

Impacts environnementaux directs et indirects du numérique

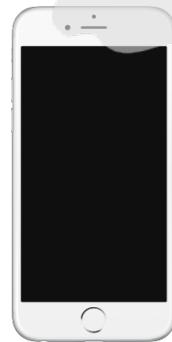
Jacques COMBAZ

Jacques.Combaz@univ-grenoble-alpes.fr

www-verimag.imag.fr ecoinfo.cnrs.fr

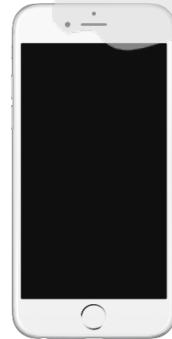


1^{ère} partie



Les impacts
environnementaux du
numérique

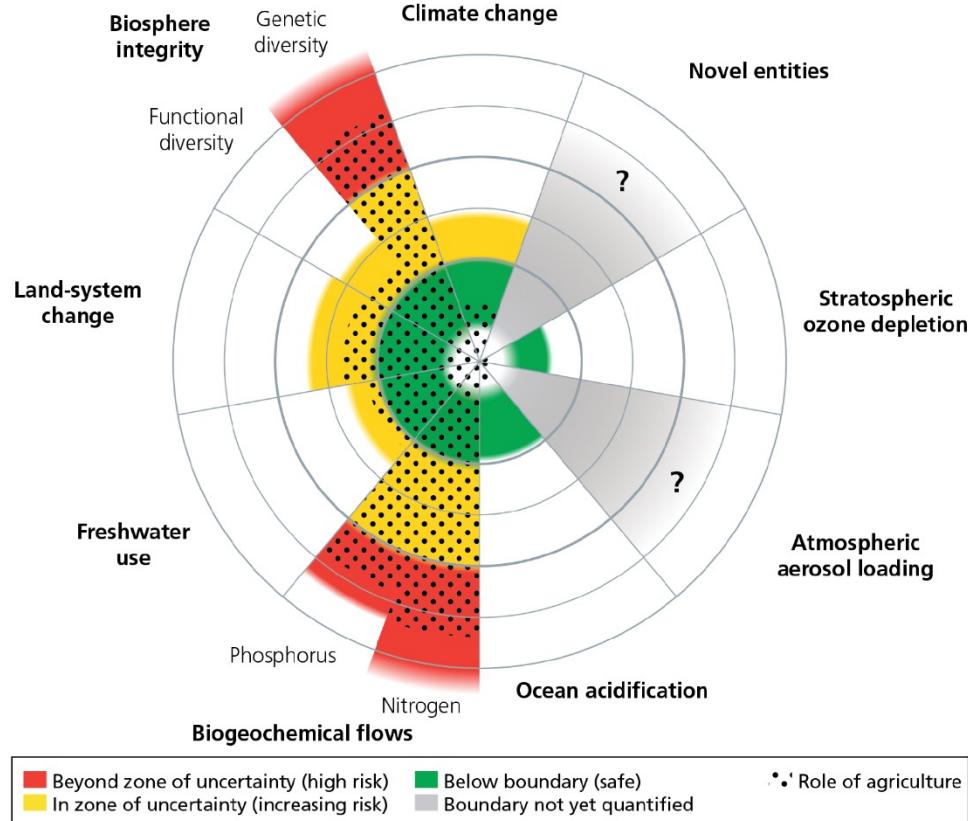
1^{ère} partie



Les impacts
environnementaux du
numérique
enjeux globaux



Bienvenu dans l'Anthropocène



* Role of agriculture

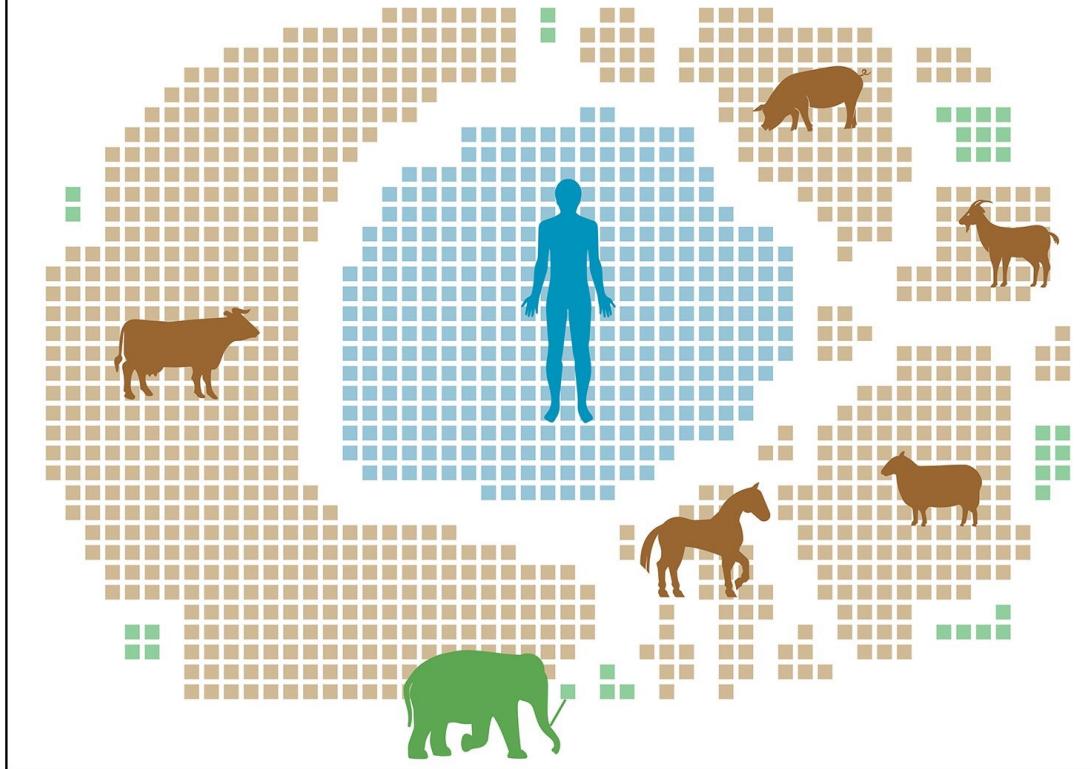
source : Campbell et al.,
Ecology and Society (2017)

Bienvenu dans l'Anthropocène

The Earth's Land Mammals by weight

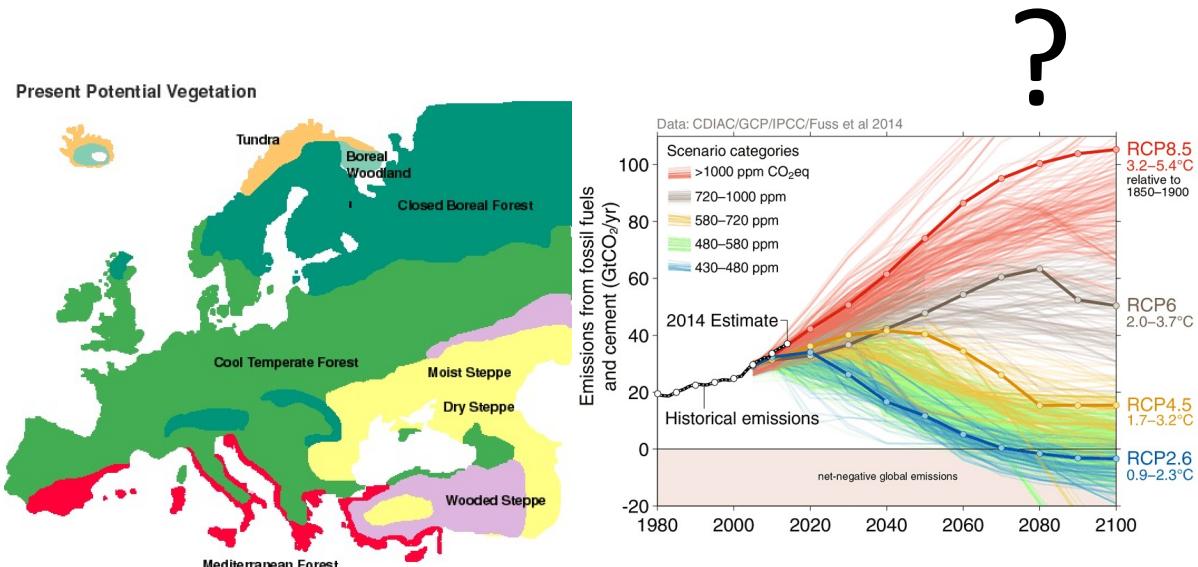
each square is 1,000,000 Tons

- Humans
- Our pets & livestock
- Wild animals



Source: Vaclav Smil (2003) and Bar-On *et al.* (2018)

+5°C, ça fait quoi ?



2019
0°C $\sim 2^\circ\text{C} / \text{siecle (actuel)}$ 2100
+5°C ?

+5°C, ça fait quoi ?

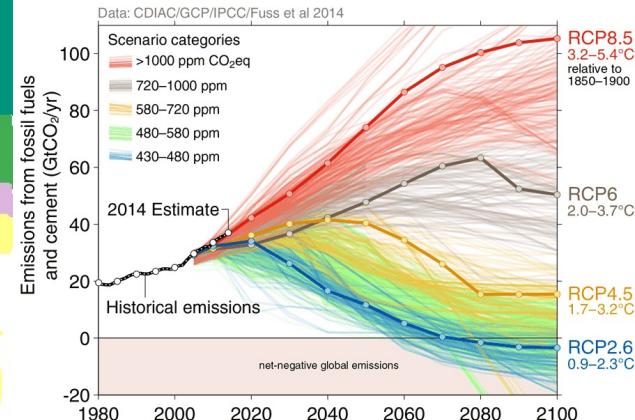
22,000 – 14,000 ^{14}C years ago



Present Potential Vegetation



?



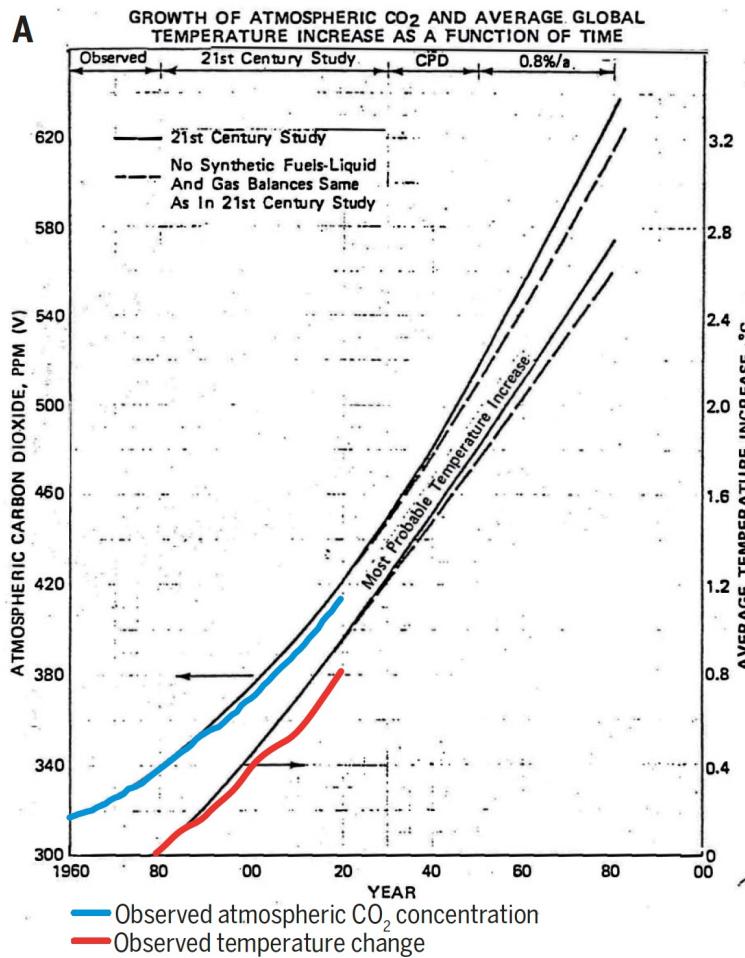
-20 000
-5°C

$\sim 0,1^\circ\text{C} / \text{siecle (max)}$

2019
0°C

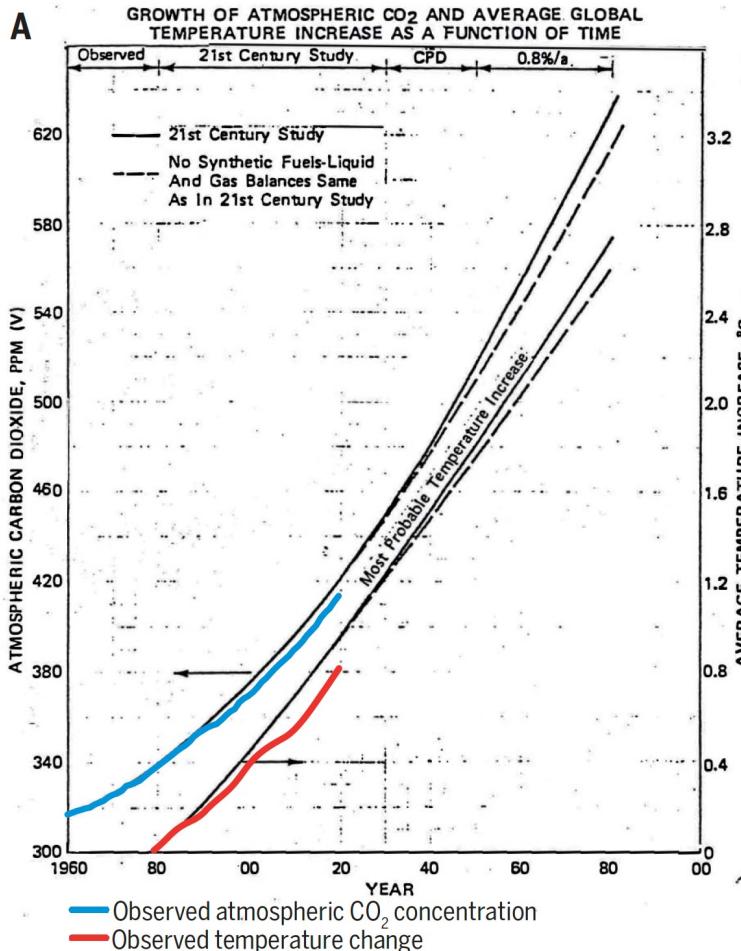
$\sim 2^\circ\text{C} / \text{siecle (actuel)}$

2100
+5°C ?

A

Projections par Exxon (1982)

A



2^{ème} partie

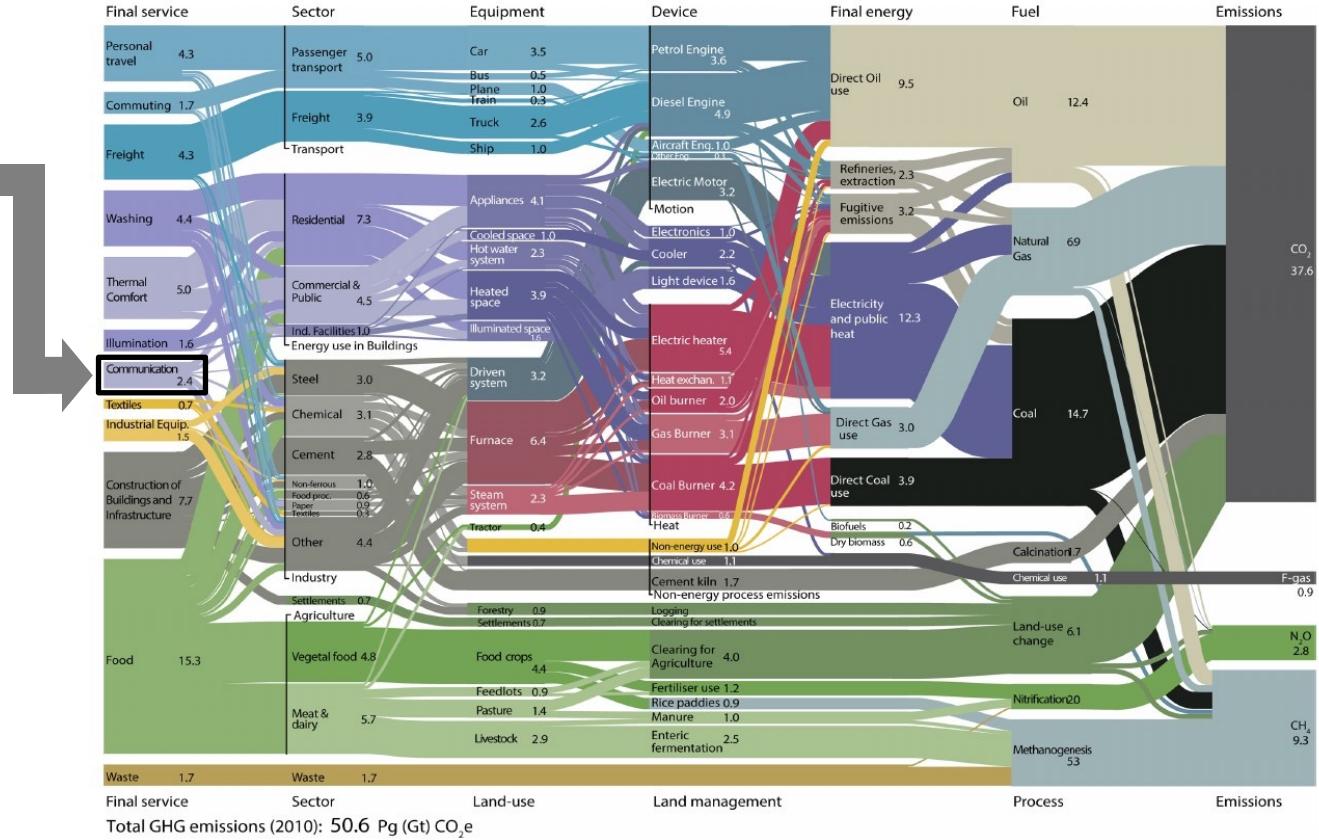


Les impacts environnementaux du numérique

enjeux climatiques du numérique

Numérique et changement climatique

- Numérique :

