Quelques enjeux écologiques autour du numérique

Kevin Marquet
Kevin.Marquet@inria.fr
ecoinfo.cnrs.fr

Merci à
Jacques Combaz (EcoInfo),
Françoise Berthoud (EcoInfo)
Pierre-Yves Longaretti (STEEP)

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 misère généralisée et une perte catastrophique de biodiversité », les scientifiques appellent l'humanité à changer radicale-

► Réchauffement climatique, biodiversité, déforestation... Tous les indicateurs montrent une dégradation continue de l'environnement sous

► Après trois années de stagnation, les émissions mondiales de CO_2 sont reparties à la hausse en 2017, portées notamment par la Chine

L'AFFAIRE DU SIÈCLE

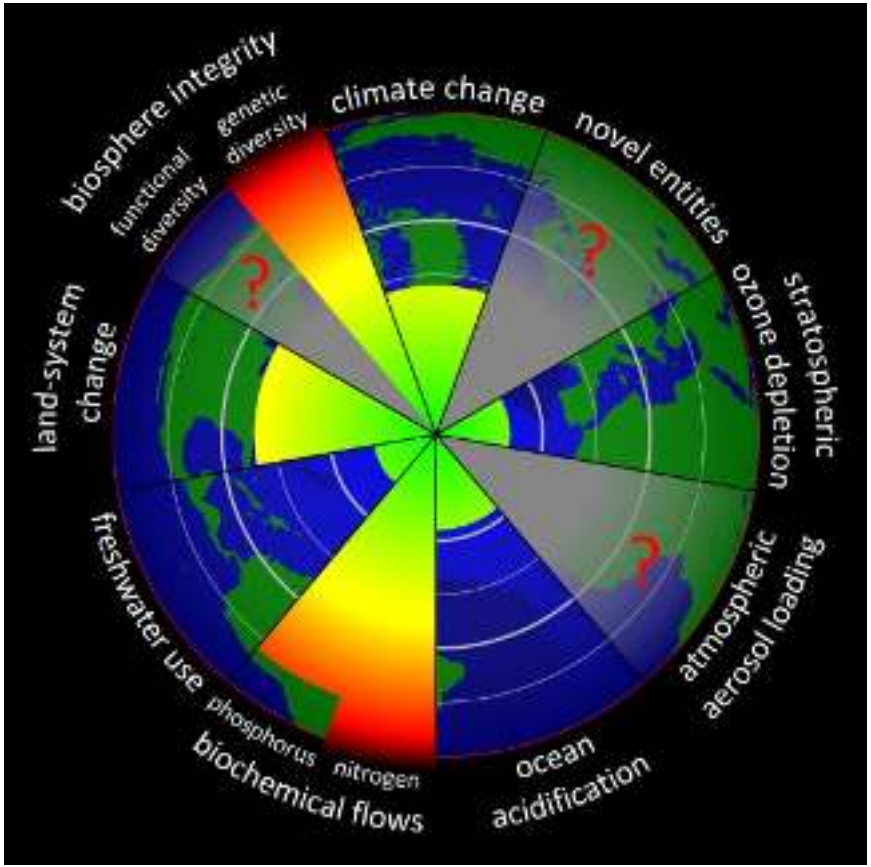
POUR LE CLIMAT ET LA BIODIVERSITÉ

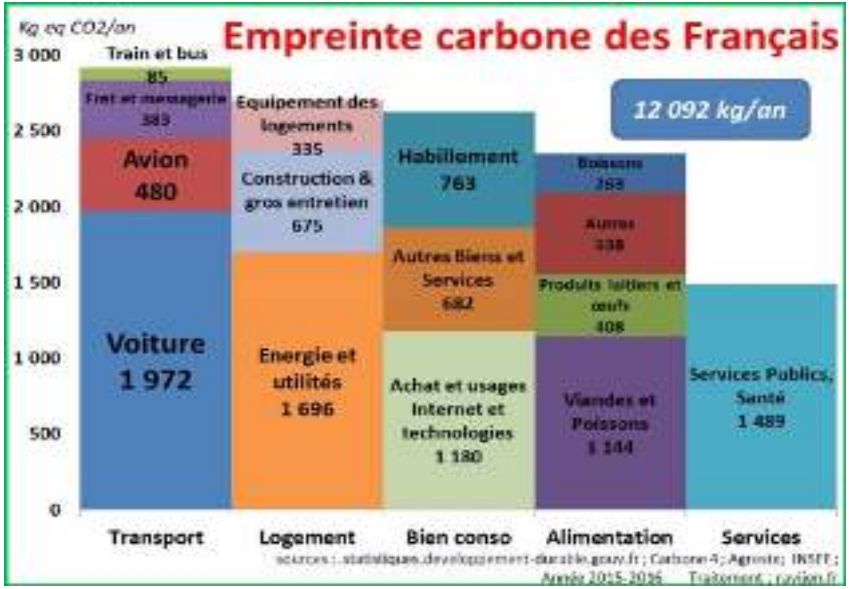
IL EST ENCORE TEMPS

#UrgenceClimat

Manifeste étudiant pour un réveil écologique

Autres limites planétaires





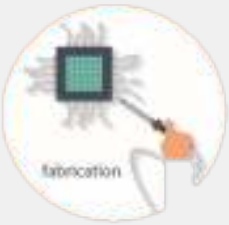
Source : http://ravijen.fr/?p=440

Pression = Activités x Population → **Impacts** → **Limites**

→ **Impacts**

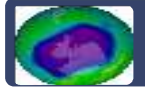
- 1er ordre (impacts directs)
- 2ème ordre (substitution optimisation)
- 3ème ordre (changement sociétés)

Impact environnemental des TIC



Consommation d'énergie primaire

Changement climatique



Destruction de la couche d'ozone

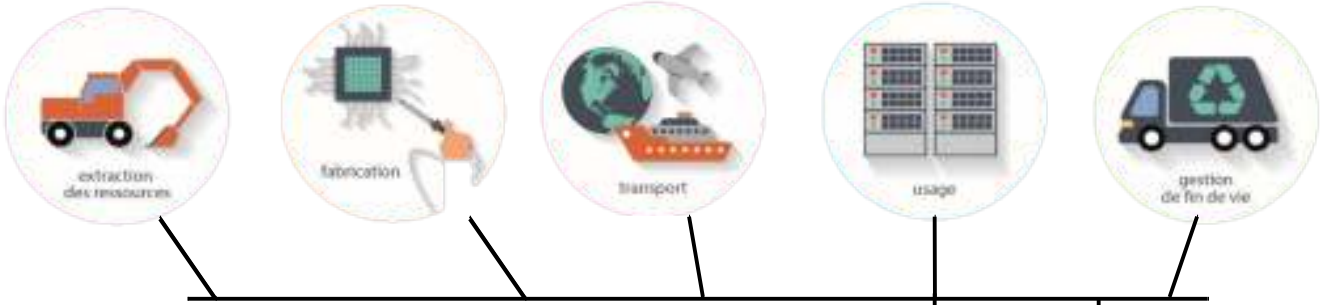
Toxicité humaine
Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour l'homme

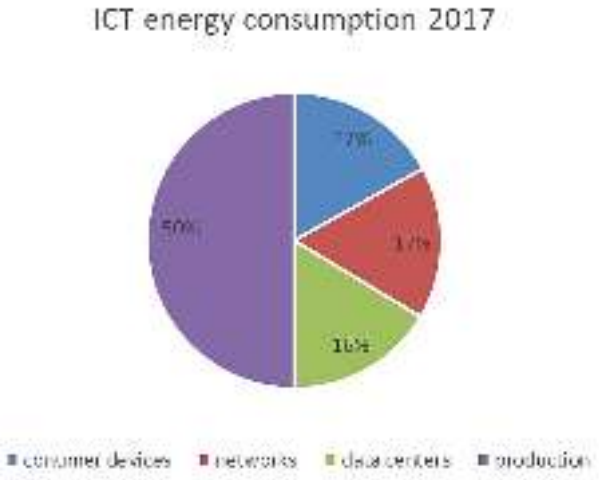
Ecotoxicité aquatique
Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour la faune et la flore aquatique

Déplétion des métaux

Consommation d'eau

TIC et GES





source : leanICT, shift projet

Consommation d'énergie électrique
8%

Consommation d'énergie primaire
4%

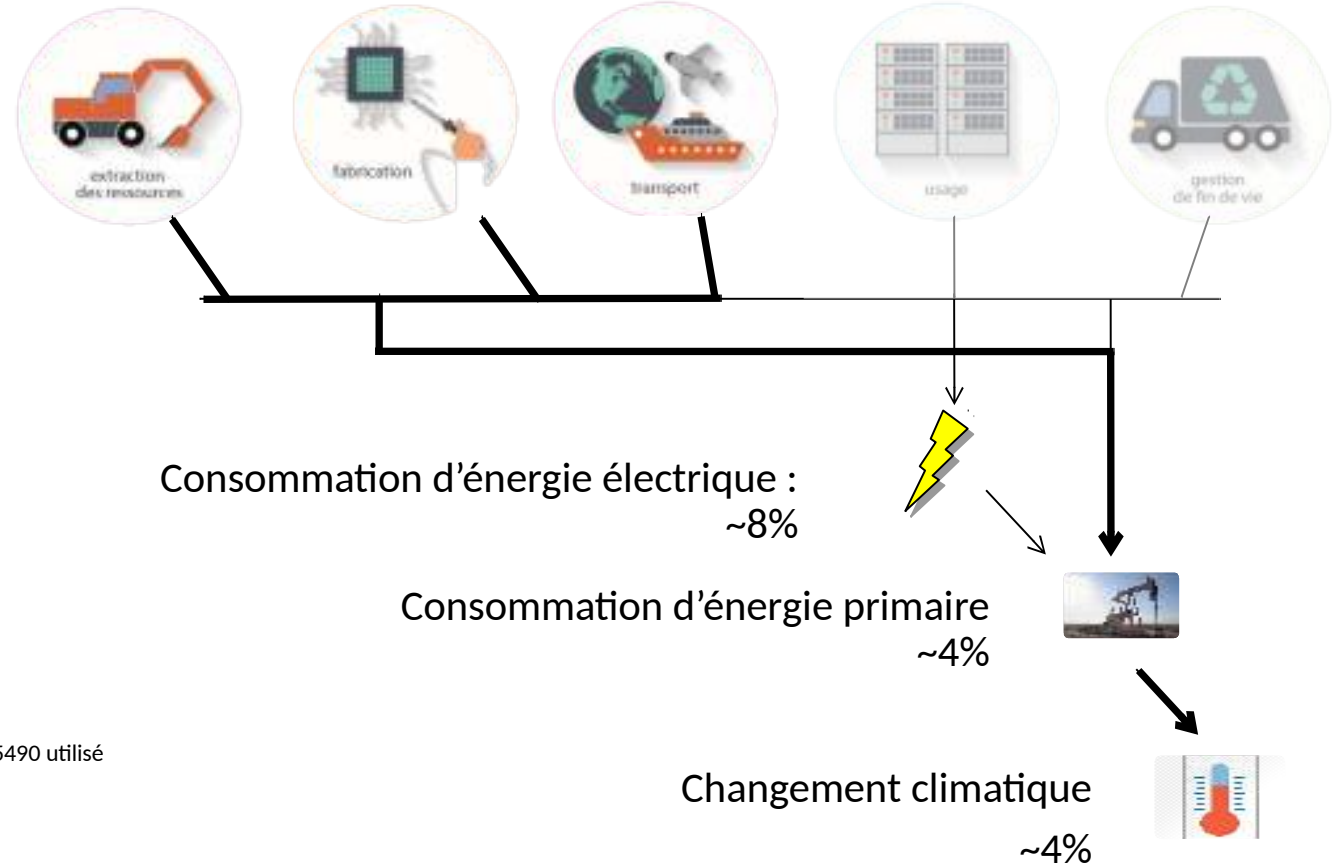
Changement climatique
4%

Tendance : +8% par an

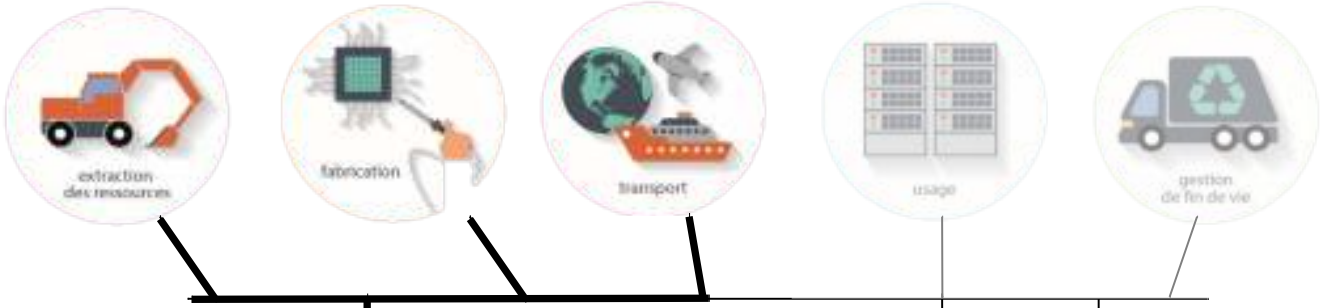
TIC et GES

Laptop pro gardé 3 ans (utilisé en France – hors internet): Plus de 95 % des GES (kg eq CO2)

source : Données DELL pour un Latitude 5490 utilisé 8h/jour 200 jours par an



TIC et GES



Consommation d'énergie électrique : 6 à 10%

Consommation d'énergie primaire : entre 3 et 4%

Changement climatique : entre 3 et 4%

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

* : hors réseau/data centers

TIC et 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)

source : leanICT, shift projet

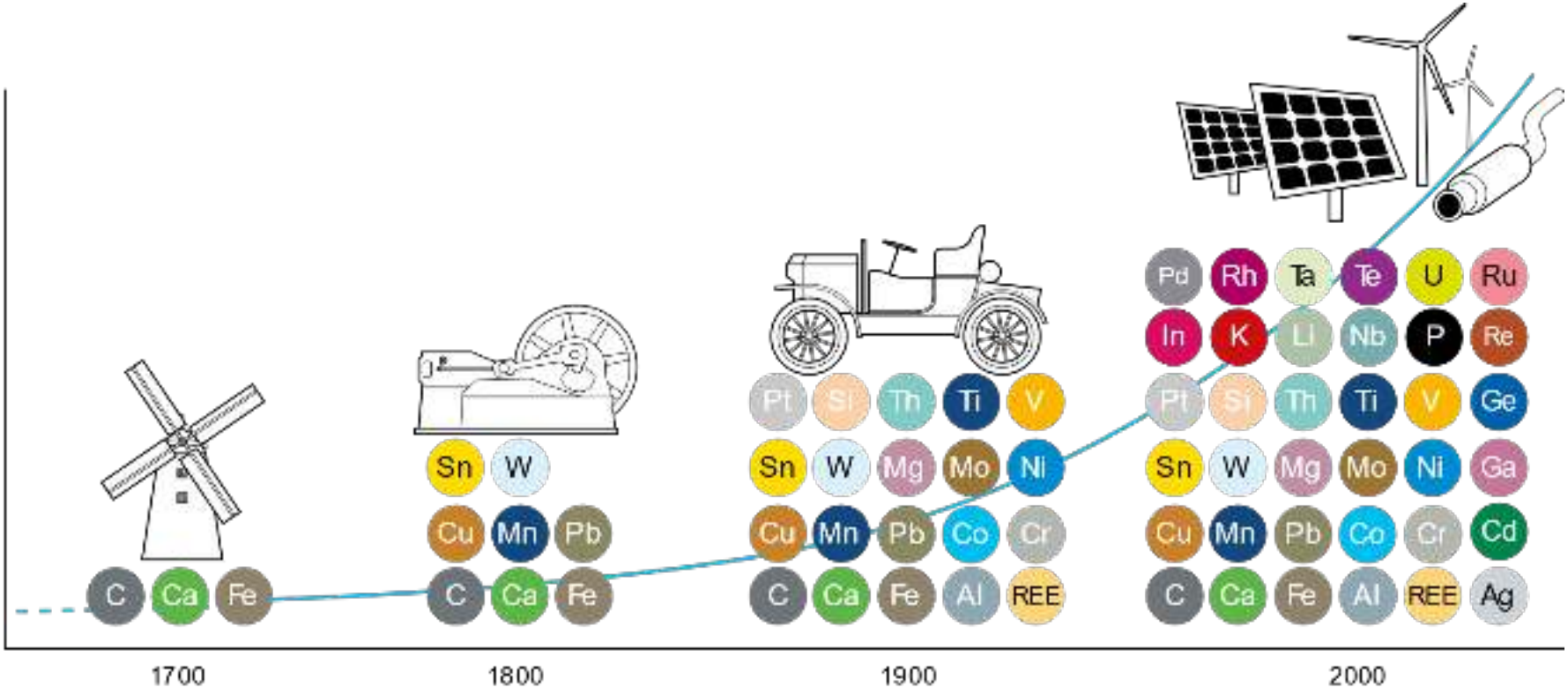
TIC et GES

	g eq CO2
1 vol Paris-Nice[1]	170 000
1 vol Paris – New York[1]	1 000 000
1 TGV Grenoble-Paris[2]	1 538
1 km en voiture pour 1 passager, s'il est seul dans sa voiture / si 4 passagers[3]	140 / 35
1 repas classique avec boeuf / végétarien [4]	6 890 / 510
1 feuille A4[5]	10

	g eq CO2
Fabrication / transport d'un laptop (latitude 5490)[6]	200 000 / 11 000
Fabrication / transport d'un écran (24'')[6]	350 000 / 25 000
Usage pendant 1 an laptop+écran (France, hors internet)[7]	10 000
1h.coeur de calcul (mésocentre, hors fabrication des serveurs) [7]	2,8
Fabrication / transport d'un serveur (R740)[6]	1 060 000 / 200 000

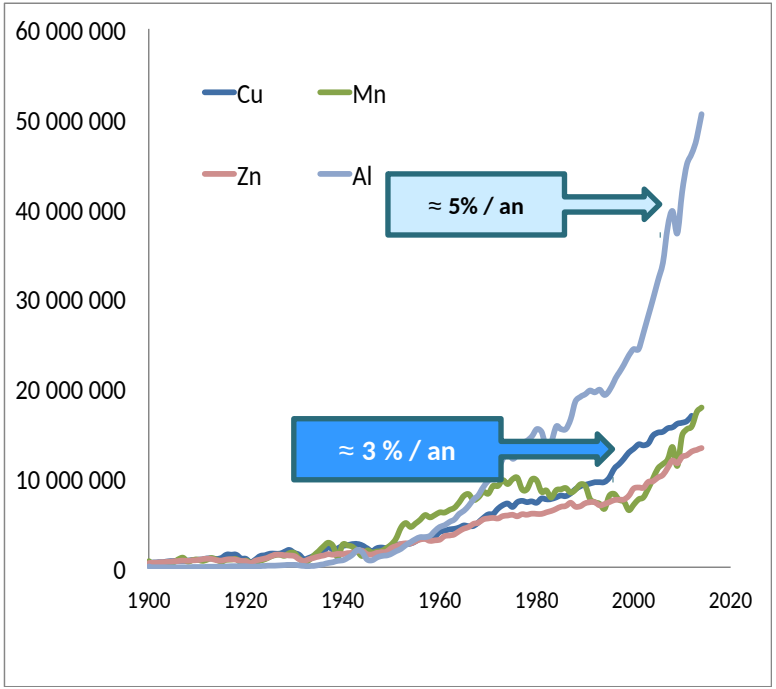
[1] https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/
[2] "
[3] Basé sur un véhicule émettant 140gCO2/km
[4] http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?repas.htm
[5] Estimation groupe dd-batimag
[6] https://www.dell.com/learn/us/en/uscorp1/corp-comm/environment_carbon_footprint_products)
[7] Estimation groupe EcoInfo (prise en compte climatisation et nombre d'heures de calcul effectif dans l'année, facteur d'impact : 0,119 kgCO2e/kwh)

