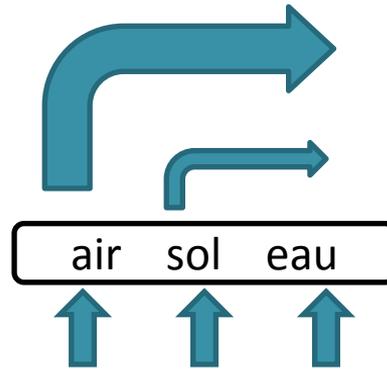
Ref : Int. J. Environ. Res. Public Health 2016, 13(8), 789;

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

Pollution



▶ Effets sur la biosphère

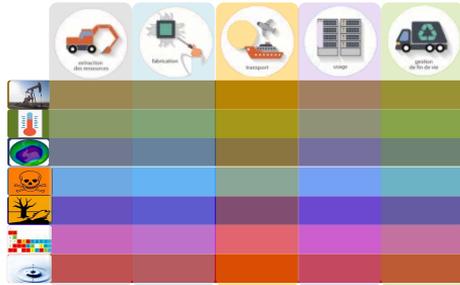
▶ Cultures (riz, légumes, ..) et eau douce polluées !

▶ Perte de biodiversité

▶ Effets sur la santé de l'homme

- ▶ Polluants organiques persistants
- ▶ Métaux lourds (cuivre, nickel, zinc, étain, plomb, arsenic, gallium, germanium, indium, mercure, sélénium, thallium) : non dégradables et bio-accumulables
- ▶ Phtalates (issus des plastiques) : bio-accumulables, persistants
- ▶ Solvants, agents tensio-actifs (bioamplification), composés chimiques perfluorés, dioxine, furane
- ▶ Etc.

Impacts positifs / négatifs



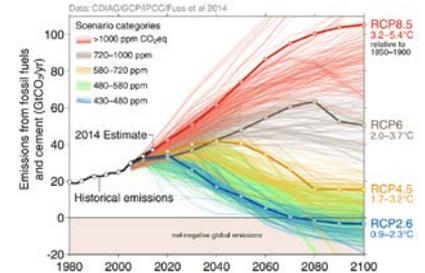
impacts
environnementaux



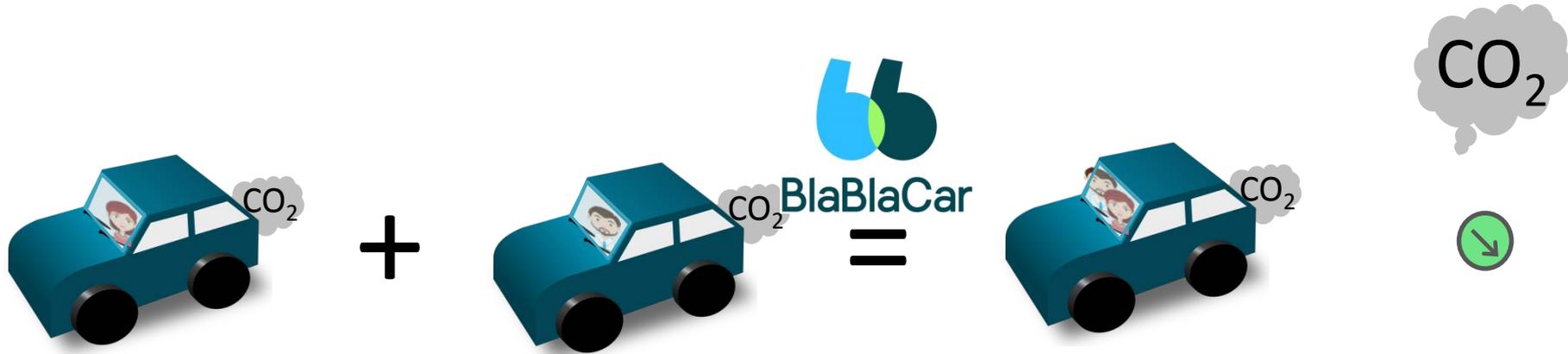
TIC



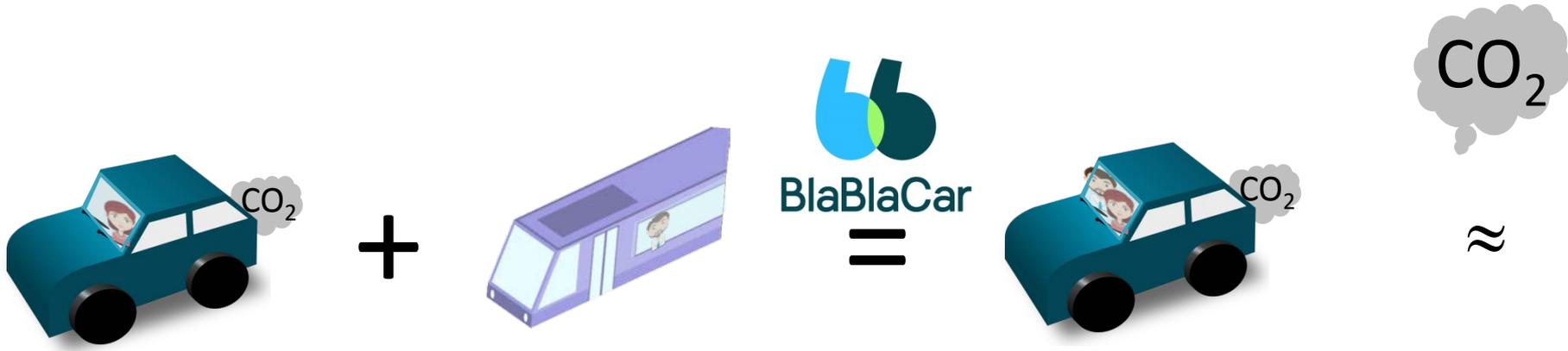
services



Exemple du covoiturage



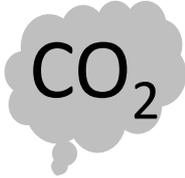
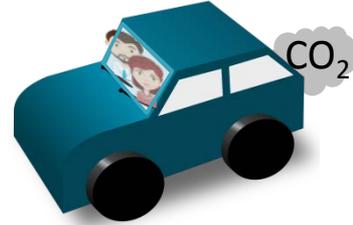
Exemple du covoiturage



Exemple du covoiturage



+



Exemple du covoiturage

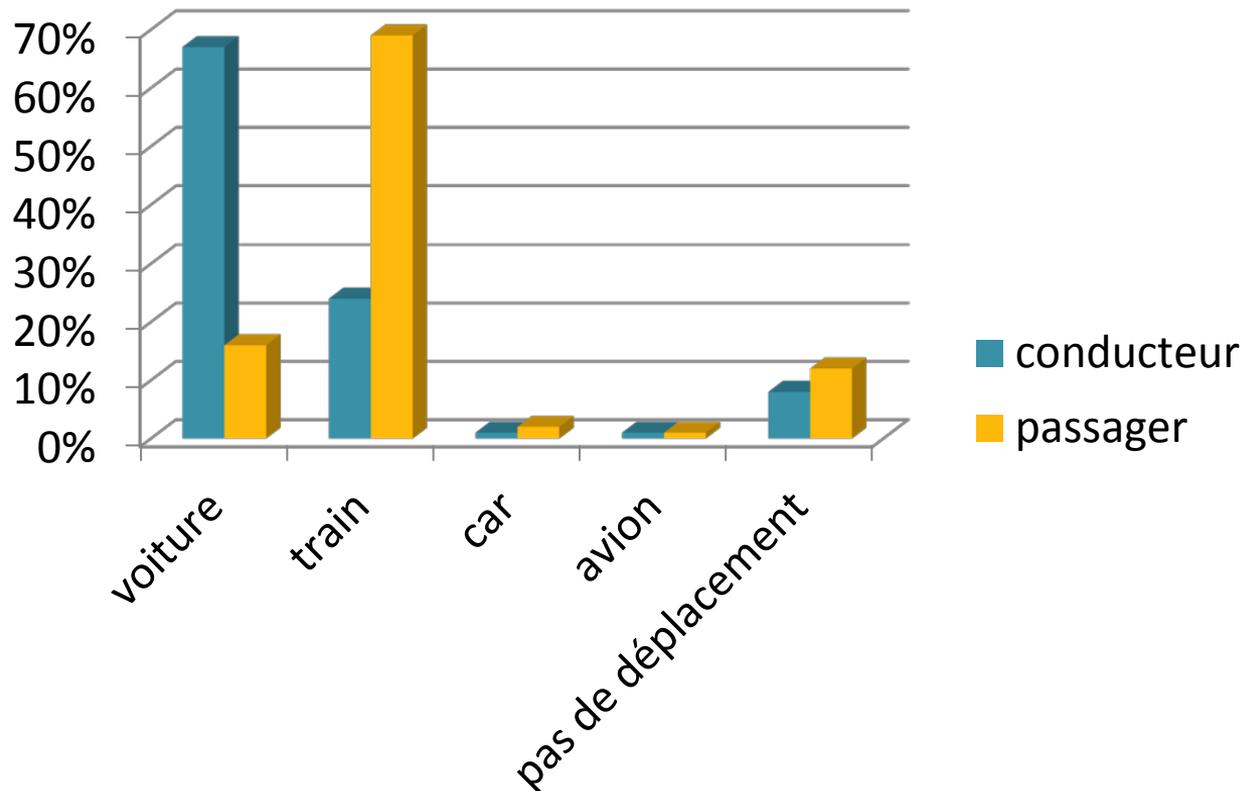


Trajet moyen : 364 km

Motivations principales :

- économies 69 %
- convivialité 87 %

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



Exemple du covoiturage

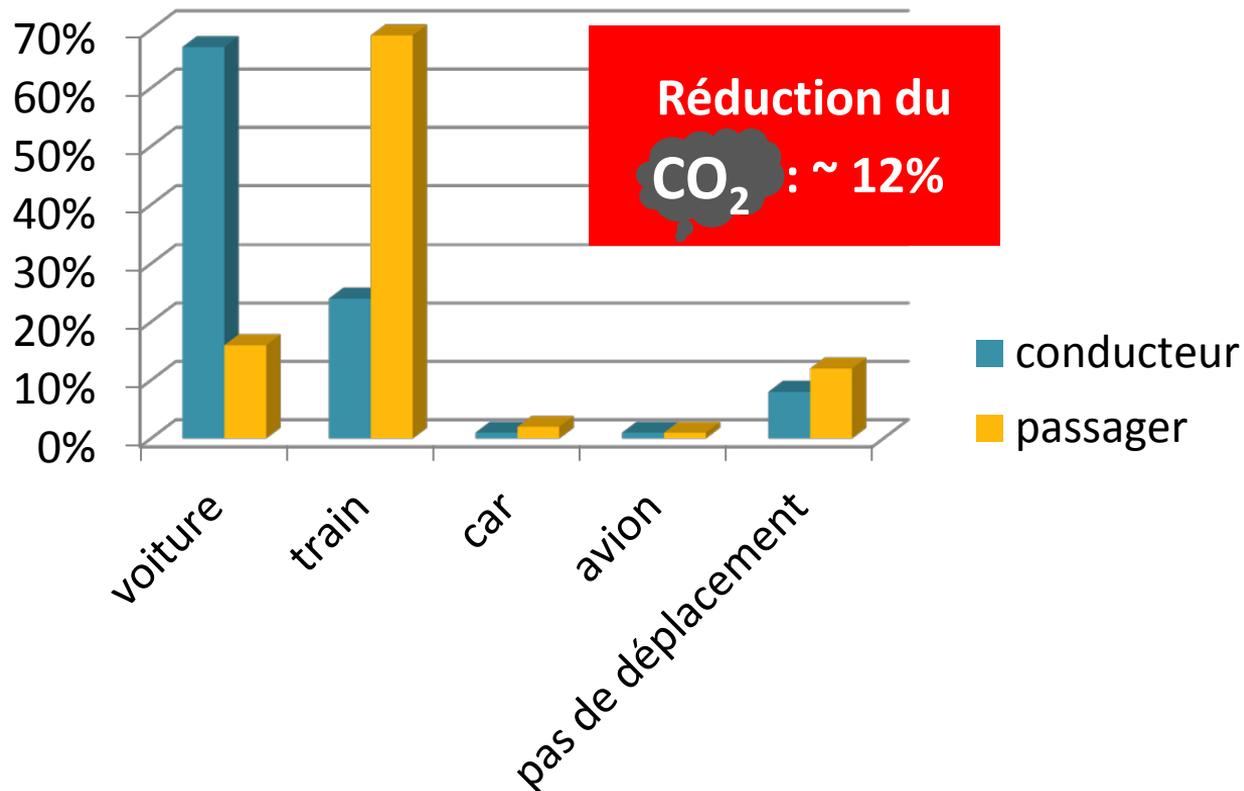


Trajet moyen : 364 km

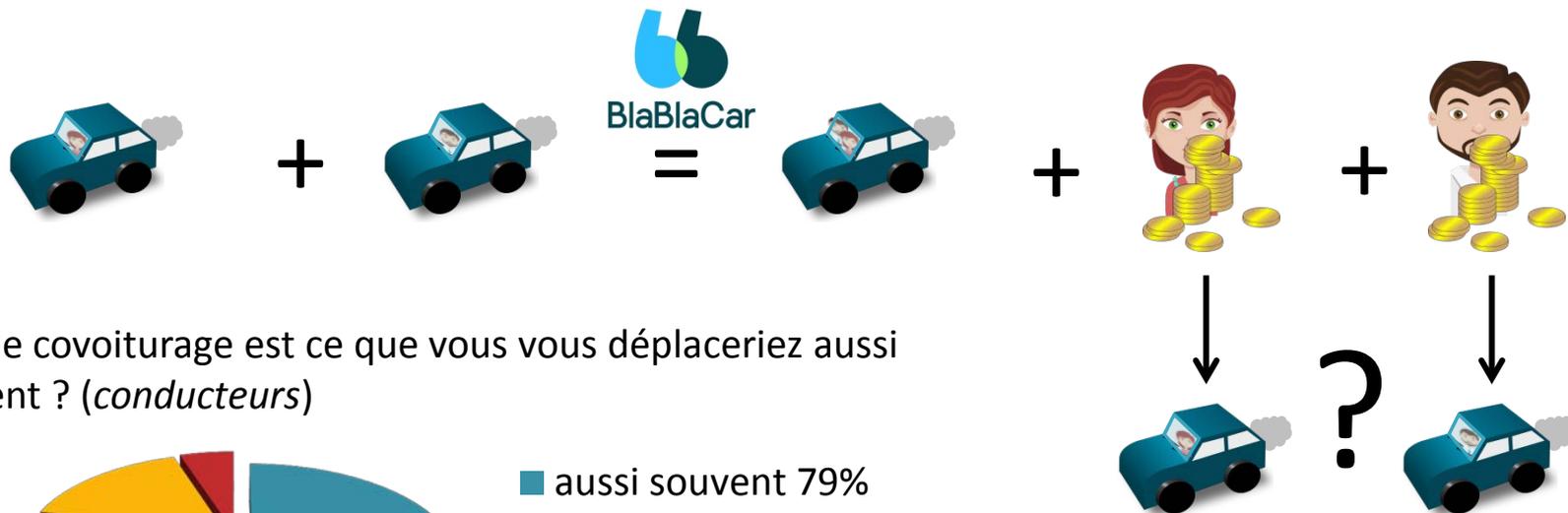
Motivations principales :