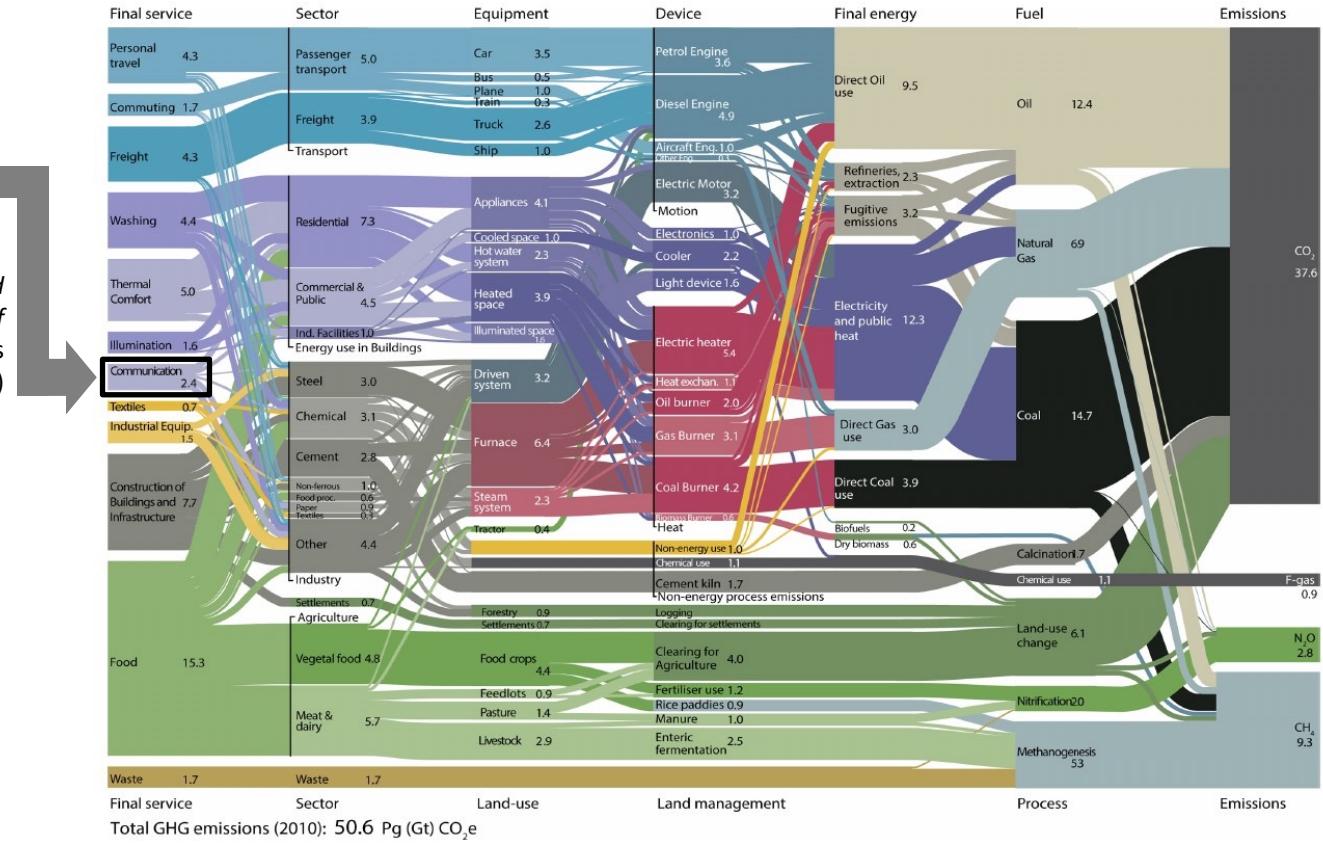


source : Bajzeli et al., *Designing Climate Change Mitigation Plans That Add Up*, Environmental Science & Technologie (2013)

Numérique et changement climatique

- Numérique :
2-4% des GES

source : Freitag et al., *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations, Patterns (2021)*

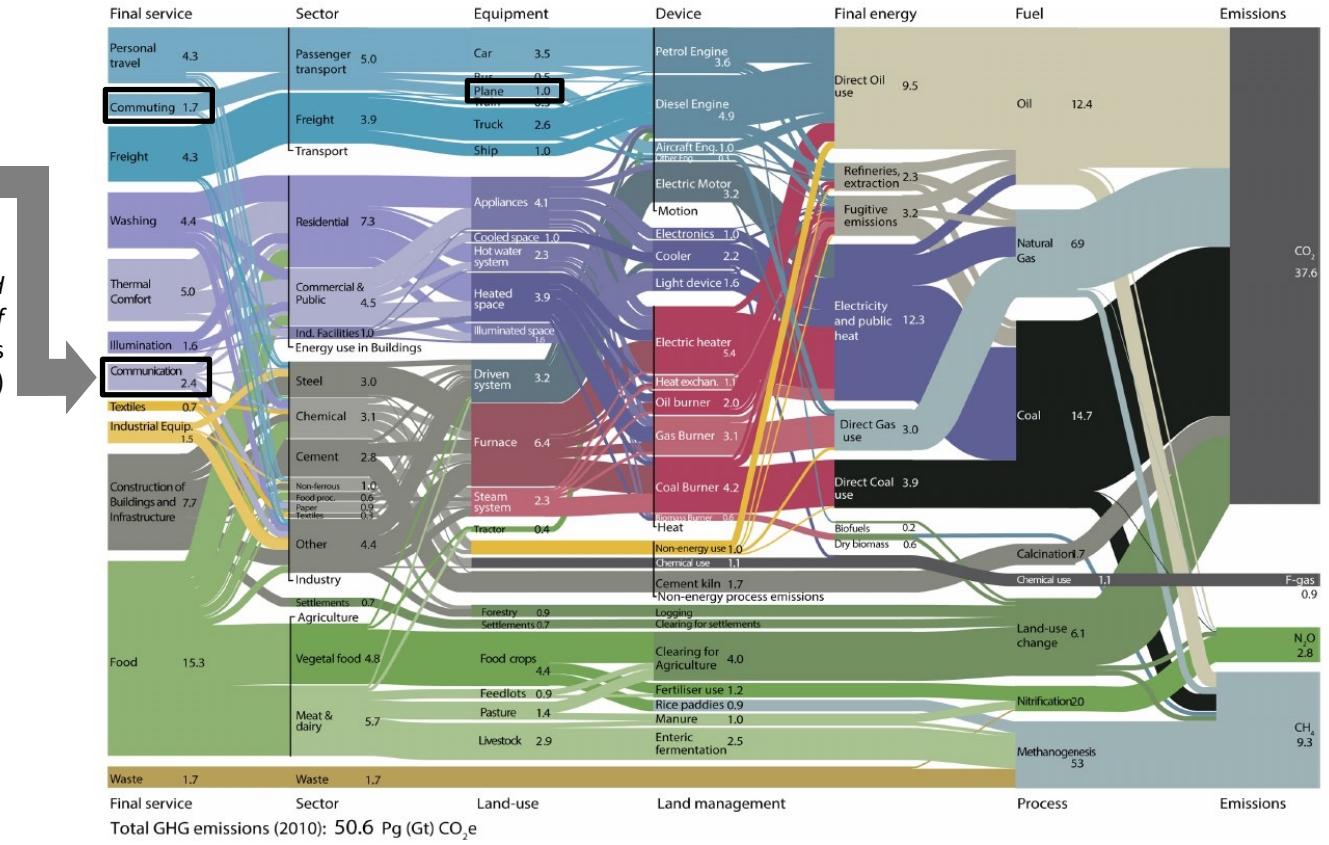


source : Bajzeli et al., *Designing Climate Change Mitigation Plans That Add Up*, Environmental Science & Technologie (2013)

Numérique et changement climatique

- Numérique :
2-4% des GES

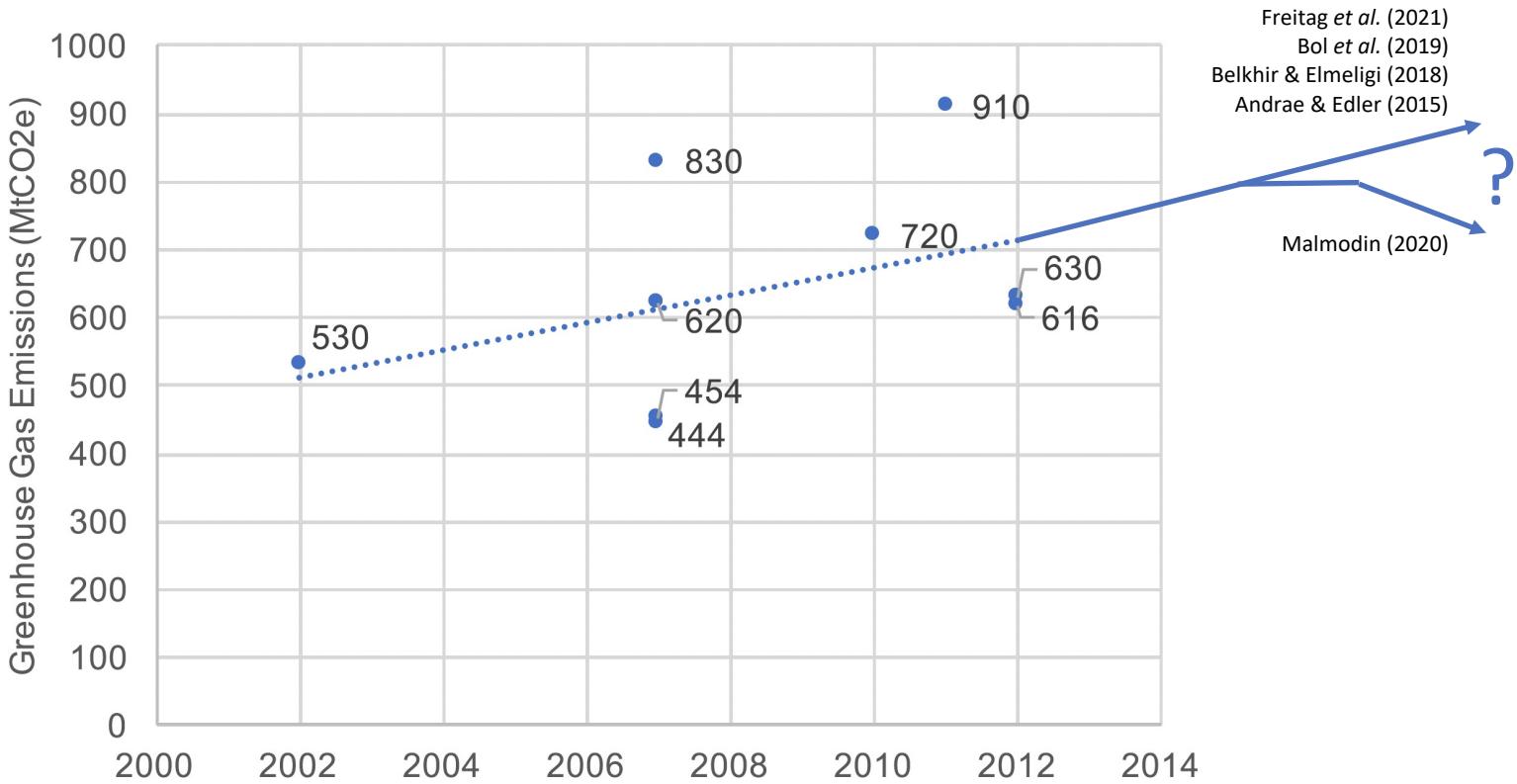
source : Freitag et al., *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations, Patterns (2021)*



source : Bajzeli et al., *Designing Climate Change Mitigation Plans That Add Up*, Environmental Science & Technologie (2013)

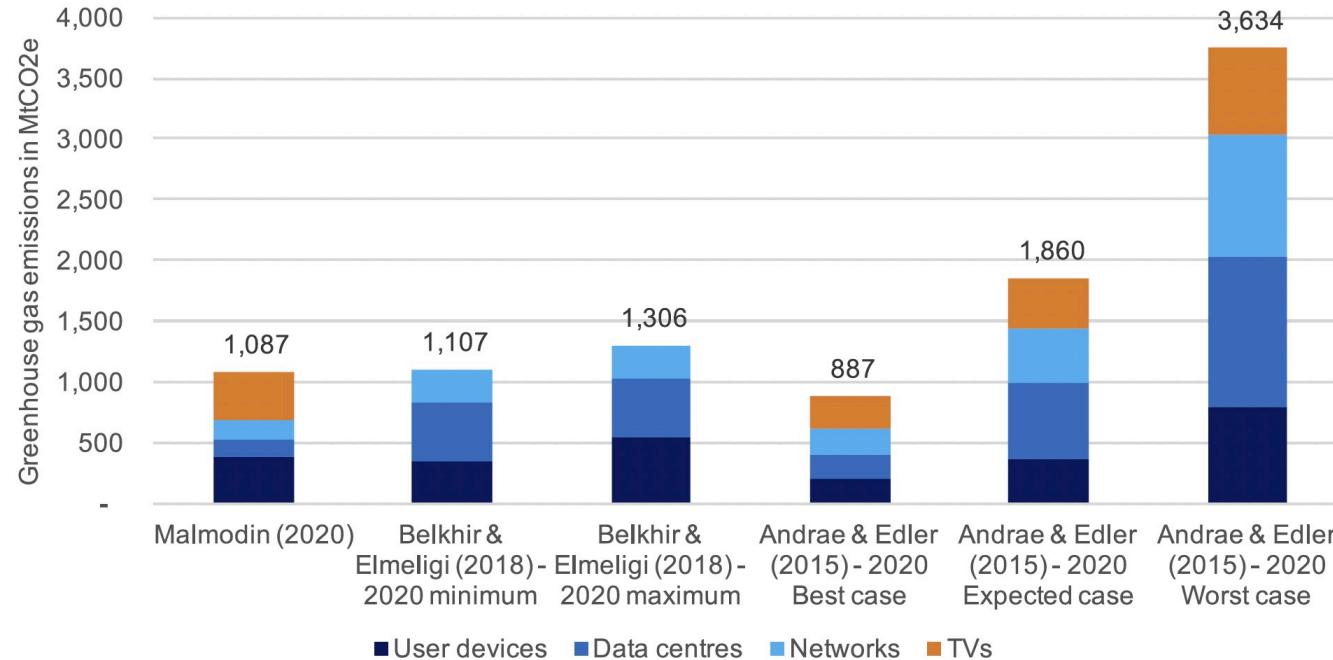
Les émissions mondiales du numérique

tendance

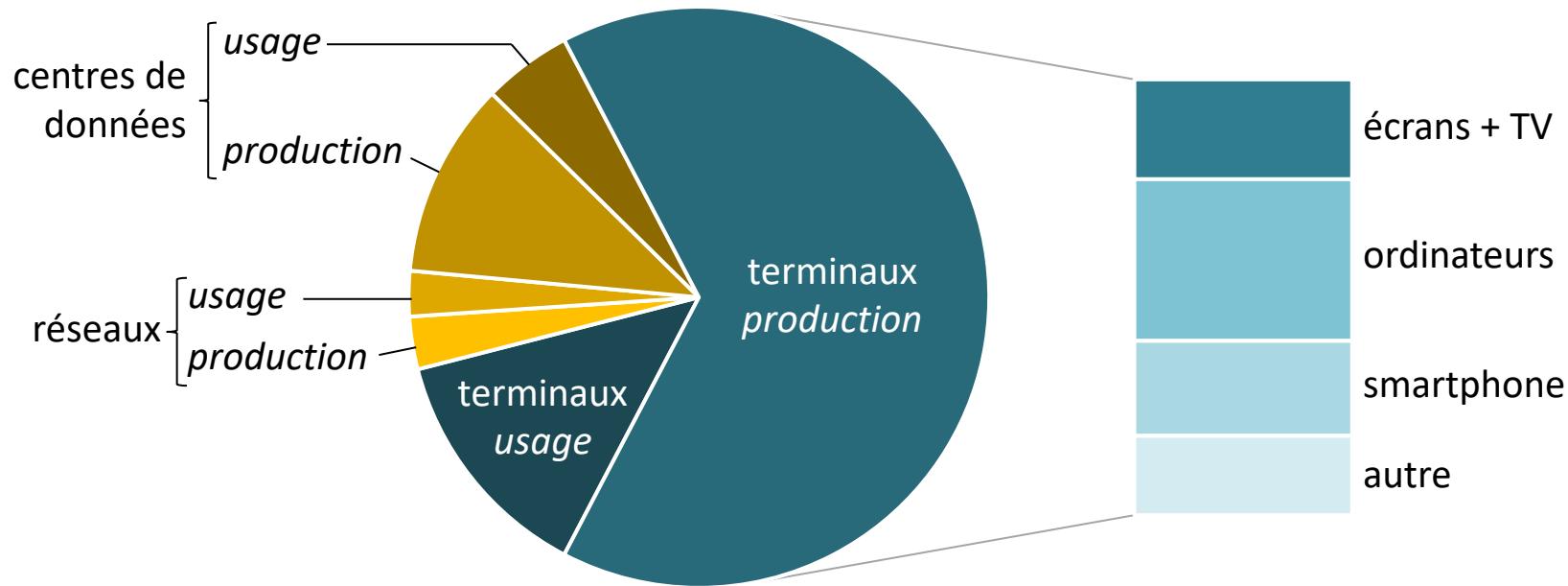


Les émissions mondiales du numérique

répartition



Répartition des émissions pour la France



source des données : ADEME ARCEP, *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective* (2022)



2^{ème} partie



Les impacts environnementaux du numérique *d'autres enjeux du numérique*

Impacts liés à l'extraction des métaux

Conflits armés



Conditions de travail



Usage de l'eau



Source : <https://mapa.conflictosmineros.net>

Pollutions (eau, air, sol)



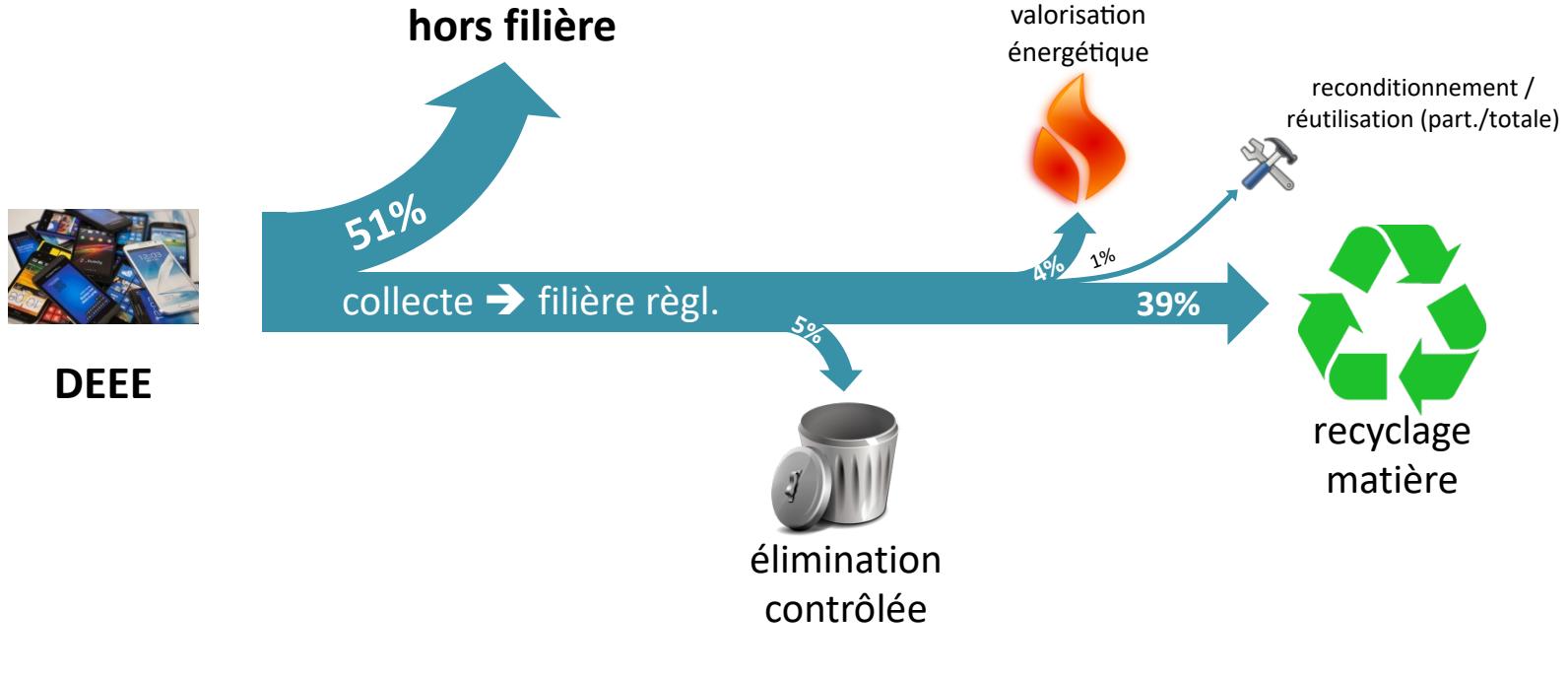
ressource : Aurore Stéphant, SICT (2021)