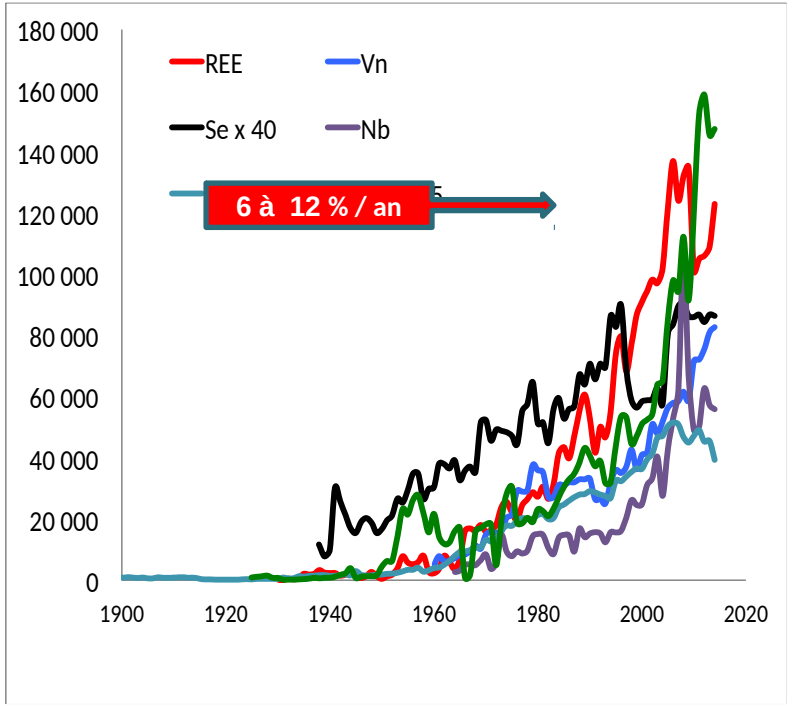
Les métaux dans les TIC



Source: V. Zepf, 2014

Les métaux dans les TIC





Source: V. Zepf, 2014

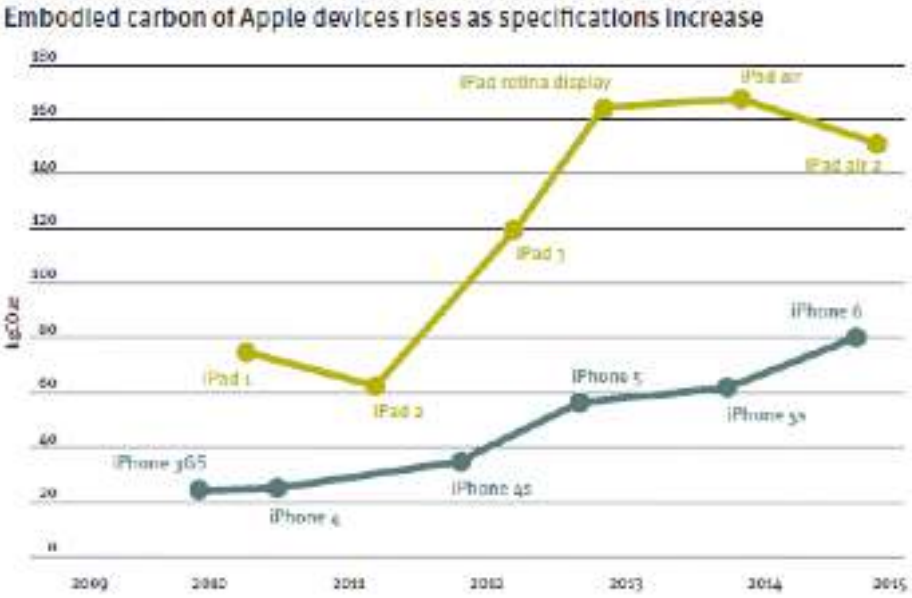
Les métaux dans les TIC

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

Sources : Ademe ; Sénat (rapport n° 850, 09/2015) ; Wuppertal Institut (2012), évaluation selon l'approche poids-matière de l'écologiste Friedrich Schmidt-Bleek
Infographie : Bertrand Gallet

Source: V. Zepf, 2014

Les métaux dans les TIC



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

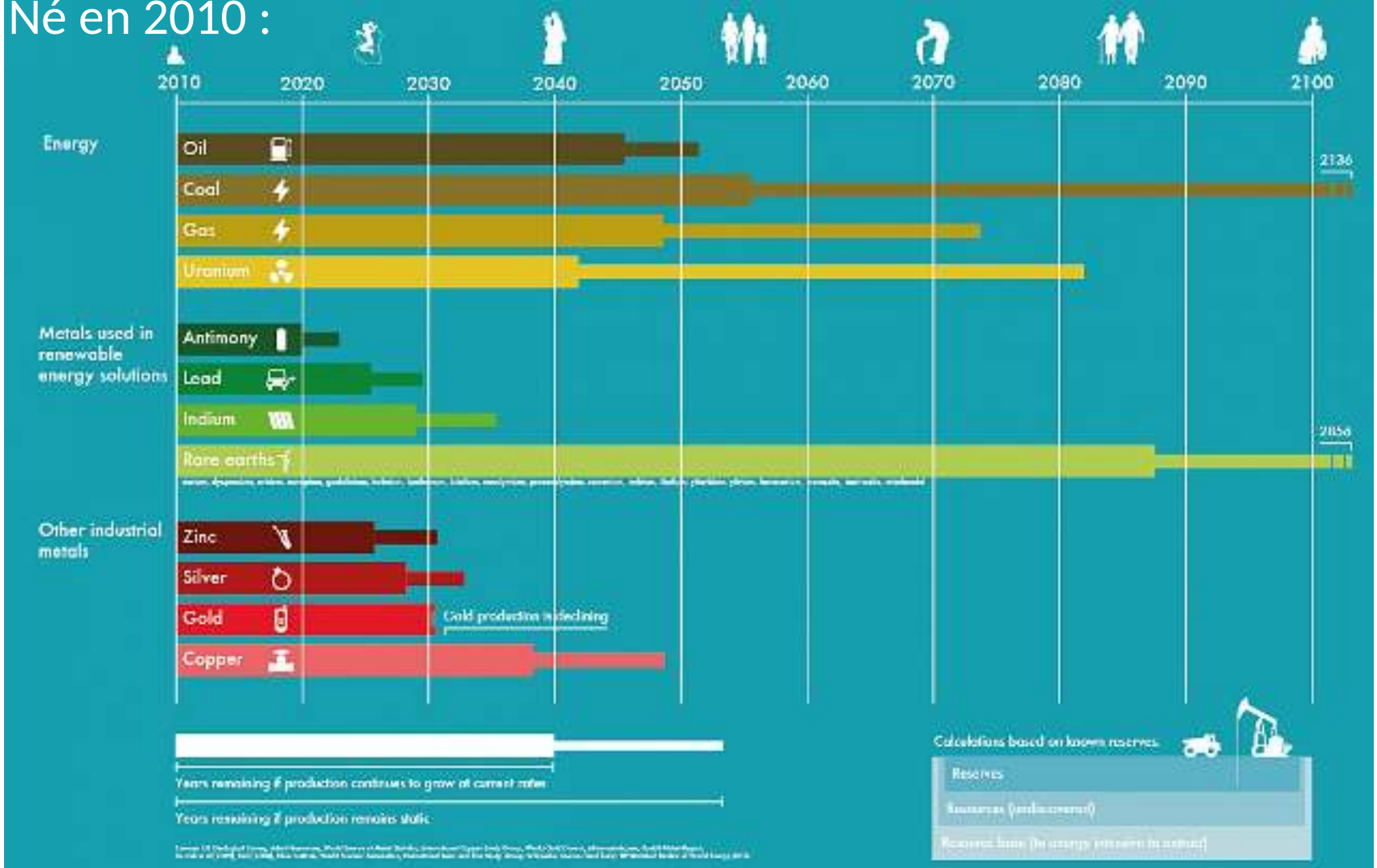
Source: V. Zepf, 2014

Poids des TIC dans la demande mondiale

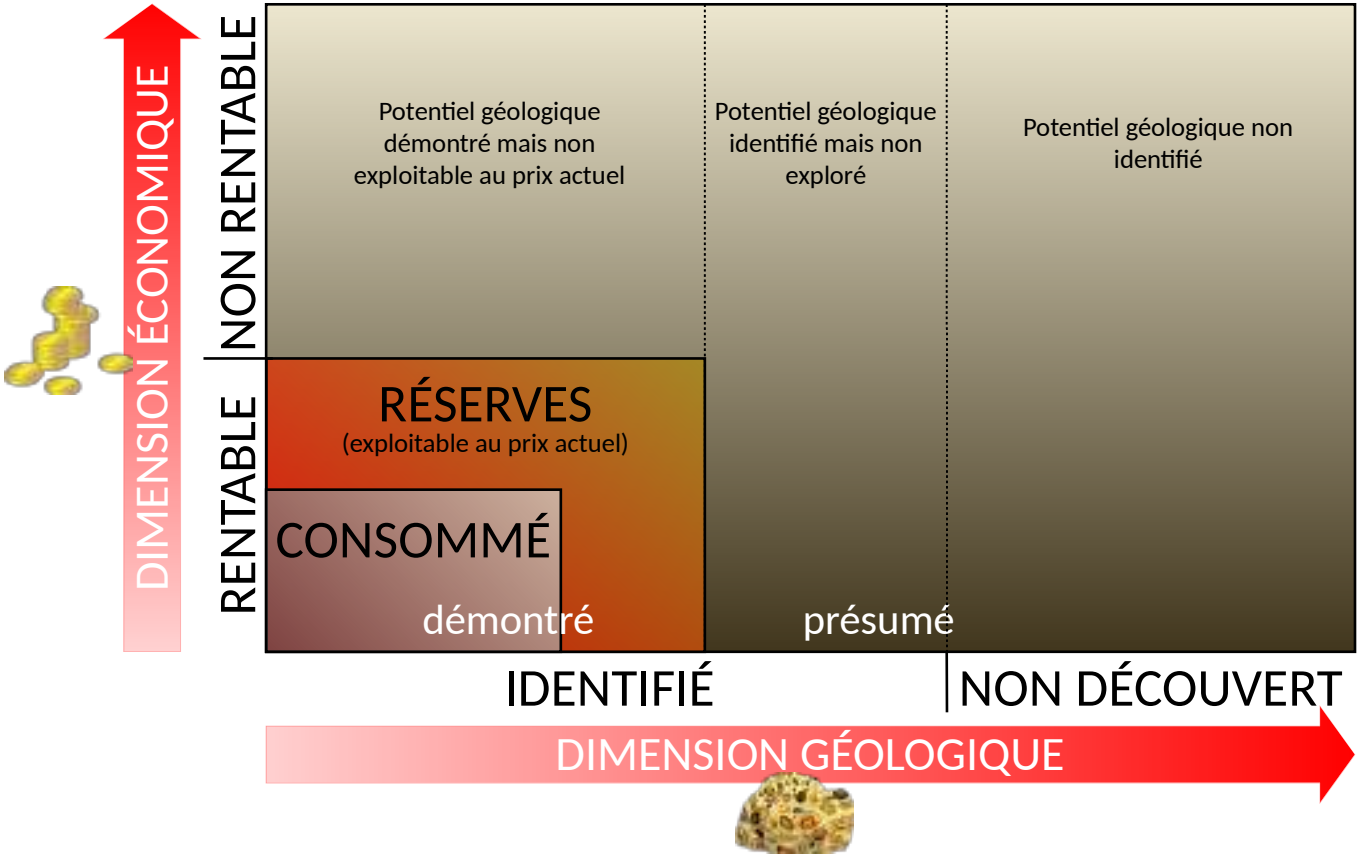
Métal	Production totale en tonnes (2013)	Part du secteur électronique	Exemples d'utilisation
Cuivre	18,7 millions t.	6 %	3 % équipement, 3 % telecoms
Étain	296 000	35 %	Brasures
Antimoine	160 000	< 20 %	Retardateur de flammes : ~35 %
Ruthérium	30	55 %	Disques durs
Tantale	1400	60 %	Condensateurs
Indium	800	80 %	Écrans
Gallium	440	90 %	Circuits intégrés
Germanium	160	30-50 %	Circuits intégrés
Lithium	36 000	20 %	Batteries
Cobalt	112 000	35 %	Batteries

Source : USGS 2015

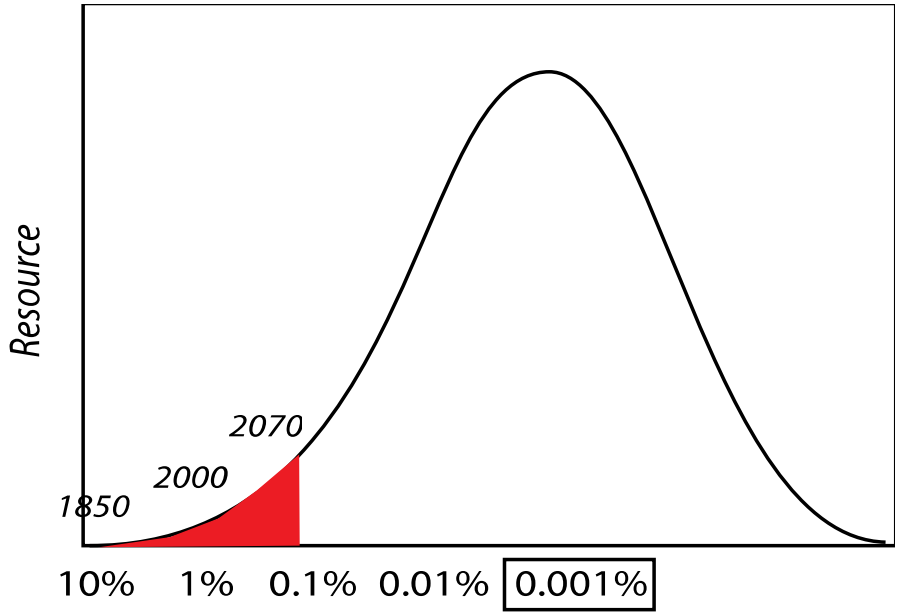
Né en 2010 :

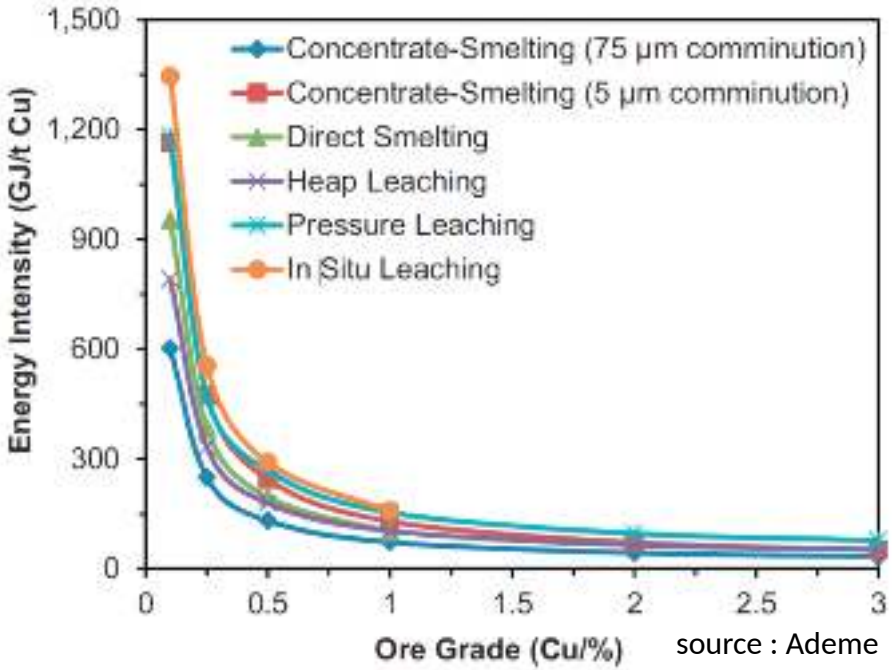

2010
2020
2030
2040
2050
2060
2070
2080
2090
2100
Energy
Oil
Coal
2136
Gas
Uranium
Metals used in renewable energy solutions
Antimony
Lead
Indium
2056
Rare earths
Other industrial metals
Zinc
Silver
Gold
Gold production is declining
Copper
Years remaining if production continues to grow at current rates
Years remaining if production remains static
Calculations based on known reserves
Reserves

Attention à la notion de réserves



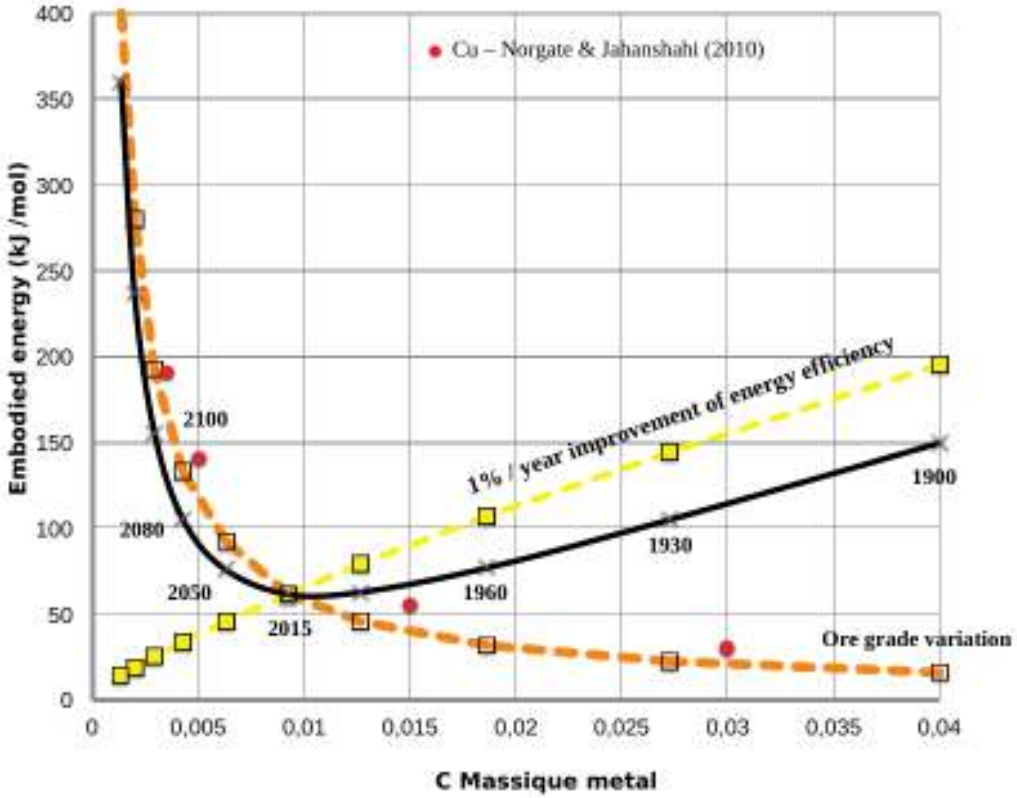
Concentration / Énergie (Cuivre)





source : Ademe

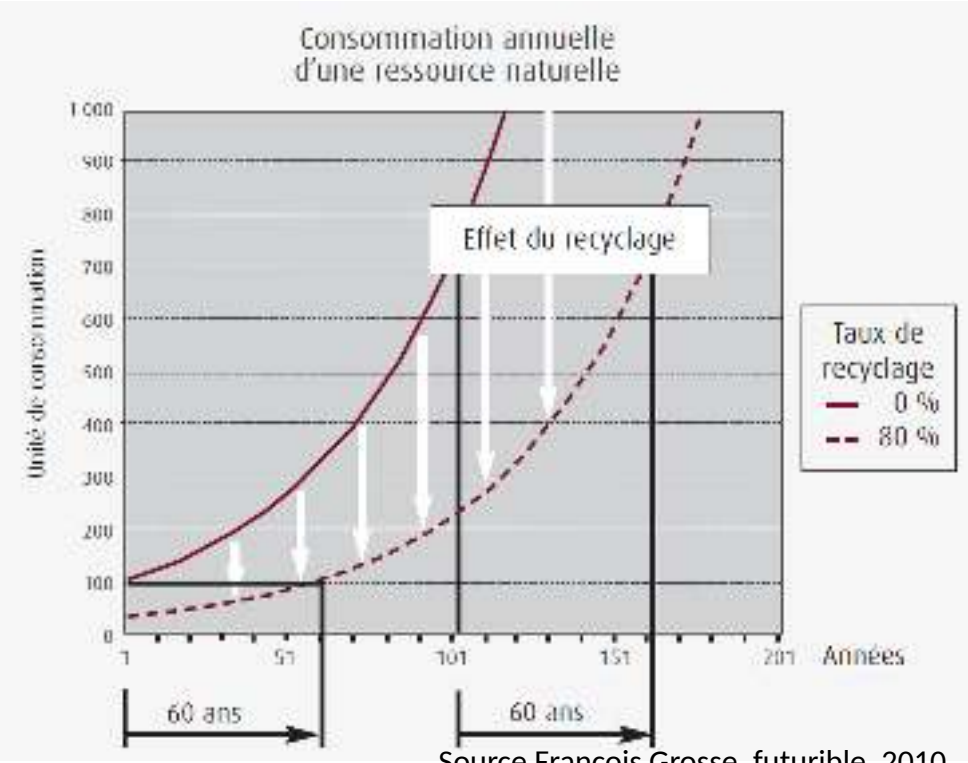
Energie d'extraction (cuivre)



Source : Vidal, INRIA, 2019

Effet du recyclage

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

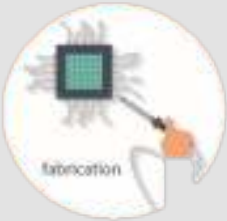


Source François Grosse, futurible, 2010

Demande exponentielle + recyclage :

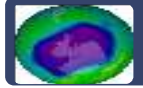
- production = demande mais décalée
- même avec un taux de recyclage à 100% !