- économies 69 %
- convivialité 87 %

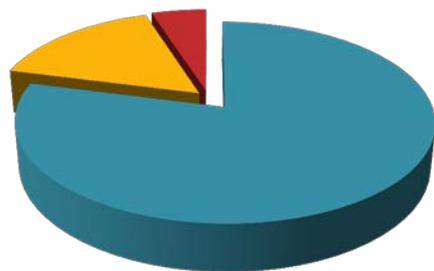
Moyen de déplacement qui aurait été utilisé sans le covoiturage (longue distance)



Covoiturage : attention aux effets rebond



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

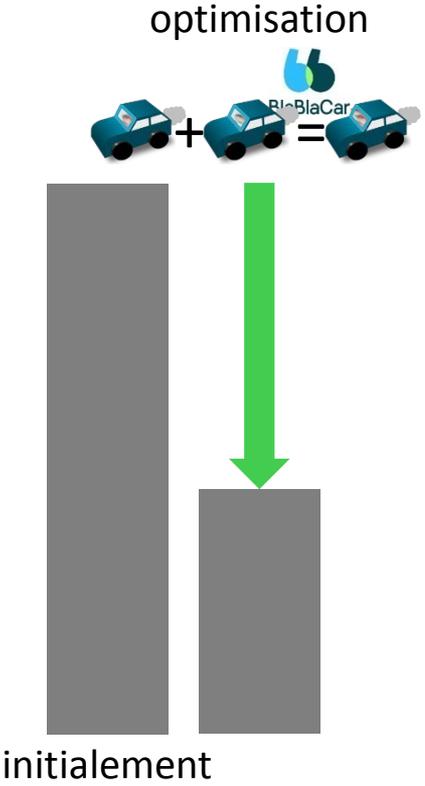


- aussi souvent 79%
- moins souvent 16%
- bcp moins souvent 5%

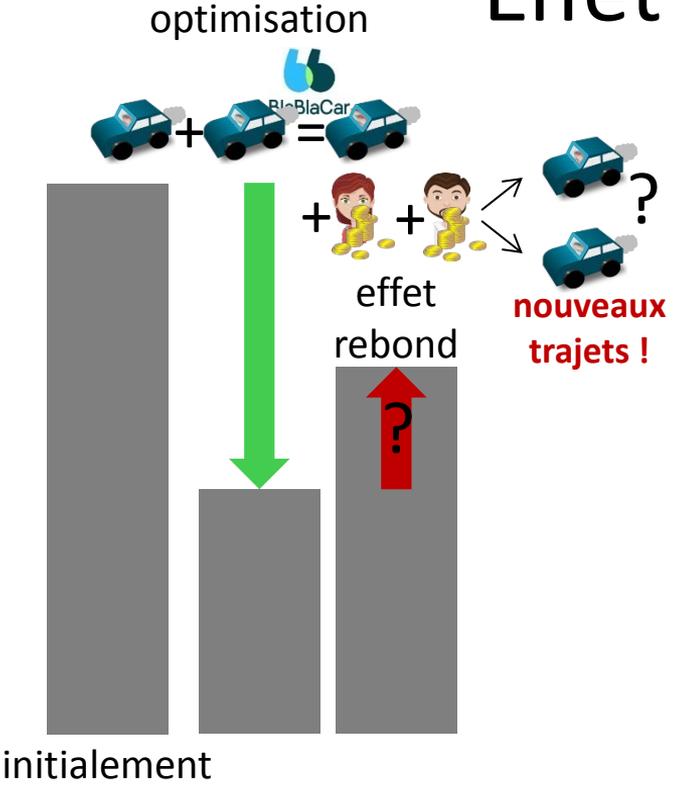
source : Ademe, 2015

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

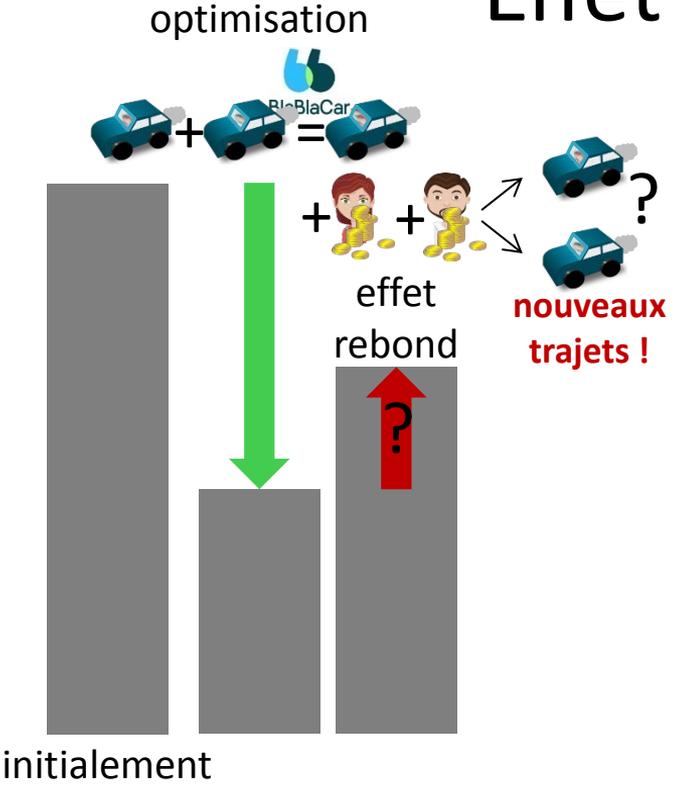
Effet rebond



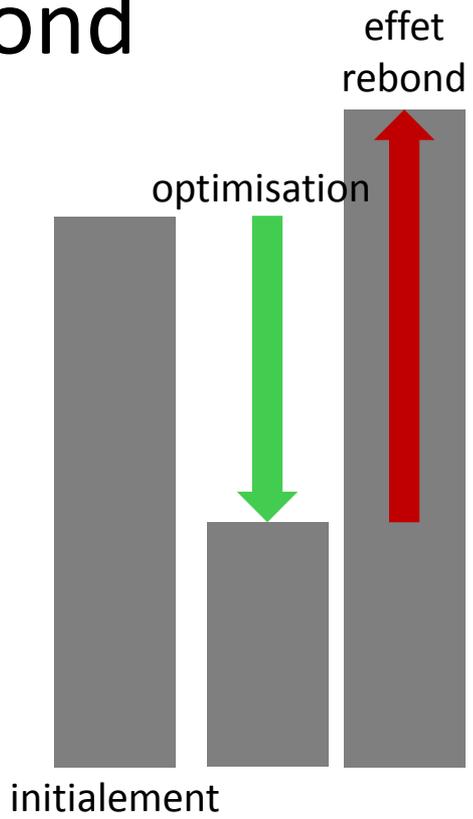
Effet rebond



Effet rebond

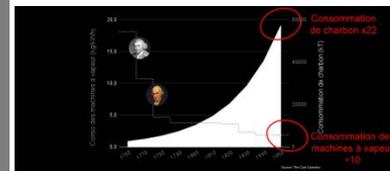
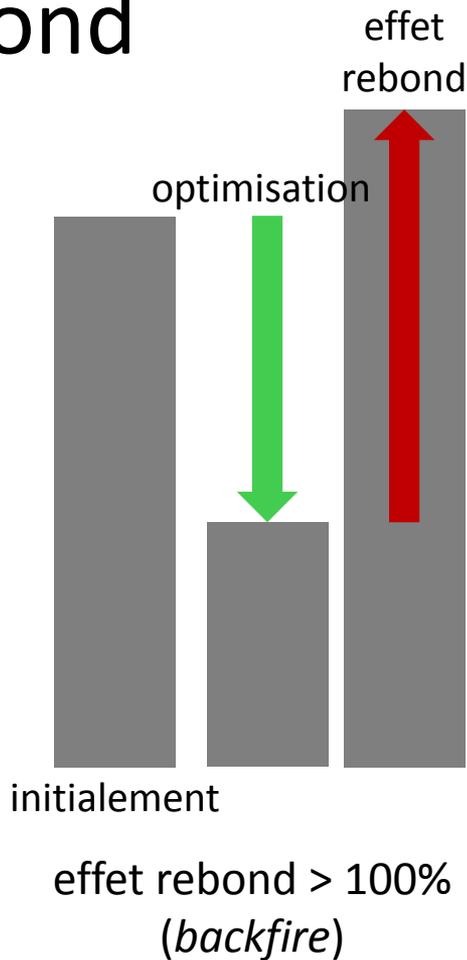
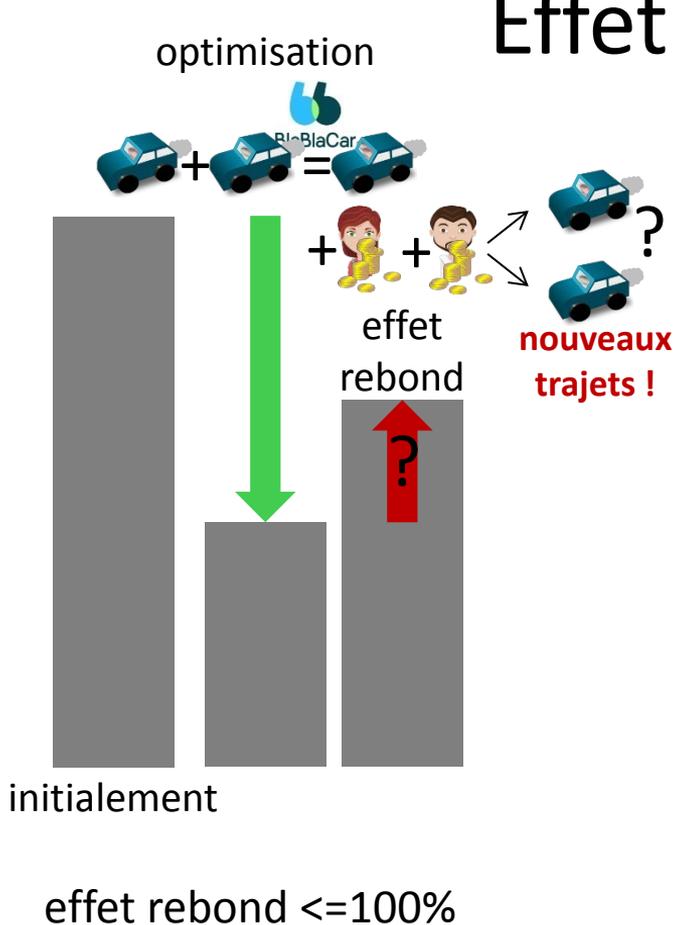


effet rebond $\leq 100\%$



effet rebond $> 100\%$
(backfire)