<https://www.youtube.com/watch?v=QW9udH0vwIE>

Impacts liés à la fin de vie

problème du trafic illégal de déchets électriques et électroniques
et du recyclage « informel » (pollution des éco-systèmes, effets sur la santé, ...)

filières de valorisation





Agbogbloshie



DEEE



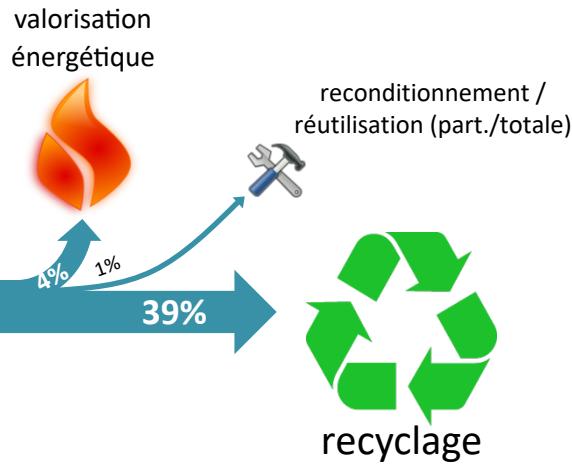
élimination
contrôlée

pas de valorisation

source des données : registre DEEE, Ademe, 2016

vers à la fin de vie

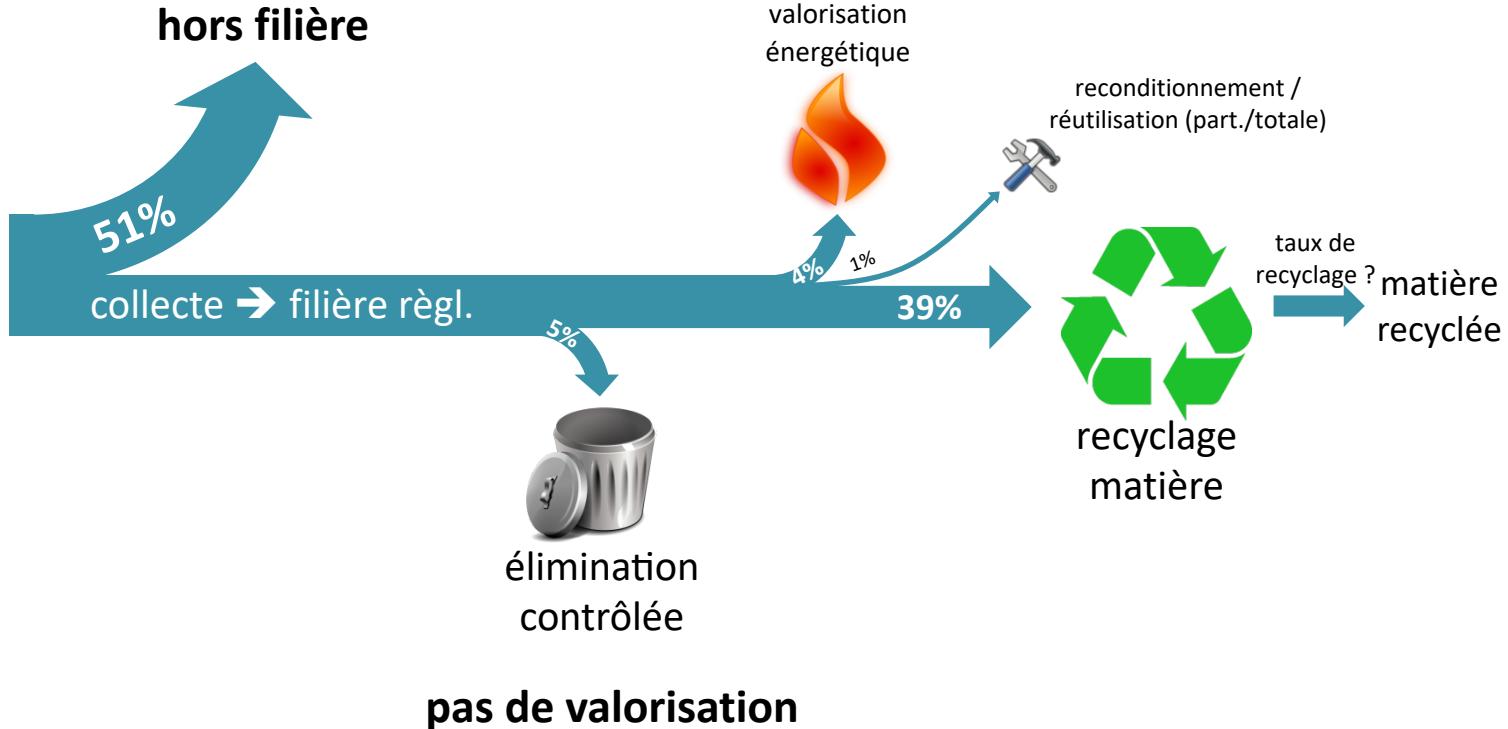
filières de valorisation



Impacts liés à la fin de vie

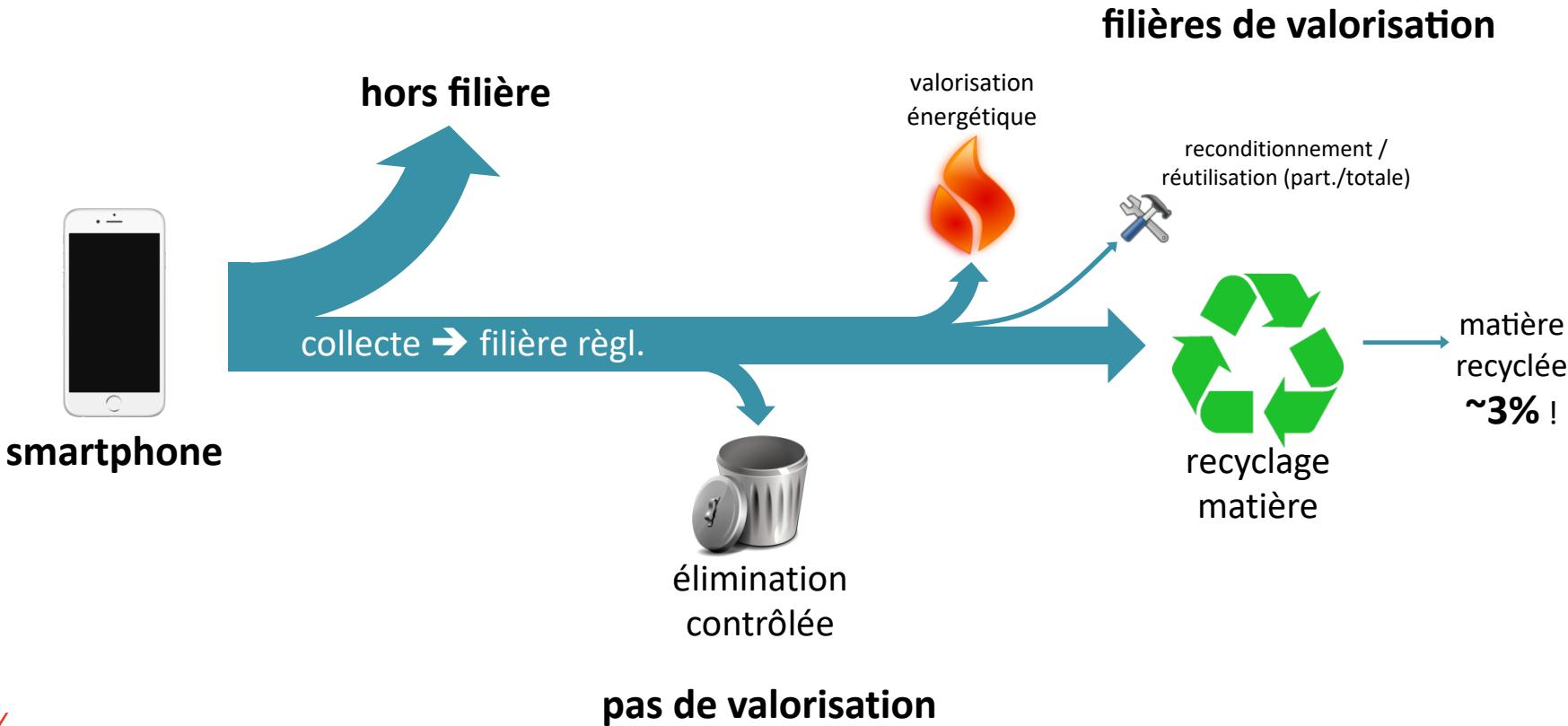


DEEE



source des données : registre DEEE, Ademe, 2016

Impacts liés à la fin de vie

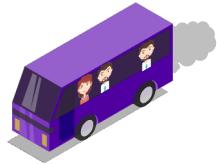


Conclusion

« *The cloud is a factory.* »
— Nathan Ensmenger



Méthodes de calcul en analyse de cycle de vie

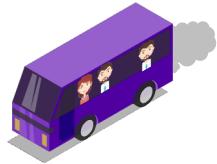


émissions d'un bus diesel :
 1540 g/km^*



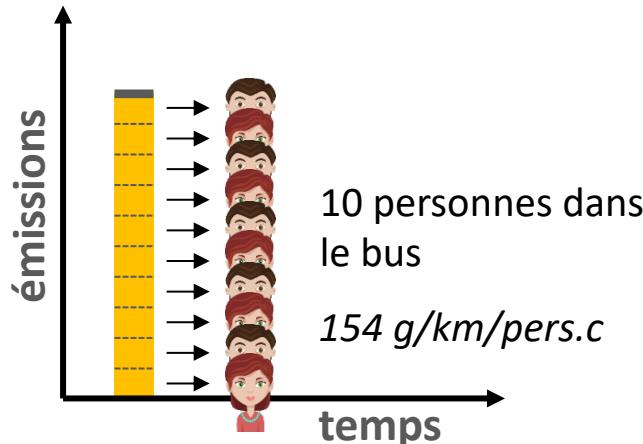
? g/km

Méthodes de calcul en analyse de cycle de vie

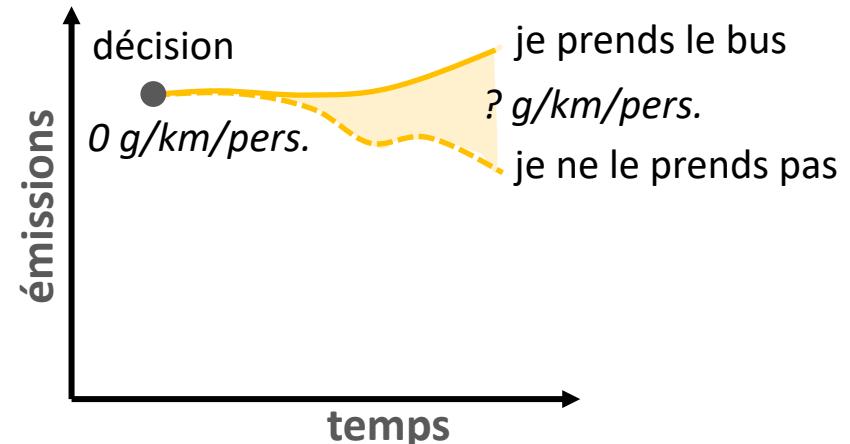


émissions d'un bus diesel :
 1540 g/km^*

Calcul attributionnel répartition des émissions



Calcul conséquentiel effets d'une décision



* : source : Carbone4

L'exemple de l'électricité

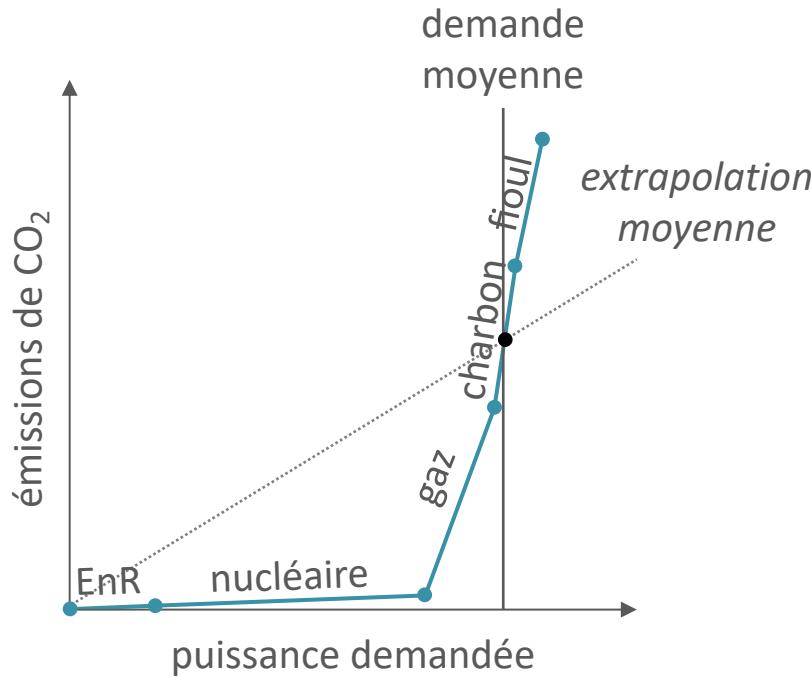
Facteurs d'émission en g éq. CO2 / kWh

Méthode/Usage	Chauffage	Éclairage	Eau chaude san.
Moyen	57	57	57
Moyen/usage, mensualisé*	101	82	67
Saisonnalisé**	147	82	53
Marginal, court terme***	500-600	?	450-550
Conséquentiel, long terme / (dit « incrémental »)****	80	80	80

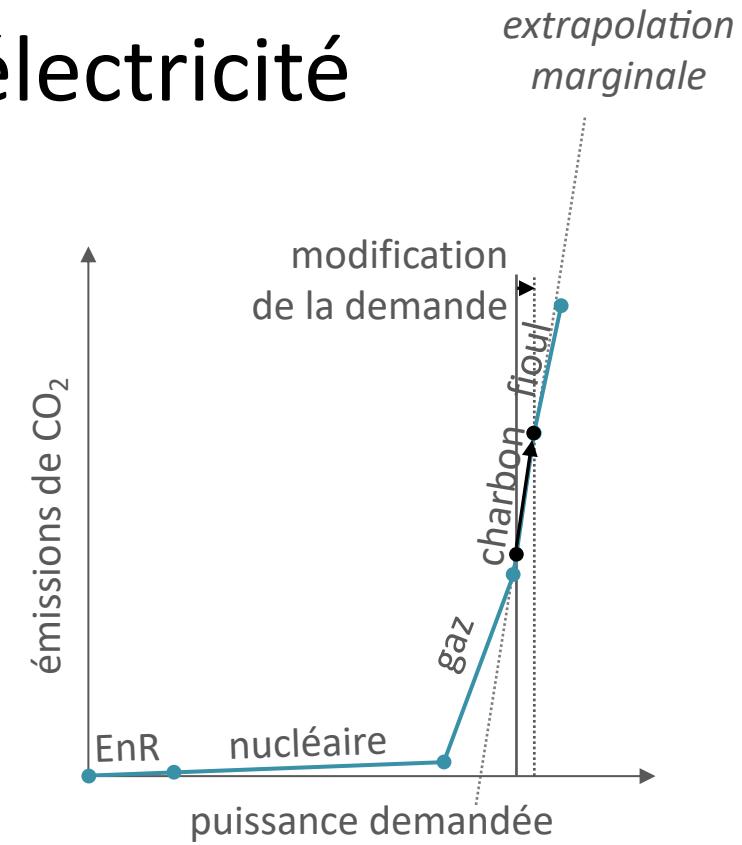
source : ADEME/RTE 2016 (*), 2018 (**), 2007 (***) , 2020 (****)

RT2012 (saisonnalisée)	RE2020 (moyen/usage, mensualisé)
180	79 (saisonnalisé, E+C- : 210)

L'exemple de l'électricité



attributionnel

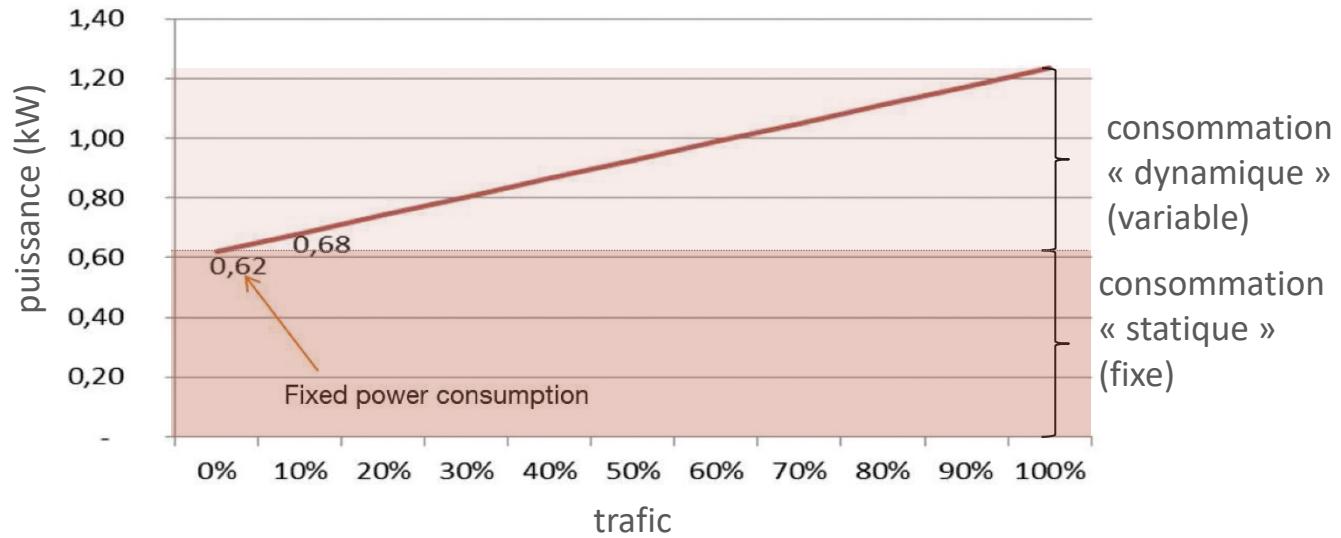
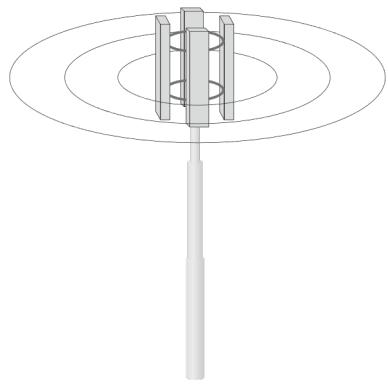