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

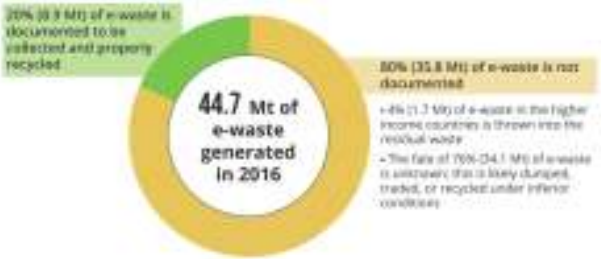
Ecotoxicité aquatique
Émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour la faune et la flore aquatique

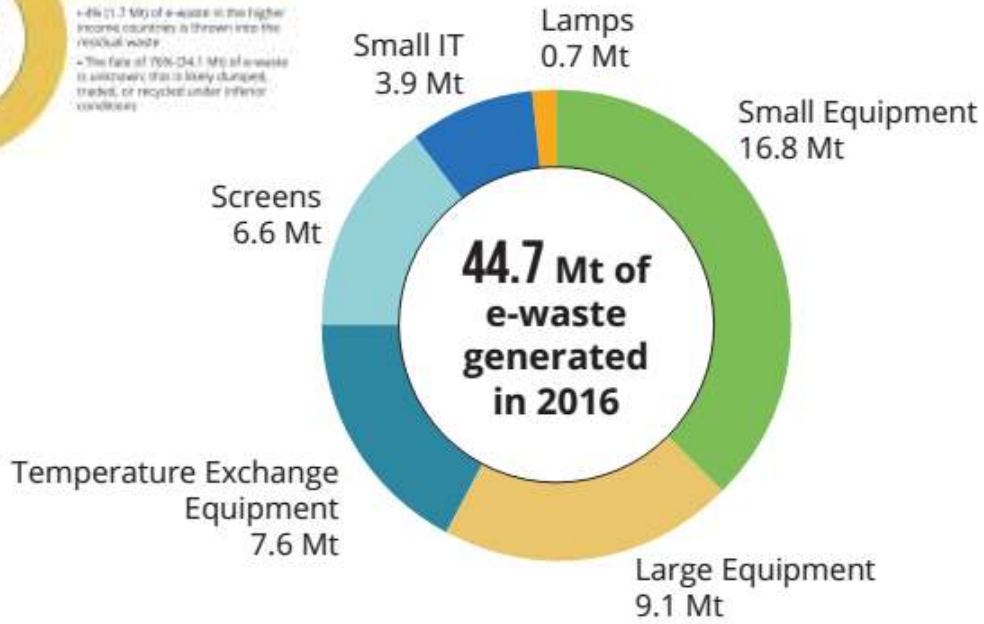
Déplétion des métaux

Consommation d'eau

Les déchets électriques et électroniques (DEEE)

17 à 24 kg DEEE par habitant



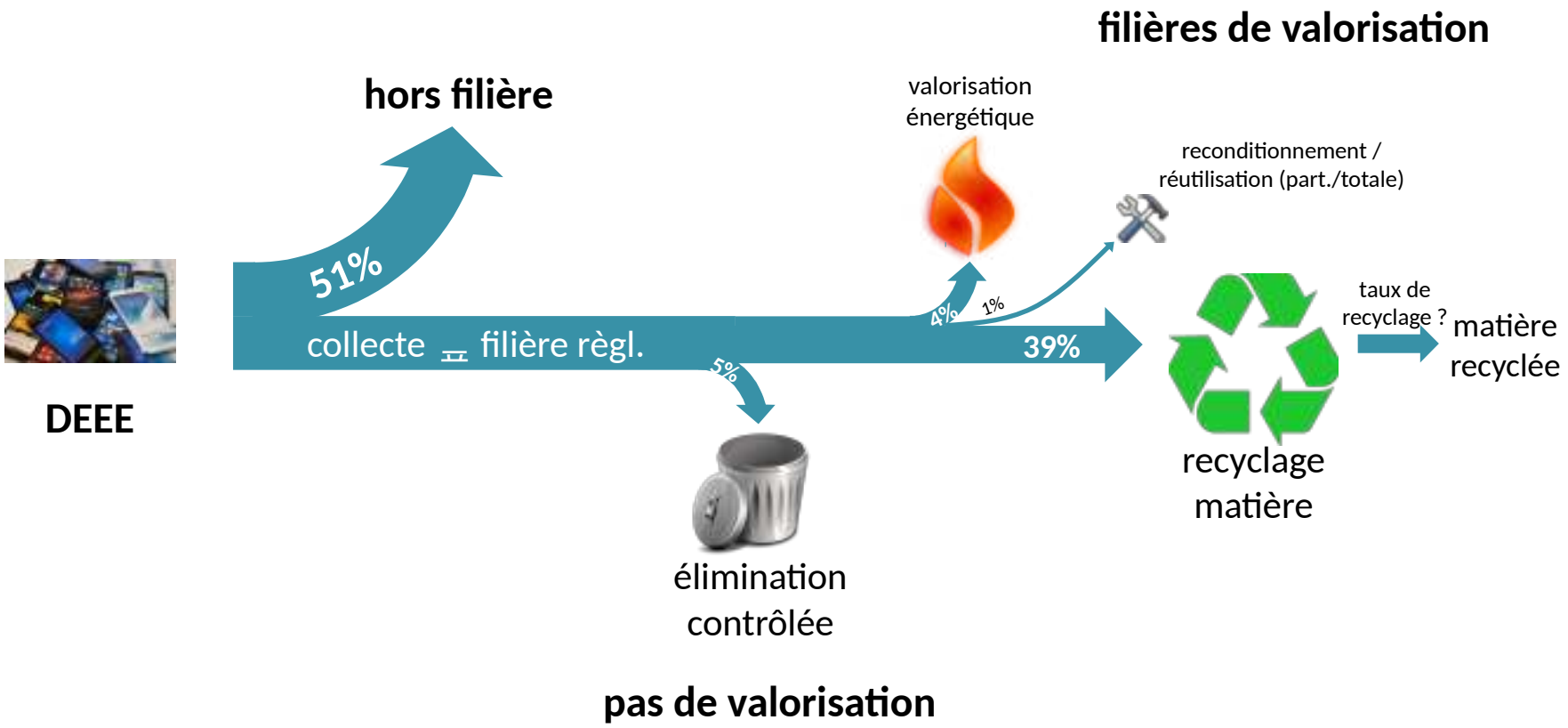


Taux de collecte

	2013	2015	2016
Filière règlementaire	35%	43%	49%
Hors filière	65%	57%	51%

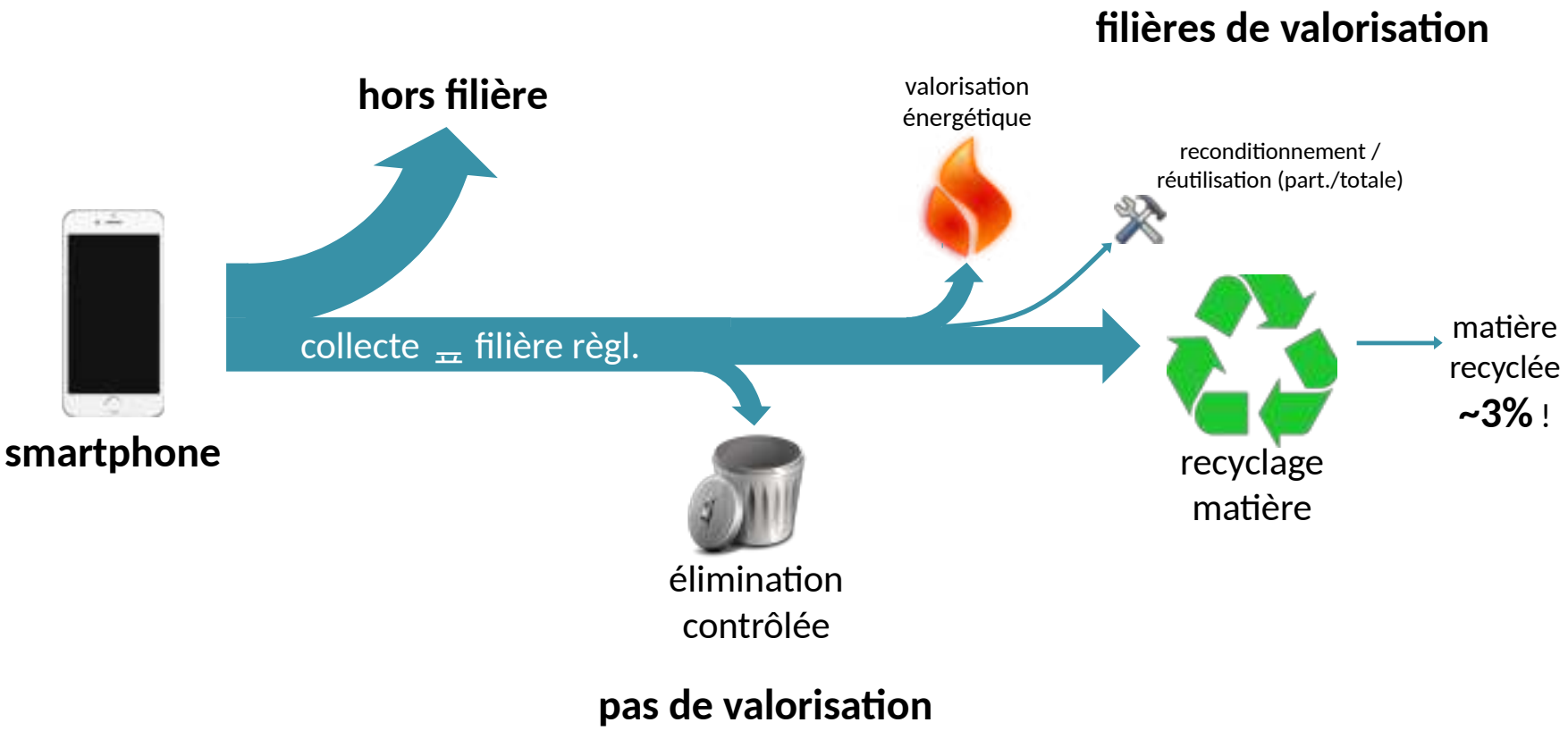
The global e-wastemonitor –2017, United Nations University.

Traitement des DEEE



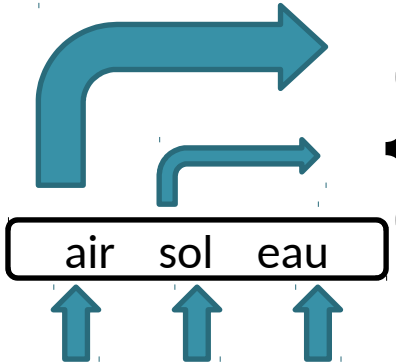
source : registre DEEE, Ademe, 2016

Traitement des DEEE



source : registre DEEE, Ademe, 2016

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 dégradable et bio-accumulables
- Phtalates (issus des plastiques) : bio-accumulables, persistants
- Solvants , agents tensio-actifs (bioamplification), composés chimiques perfluorés, dioxine, furane
- Etc.

Pression = Activités x Population → **Impacts** → **Limites**

Impacts ?

- 1er ordre (impacts directs)
- **2ème ordre (substitution optimisation)**
- 3ème ordre (sobriété matérielle, résilience)

Optimisation

- Transports
- Production énergie renouvelable
- Smartbuilding
- Smartcity
- Linky
- …

Substitution

- Dématérialisation
- Télétravail
- …

Exemple du covoiturage

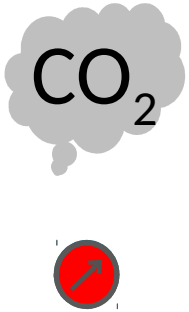
Exemple du covoiturage

Exemple du covoiturage

+

BlaBlaCar

=

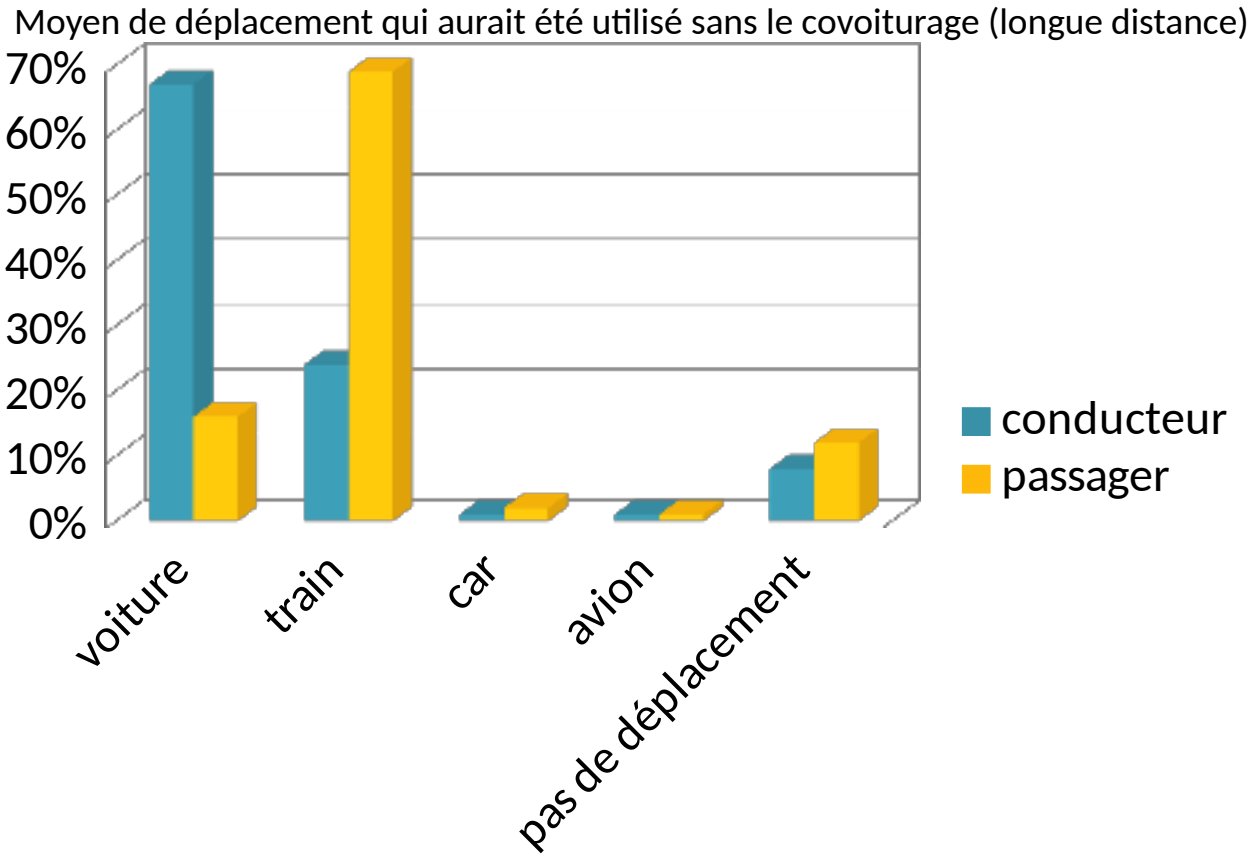


Exemple du covoiturage

Trajet moyen : 364 km

Motivations principales :

- économies 69 %
- convivialité 87 %



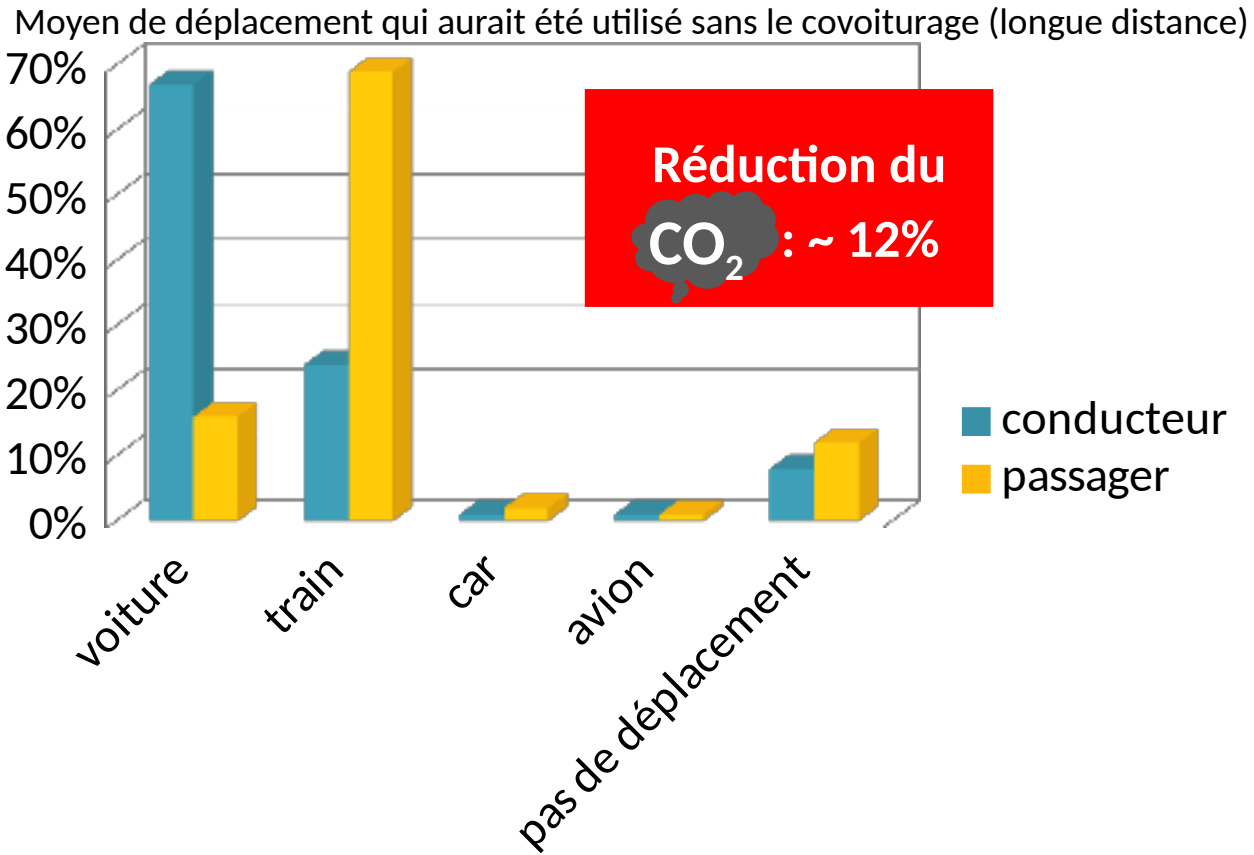
source : Ademe, 2015

Exemple du covoiturage

Trajet moyen : 364 km

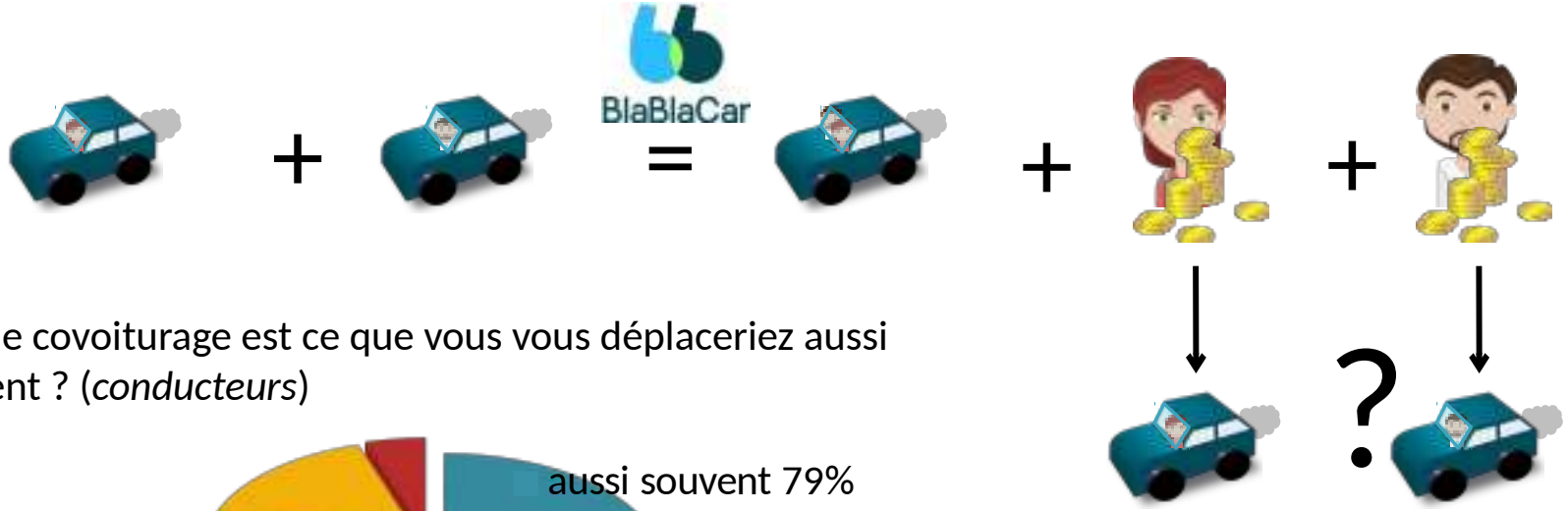
Motivations principales :