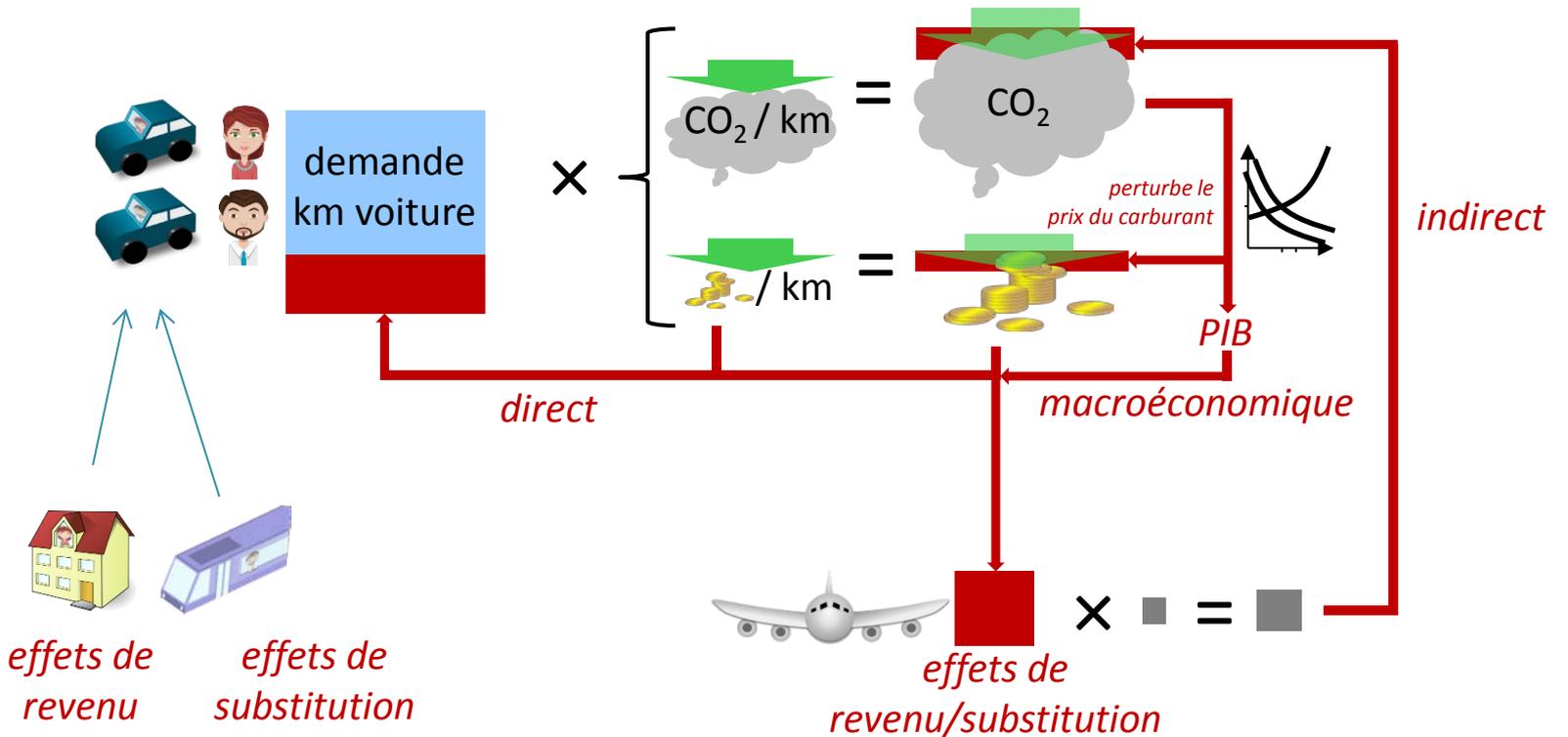
Effet rebond



Ex. célèbre : le charbon en Angleterre entre 1760 et 1850

Effet rebond

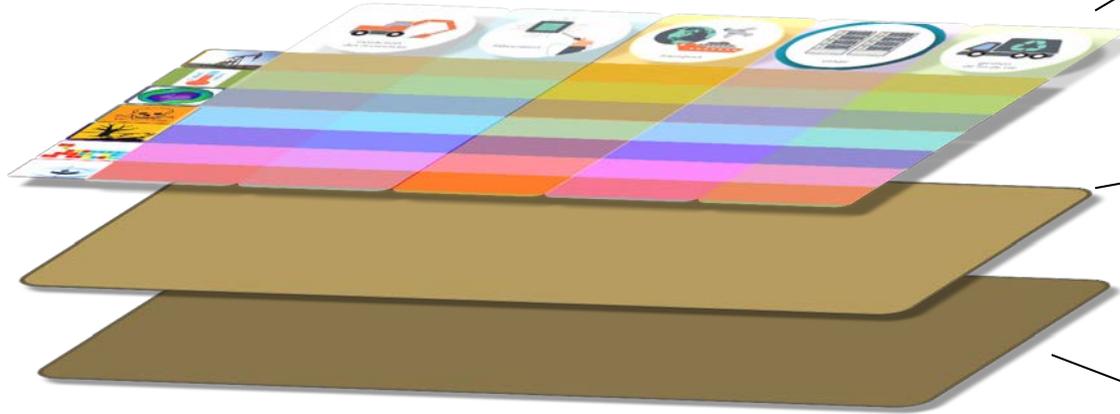
covoiturage
(optimisation unitaire)



Effet rebond ?



Impacts +/- directs, induits, rebond



1^{er} ordre :

- analyse de cycle de vie (ACV)
- + outils au service de l'écologie

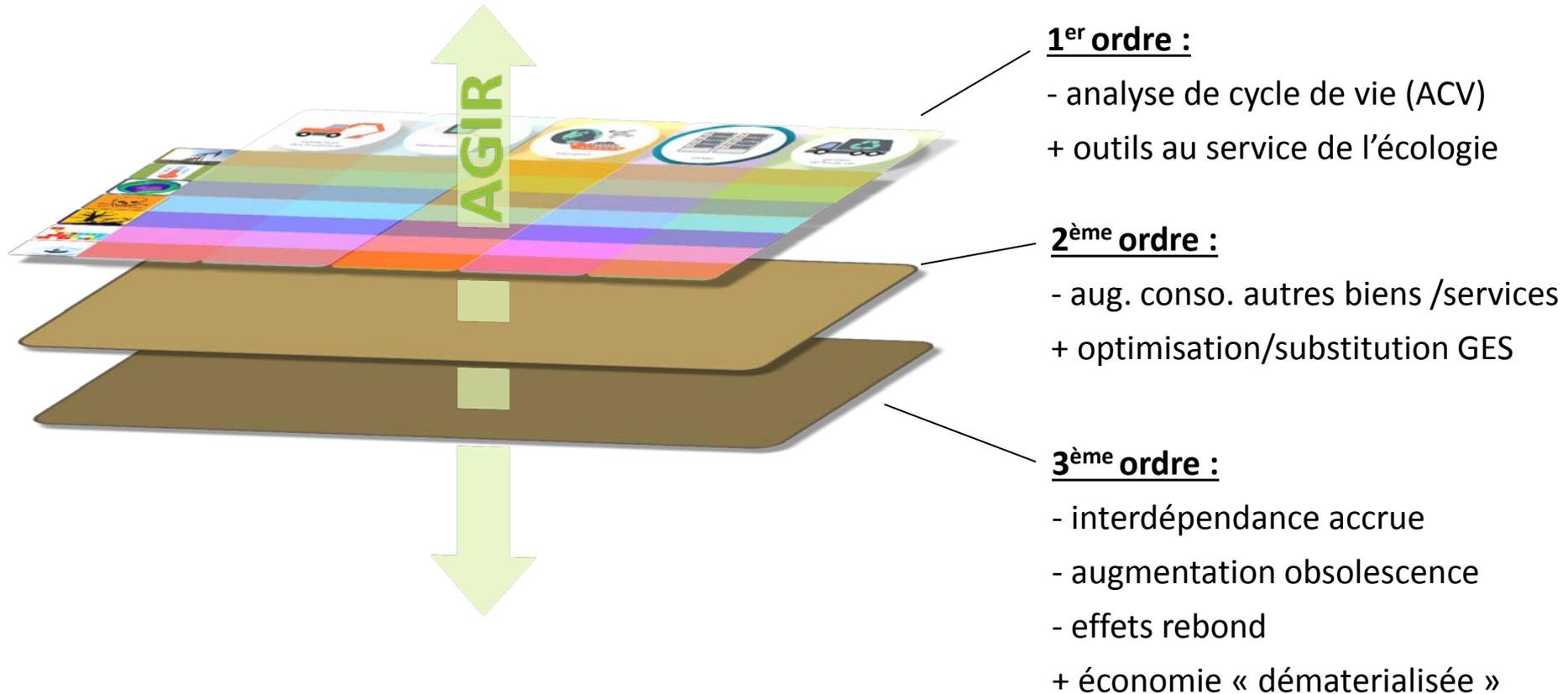
2^{ème} ordre :

- aug. conso. autres biens /services
- + optimisation/substitution GES

3^{ème} ordre :

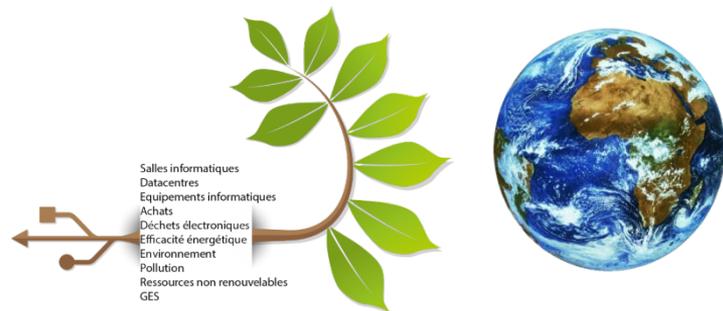
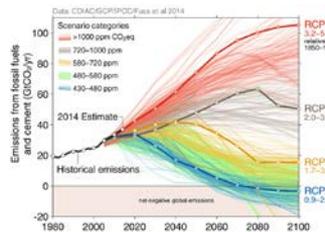
- interdépendance accrue
- augmentation obsolescence
- effets rebond
- + économie « dématérialisée »

Impacts +/- directs, induits, rebond

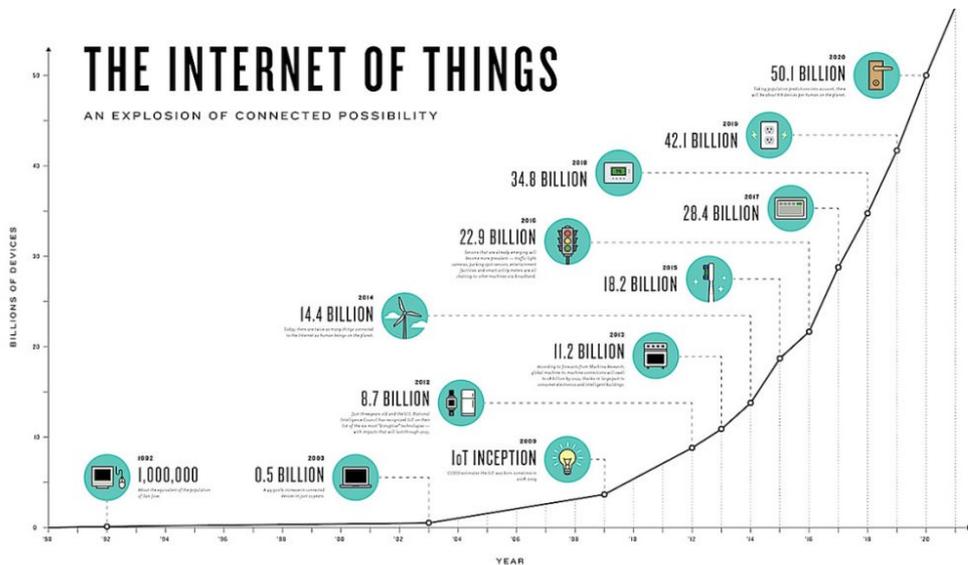


Le numérique : alors menace ou espoir ?

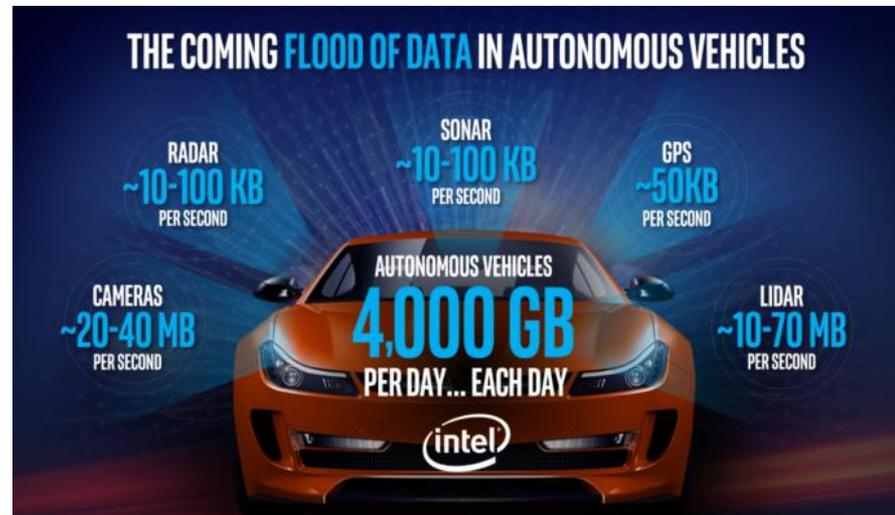
- Clé pour analyser la complexité
- Illusion de dématérialisation
- Formidable accélérateur des processus (qu'ils soient vertueux ou néfastes)
- Dogme de la technologie : rend aveugle à d'autres solutions (low-tech)
- Agir vers :
 - la sobriété :
 - taux de renouvellement
 - lutter contre l'obsolescence
 - éco-conception (attention aux effets rebond !)
 - la résilience : comment se passer des TIC pour les besoins de base ?



Demain ?