conséquentiel

source : selon les facteurs d'émissions de la base carbone ADEME

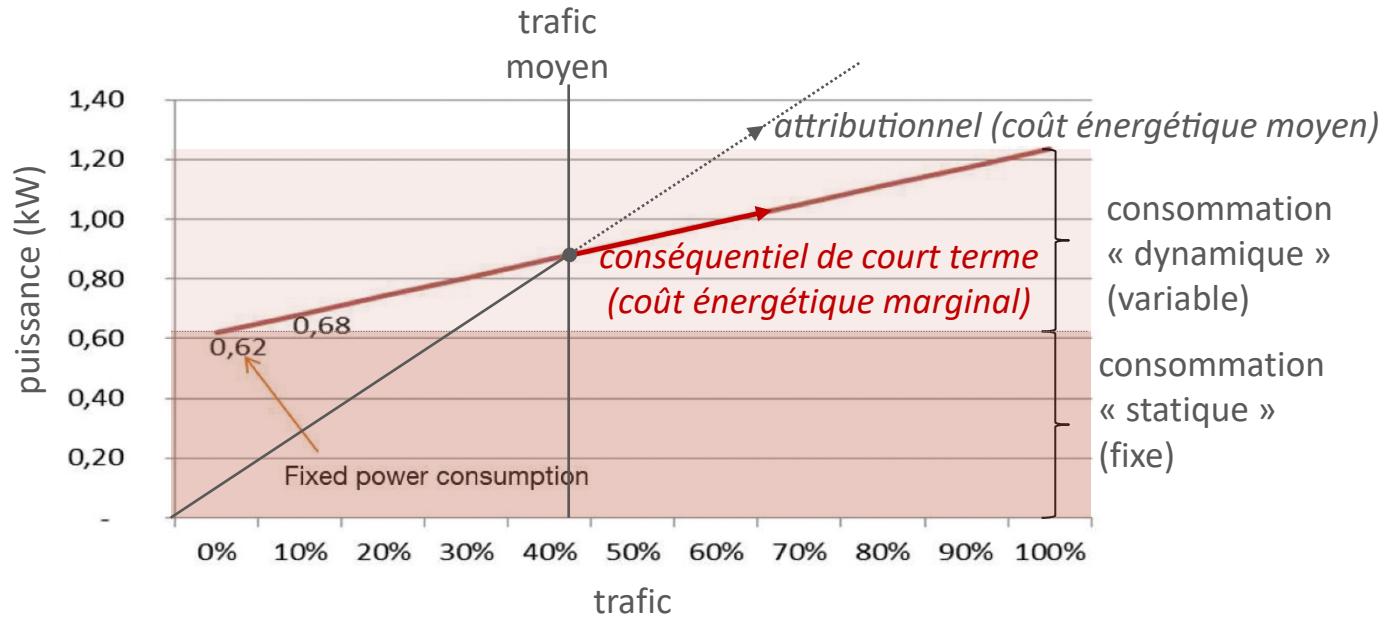
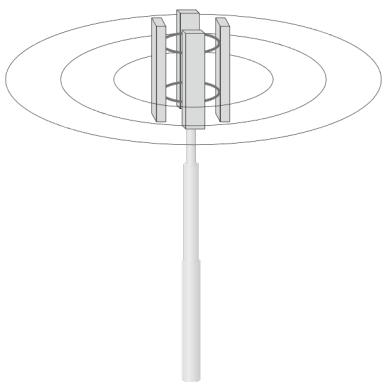
Les coûts fixes dans les réseaux

consommation d'énergie d'une station 4G

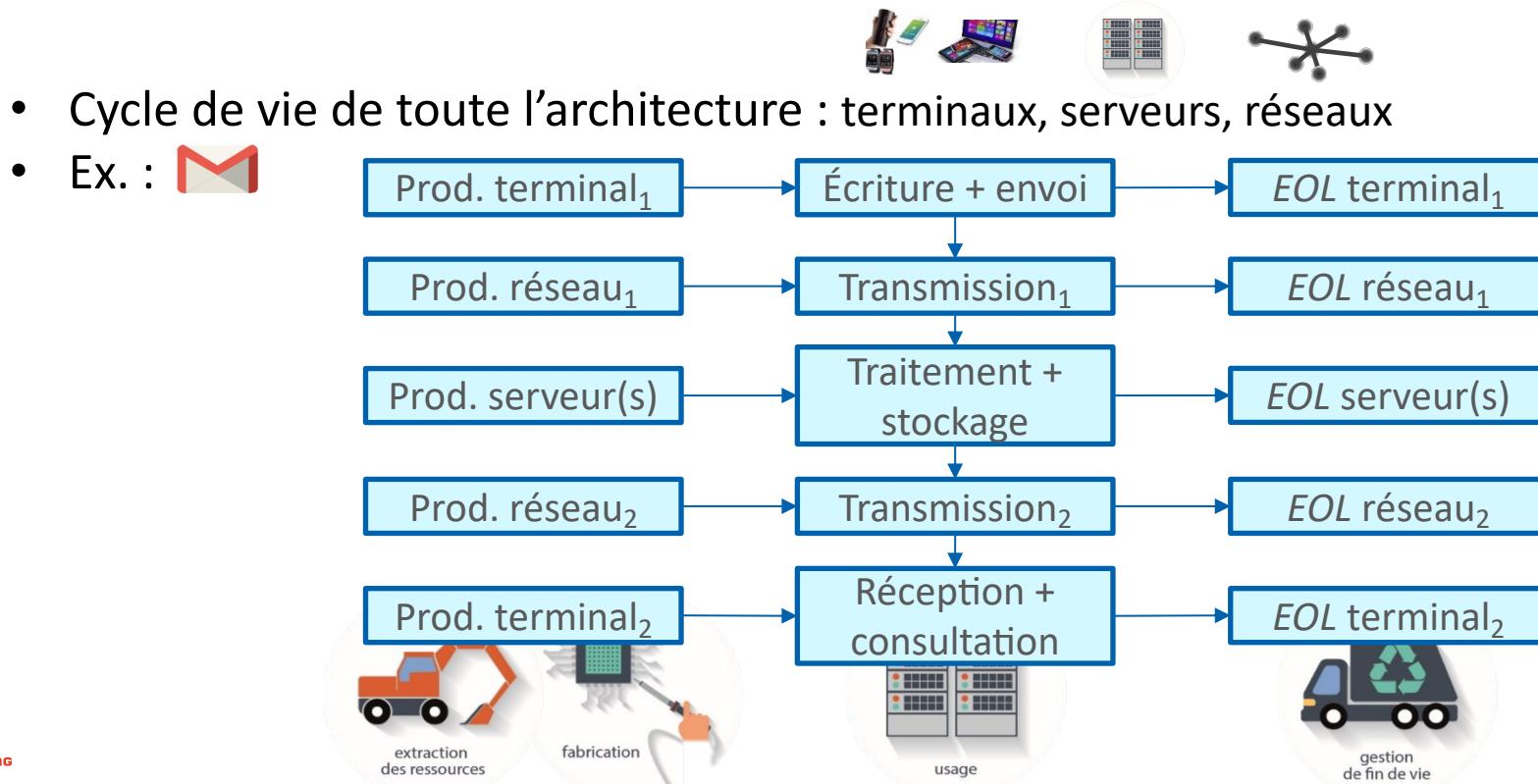


Les coûts fixes dans les réseaux

consommation d'énergie d'une station 4G

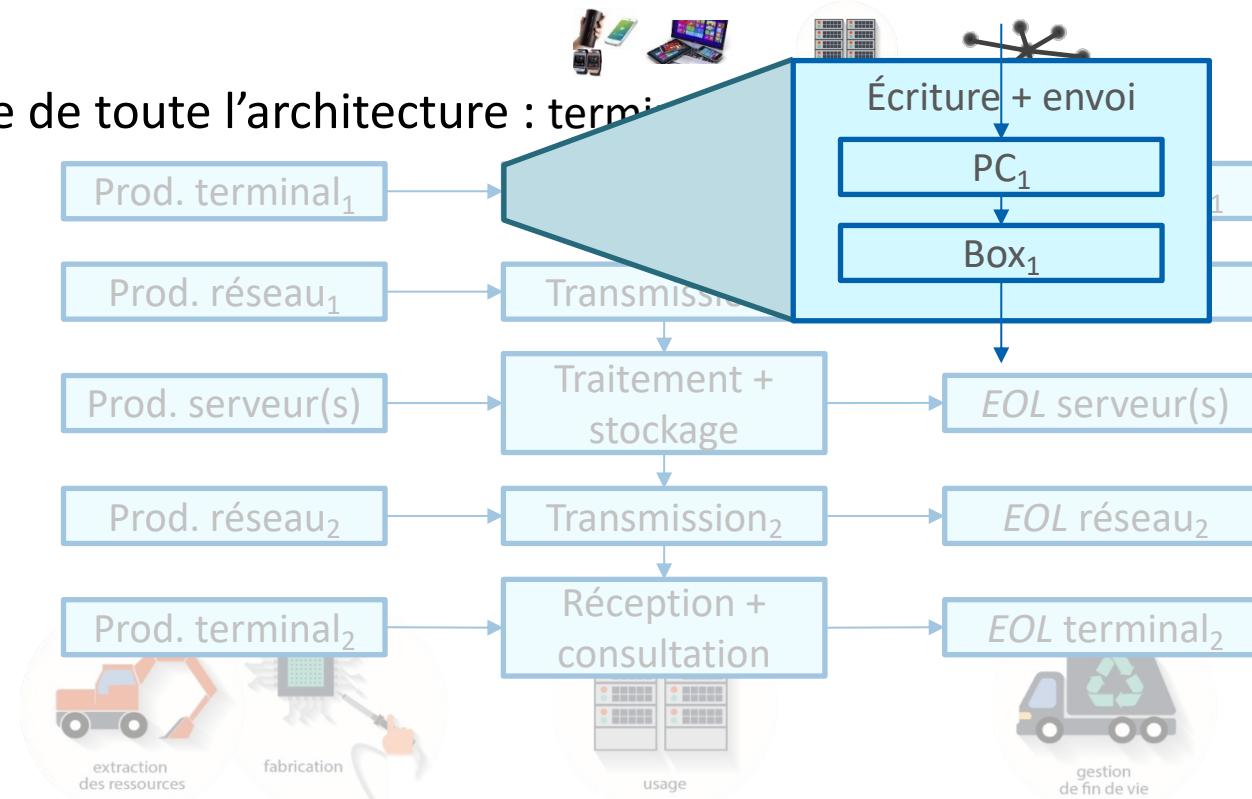


Exemple : l'envoi d'un e-mail (ICV)



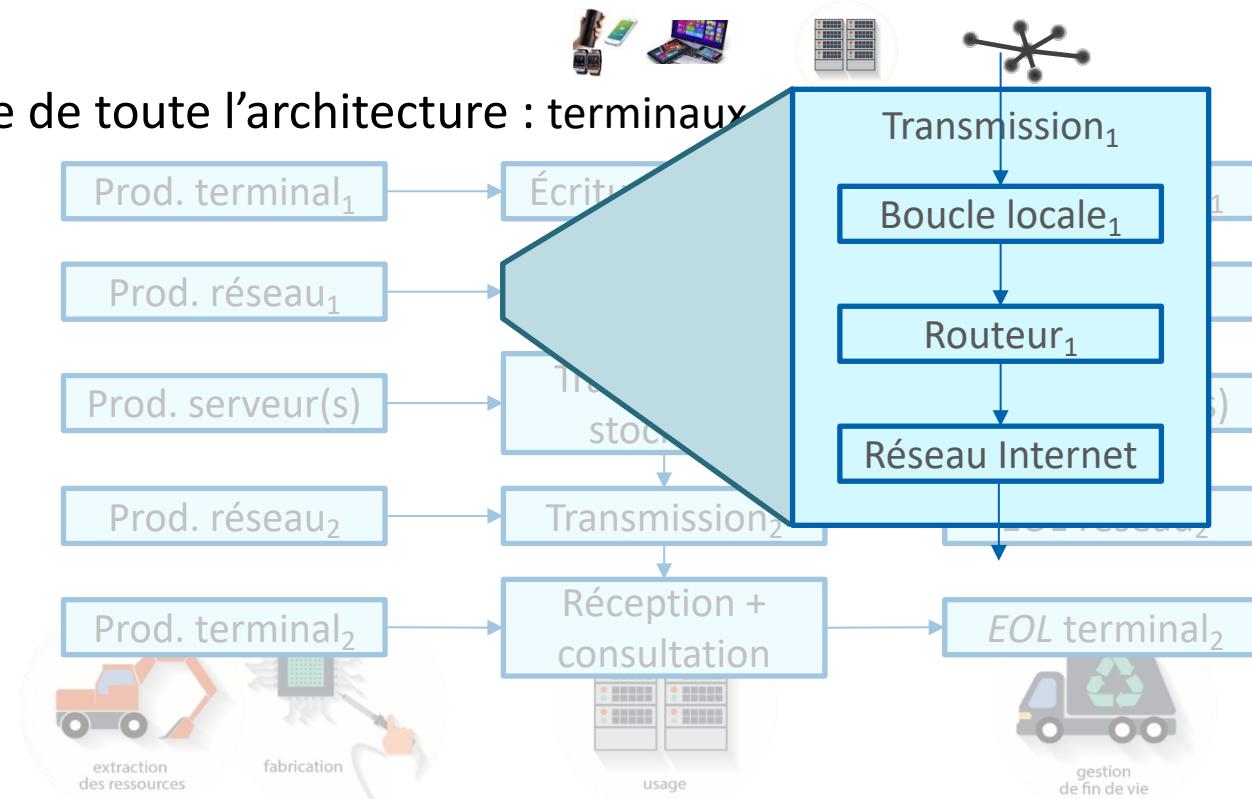
Exemple : l'envoi d'un e-mail (ICV)

- Cycle de vie de toute l'architecture : terminé
- Ex. : 

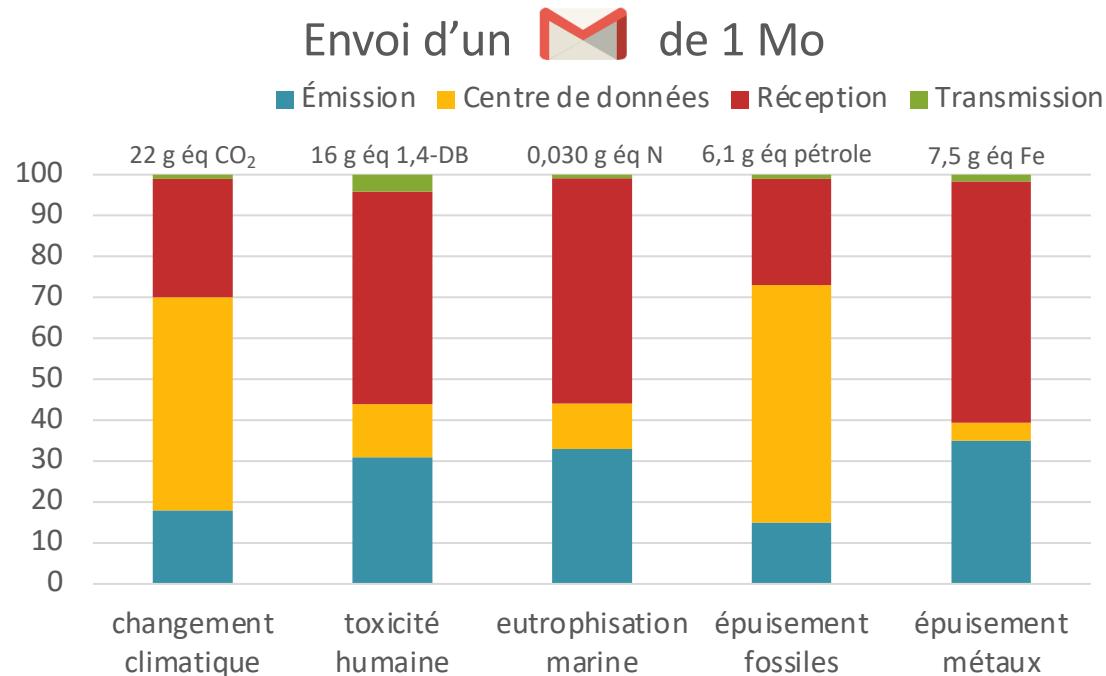


Exemple : l'envoi d'un e-mail (ICV)

- Cycle de vie de toute l'architecture : terminaux
- Ex. : 



Ex. : l'envoi d'un e-mail (résultats)



source : ADEME, Analyse comparée des impacts environnementaux de la communication par voie électronique, 2011

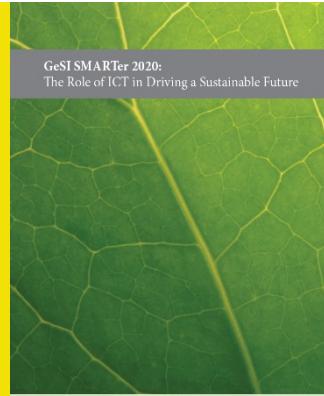
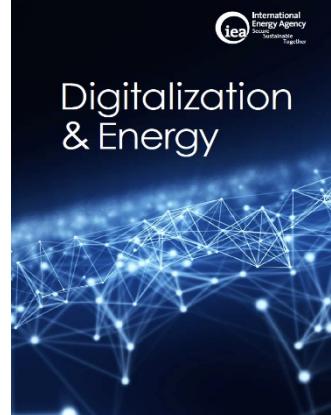
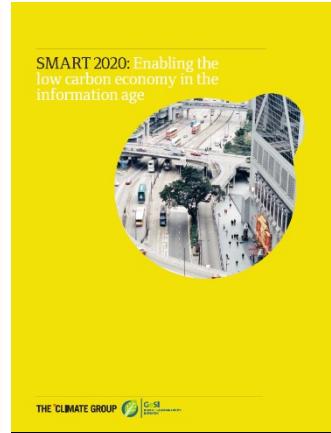


2^{ème} partie **Les effets « indirects » du numérique**

Les promesses des TIC...



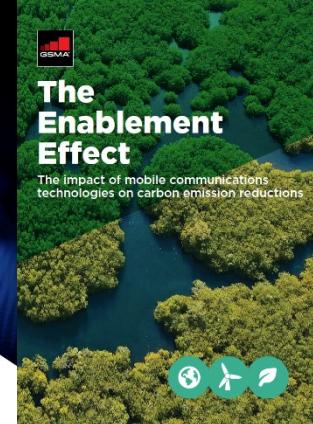
The potential global CO₂ reductions from ICT use
Identifying and increasing the opportunities to reduce the first billion tonnes of CO₂.



#SMARTer2030
ICI Solutions for 21st Century Challenges



GeSI Global e-Sustainability Initiative accenture strategy



Les promesses des TIC...



Gauthier Roussilhe,
Que peut le numérique pour la transition écologique ? (2021)

The collage consists of five study reports:

- SMART 2020: Enabling the Low Carbon Economy through Information and Communications Technologies** (Cédric Villani, March 2020)
- GESSMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future** (GeSI, March 2020)
- #SMARTer2030: ICT Solutions for 21st Century Challenges** (GeSI, March 2020)
- The Climate Impact of Digitalization & Energy** (Accenture Strategy, March 2020)
- The Enablement Effect: The Impact of mobile communications technologies on carbon emission reductions** (GSMA, March 2019)

Problèmes de ces études :

- se concentre sur les bénéfices
- incompatible avec l'observation
- attribution des bénéfices ou double comptage des bénéfices
- hypothèses optimistes (effets rebond pas pris en compte, ...).

Les promesses des TIC...



« Compared to the global carbon footprint of mobile networks themselves, **the level of avoided emissions enabled by mobile communications technologies is 10 times greater – a tenfold positive impact.** »

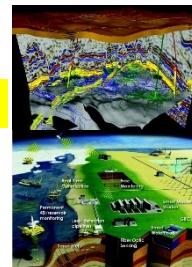
— Carbon Trust

Les promesses des TIC...