- économies 69 %
- convivialité 87 %

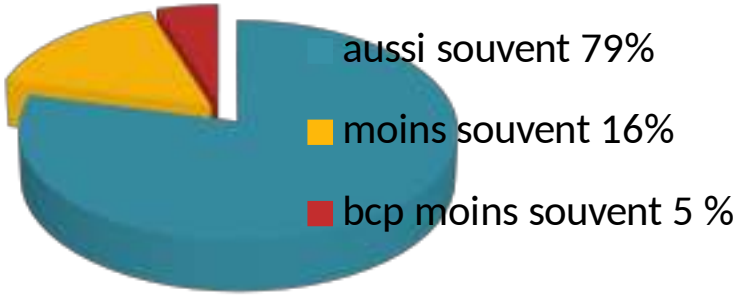


source : Ademe, 2015

Covoiturage : attention aux effets rebond



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

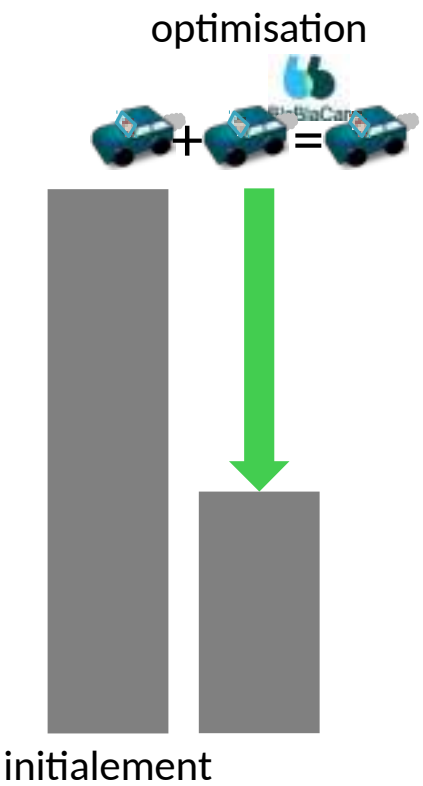


source : Ademe, 2015

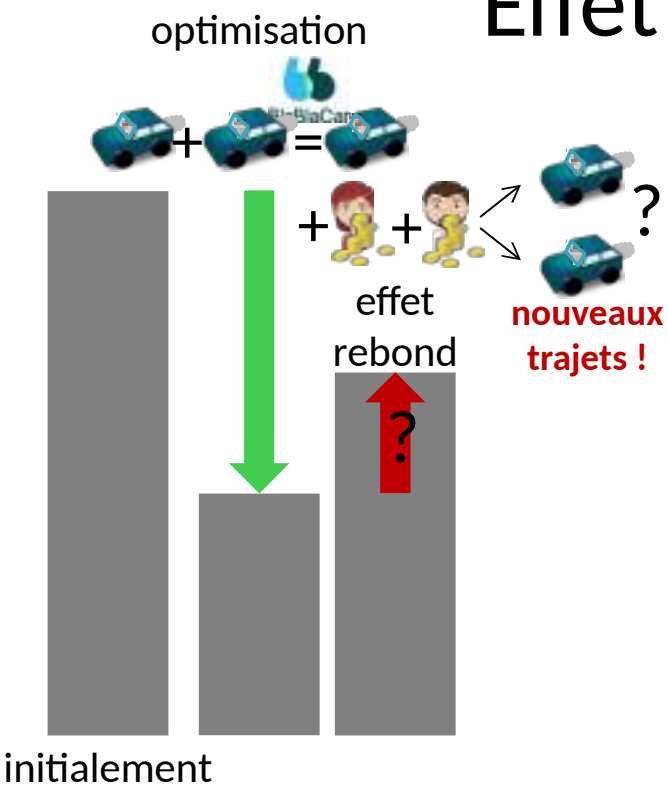
Nouveaux trajets !

pas pris en compte dans le calcul des 12 % de réduction de CO_2

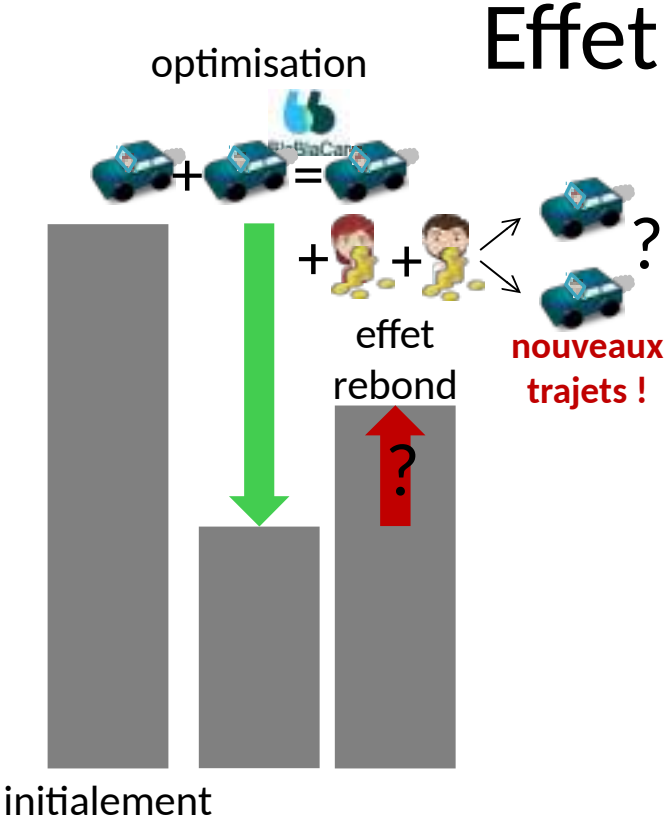
Effet rebond



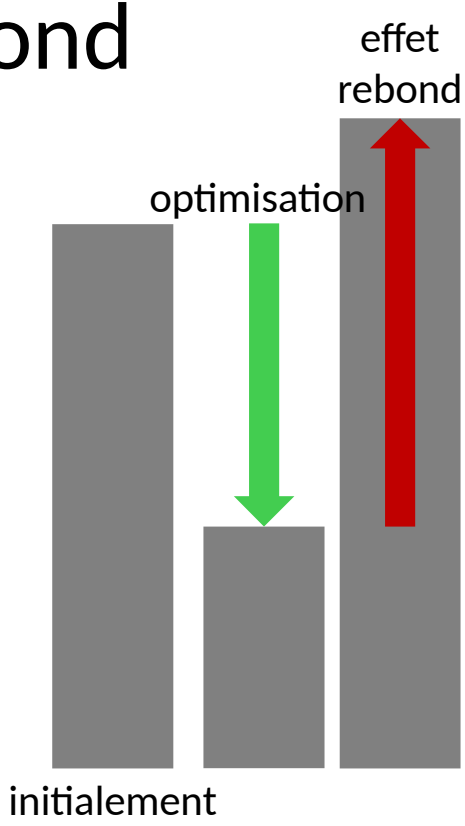
Effet rebond



Effet rebond

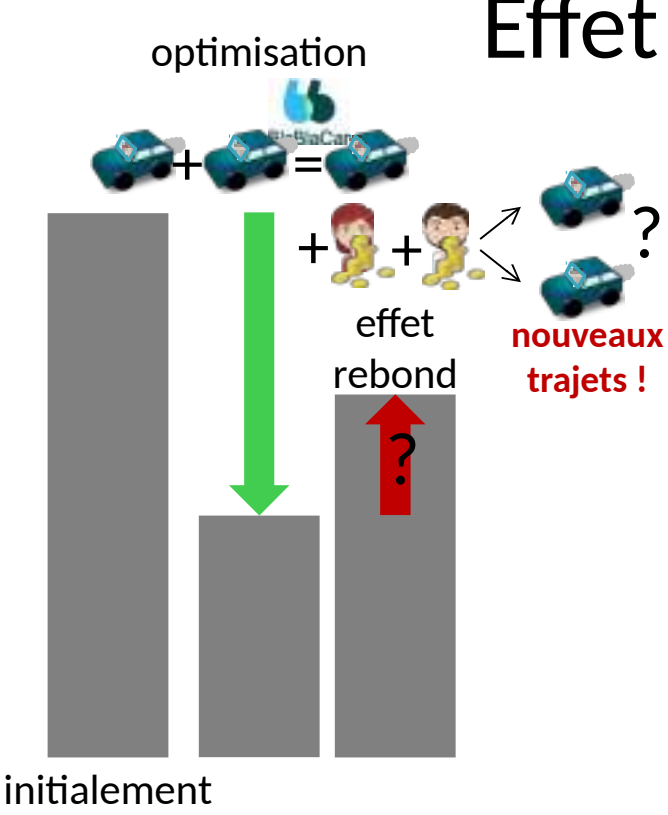


effet rebond <=100%

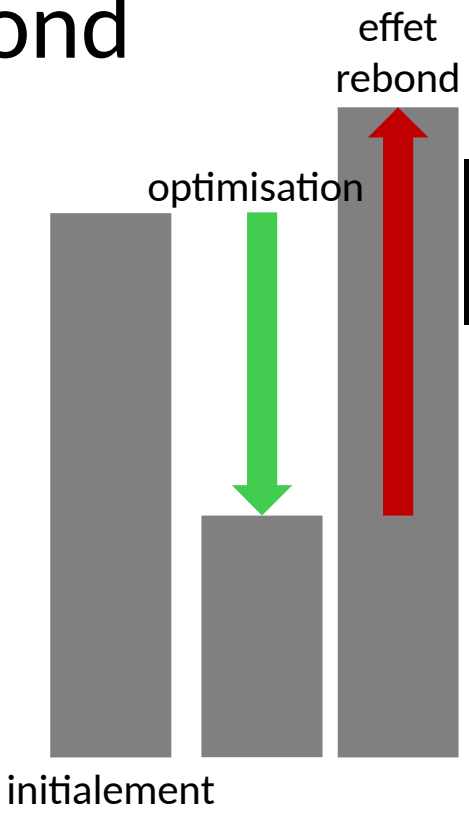


effet rebond > 100%
(*backfire*)

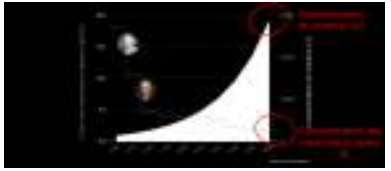
Effet rebond



effet rebond <=100%



effet rebond > 100%
(*backfire*)



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

Effet rebond ?

easyJet + airbnb = ?

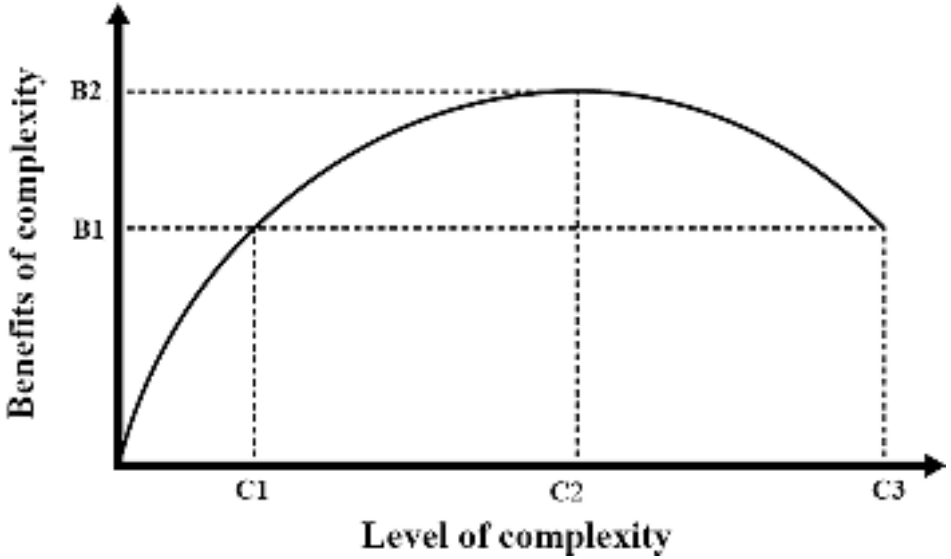
Dans un système en croissance, tous les gains en efficacité sont réinvestis…
Le numérique facilite et amplifie ce processus

Pression = Activités x Population → **Impacts** → **Limites**

→ **Impacts** ?

- 1er ordre (impacts directs)
- 2ème ordre (substitution optimisation)
- **3ème ordre (changement sociétés)**

Le numérique : booster de la grande accélération



Source: J. Tainter, *The Collapse of Complex Societies*

1 – ajoute

- De la **dépendance**
- De la **complexité**

2 – **accélération**

- Des flux (de marchandises, de personnes, financiers)
- Des procédés de production
- De **l'obsolescence directe** (équipements numériques eux-même)
- De **l'obsolescence indirecte**

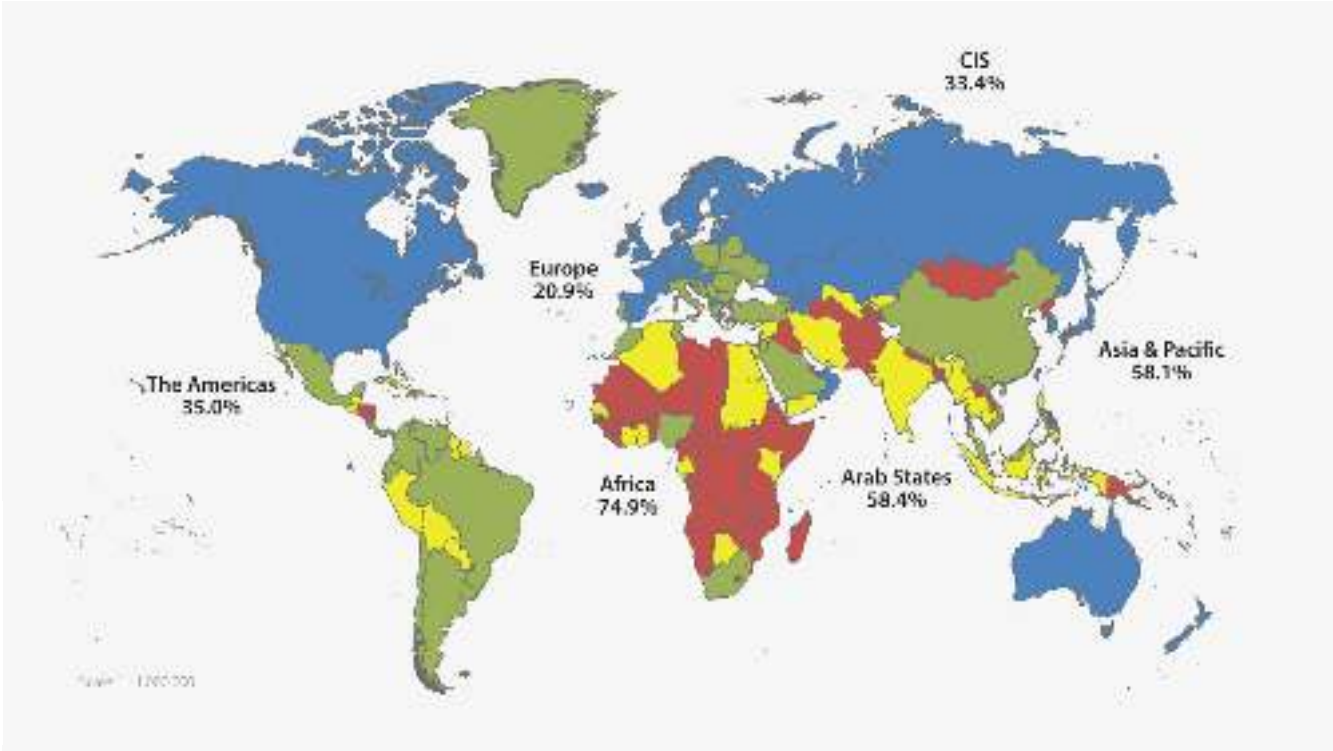
Considérations éthico-géographiques

- 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

Considérations éthico-géographiques

Pourcentage de la population n'ayant **pas** accès à internet



- 0 - 25
- 26 - 50
- 51 - 75
- 76 - 100

Source : ITU

Considérations éthico-géographiques

	2017	2022
Asia Pacific	2.1	3.1
Central and Eastern Europe	2.5	3.9
Latin America	2.1	2.9
Middle East and Africa	1.1	1.4
North America	8.0	13.4
Western Europe	5.4	9.4
Global	2.4	3.6

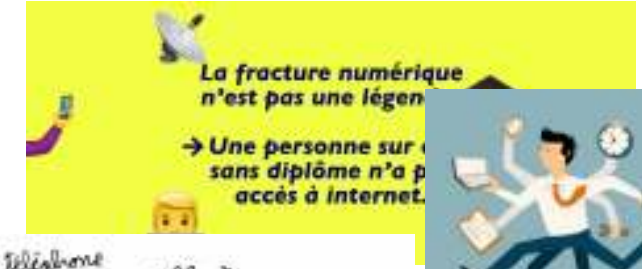
Source: Cisco VNI, 2018.

Impacts santé et sociaux

Là-bas :
Fabrication + recyclage

Ici : excès d'usage

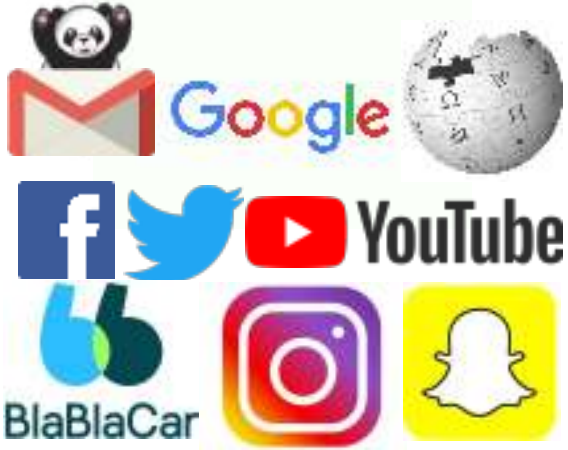
Source : https://mapa.conflictosmineros.net

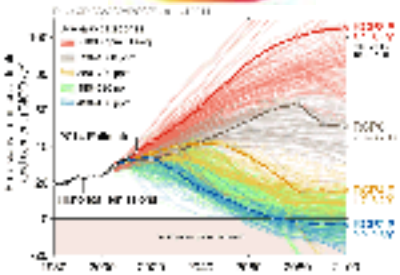


Services rendus vs. impacts

impacts environnementaux

TIC

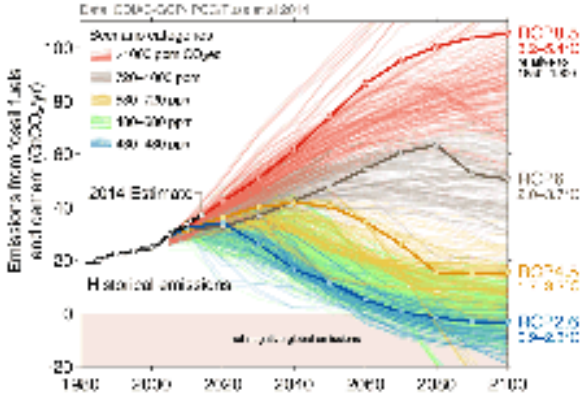




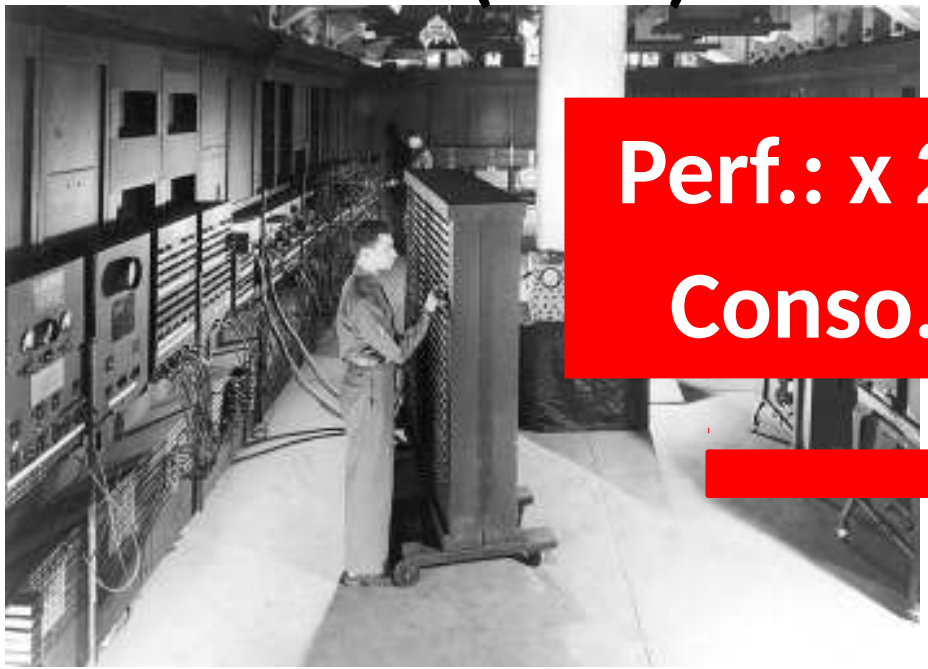
services

Le numérique dans le bons sens ?