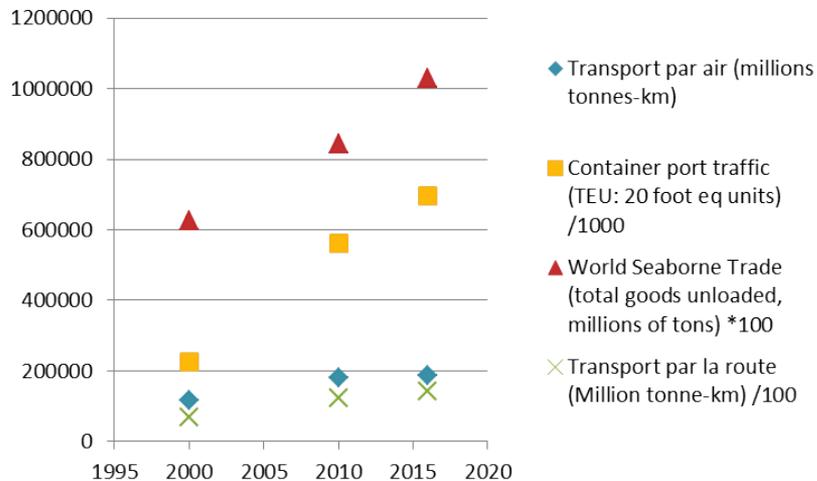
source : NCTA



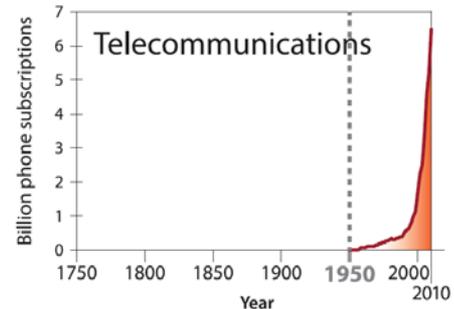
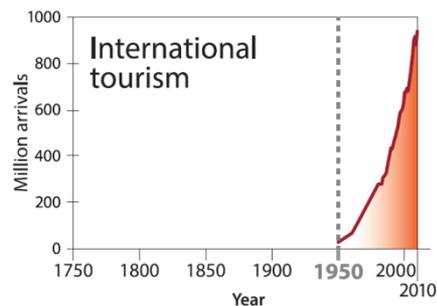
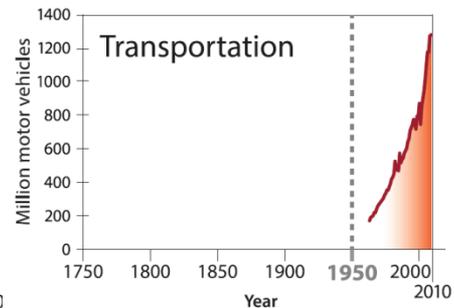
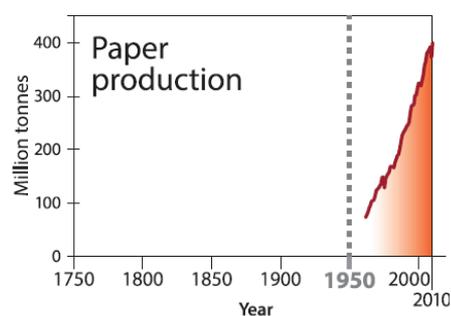
source : Intel

Merci !

Backup



Source: World Bank, UNCTAD, OECD et calculs de Eloi Laurent



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

Pas d'effet d'atténuation visible sur ces secteurs !

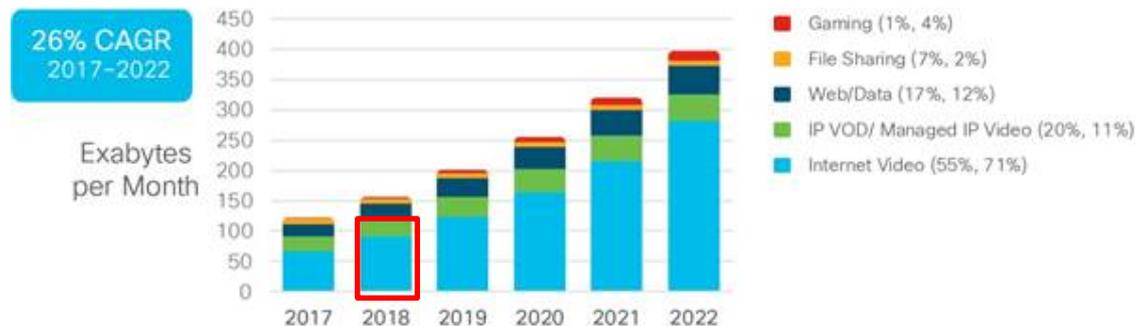


SUV Range Rover (équipé par l'entreprise Valeo), c'est

- quatre ou cinq caméras,
- huit lidars,
- plusieurs radars longue portée,
- un ordinateur central de grande puissance,
- une caméra trifocale sur le pare-brise et d'autres capteurs

et, pour huit heures de conduite, environ 40 téraoctets de données

- + Batteries
- + Datacentres
- + Réseau 5G
- + Caméras
- + Data



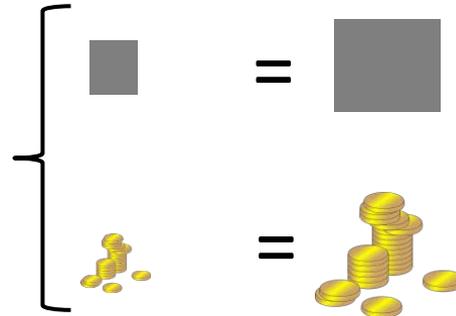
* Figures (n) refer to 2017, 2022 traffic share
Source: Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022

Situation initiale

quantité du
produit/service



×



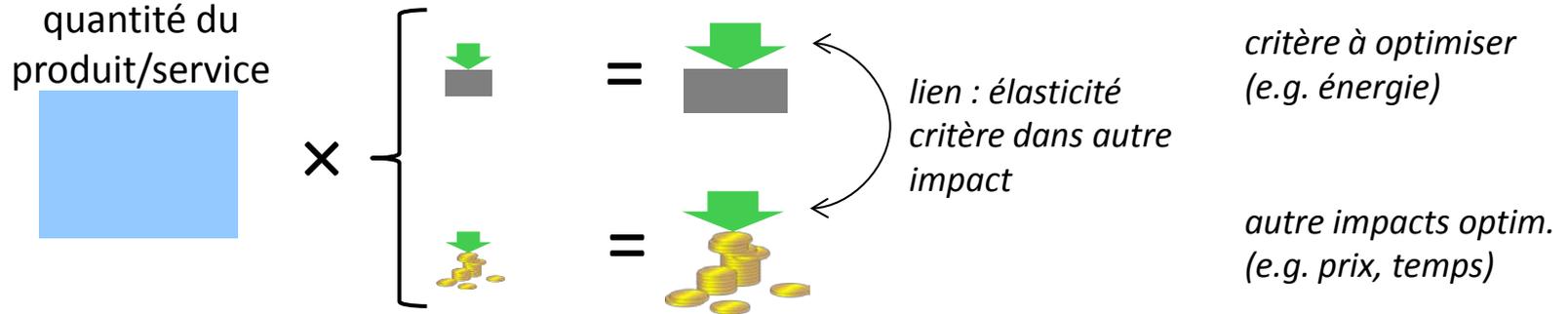
*critère à optimiser
(e.g. énergie)*

*autres impacts optim.
(e.g. prix, temps)*

exemple :

- *service : se déplacer en voiture*
- *critère : carburant*
- *impact sur le coût des déplacements*

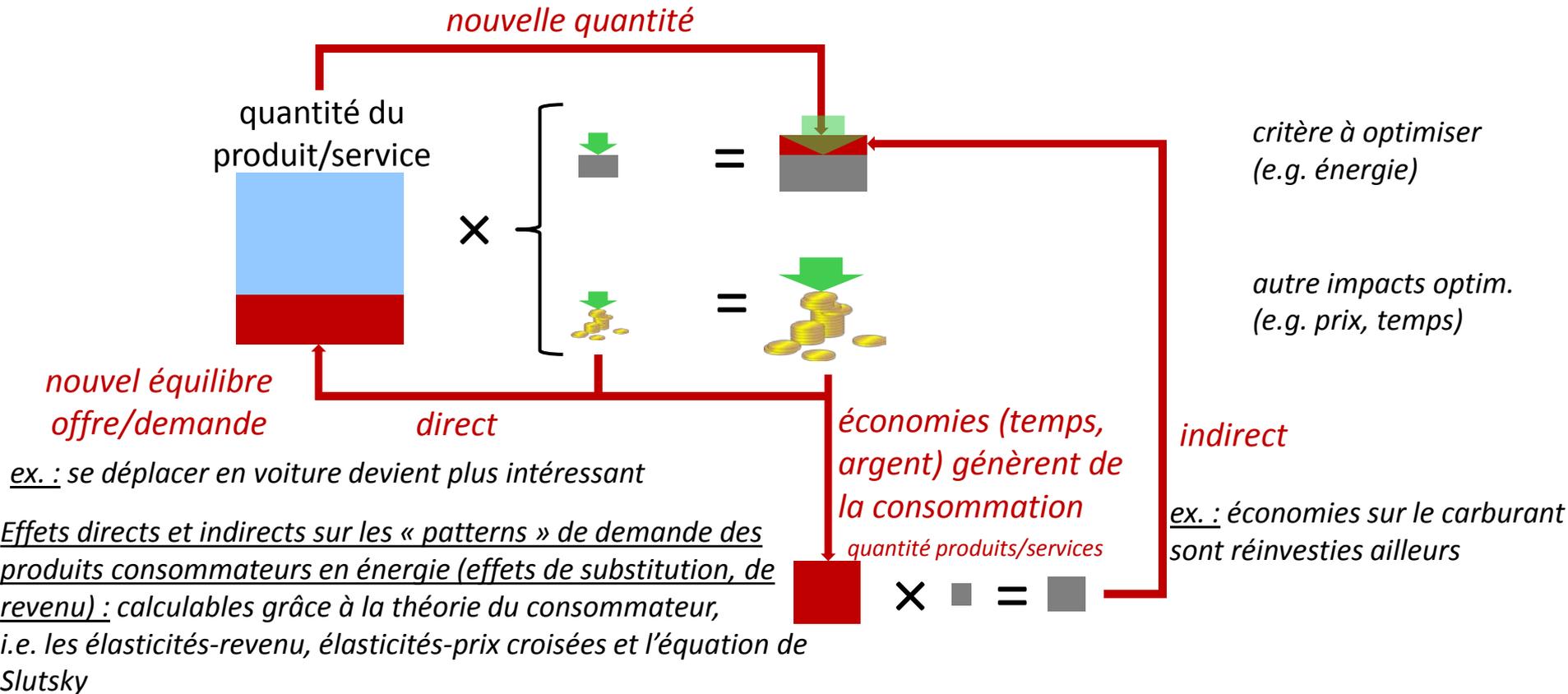
Optimisation : effets directs



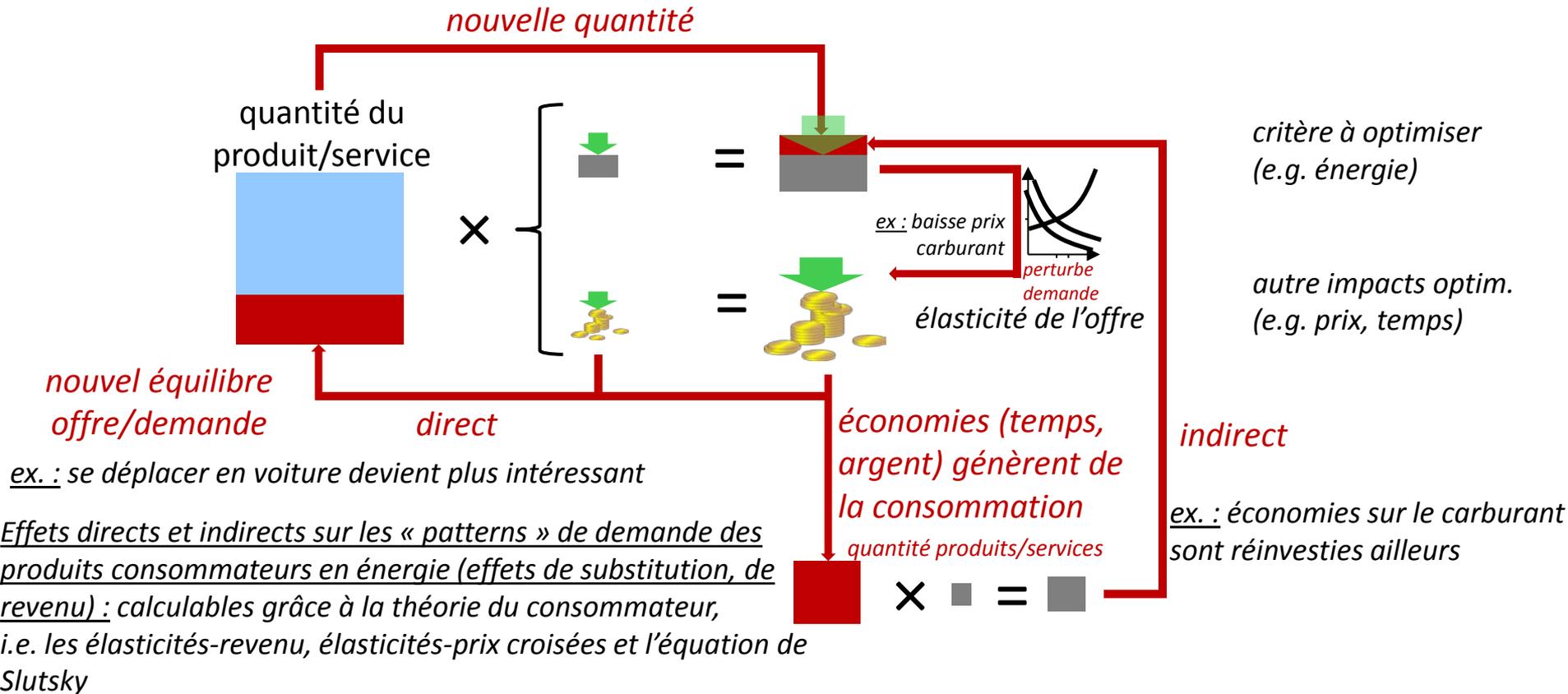
exemple :

- se déplacer en voiture
- critère : carburant
- impact sur le coût des déplacements
- optimisation : baisse de la consommation
- lien : consommation / coût de déplacement