« *More evidence is needed on how digital technologies could combine to deliver system-wide improvements, and how rebound effects might curtail their benefits if the spread of digital devices increases energy use.* »



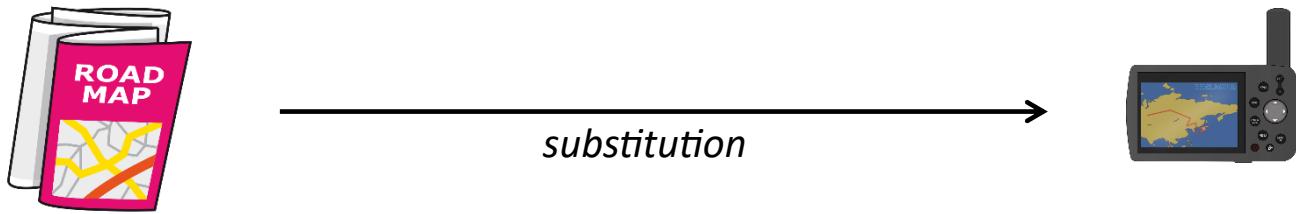
grâce au numérique :
+5% sur les réserves fossiles
exploitables, soit 10 ans de
consommation mondiale !



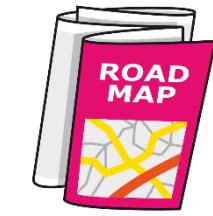
Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		exemples	
1 ^{er} ordre direct	technologie elle-même	impacts du cycle de vie du matériel		production (énergie, ressources), utilisation (énergie), fin de vie (pollution)	
2 ^{ème} ordre indirect	usages et applications	optimisation		smart-*	
		substitution		« dématérialisation » baladeur, APN -> smartphone	
3 ^{ème} ordre comportemental structurel	consommateurs	obsolescence	induction	5G	imprimante -> papier
		rebond direct	et indirect	↗ appareils, usages, consommation	
	économie	croissance économique		nouveaux marchés	
		accélération		e-commerce (24/7), logistique	
	société	reconfiguration		Uber	

Impacts environnementaux du GPS



Impacts environnementaux du GPS



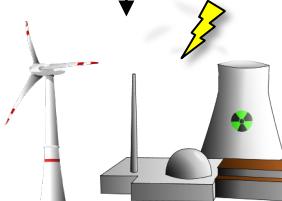
- papier



- production
de papier

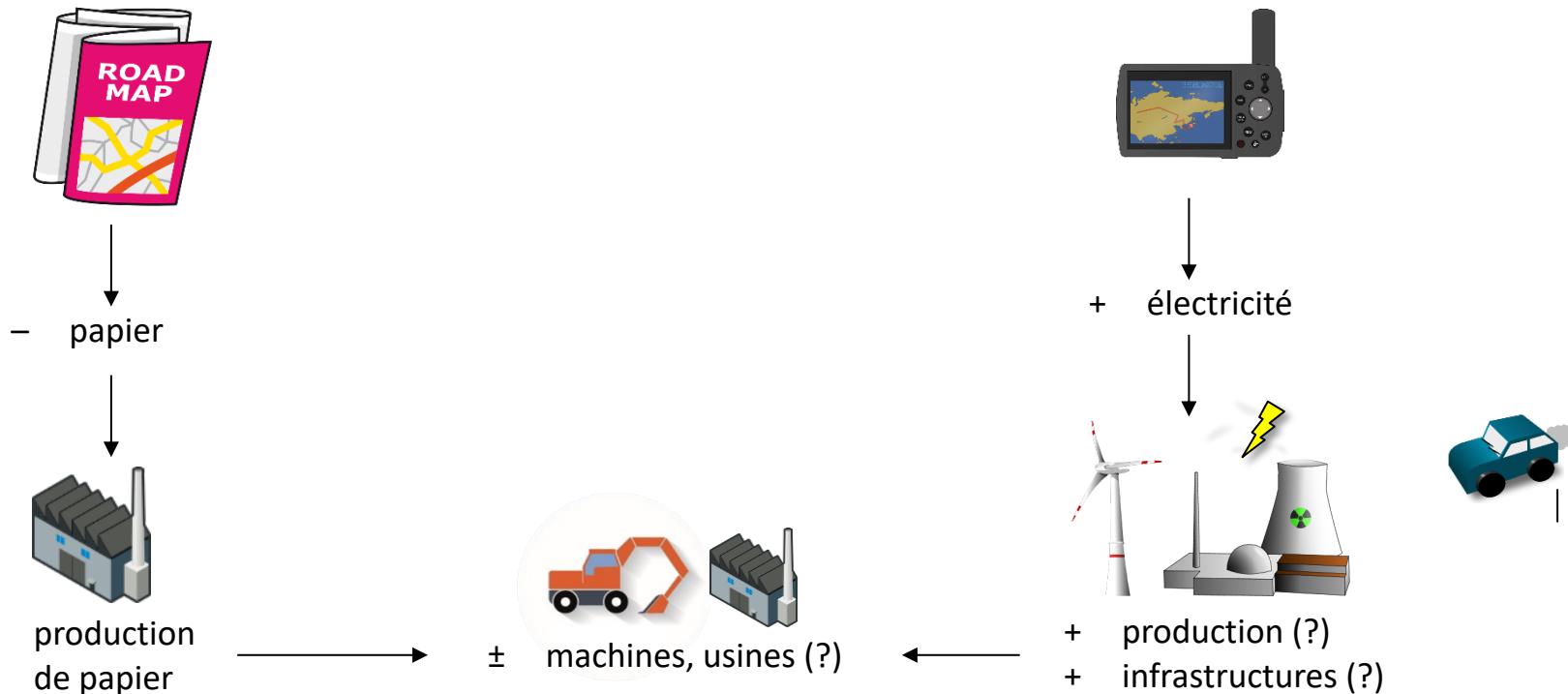


+ électricité



+ production (?)
+ infrastructures (?)