- Clé pour analyser la complexité
- Formidable accélérateur des processus
- 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 ?
- Le GreenIt ne suffira pas



ENIAC (1945)



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

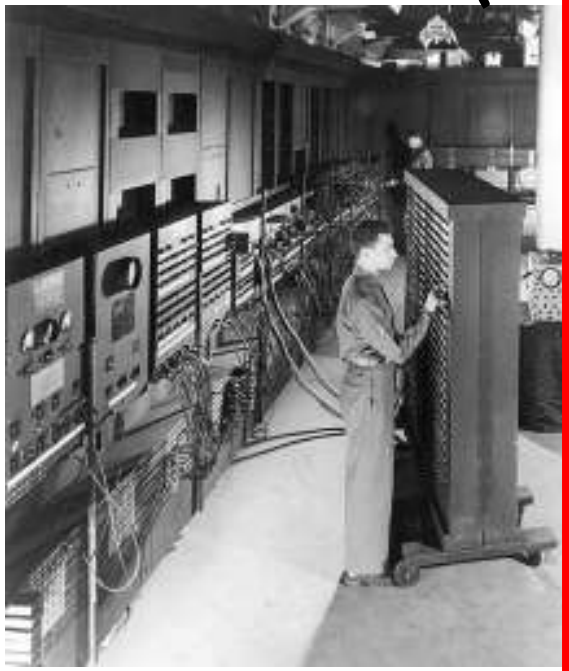
iPhone 6 (2014)

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

Perf.: x 260 millions !

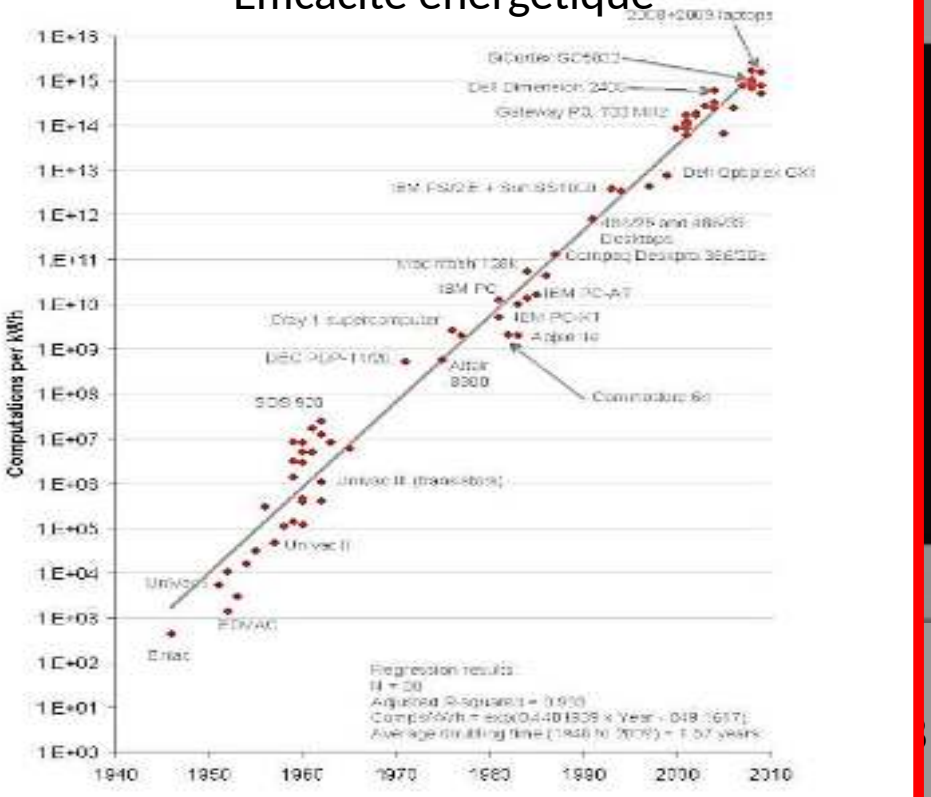
Conso. : ÷ 75 000 !

ENIAC (1945)



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

Efficacité énergétique



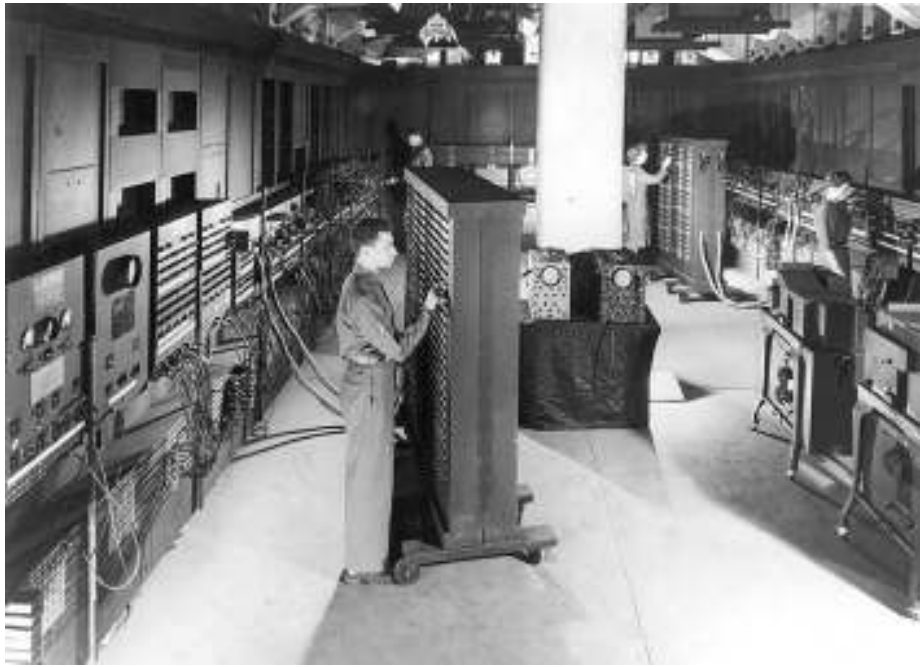
source : Wikipedia, loi de Koomey

iPhone 6 (2014)

mm × 7,1 mm

- Perf. : ~130 GFLOPS

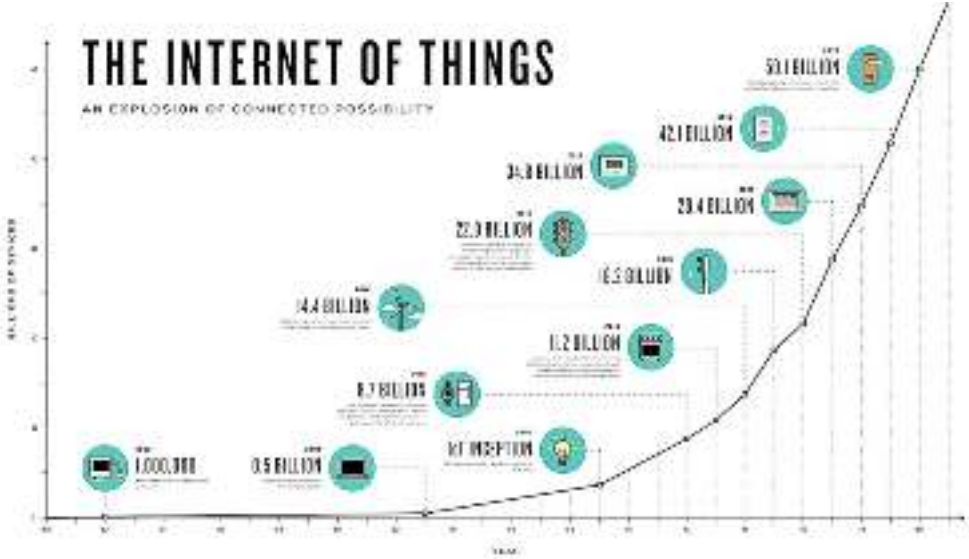
ENIAC



150 kW
(en fonctionnement)

260 GW
(en continu)

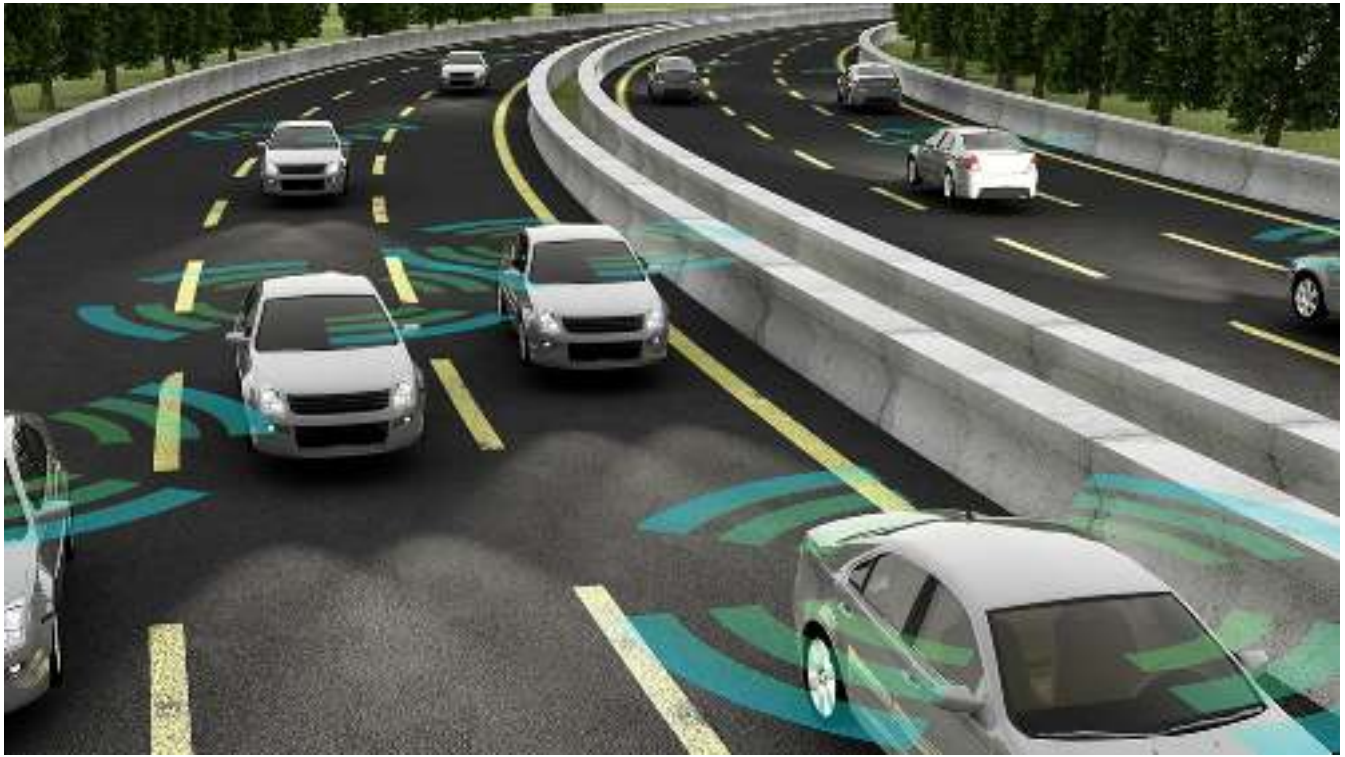
Demain ?



source : NCTA

source : Intel

Exemple du véhicule autonome



Source : cerema.fr

Exemple du véhicule autonome

- **Pour**
  - conduite plus efficace (10-20%) : aspiration, freinage/accélération/passage de vitesse doux
  - moins de bouchons
  - moins de véhicules (?)

- **Contre**
  - effets rebond gigantesques (+ 10-30% de distance parcourue en +)
  - les fabricants n'ont aucun intérêt àvoir le nombre de véhicule divisé par 10
  - électronique embarquée pour la conduite : GPS, caméra, capteurs, calculateurs, réseaux sans-fil…
  - quantité de données générées, et récoltées…
  - investissement financier et énergétique gigantesque (pourrait servir à autre chose) ?
  - matériel additionnel : caméra de vidéosurveillance, écrans de TV…
  - ne servira qu'une partie de la population mondiale

Autres technos : I.A., Internet des objets, blockchain, 5G, …

En conclusion - actions

Atténuer	Préparer l'adpatation
- Former / sensibiliser - Mesurer, évaluer globalement - Développer une approche systémique - Augmenter l'efficacité globale - Développer une utilisation sobre - Changer de valeurs - Ralentir - Remettre en cause le dogme de la technologie - …	- Intégrer robustesse, résilience (ruptures d'approvisionnements), simplicité, longévité, sobriété dans tous les développements - Développer des alternatives socio-techniques - Imaginer des low-tech - …

Merci !

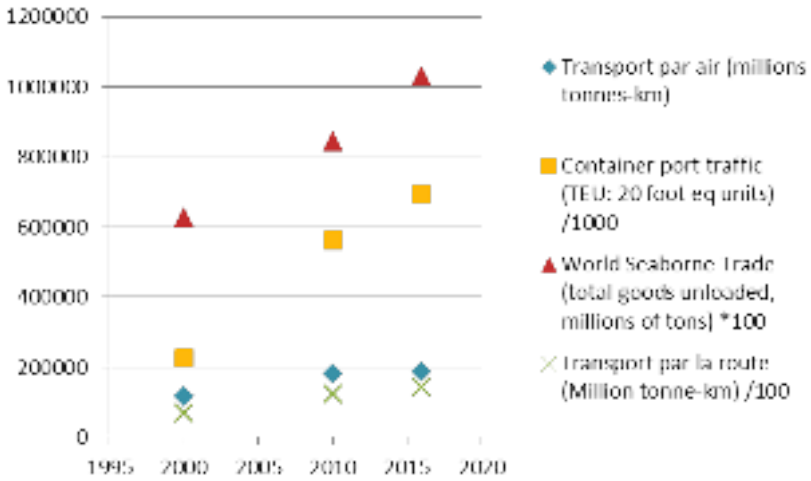
Backup

Le numérique : un accélérateur

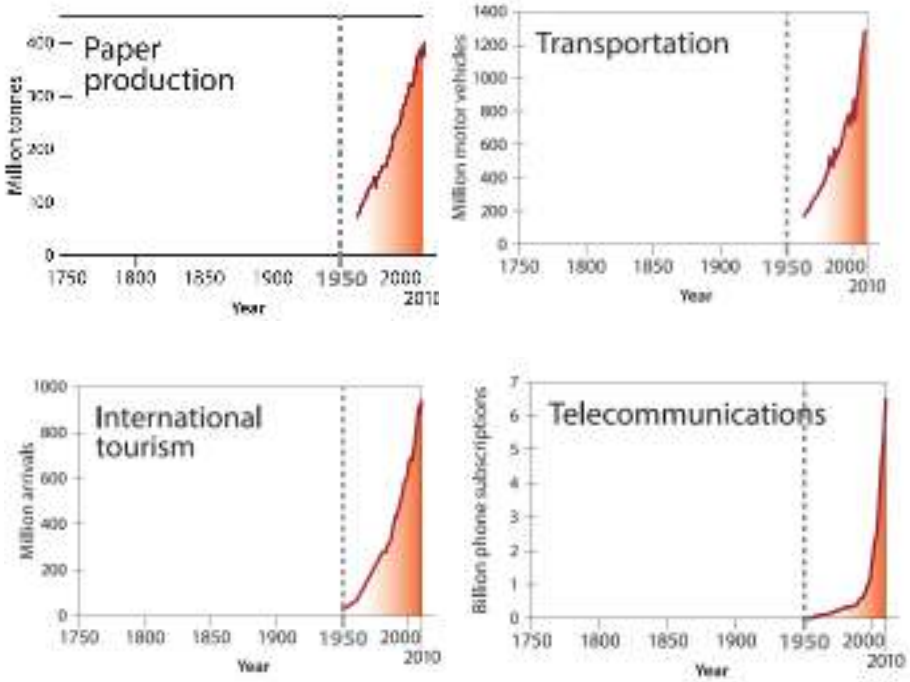
XVIIIe siècle

XIXe siècle

Source : Economix, M. Goodwin



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

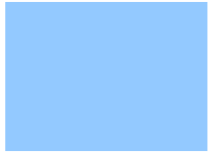


Source : The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration, 2015 Will Steffen & al

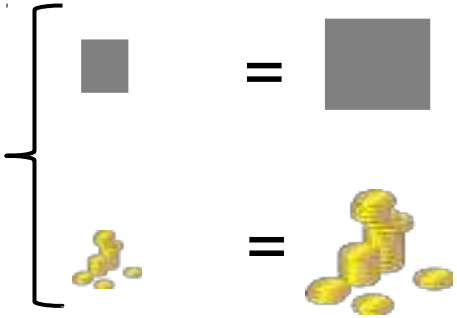
Pas d'effet d'atténuation visible sur ces secteurs !