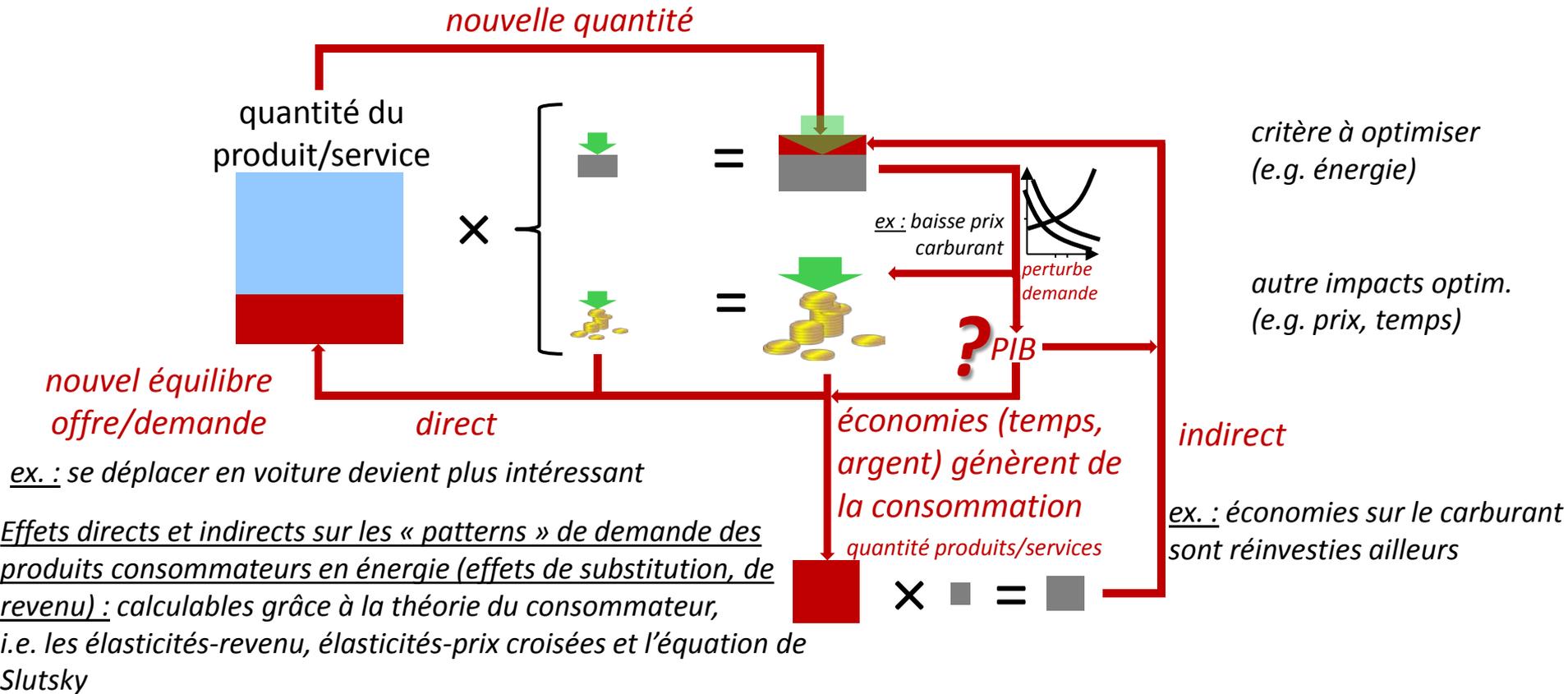
Optimisation : effet rebond direct / indirect



Optimisation : effet rebond direct / indirect



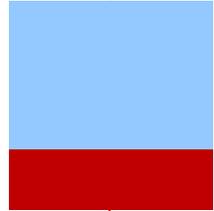
Optimisation : effet rebond macro-économique



Autre exemple : machine à vapeur

ex. : travail par machine à vapeur (en W)

quantité du produit/service



×

conso/W



=

conso totale



\$/W



=

\$



ex. : critère à optimiser consommation charbon

nouvel équilibre offre/demande

direct

économies (temps, argent) génèrent de la consommation

indirect

ex. : utiliser la machine une machine à vapeur devient plus intéressant (par rapport au travail humain, chevaux, etc.)

quantité produits/services

ex. : économies sur le charbon sont réinvesties ailleurs



ex. : baisse prix charbon

PIB ex. : participe à la révolution industrielle

Estimation effet rebond direct / indirect

- Situation initiale :

- n services/produits en quantités $x_i, i=1..n$, service/produit à optimiser $i=1$ (e.g. kilométrage voiture donné par x_1)
- consommation / unité de quantité en critère à optimiser (e.g. carburant) par les services/produits donné par $c_i, i=1..n$
- consommation totale : $x_1 c_1 + \dots + x_n c_n$
- prix de revient / unité de quantité : $p_i, i=1..n$
- prix du critère à optimiser par unité : p

- Optimisation + effet rebond direct/indirect (sans macro-économique) :

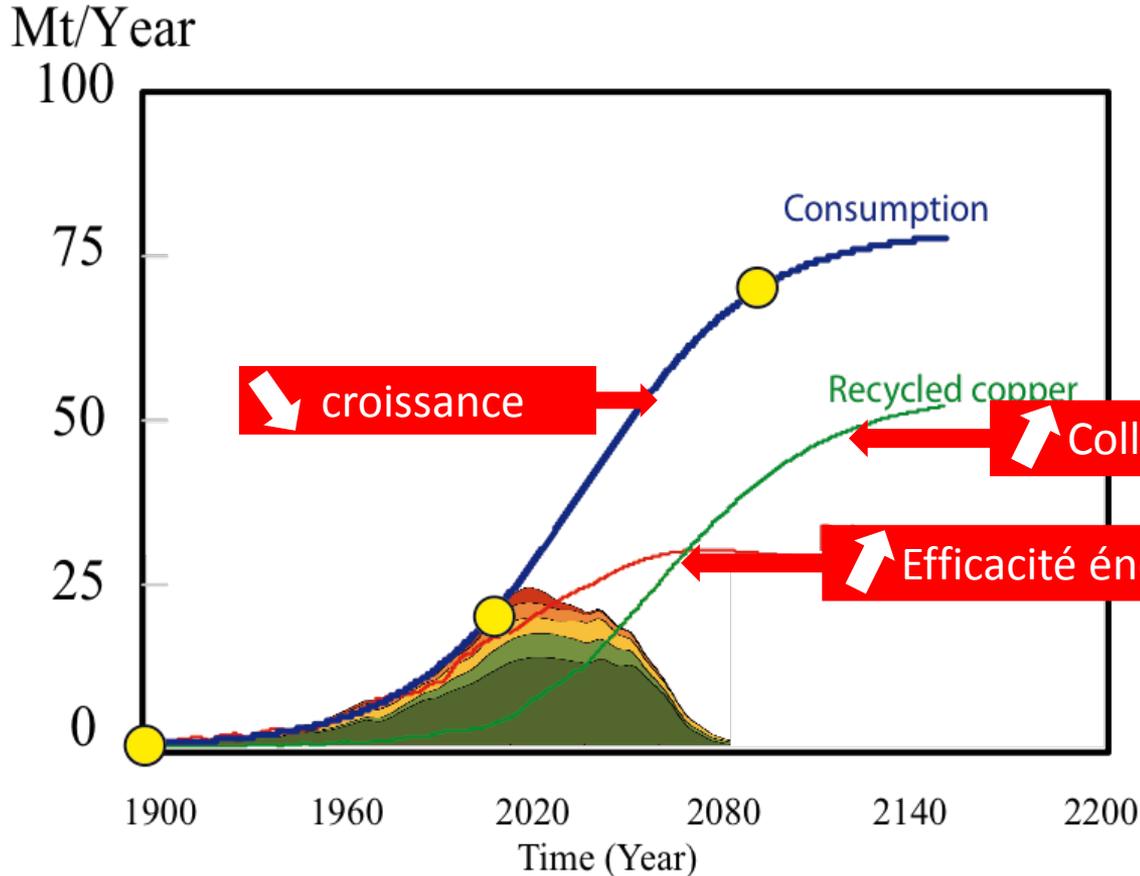
- facteur d'optimisation du service 1 : η
- nouvelle consommation du service 1 : ηc_1
- nouveau prix du critère à optimiser par unité : p'
- nouveau prix de revient pour service 1 : $p_1 - p' c_1 (1 - \eta)$
- impact du changement de prix du service sur tous les services, grâce à l'équation de Slutsky :

$$1 : \varepsilon_1 = \varepsilon_1^c - \varepsilon_1^r x_1 p_1 / l \quad (\varepsilon_1 : \text{élasticité-prix}, \varepsilon_1^c : \text{élasticité-prix compensée}, \varepsilon_1^r : \text{élasticité-revenue}, l : \text{revenue})$$

$$i : \varepsilon_{i1} = \varepsilon_{i1}^c - \varepsilon_i^r x_1 p_1 / l \quad (\varepsilon_{i1} : \text{élasticité-prix croisée}, \varepsilon_{i1}^c : \text{élasticité-prix croisée compensée}, \varepsilon_i^r : \text{élasticité-revenue})$$

- ces équations permettent de calculer les nouvelles valeurs de quantité : $x'_i, i=1..n$
- nouvelle consommation totale : $x'_1 \eta c_1 + x'_2 c_2 + \dots + x'_n c_n$

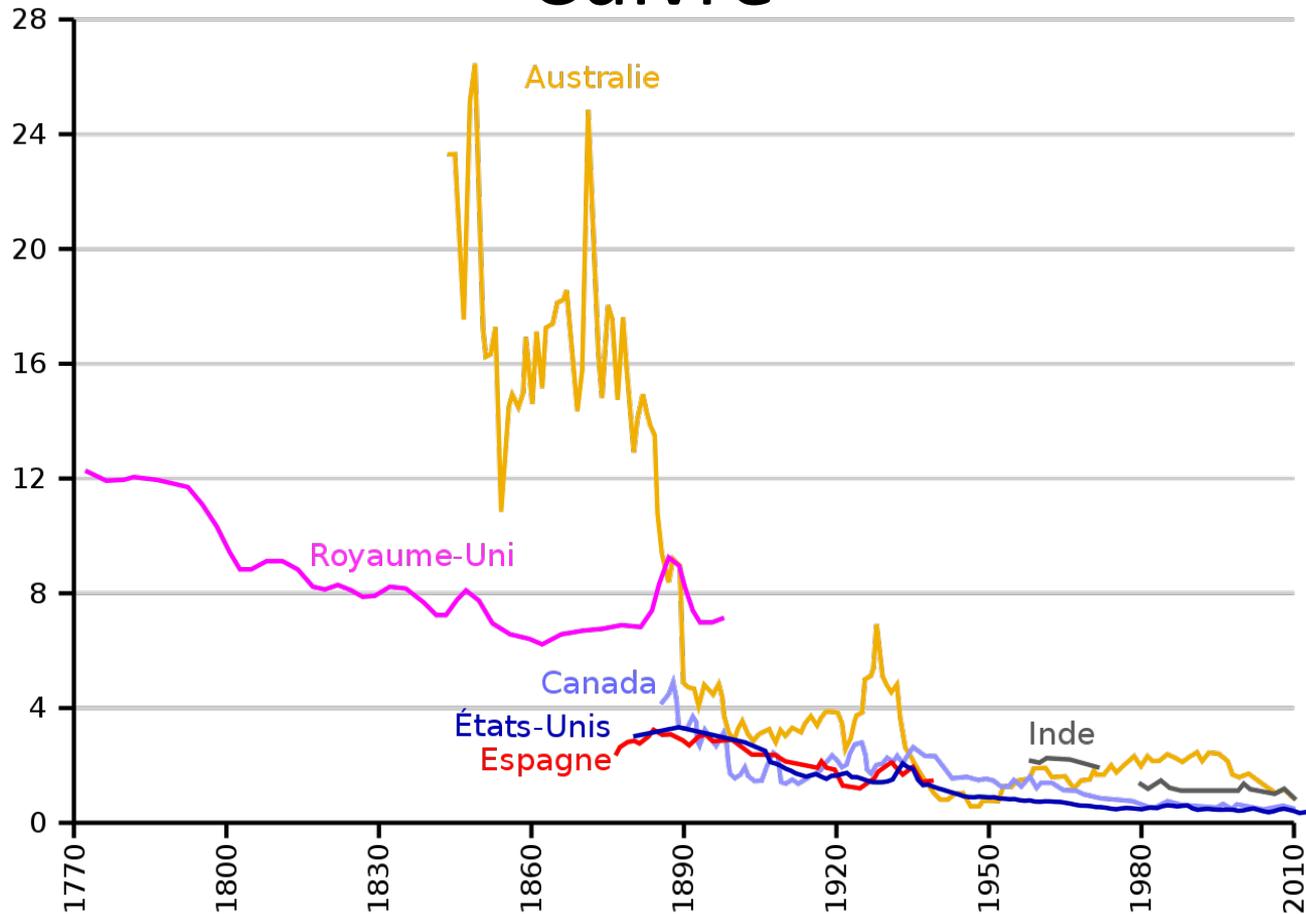
Modélisation



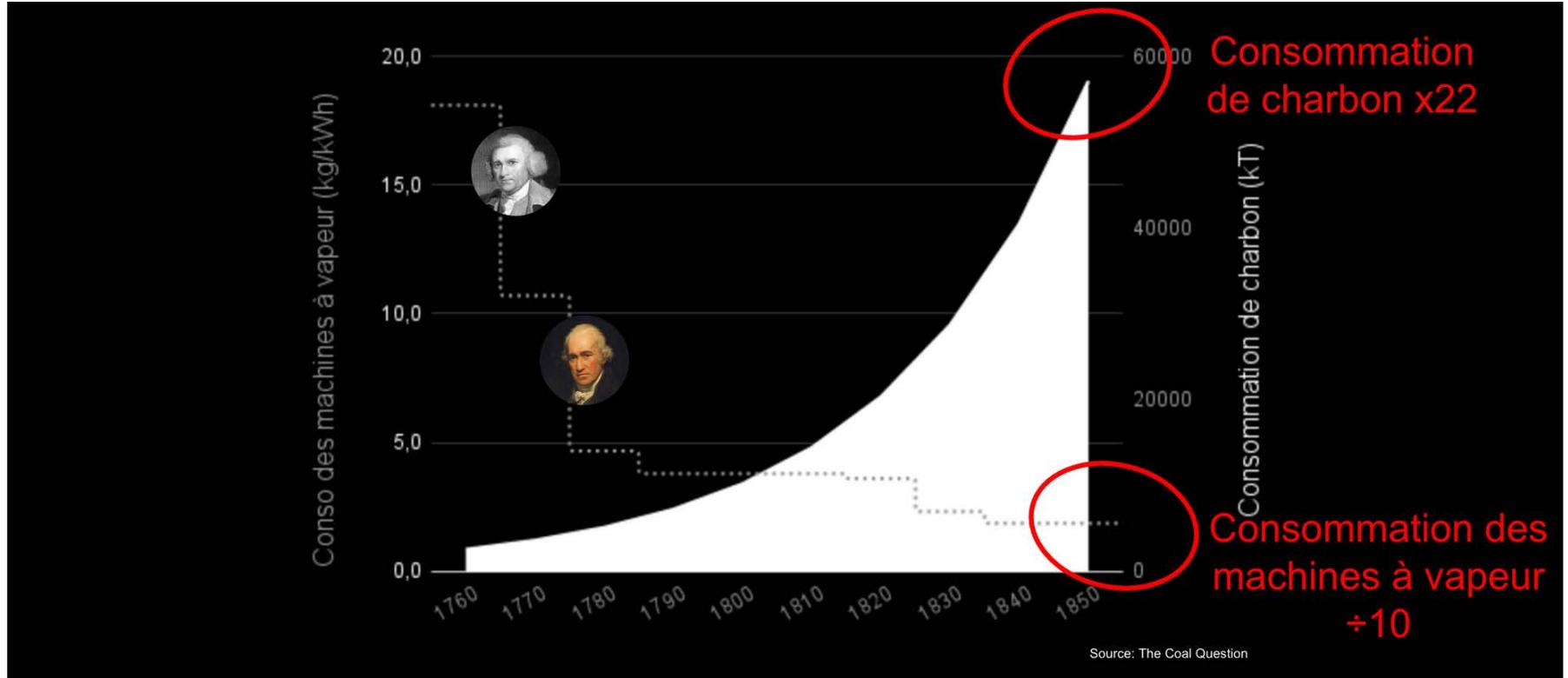
Dans ces conditions les réserves pourraient être encore accessibles pendant qq's centaines d'années ?