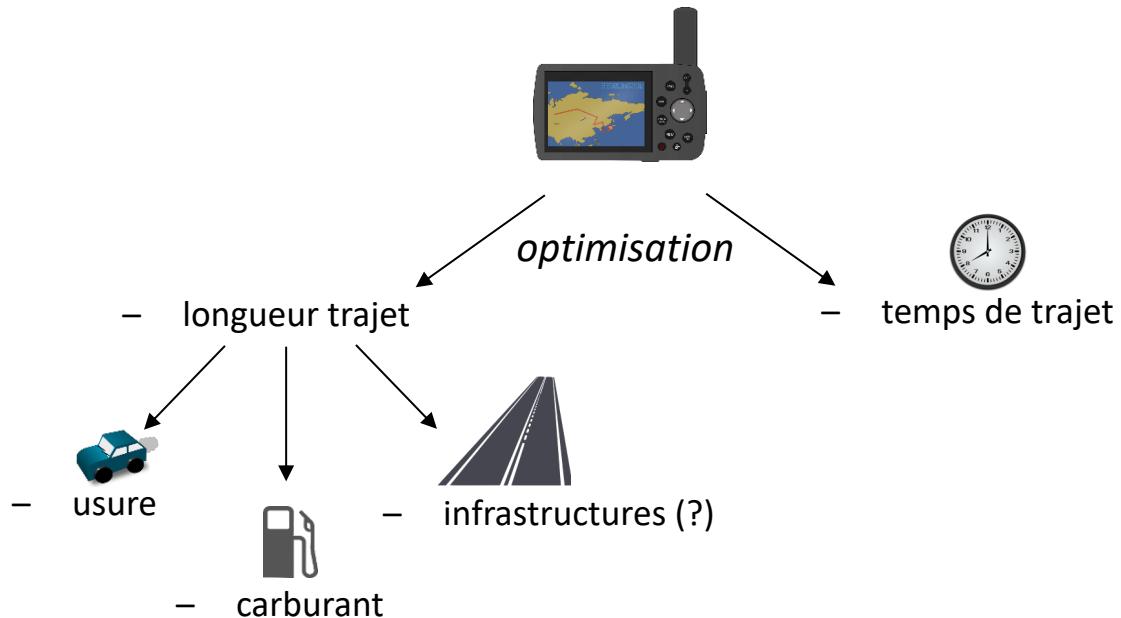
Impacts environnementaux du GPS



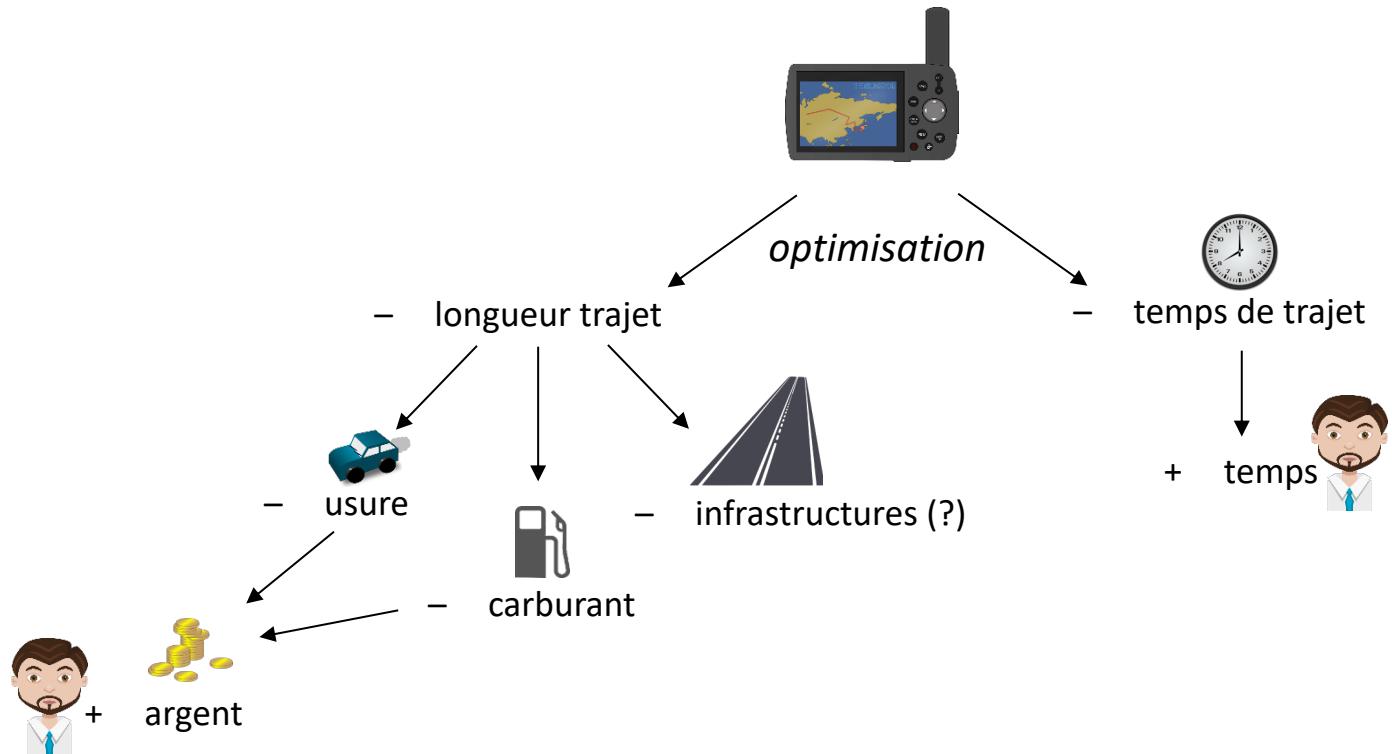
Impacts environnementaux du GPS



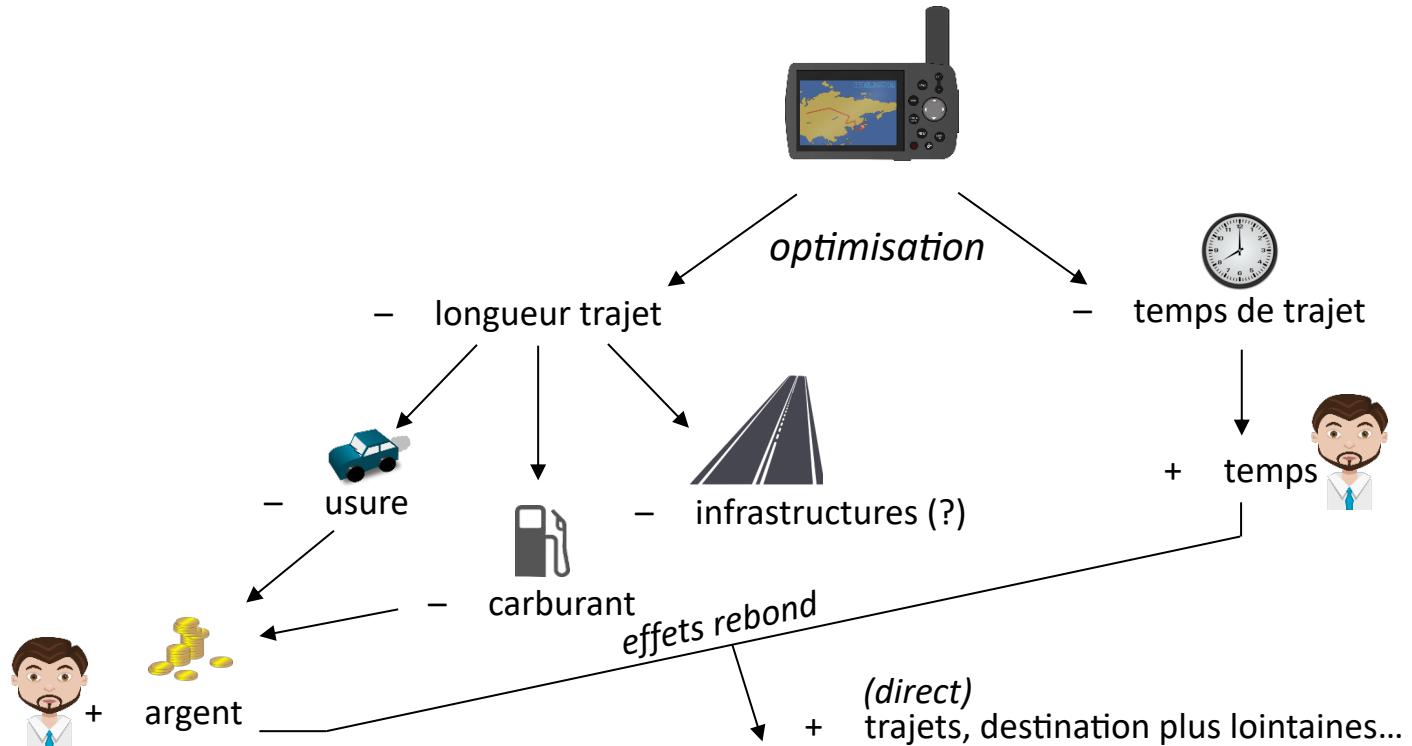
Impacts environnementaux du GPS



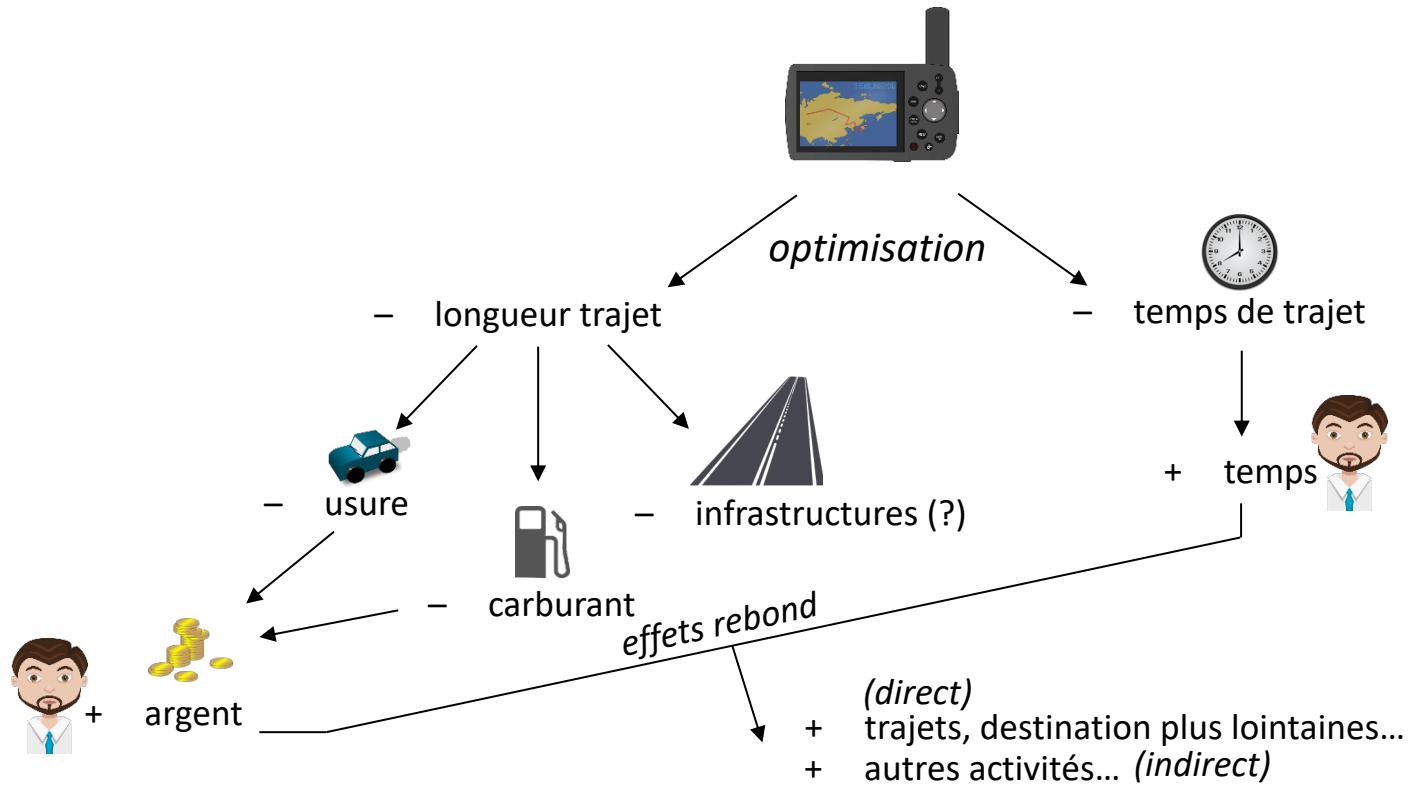
Impacts environnementaux du GPS



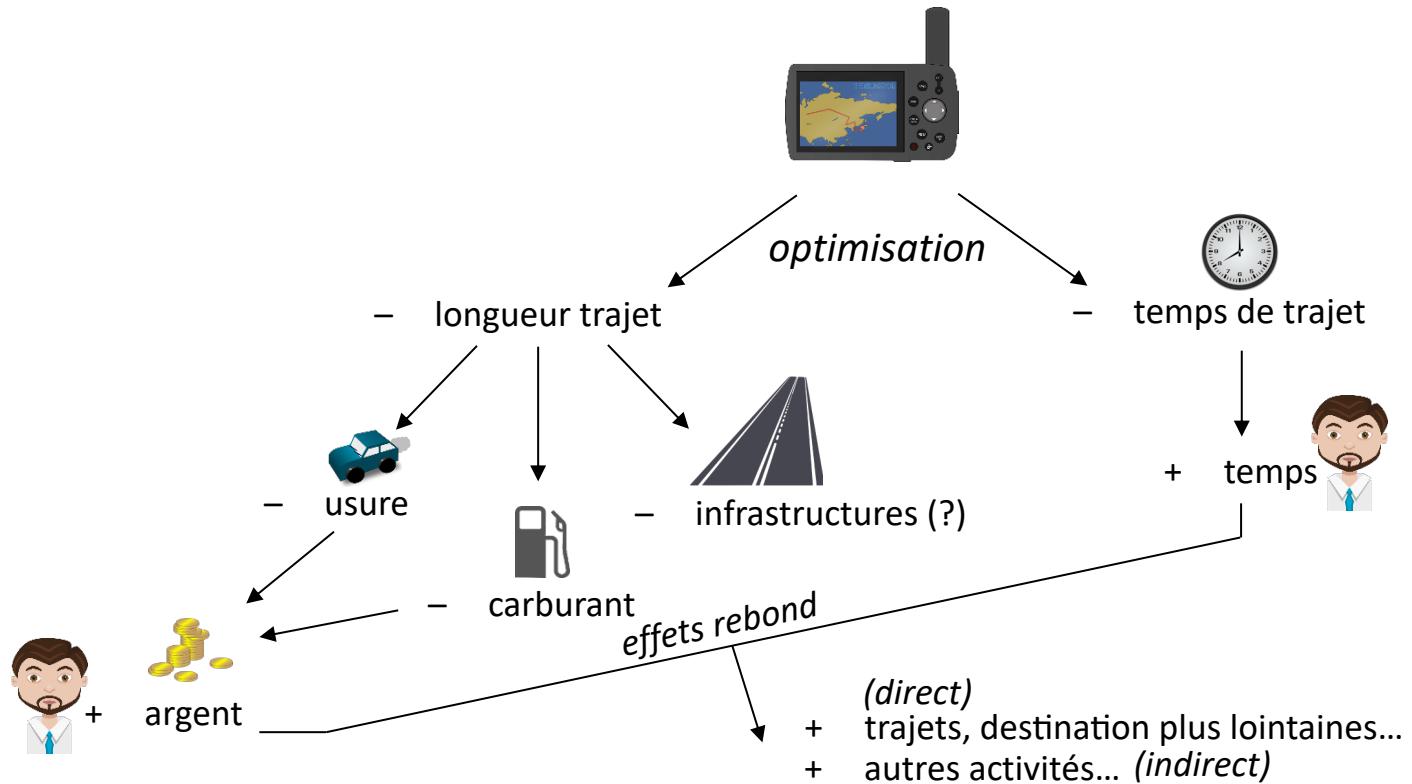
Impacts environnementaux du GPS



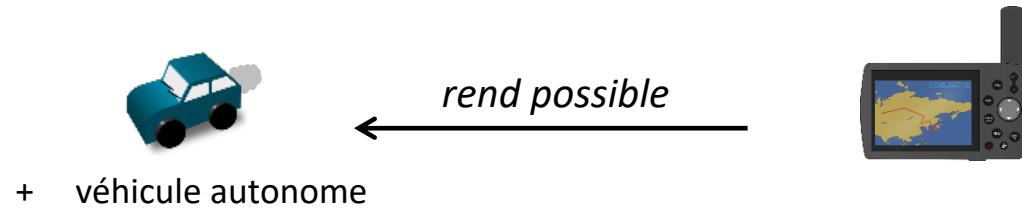
Impacts environnementaux du GPS



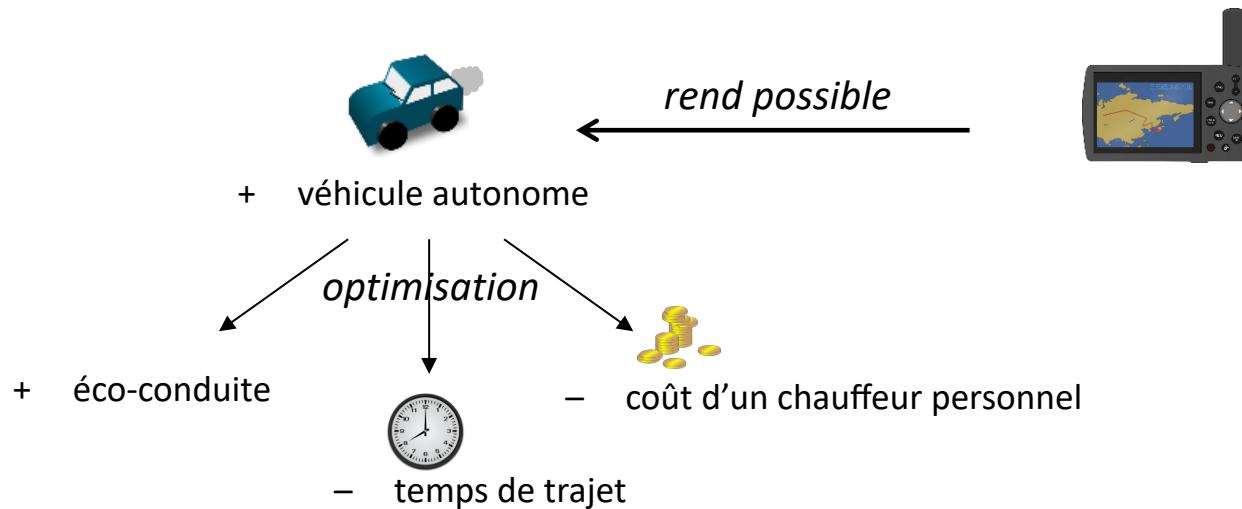
Impacts environnementaux du GPS



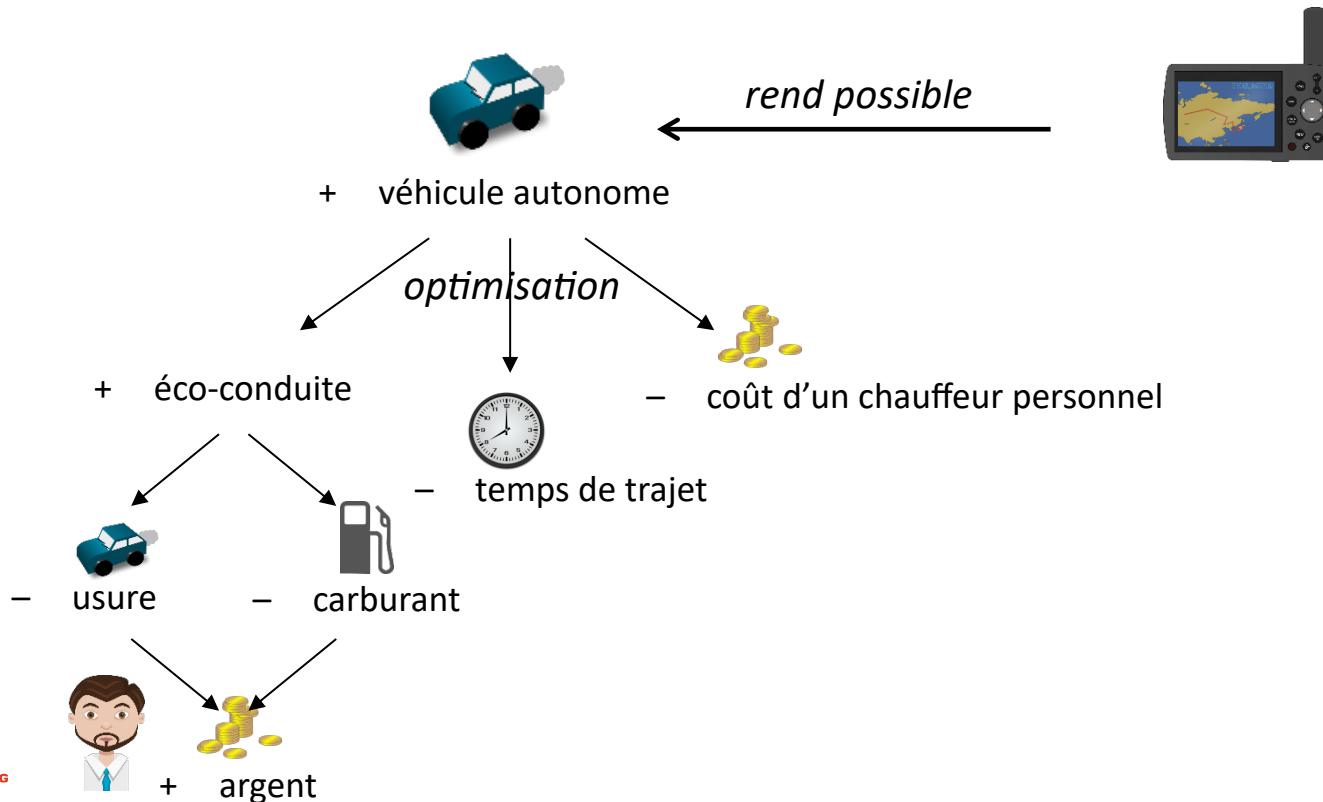
Impacts environnementaux du GPS



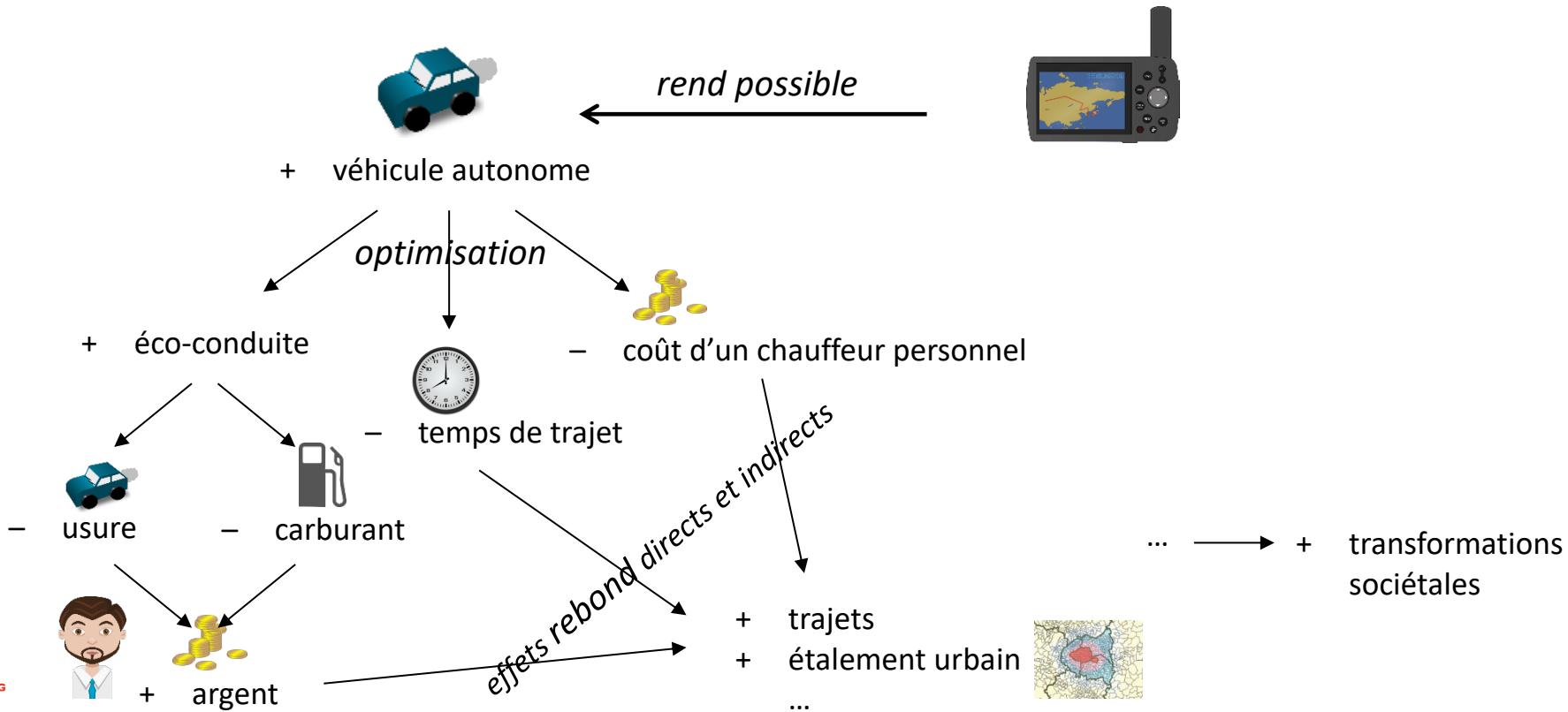
Impacts environnementaux du GPS



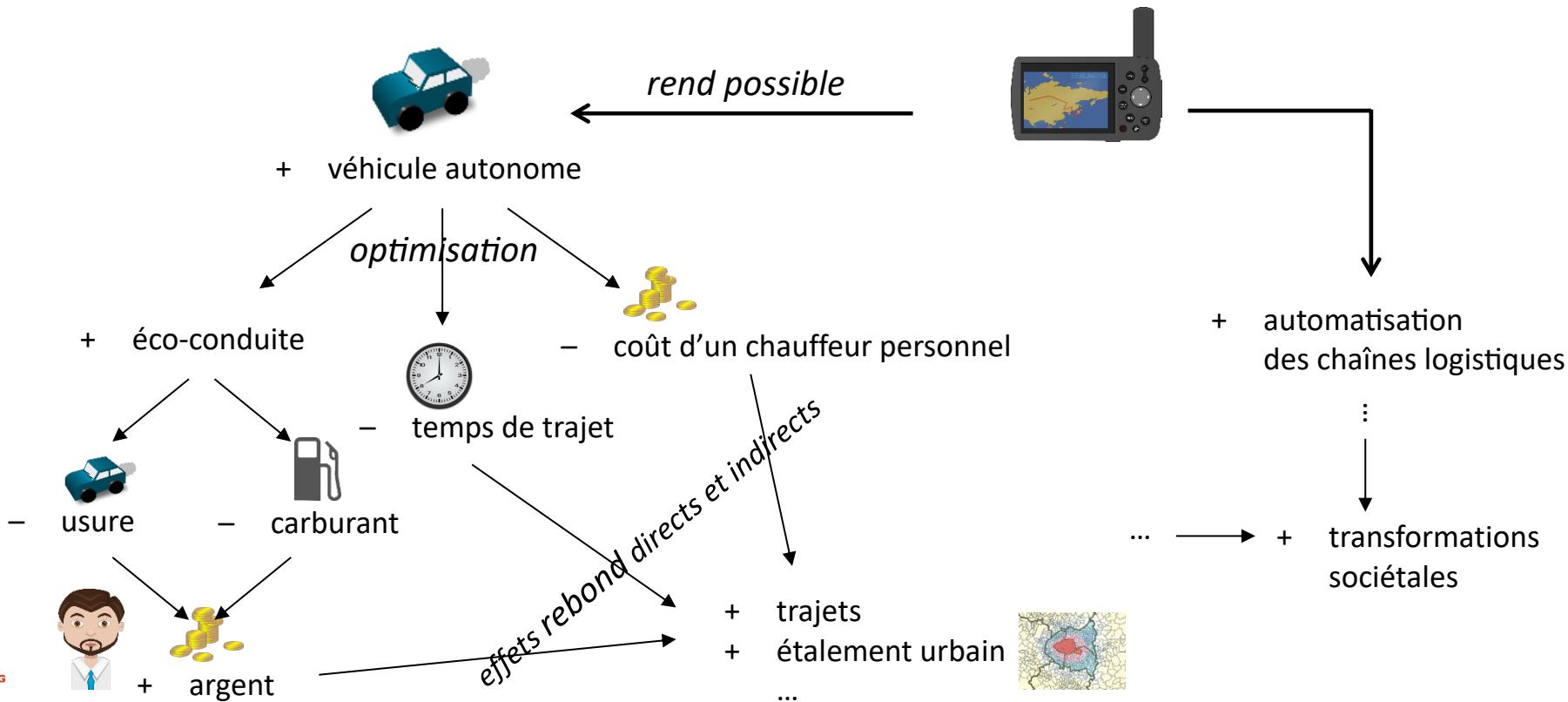
Impacts environnementaux du GPS



Impacts environnementaux du GPS



Impacts environnementaux du GPS



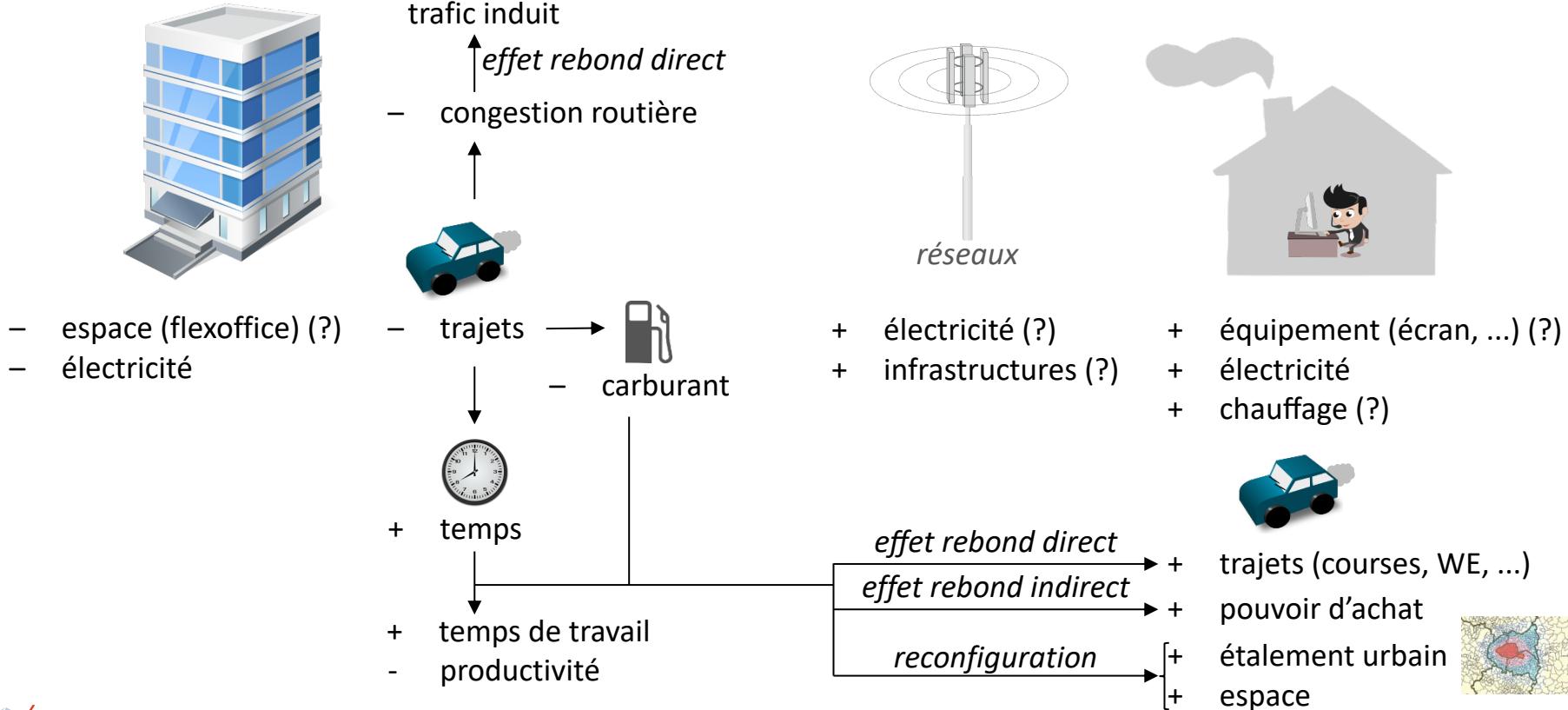
Les impacts environnementaux du télétravail



substitution →



Les impacts environnementaux du télétravail



d'autres effets : virtualisation des relations professionnelles, flexibilité des horaires, ...