Situation initiale

quantité du produit/service



×



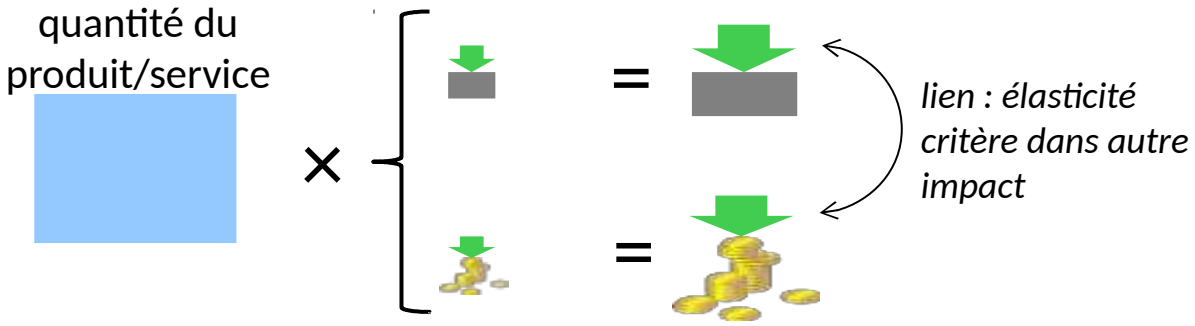
critère à optimiser (e.g. énergie)

autre impacts optim. (e.g. prix, temps)

<u>exemple :</u>

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

Optimisation : effets directs



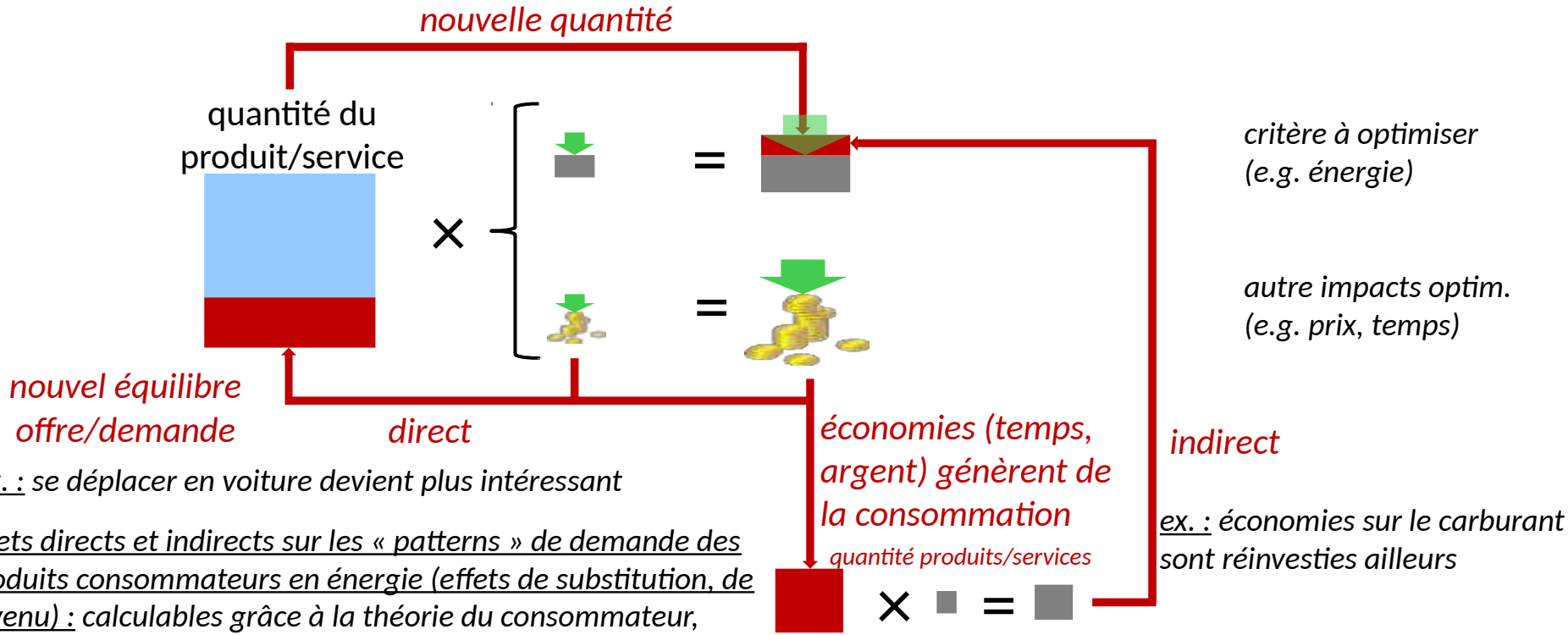
critère à optimiser (e.g. énergie)

autre impacts optim. (e.g. prix, temps)

<u>exemple :</u>

- *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

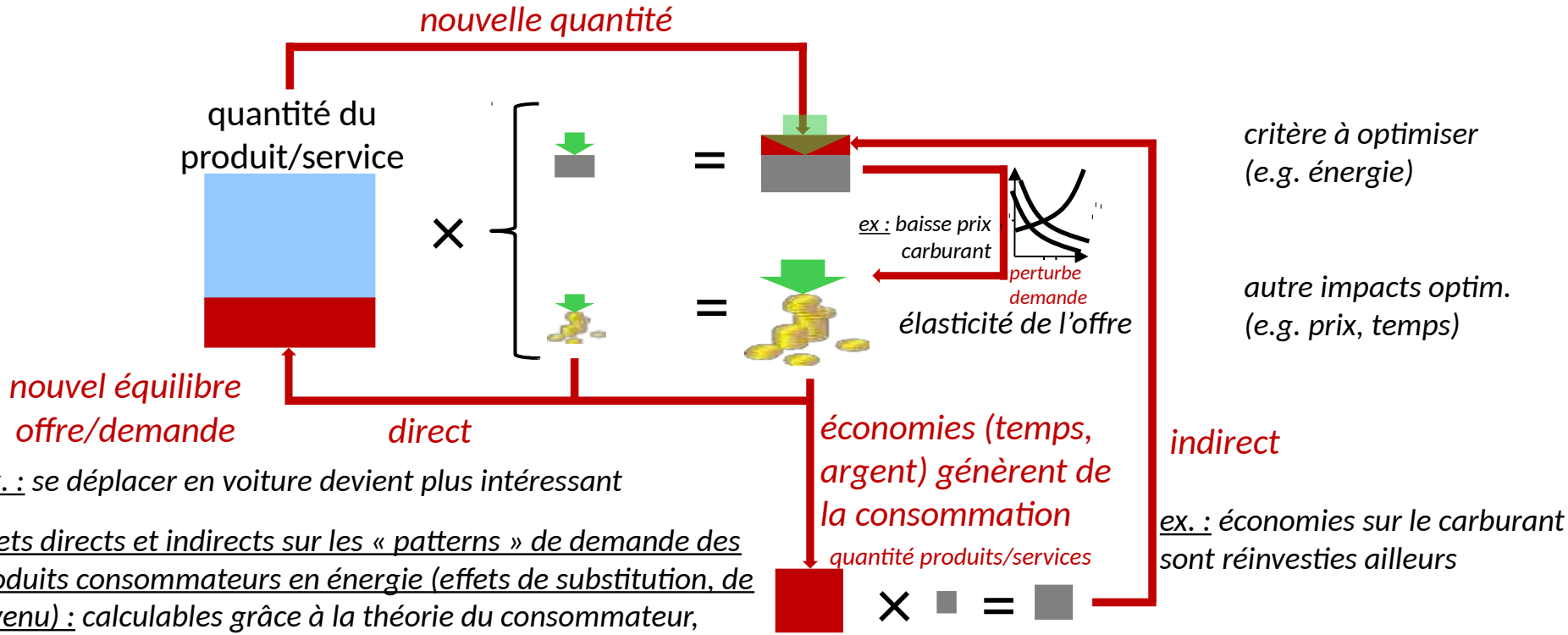


ex. : se déplacer en voiture devient plus intéressant

ex. : économies sur le carburant sont réinvesties ailleurs

Effets directs et indirects sur les « patterns » de demande des produits consommateurs en énergie (effets de substitution, de revenu) : calculables grâce à la théorie du consommateur, i.e. les élasticités-revenu, élasticités-prix croisées et l'équation de Slutsky

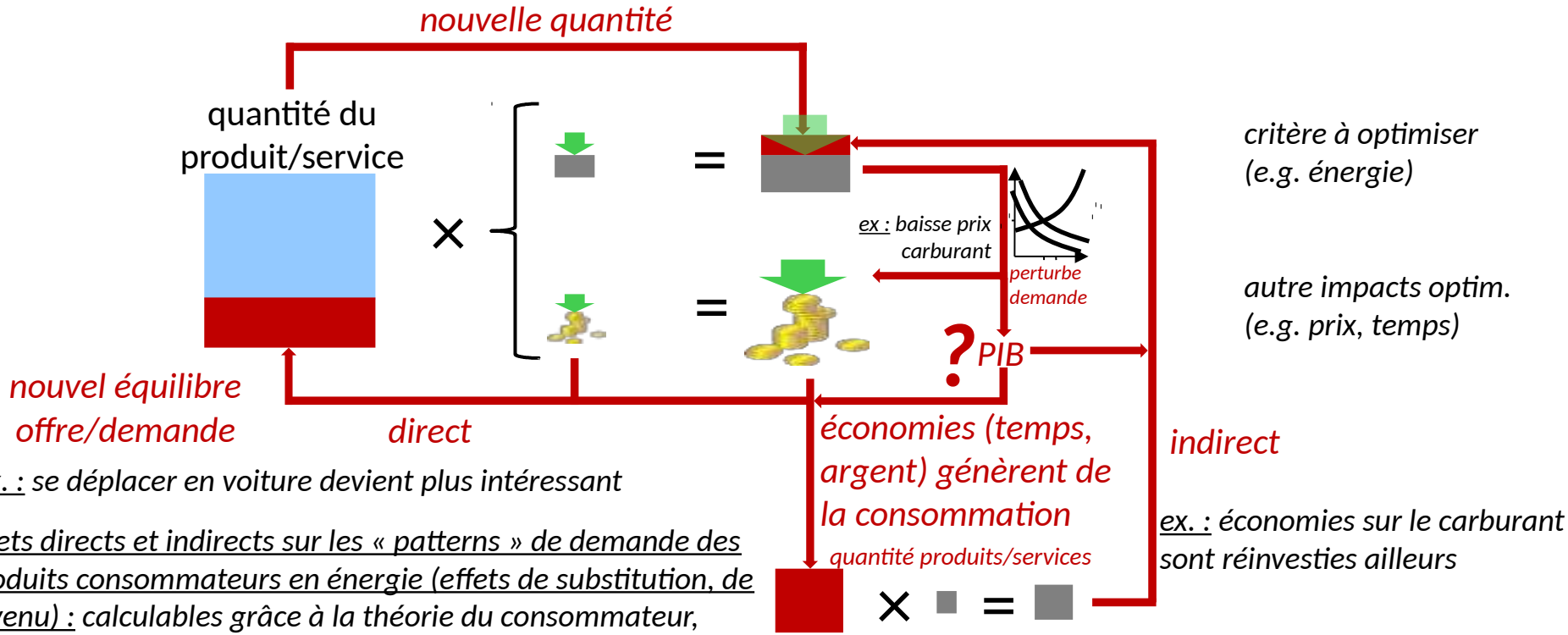
Optimisation : effet rebond direct / indirect



ex. : se déplacer en voiture devient plus intéressant

Effets directs et indirects sur les « patterns » de demande des produits consommateurs en énergie (effets de substitution, de revenu) : calculables grâce à la théorie du consommateur, i.e. les élasticités-revenu, élasticités-prix croisées et l'équation de Slutsky

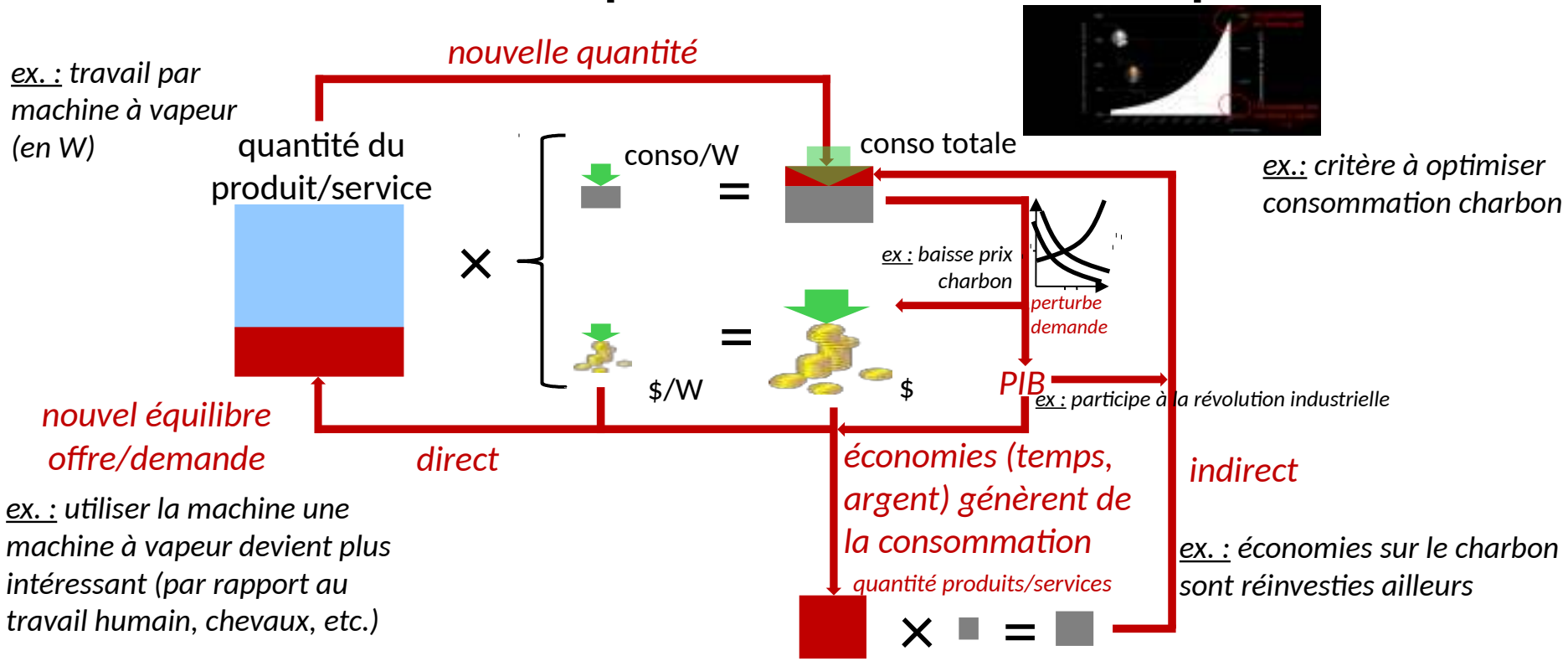
Optimisation : effet rebond macro-économique



ex. : se déplacer en voiture devient plus intéressant

Effets directs et indirects sur les « patterns » de demande des produits consommateurs en énergie (effets de substitution, de revenu) : calculables grâce à la théorie du consommateur, i.e. les élasticités-revenu, élasticités-prix croisées et l'équation de Slutsky

Autre exemple : machine à vapeur



Estimation effet rebond direct / indirect

- Situation initale :
  - 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 : $x_1\, c_1 + \ldots + x_n\, c_n$
  - prix de revient / unité de quantité : p_i, i=1..n
  - prix du critère à optimiser par unité : p

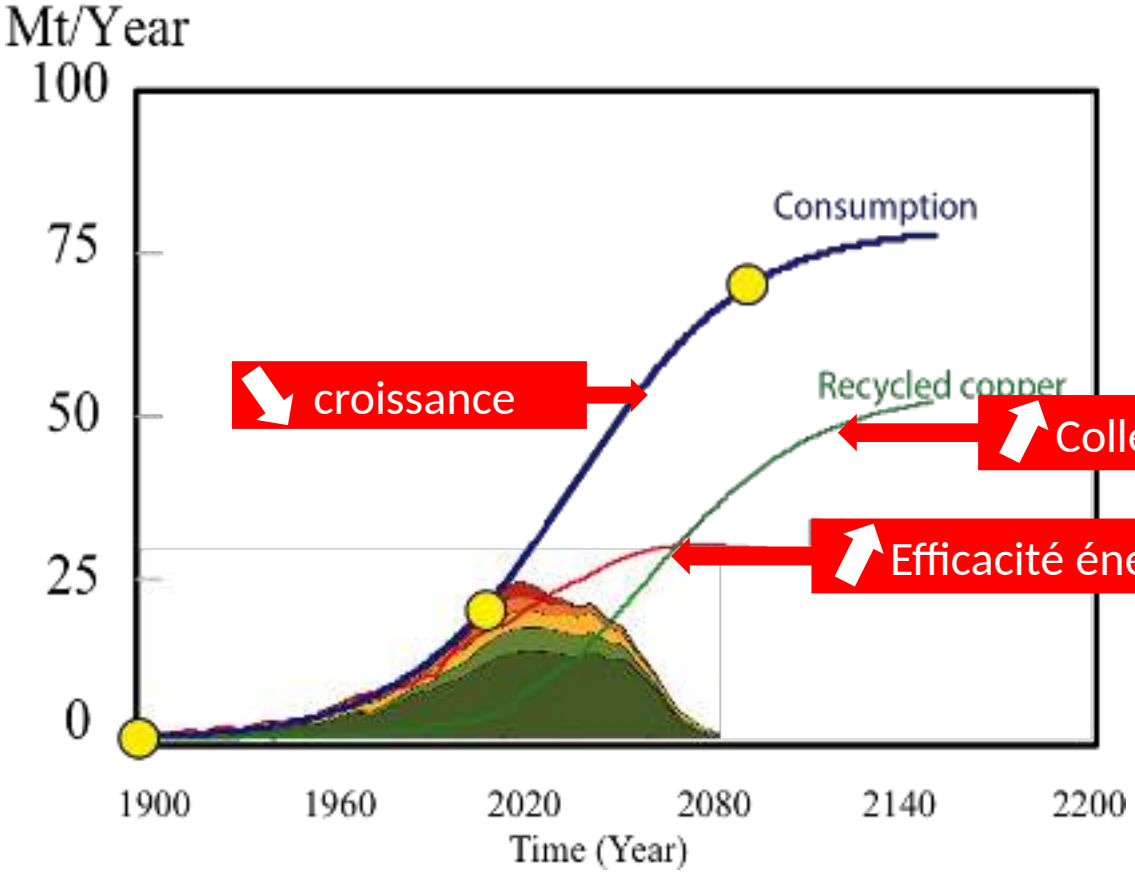
- Optimisation + effet rebond direct/indirect (sans macro-économique) :
  - facteur d'optimisation du service 1 : η
  - nouvelle consommation du service 1 : ηc_1
  - nouveau prix du critère à optimiser par unité : p'
  - nouveau prix de revient pour service 1 : $p_1 - p'\, c_1\, (1 - \eta)$
  - impact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

    1 : $\varepsilon_1 = \varepsilon^c_1 - \varepsilon^r_1\, x_1 p_1 / I$ (ε_1 : élasticité-prix, ε^c_1 : élasticité-prix compensée, ε^r_1 : élasticité-revenue, I : revenue)

    i : $\varepsilon_{i1} = \varepsilon^c_{i1} - \varepsilon^r_i\, x_1 p_1 / I$ (ε_{i1} : élasticité-prix croisée, ε^c_{i1} : élasticité-prix croisée compensée, ε^r_i : élasticité-revenue)

  - ces équations permettent de calculer les nouvelles valeurs de quantité : x'_i, i=1..n