Cuivre

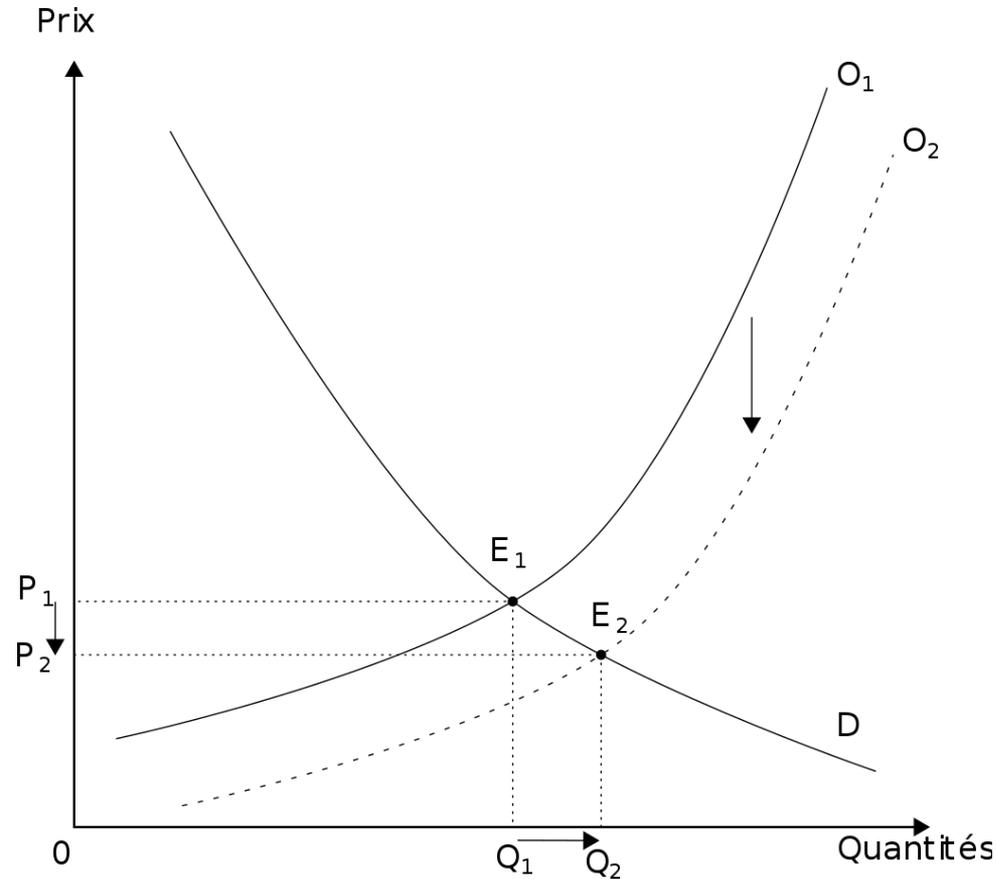
Richesse minerais (% Cu)