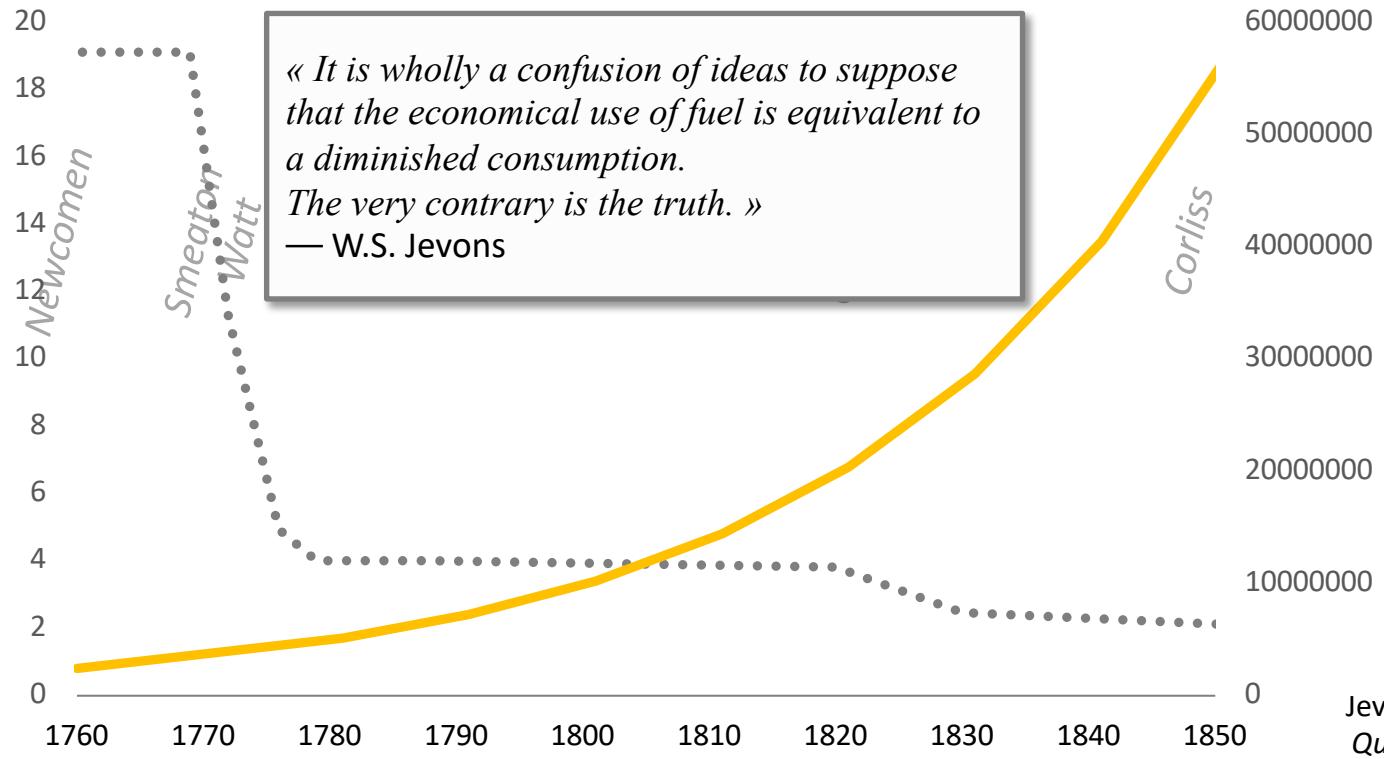


2^{ème} partie **Les effets « indirects »**
du numérique
Les effets rebond

Qu'est-ce que l'effet rebond ?

Le paradoxe de Jevons

efficacité de la machine à vapeur (kg / kWh) **consommation totale de charbon (t)**



Exemple d'effet rebond

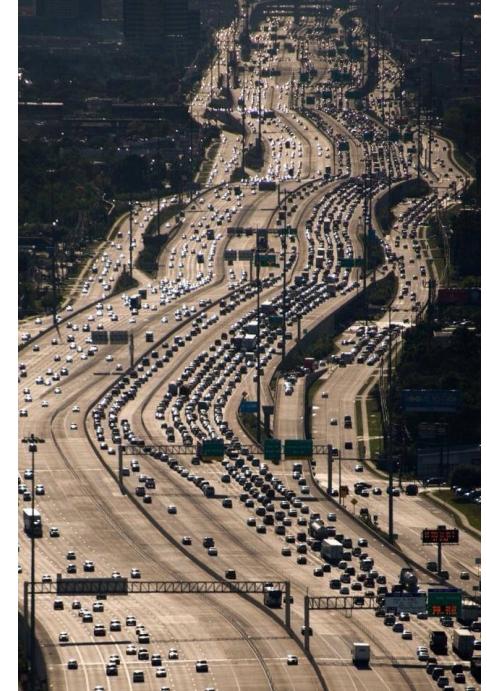
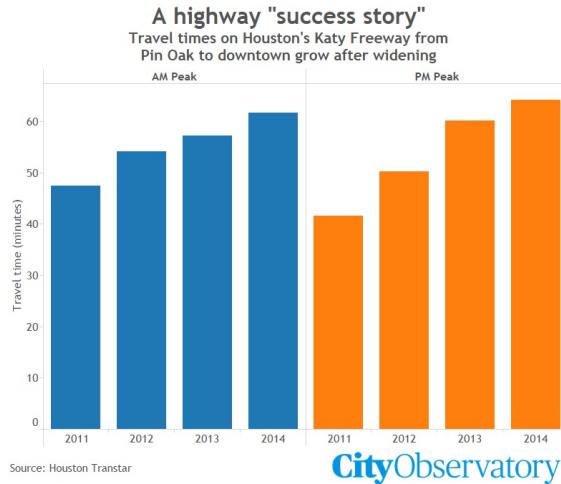
Le trafic induit

Houston I-10 Katy Freeway

- Augmentation de la capacité du réseau routier
(pour réduire la congestion)



- Augmentation du trafic
(niveau de congestion inchangé)



Exemple d'effet rebond

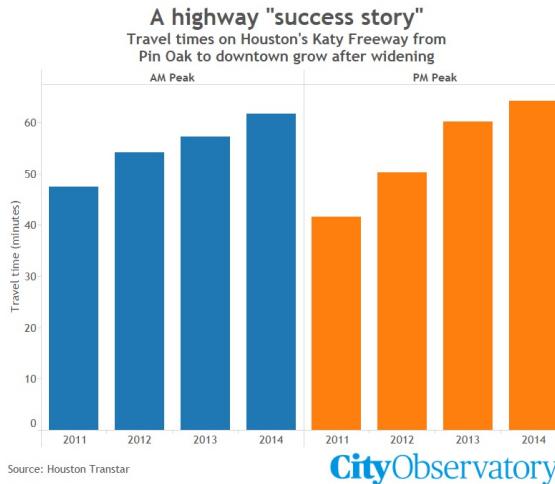
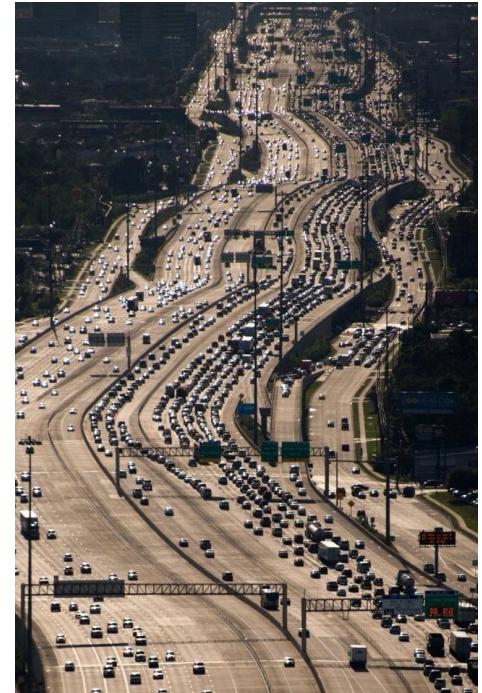
Le trafic induit

- Augmentation de la capacité du réseau routier
(pour réduire la congestion)

↓
*élasticité
de la demande*

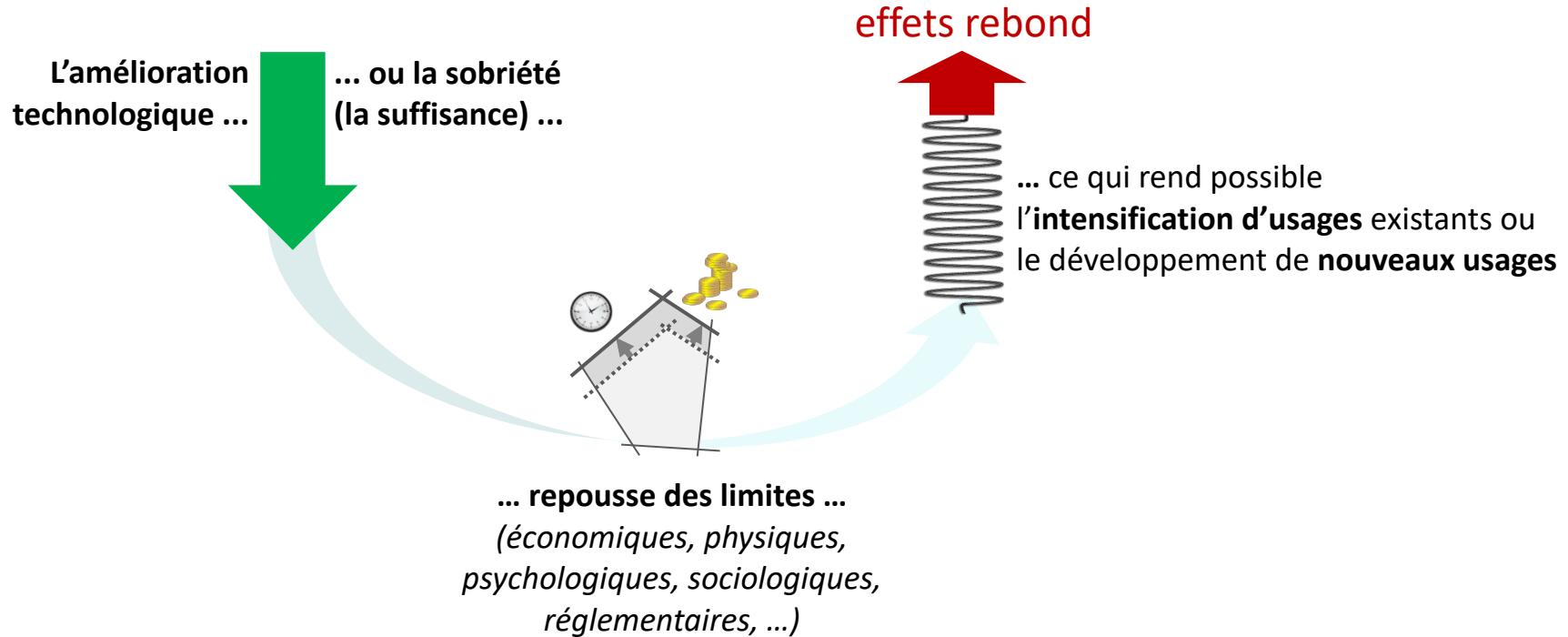
- Augmentation du trafic
(niveau de congestion inchangé)

Houston I-10 Katy Freeway

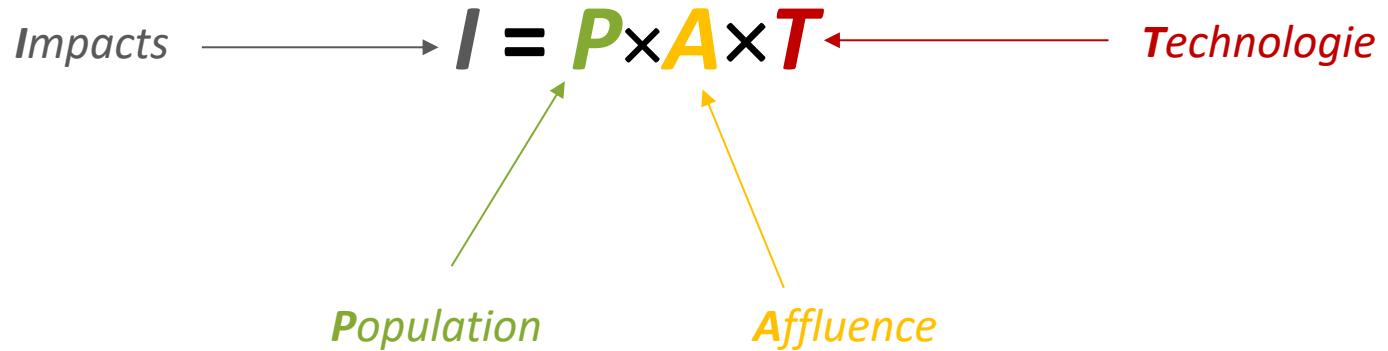


source : Duranton et al., *The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities* (2009)

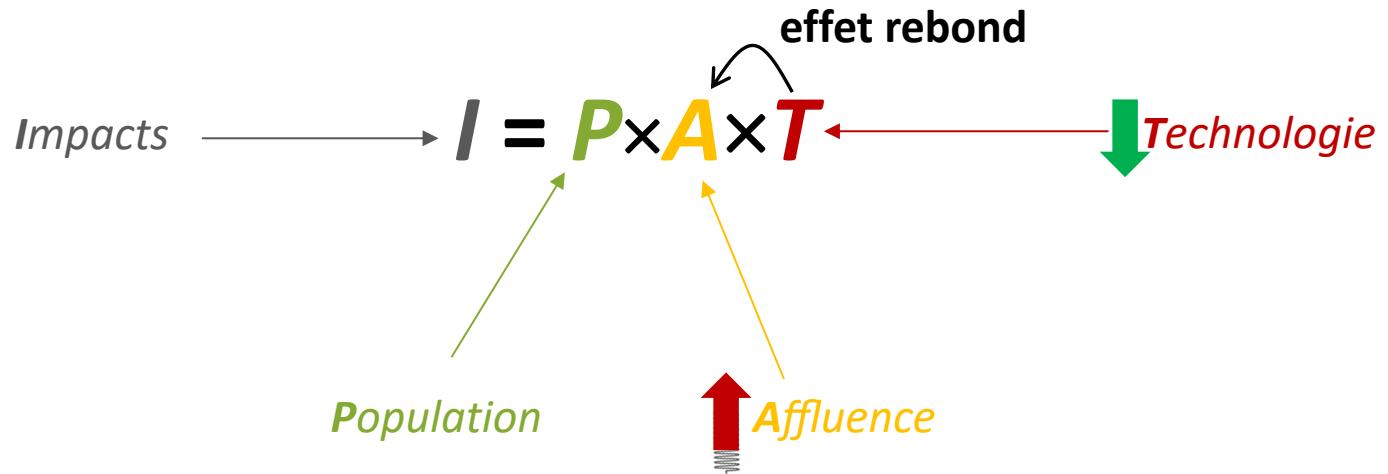
L'effet rebond



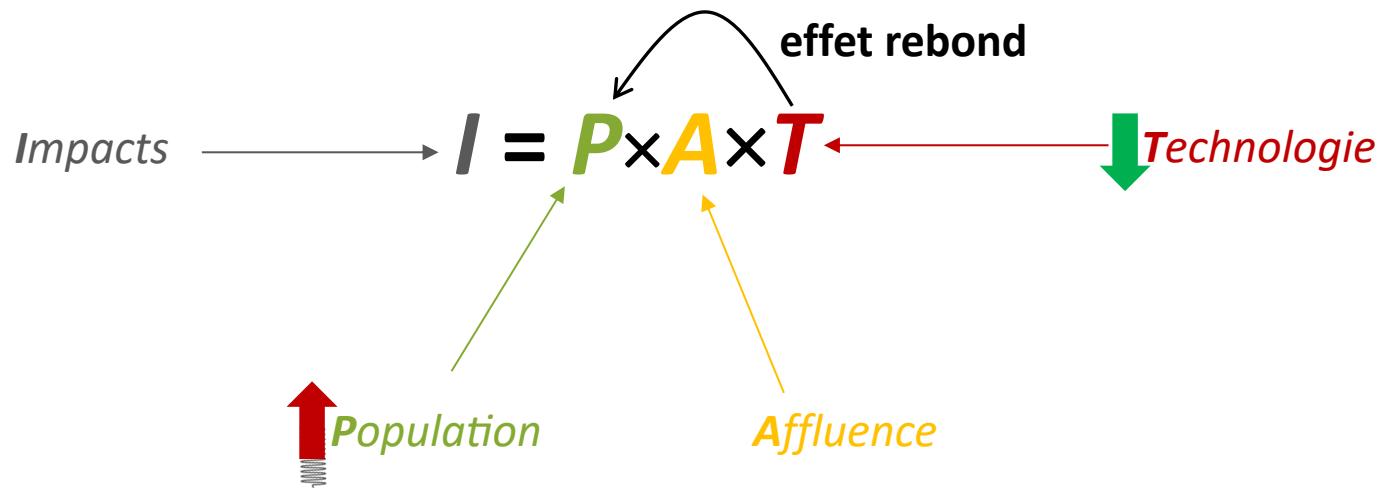
L'effet rebond



L'effet rebond



L'effet rebond



Estimer l'effet rebond

- On cherche une **causalité** : **efficacité**



effet rebond

- Comparer :

scénario **sans**
gain en efficacité

affluence

scénario **avec**
gain en efficacité

cas réel (contrôle)
modèle (contrefactuel)
cas réel (historique)
modèle (prévision)

vs
vs
vs
vs

cas réel (traité)
cas réel (historique)
modèle (contrefactuel)
modèle (prévision)

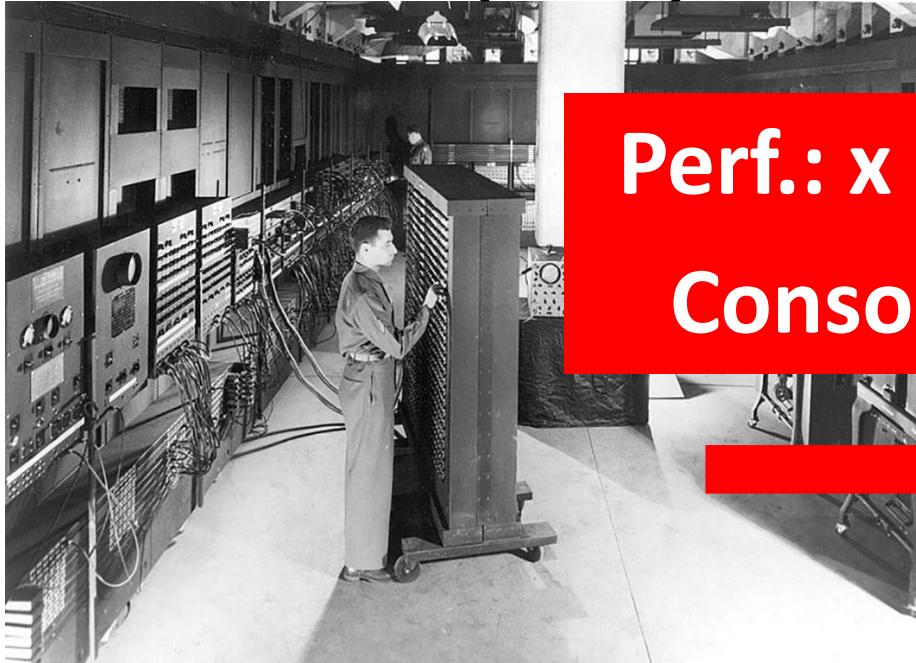
- Outils : enquêtes, essais randomisés contrôlés, statistiques, modèles, ...