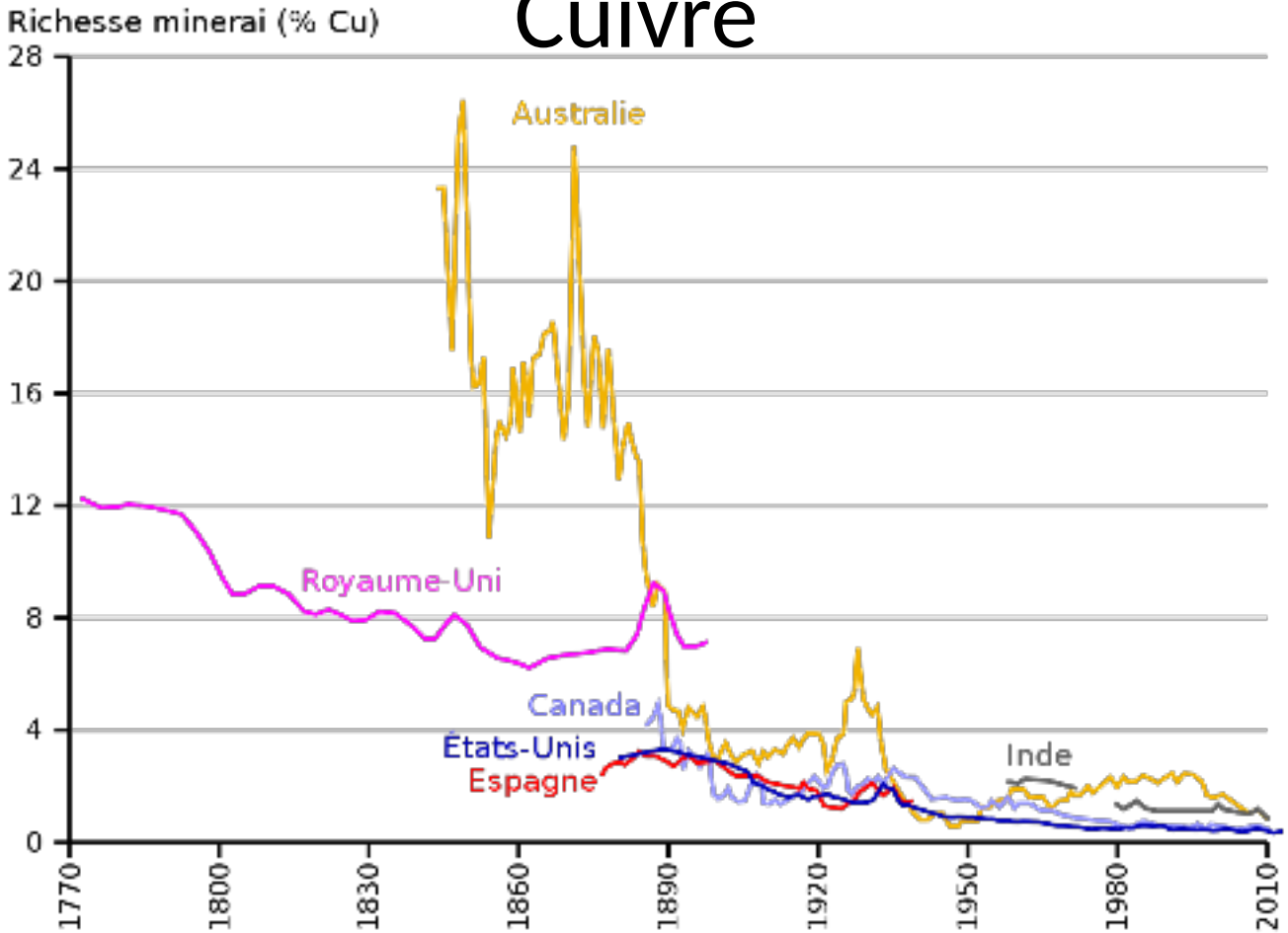
Modélisation



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

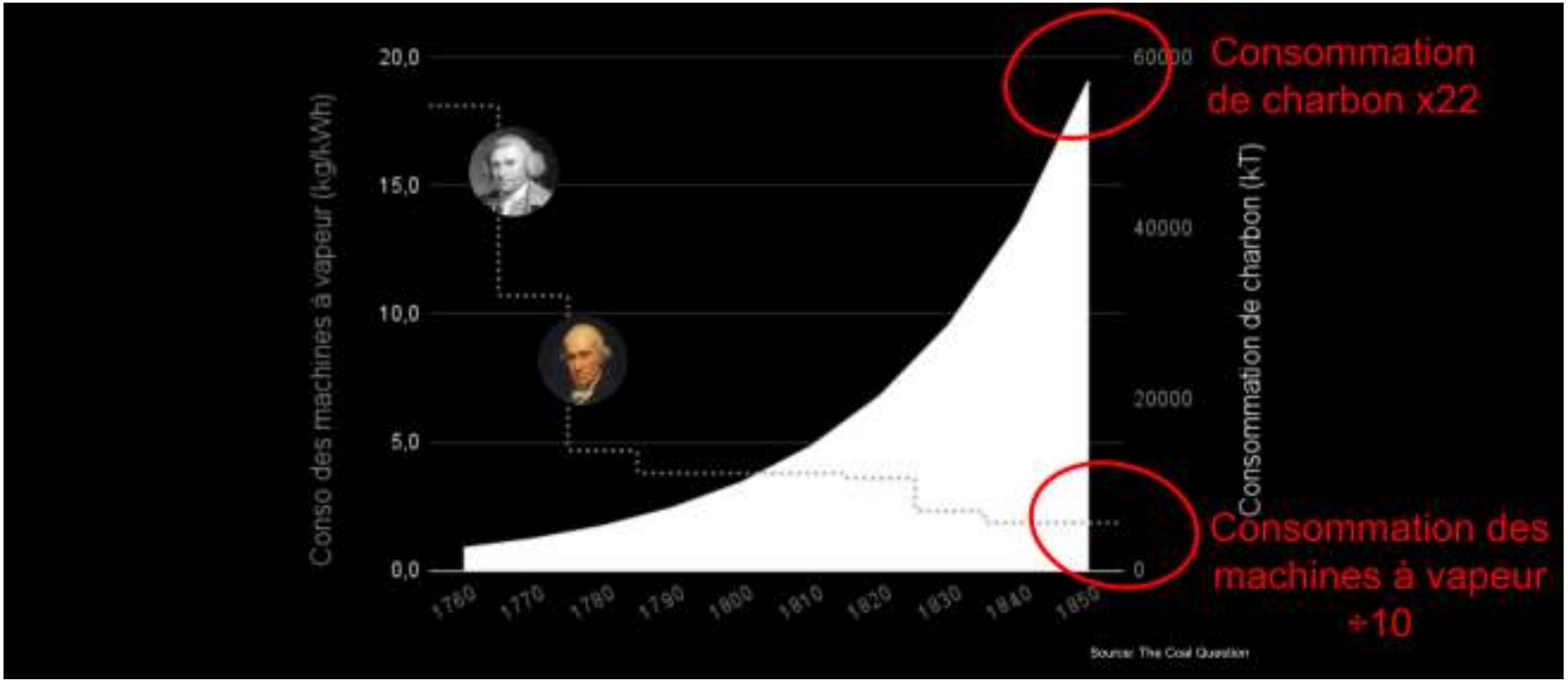
Source : Olivier Vidal, 2018

Cuivre

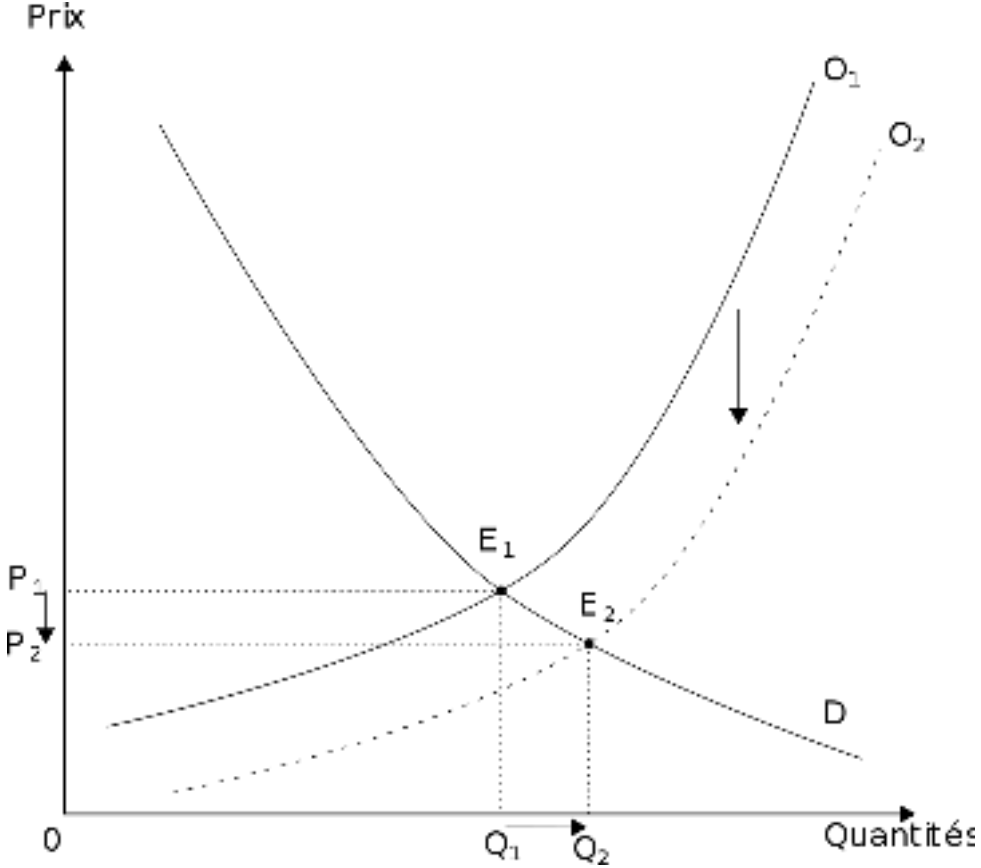


source : wikipedia

Effet rebond : l’exemple du charbon

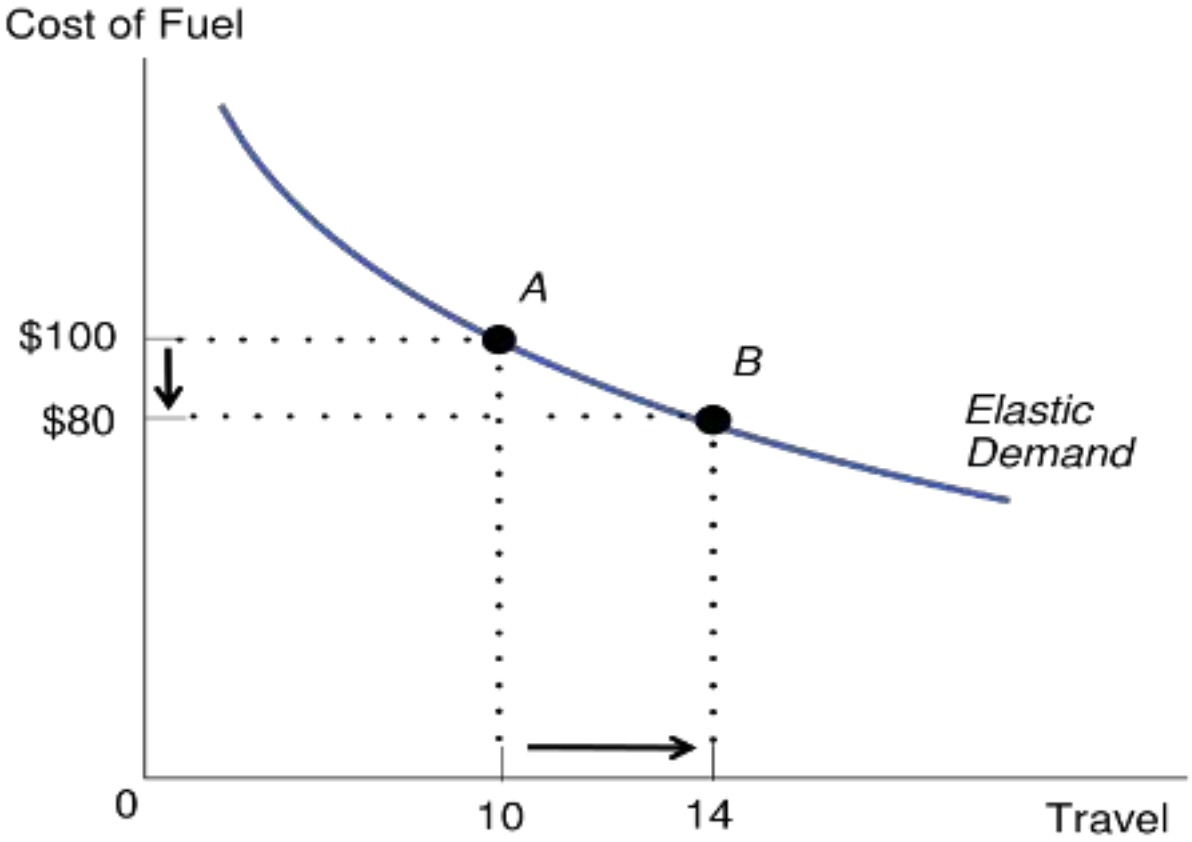


Effet rebond : loi offre demande



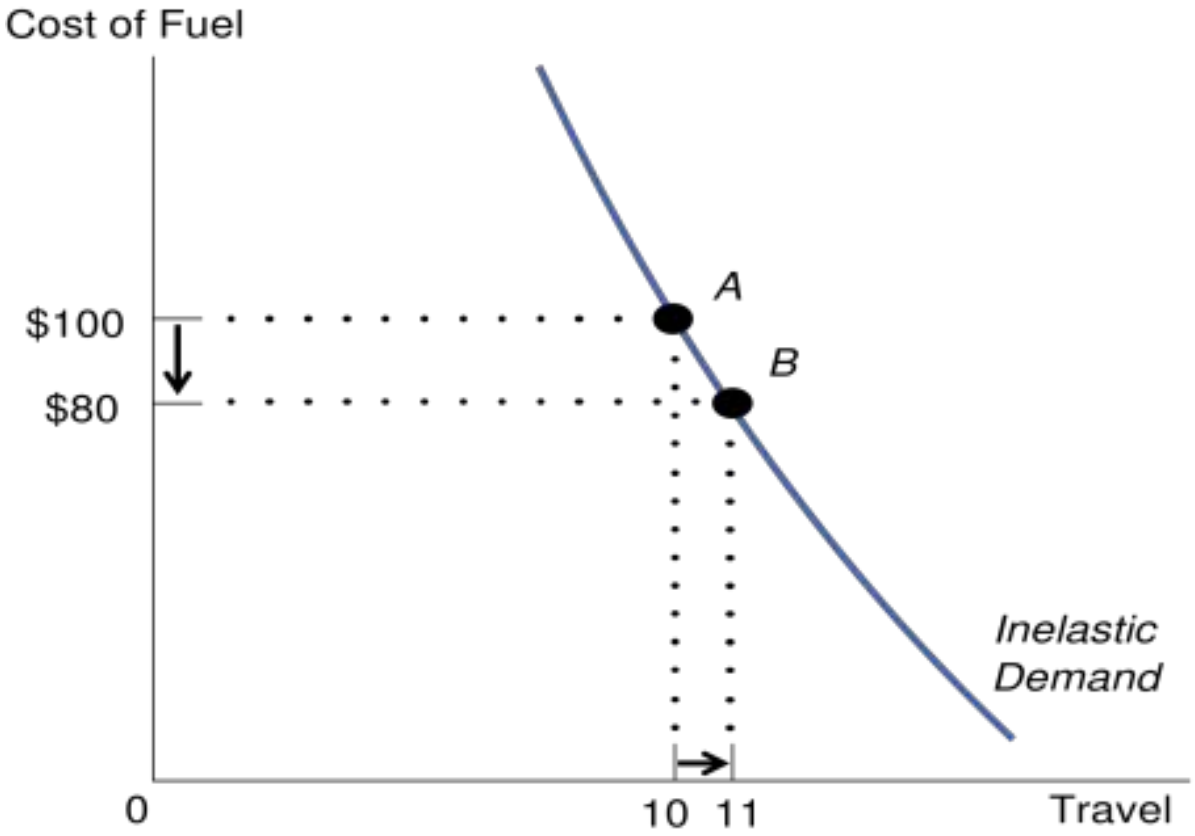
source : wikipedia

Effet rebond : demande élastique



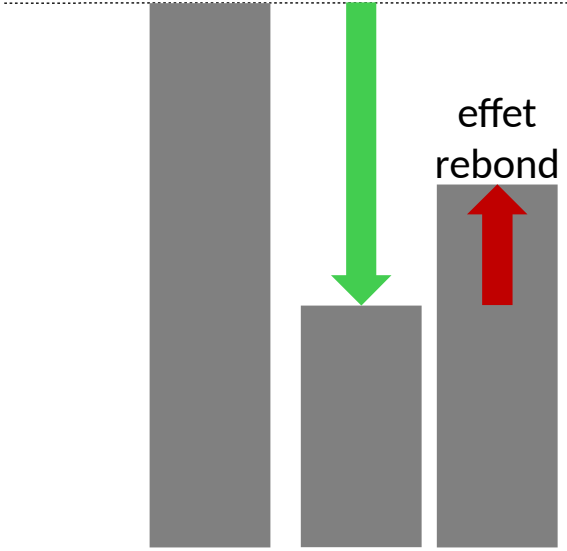
source : wikipedia

Effet rebond : demande peu élastique

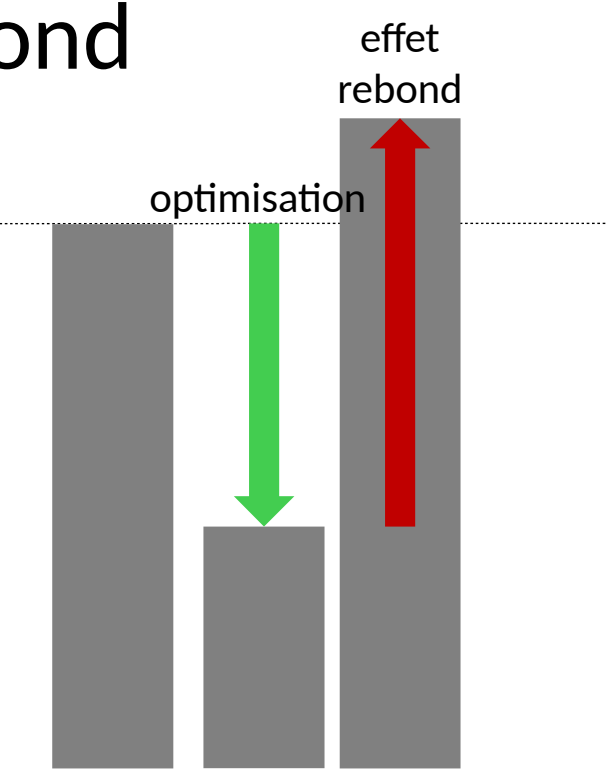


source : wikipedia

Effet rebond

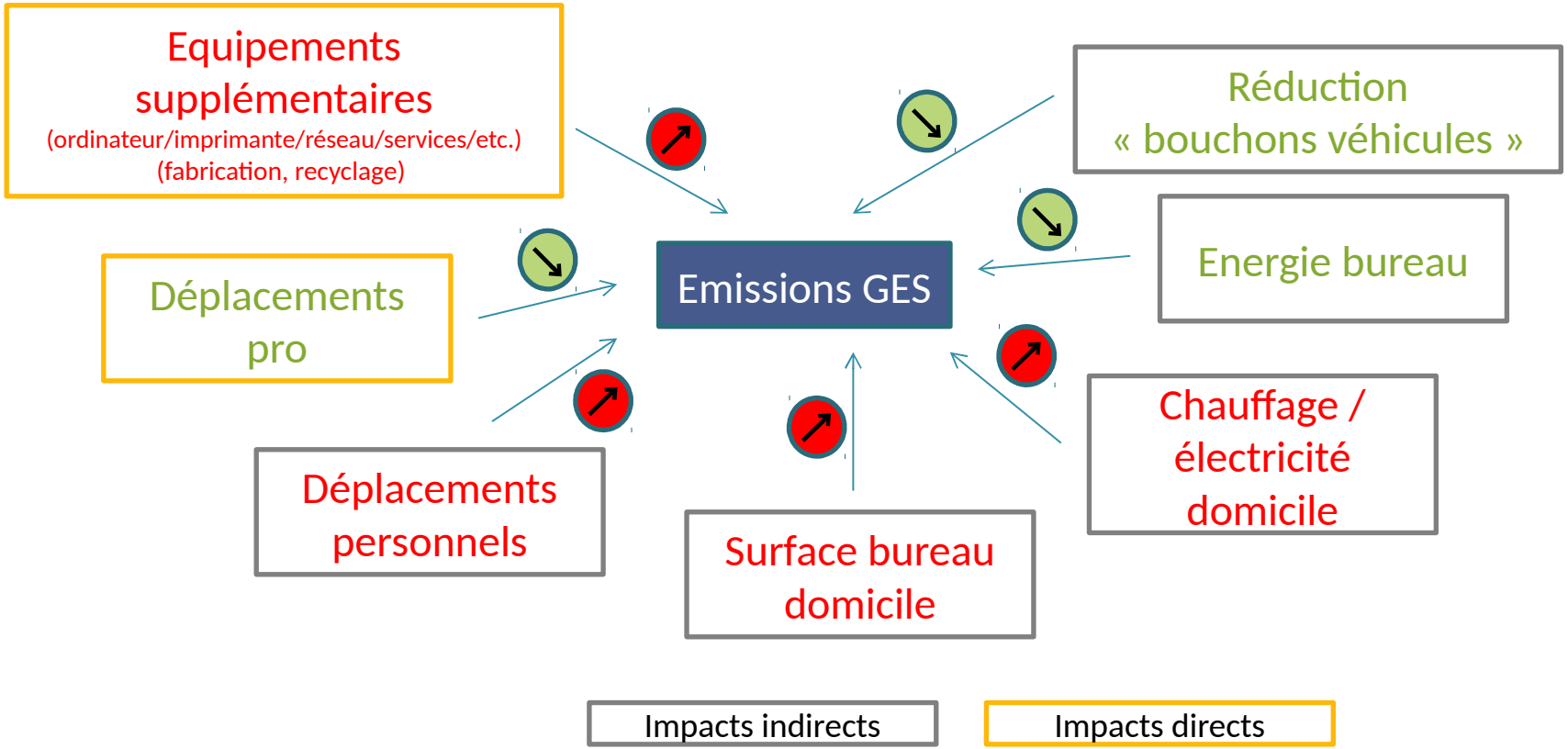


effet rebond <=100%

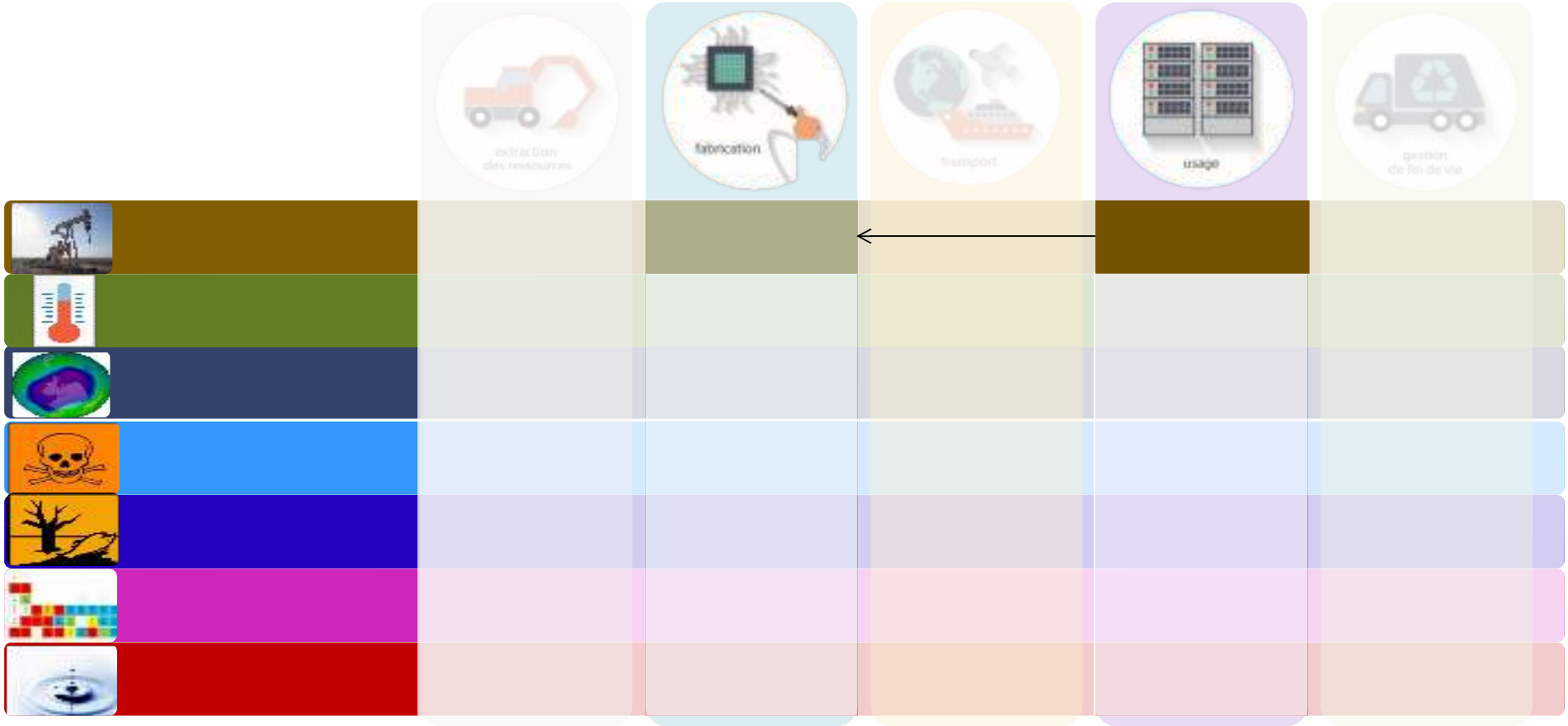


effet rebond > 100%
(*backfire*)