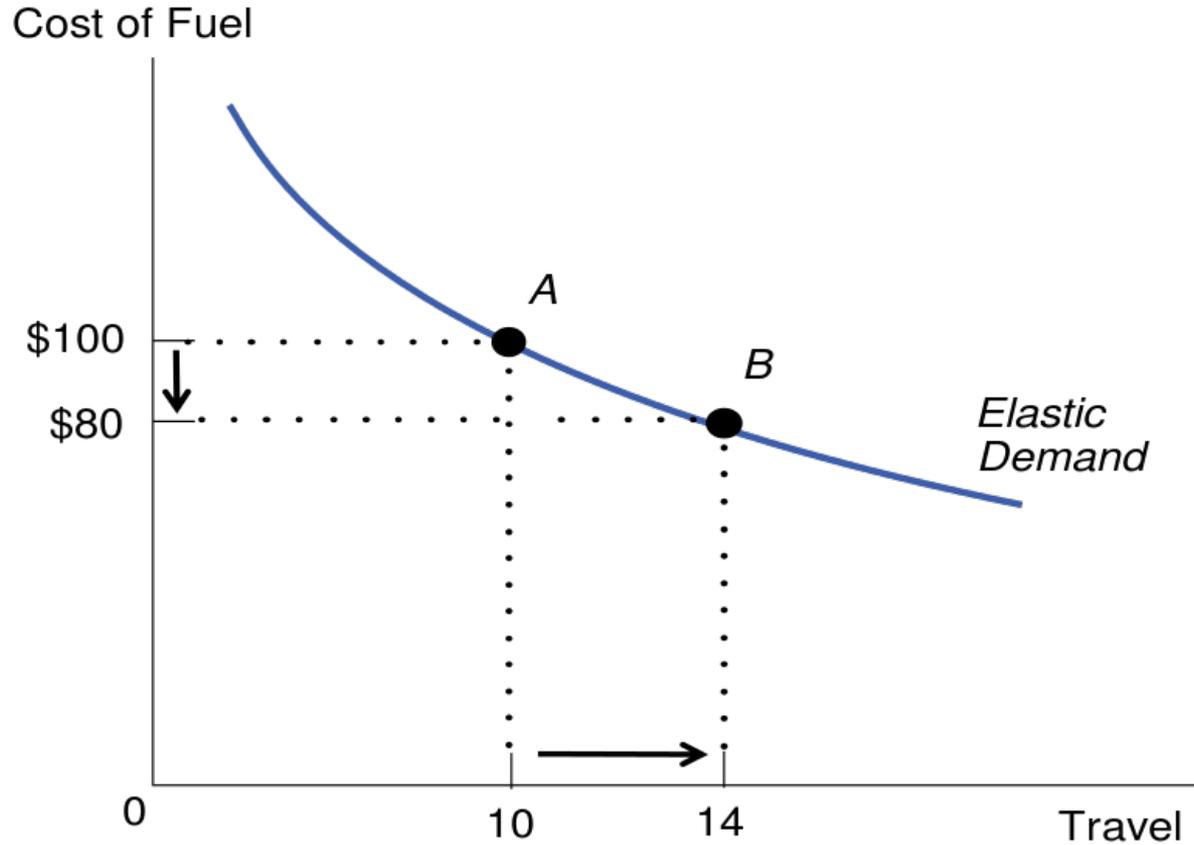
Effet rebond : l'exemple du charbon



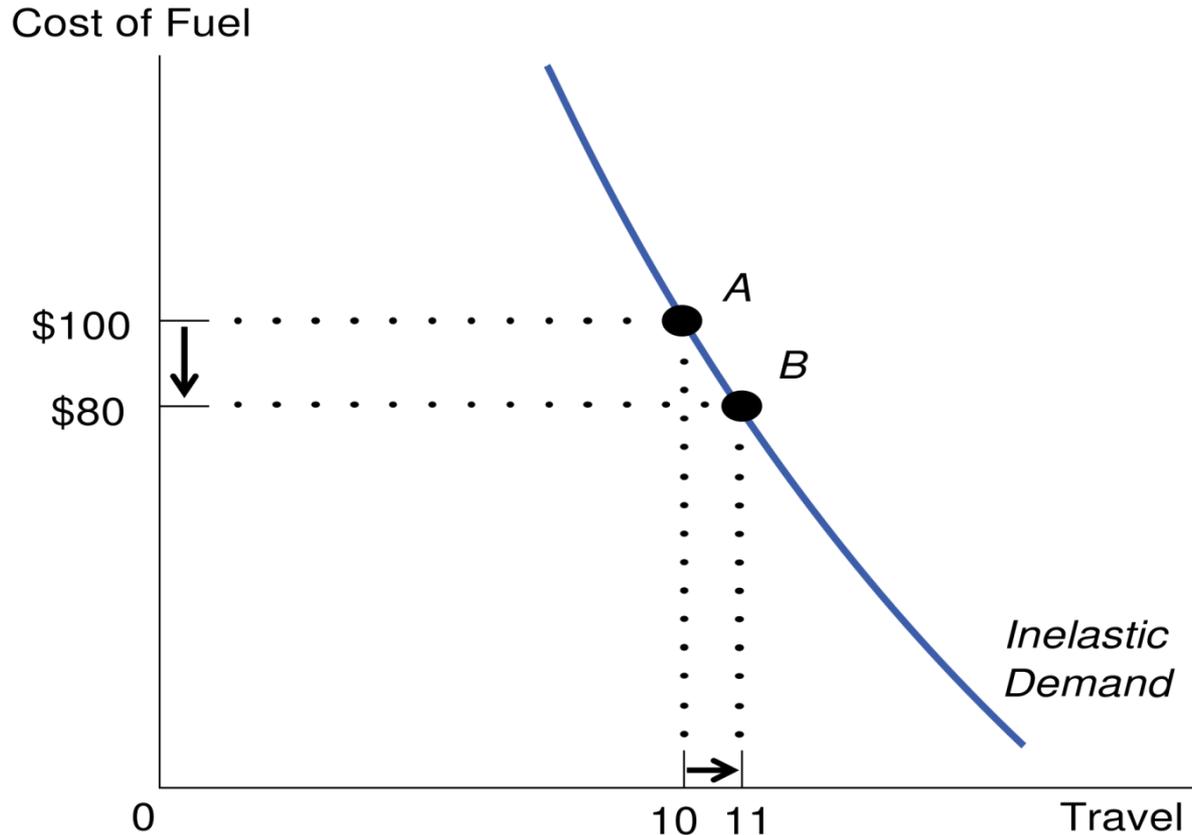
Effet rebond : loi offre demande



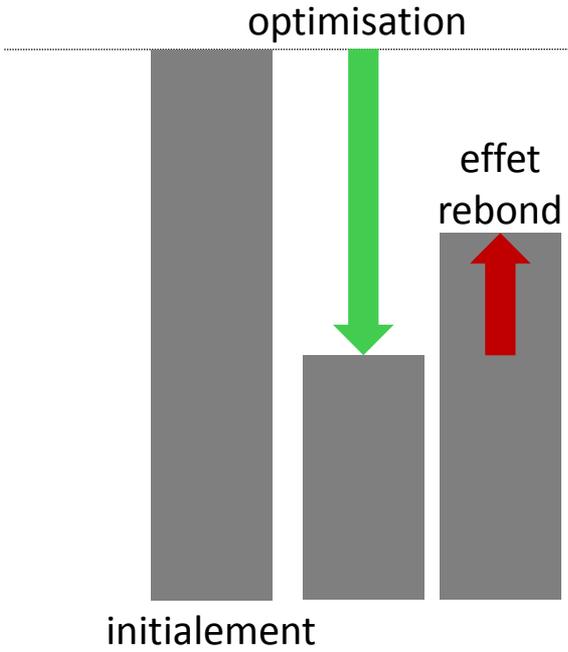
Effet rebond : demande élastique



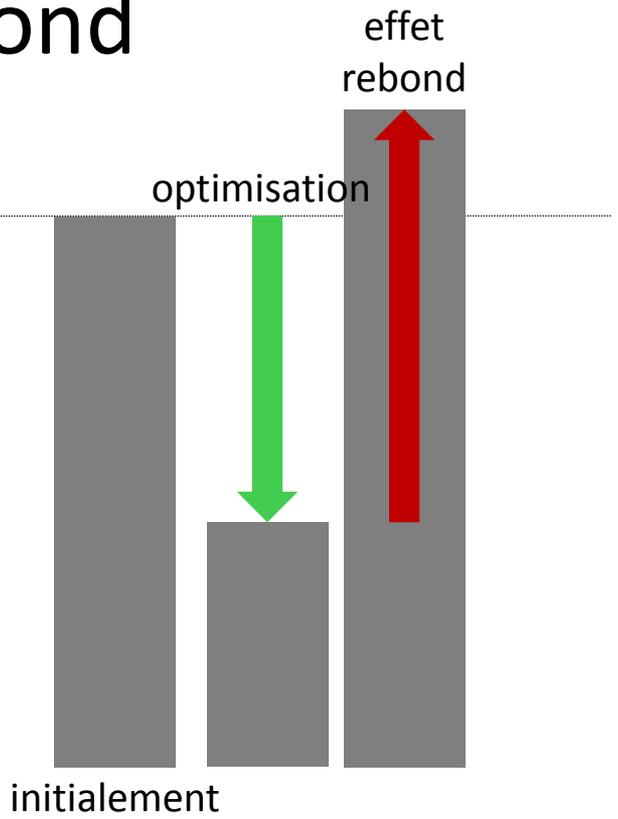
Effet rebond : demande peu élastique



Effet rebond

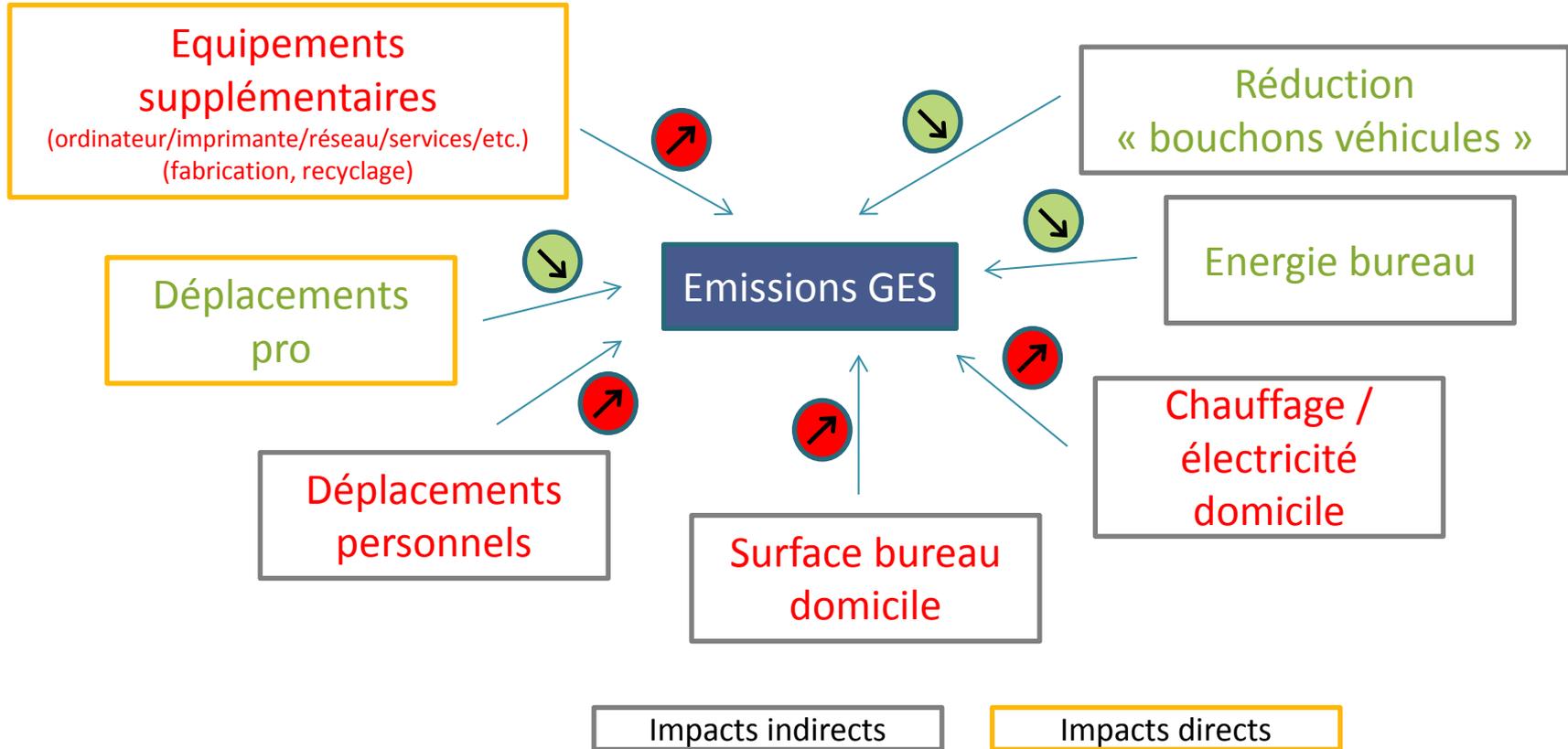


effet rebond $\leq 100\%$

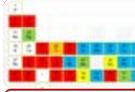
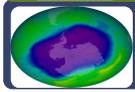
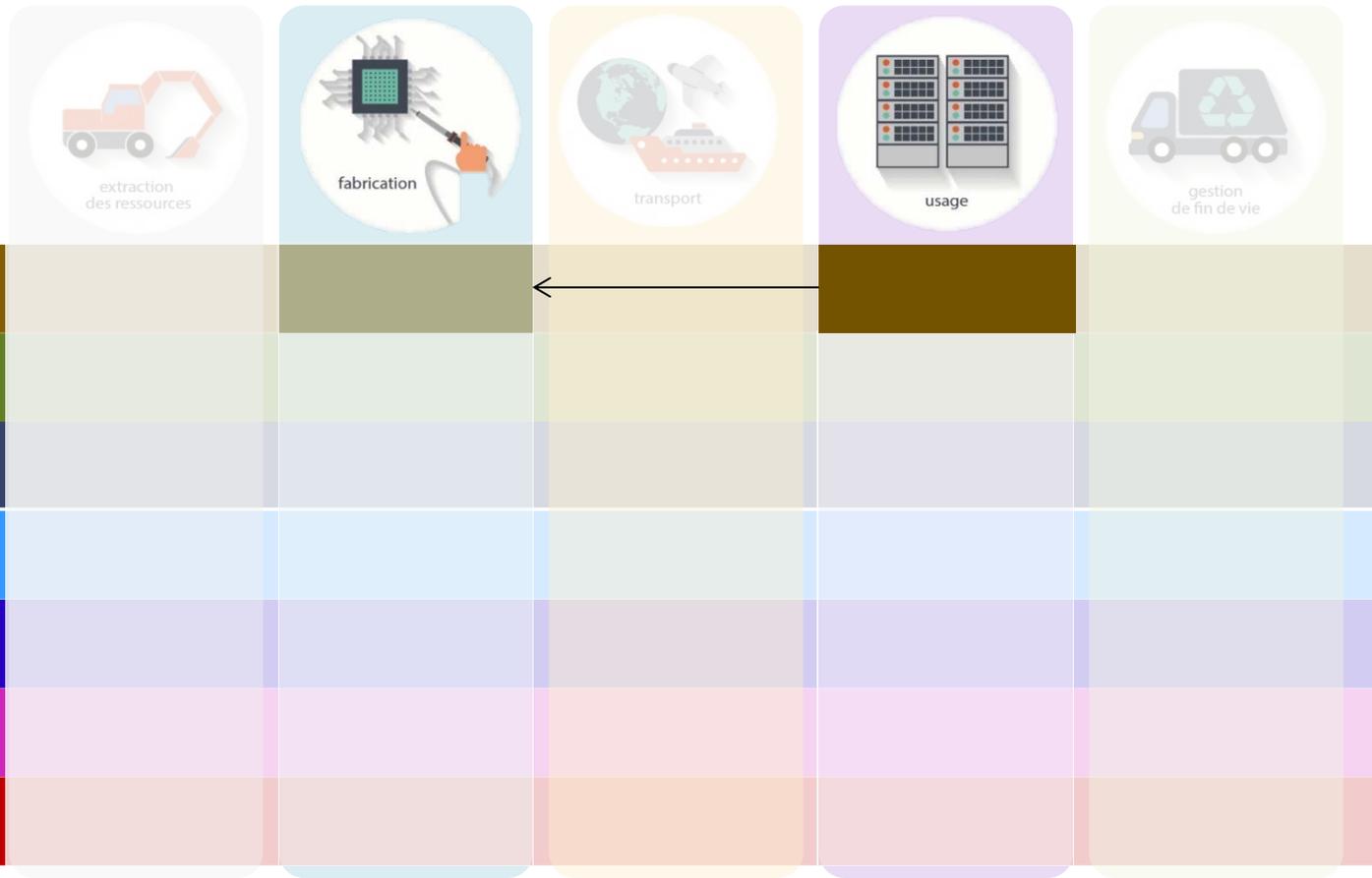


effet rebond $> 100\%$
(backfire)

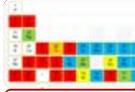
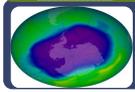
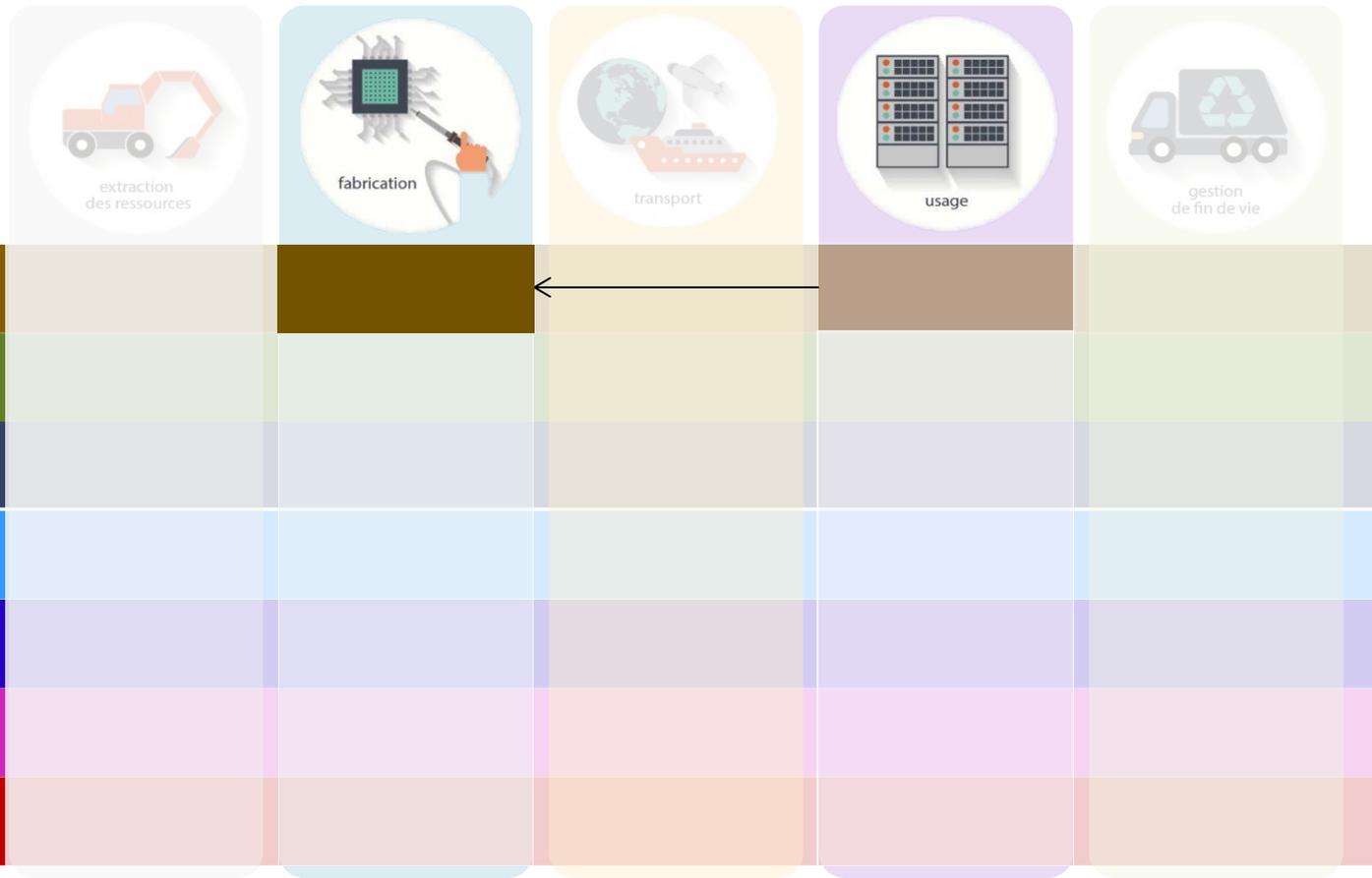
Exemple du télétravail



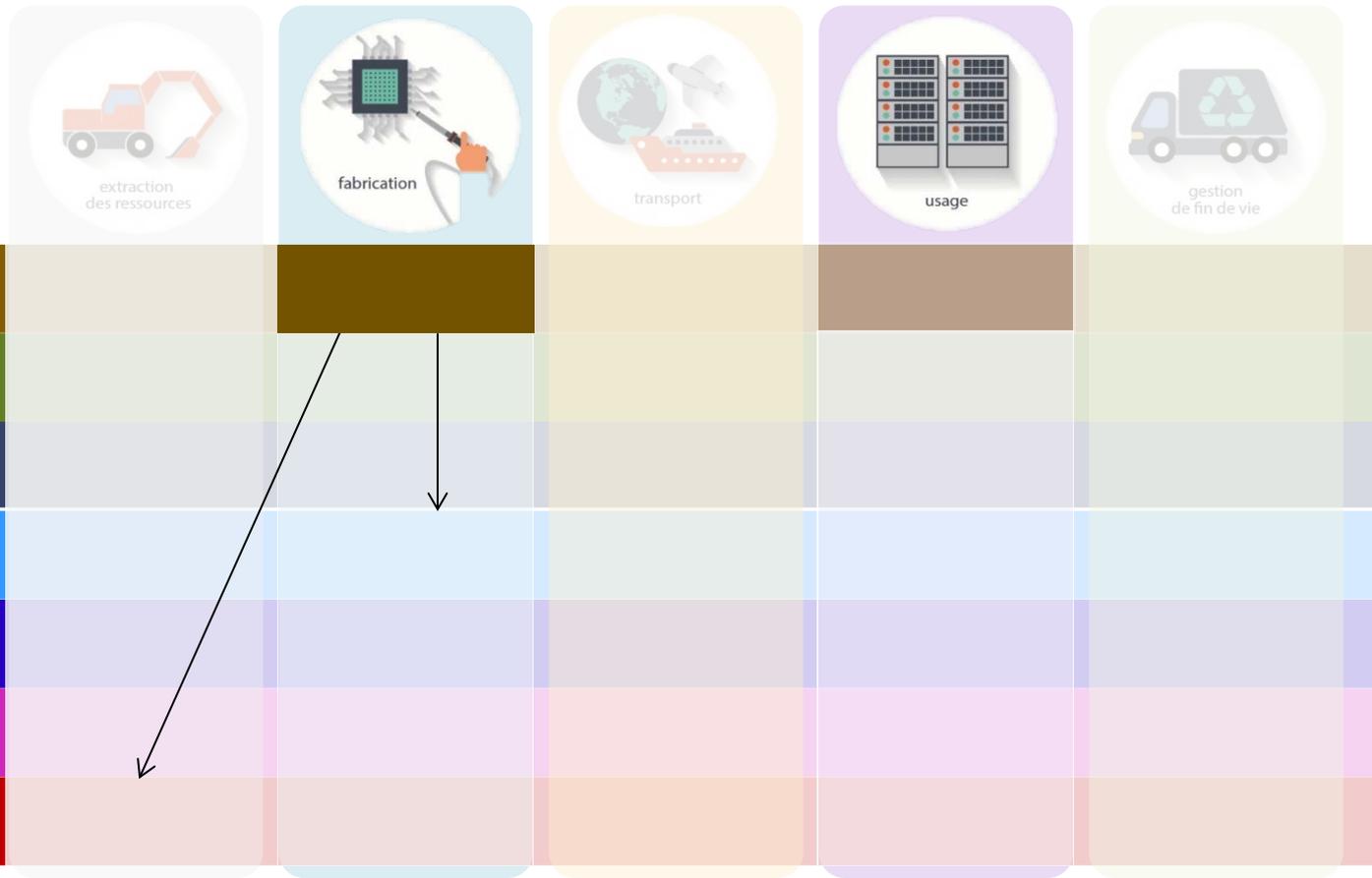
Transferts d'impacts



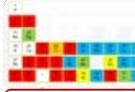
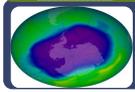
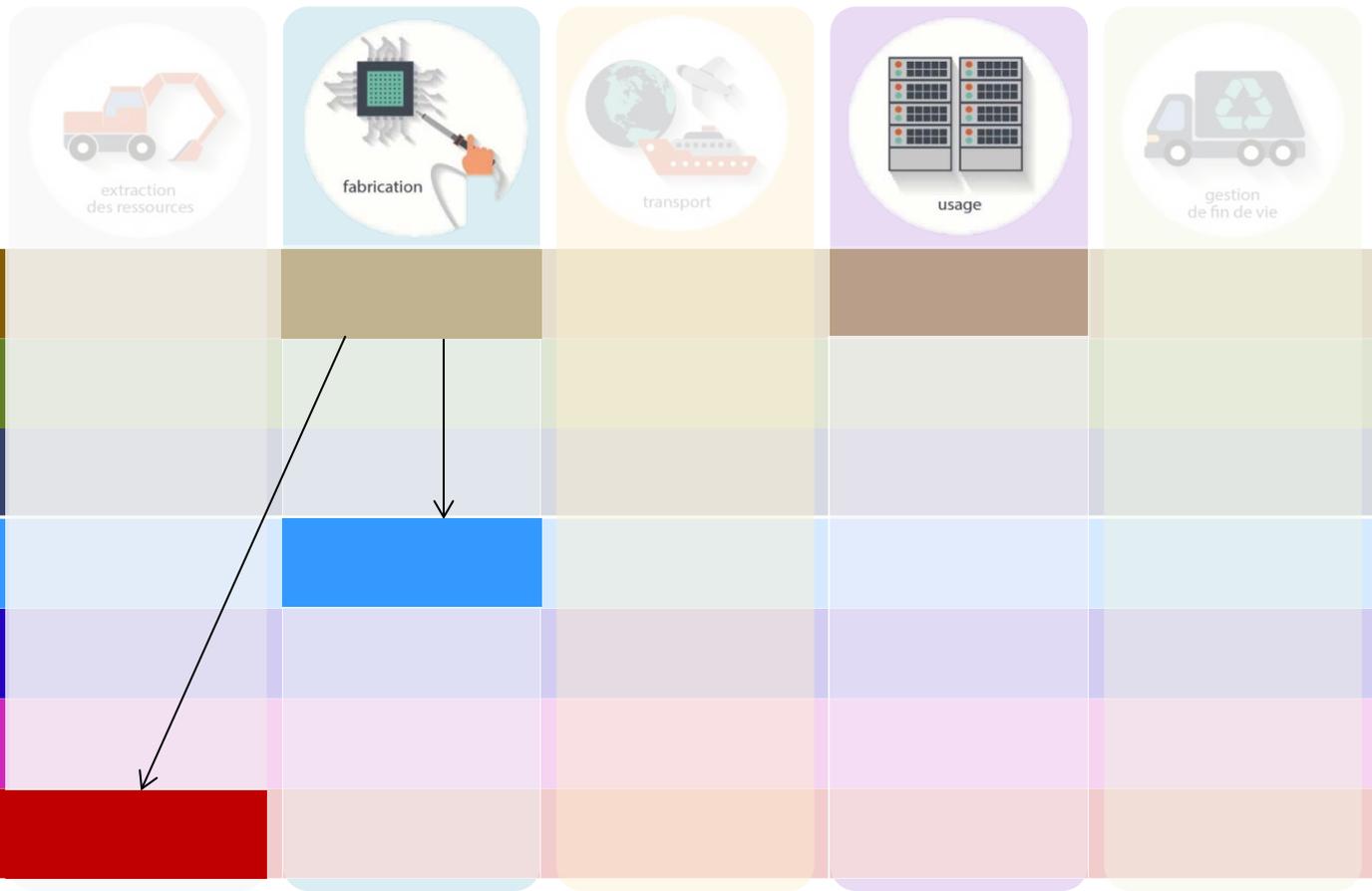
Transferts d'impacts



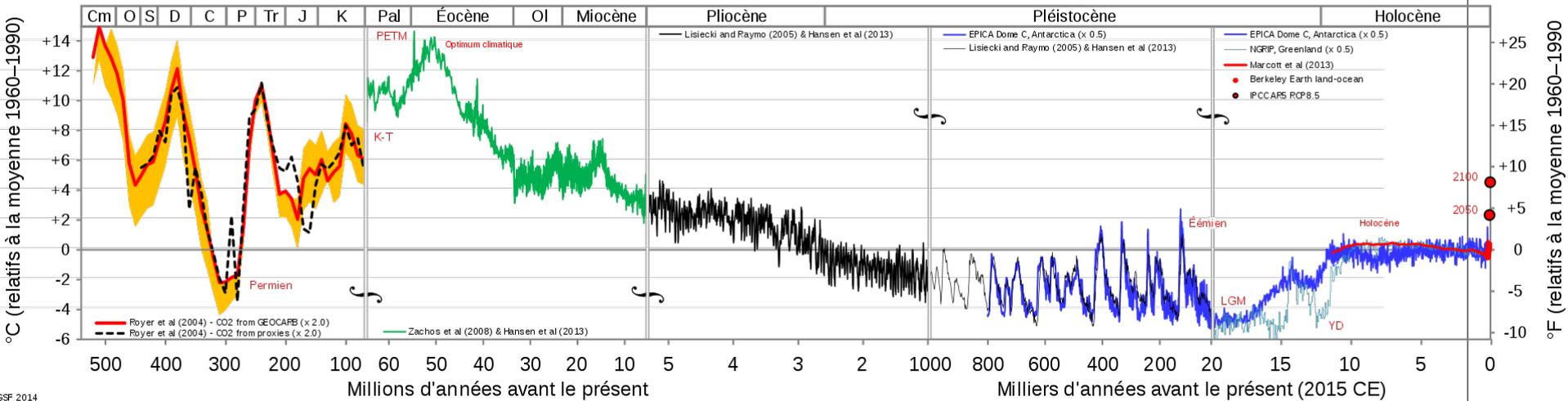
Transferts d'impacts



Transferts d'impacts

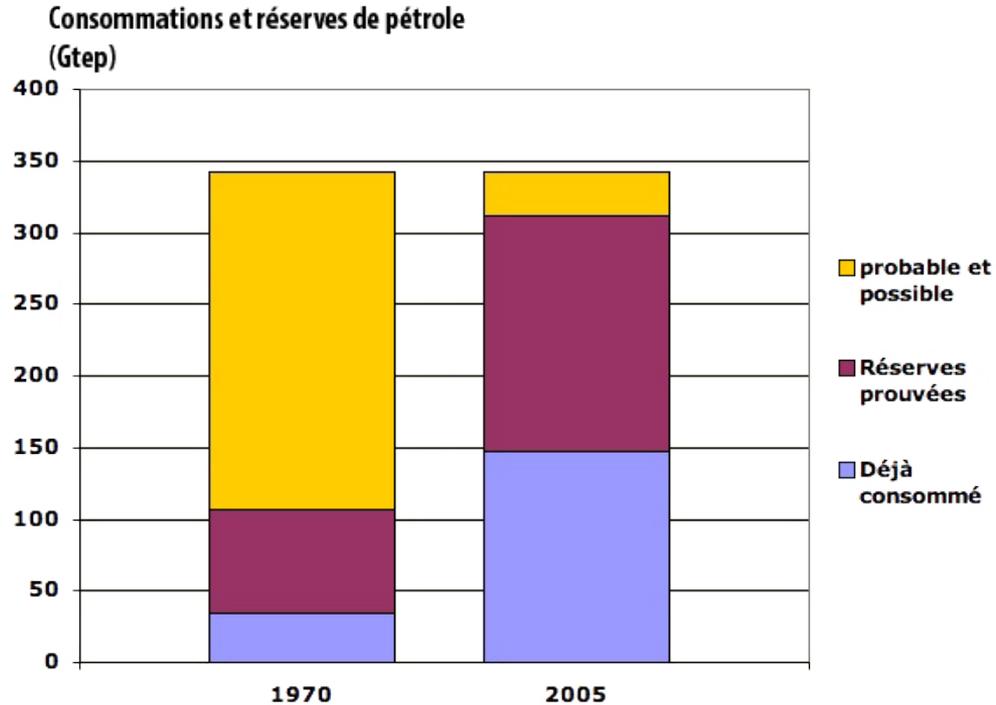


Paléotempératures sur Terre



SF 2014

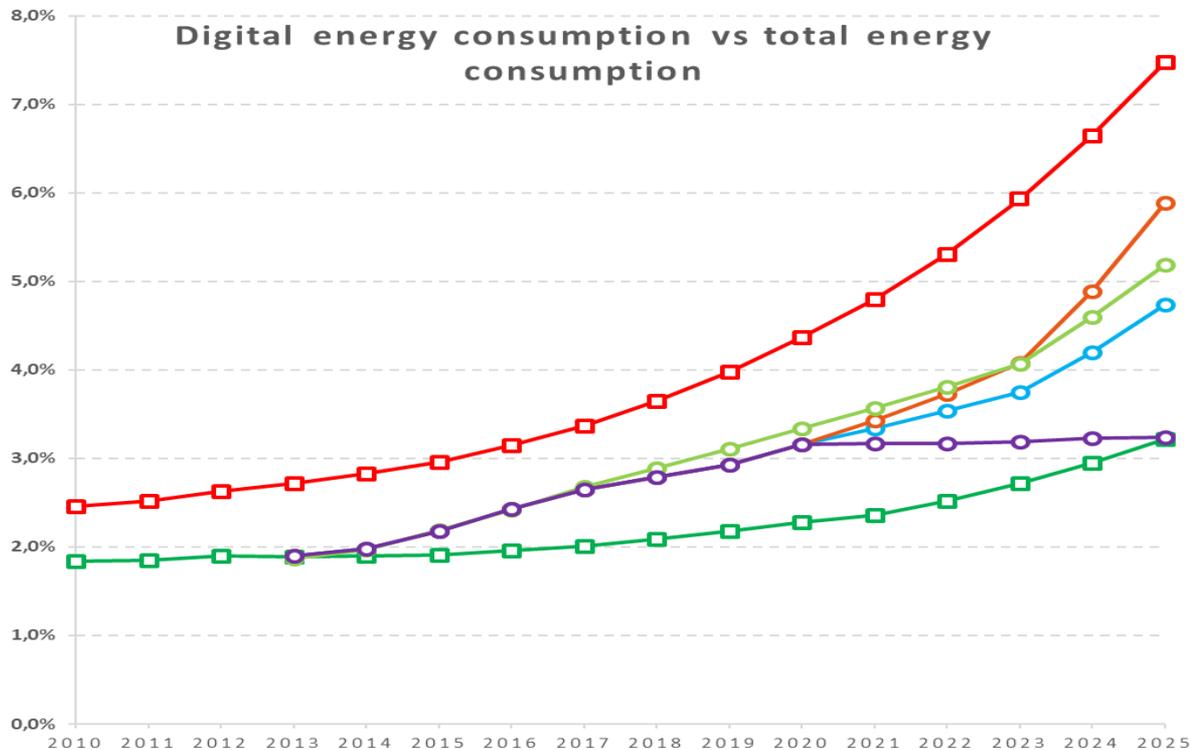
Réserves de pétrole



Consommation énergétique des TIC



- [Andrae&Edler-2015] WORST CASE
- [TSP-2018] HIGHER GROWTH HIGHER EE
- [Andrae&Edler-2015] EXPECTED
- [TSP-2018] SUPERIOR GROWTH PEAKED EE
- [TSP-2018] EXPECTED UPDATED
- [TSP-2018] SOBRIETY



source : leanICT, shift projet