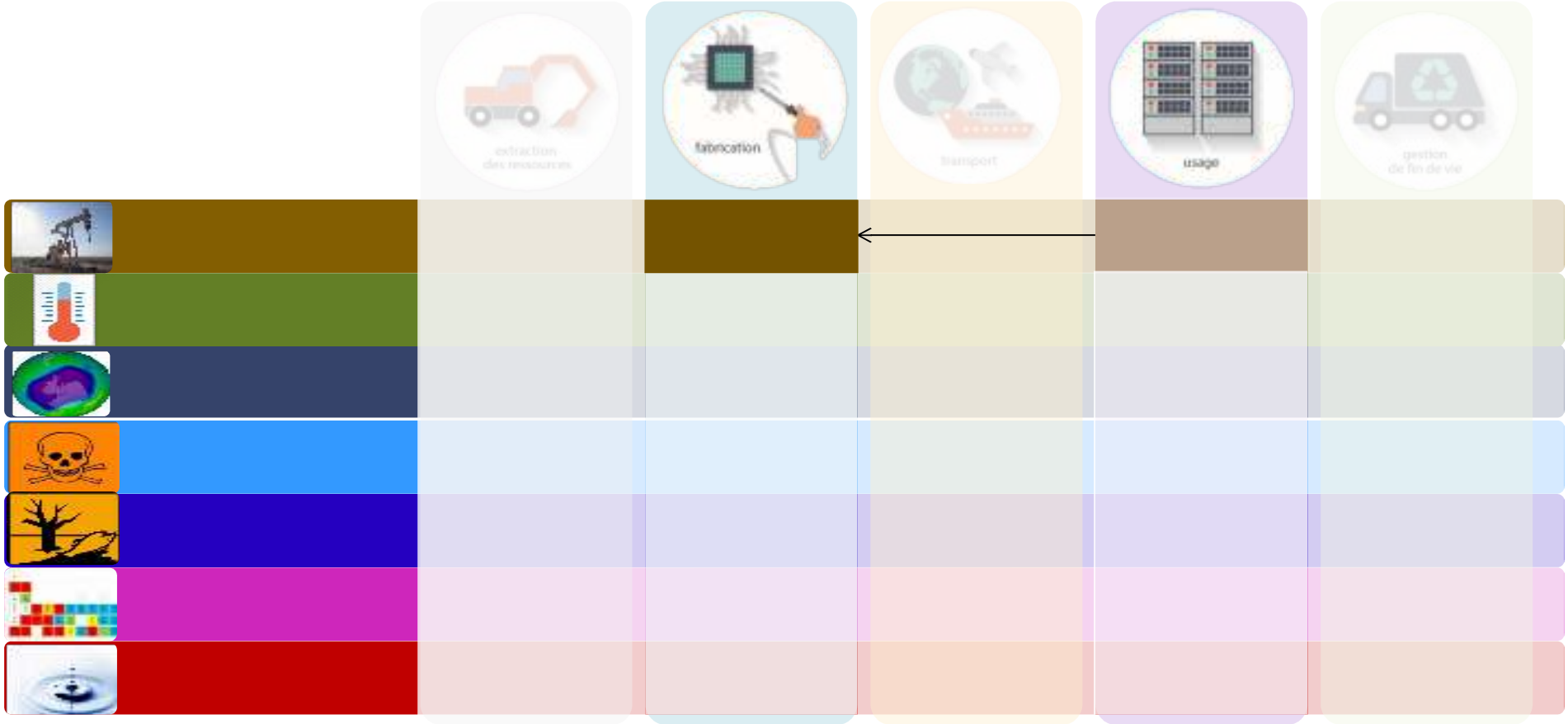
Exemple du télétravail



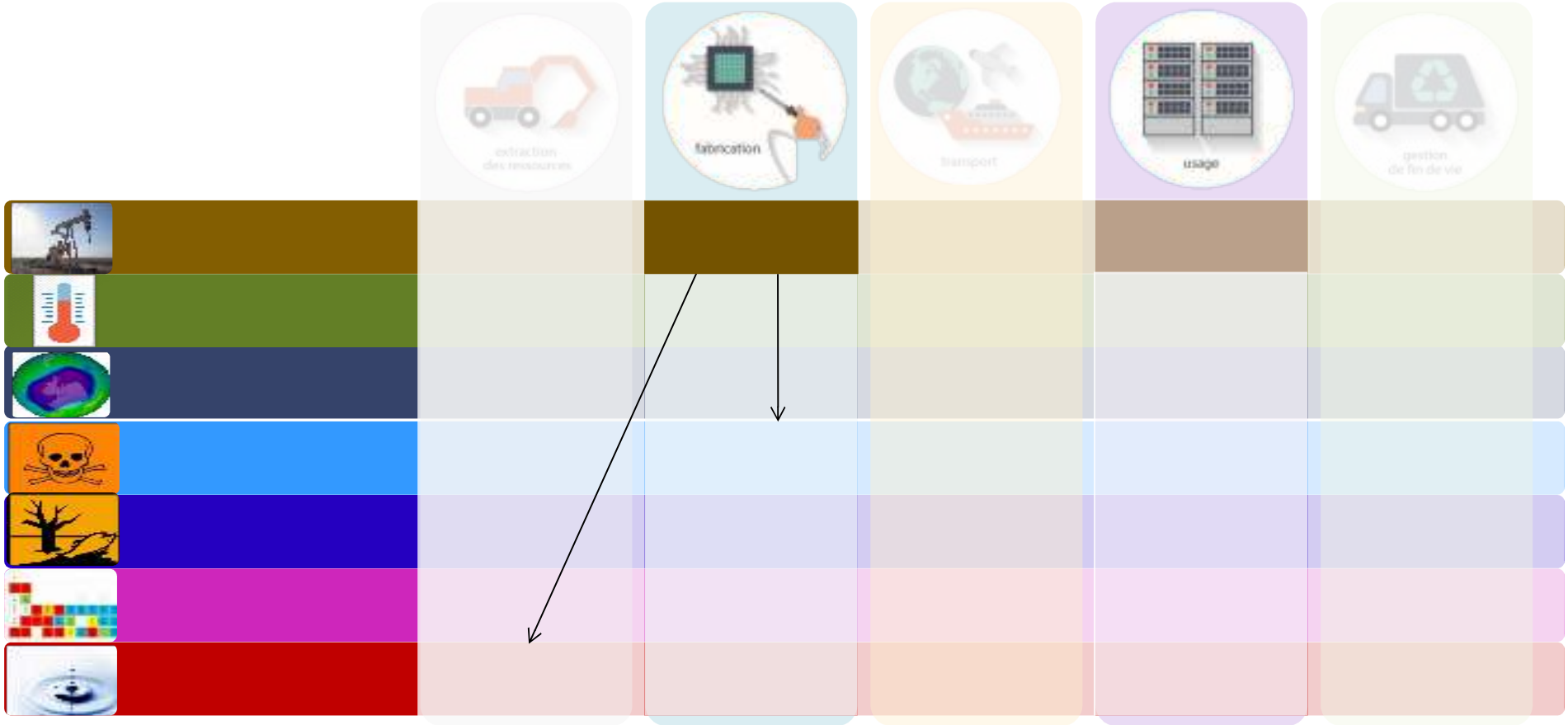
Transferts d’impacts



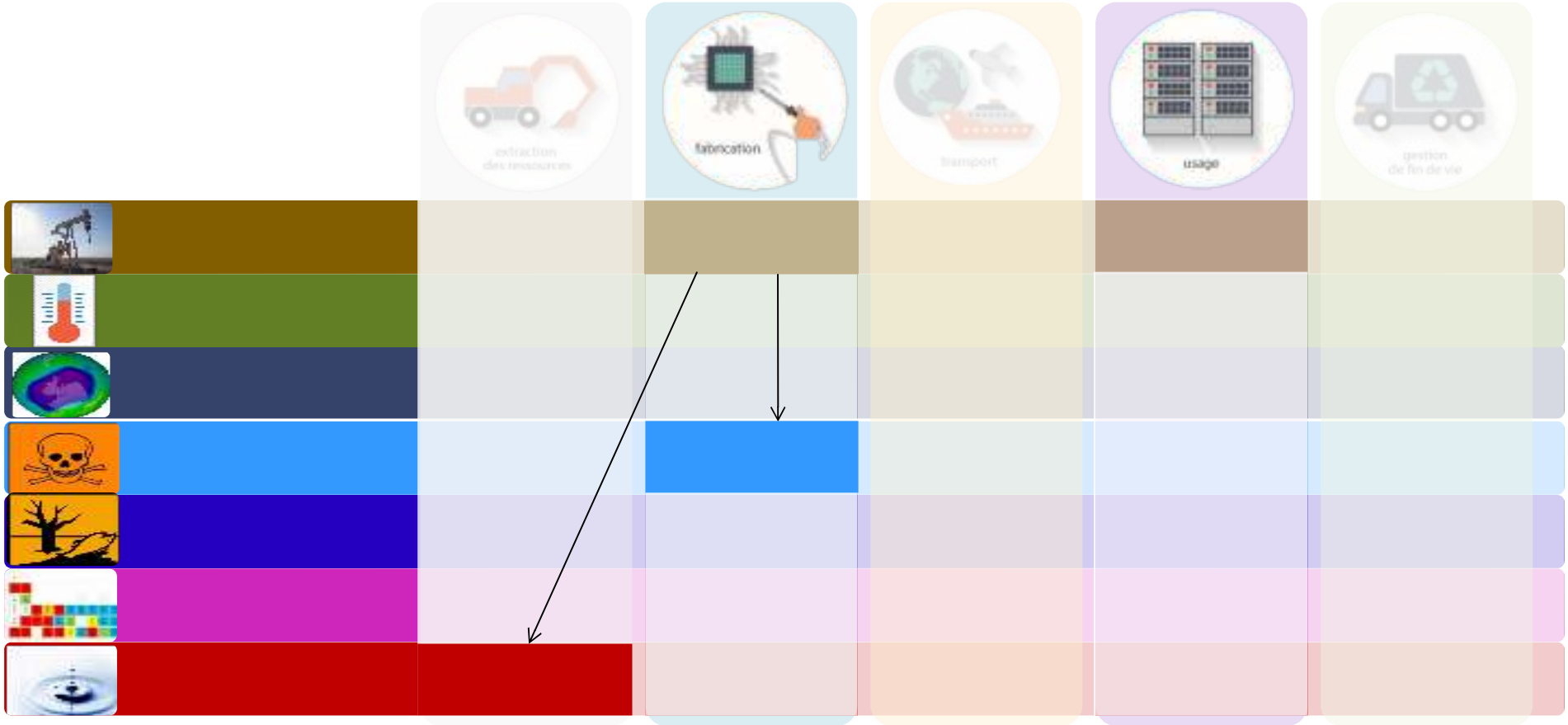
Transferts d’impacts

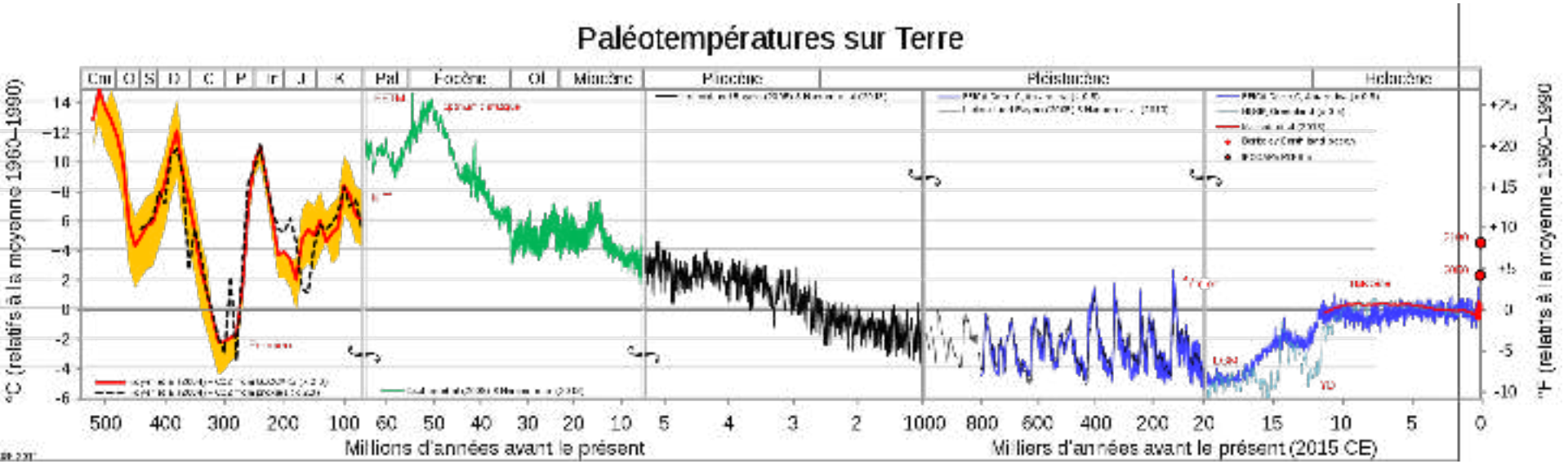


Transferts d’impacts



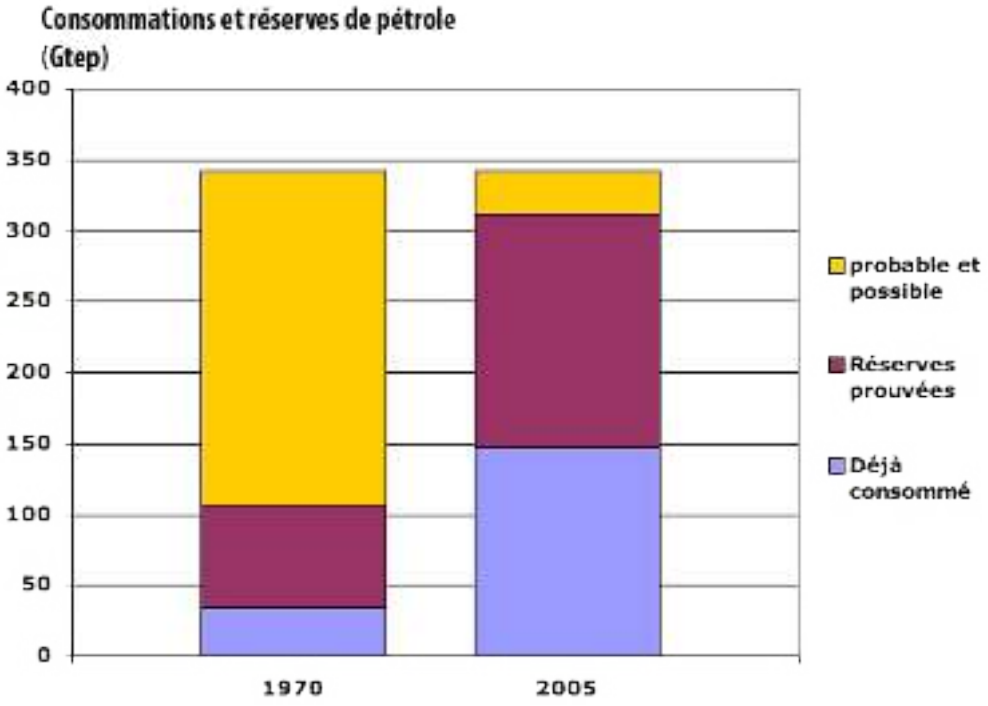
Transferts d’impacts



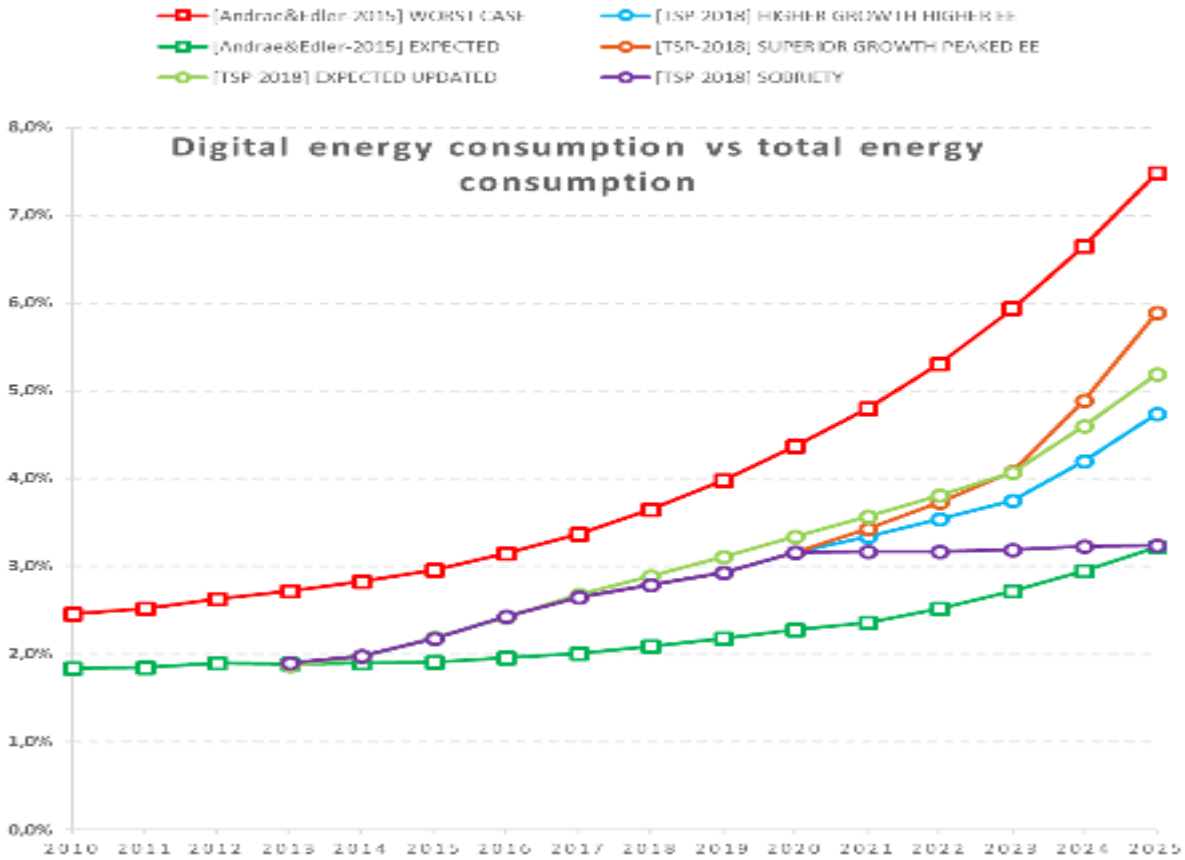


source : wikipedia

Réserves de pétrole



Consommation énergétique des TIC



source : leanICT, shift projet