2^{ème} partie

Les effets « indirects »
du numérique
*Les effets rebond
dans le numérique*

ENIAC (1945)



iPhone 6 (2014)

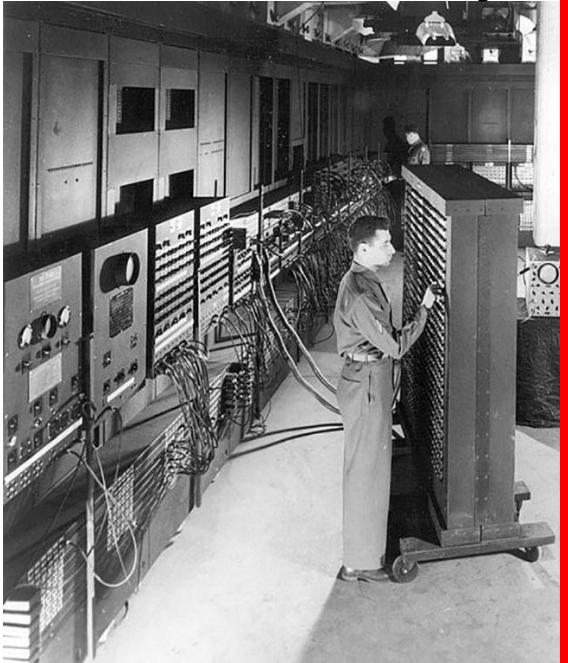
Perf.: x 260 millions !
Conso. : ÷ 75 000 !



- Poids : 30 t
- Dim. : $30,5 \text{ m} \times 2,4 \times 0,9$ (167 m^2)
- Conso. : 150 kW
- Perf. : ~500 FLOPS

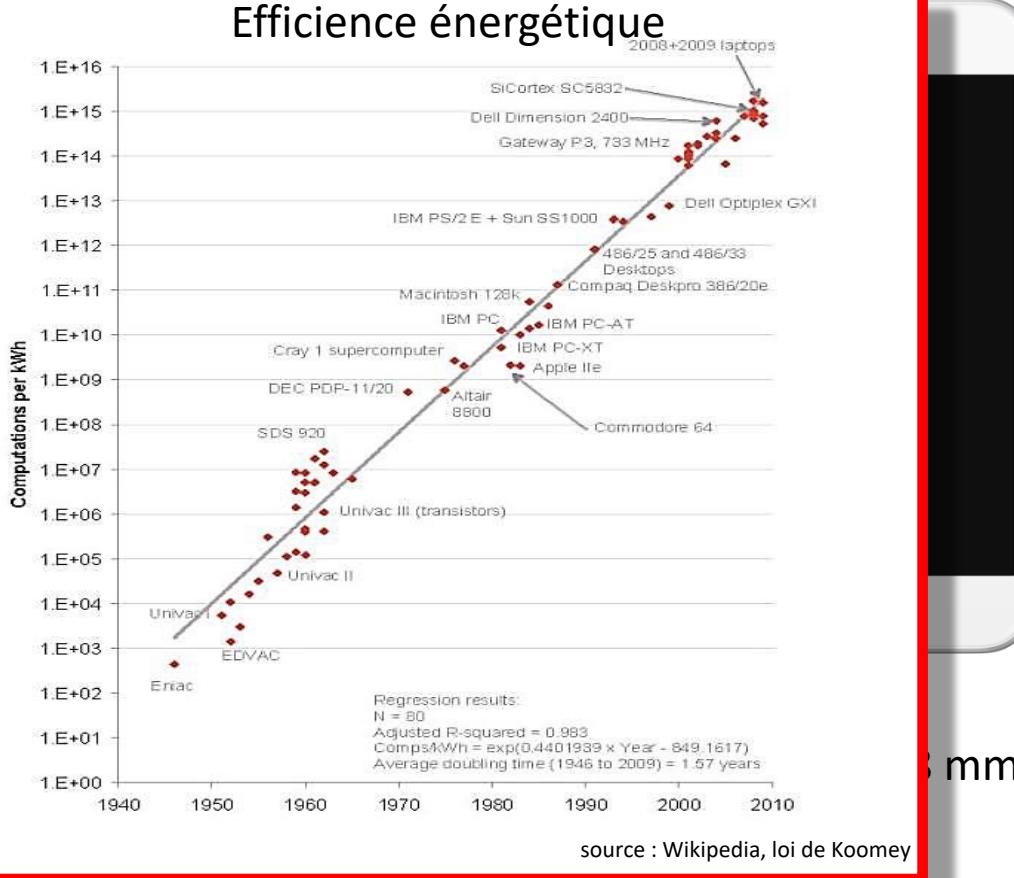
- Poids : 130 g
- Dim. : $158,1 \times 77,8 \text{ mm} \times 7,1 \text{ mm}$
- Conso. : ~2 W
- Perf. : ~130 GFLOPS

ENIAC (1945)



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

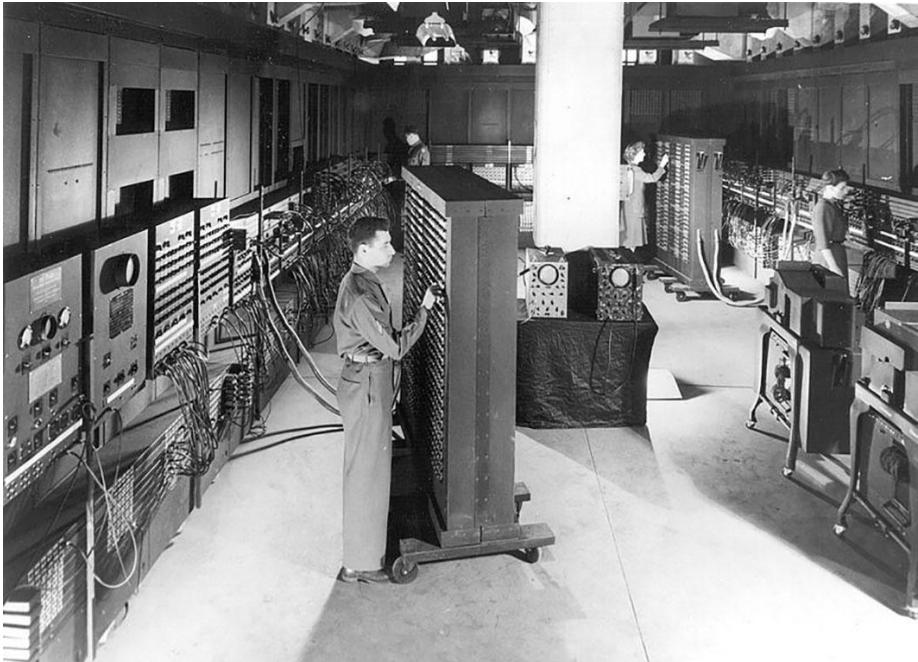
iPhone 6 (2014)



13 mm × 7,1 mm

- Perf. : ~130 GFLOPS

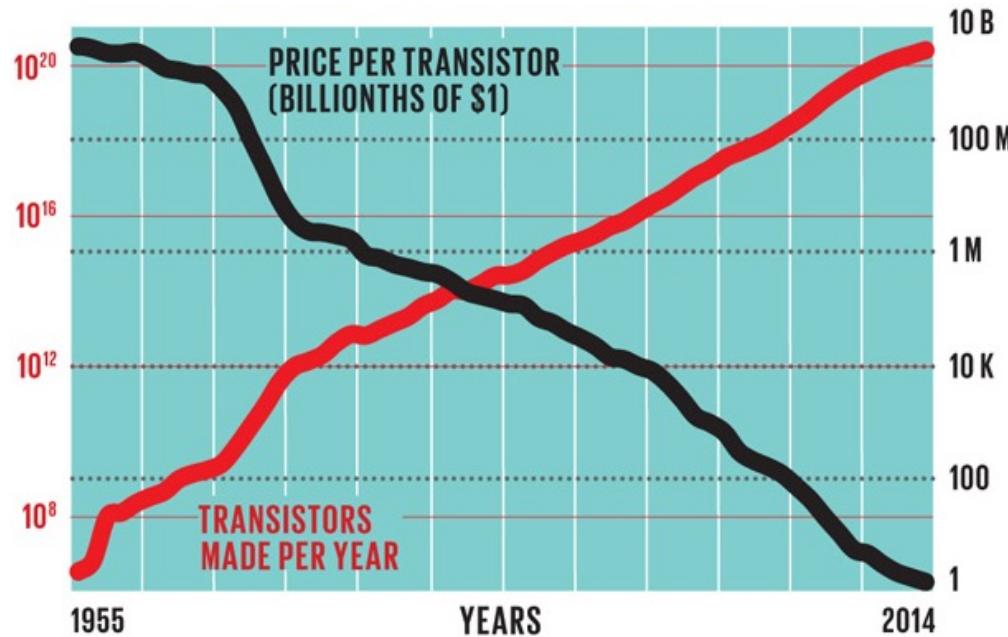
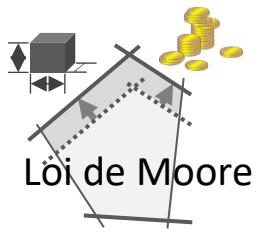
ENIAC



150 kW
(en fonctionnement)

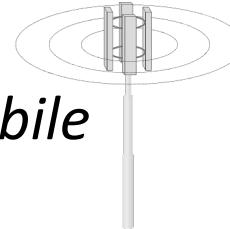
260 GW
(en continu)

Loi de Moore

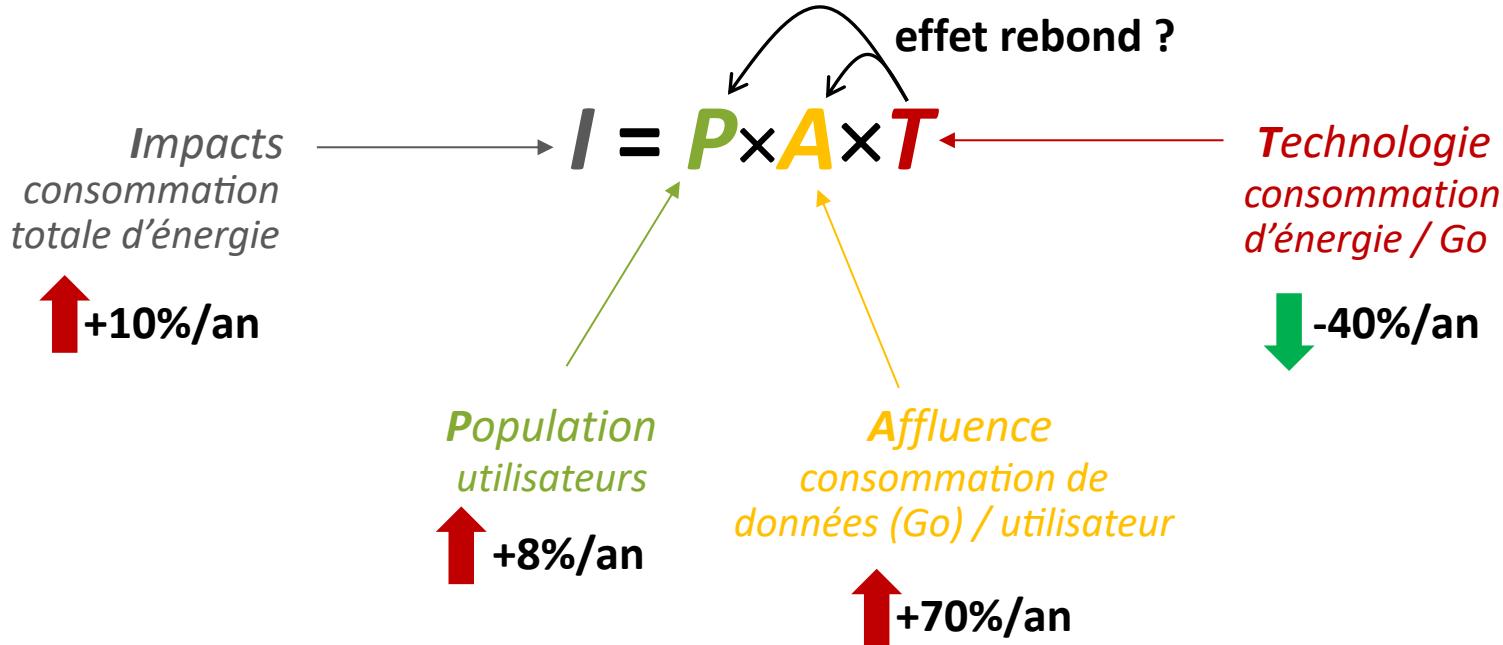


Data Source: VLSI Research

L'effet rebond



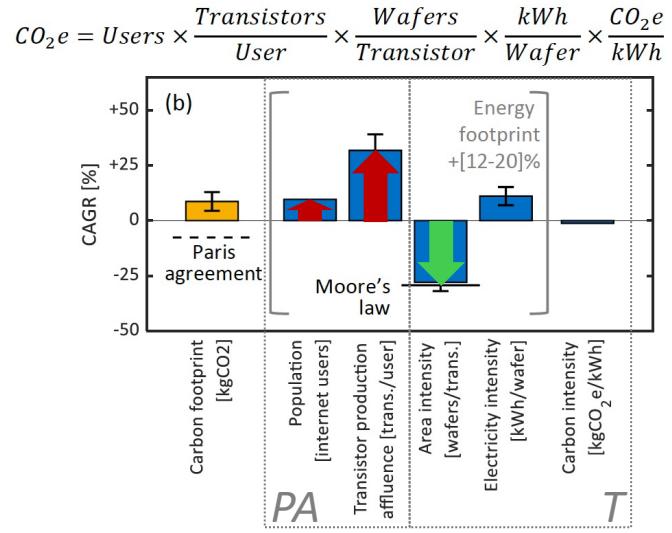
Exemple de l'internet mobile



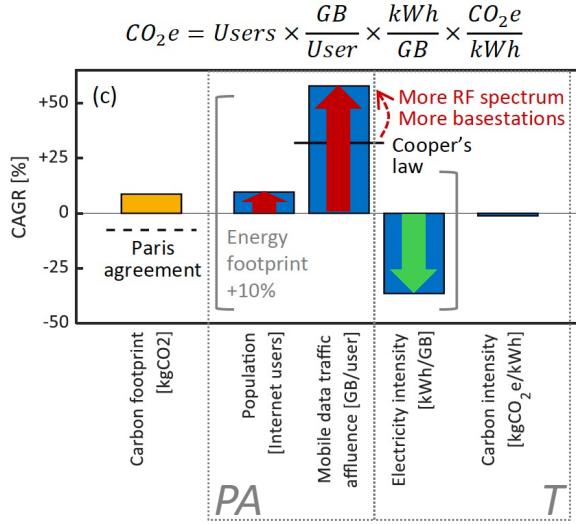
source : Bol et al., *Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene* (2021)

Émissions des CO₂

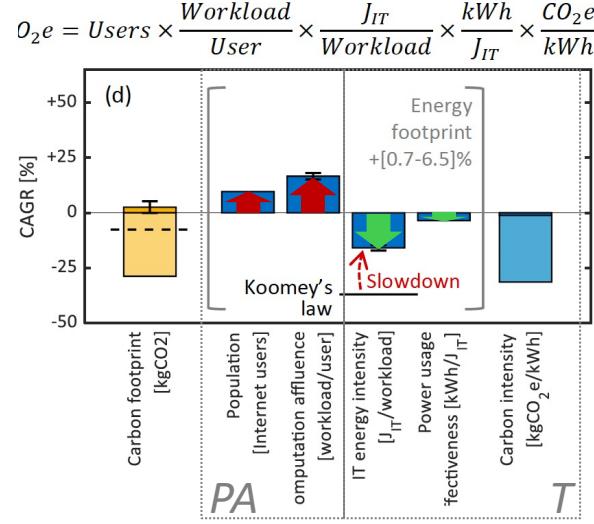
Les gains en efficacité et la croissance des « besoins »



Loi de Moore
émissions de CO₂ de
la fabrication des puces
(2004-2019)



Loi de Cooper
émissions de CO₂ de
l'internet mobile
(2010-2015)



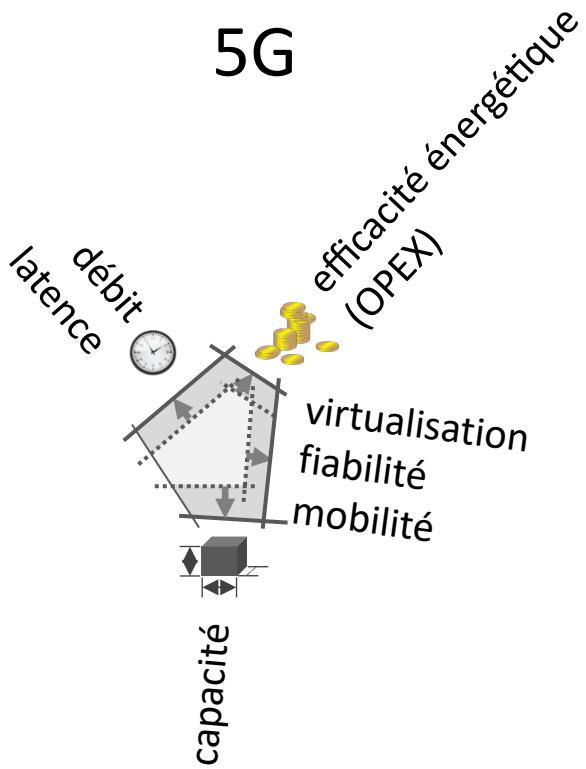
Loi de Koomey
émissions de CO₂ du calcul
dans les centres de données
(2010-2018)

source : Bol et al., *Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene* (2021)

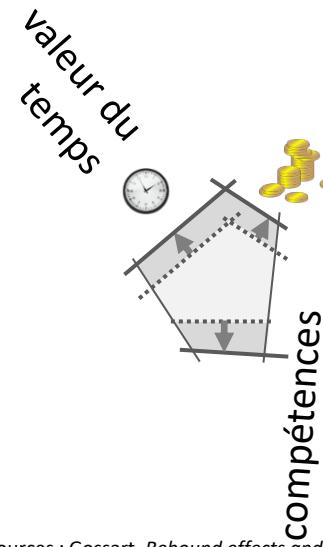
Effet rebond et limites

Repousser les limites de et par les TIC

5G



Véhicules autonomes



ressources : Gossart, Rebound effects and ICT: a review of the literature (2014)

Wadud et al., Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles (2016)

Pakusch et al., Unintended Effects of Autonomous Driving: A Study on Mobility Preferences in the Future (2018)

Taiebat et al., Forecasting the Impact of Connected and Automated Vehicles on Energy Use: A Microeconomic Study of Induced Travel and Energy Rebound (2019)

Coroamă et al., Skill rebound: On an unintended effect of digitalization (2020) and Digital Rebound – Why Digitalization Will Not Redeem Us Our Environmental Sins (2019)

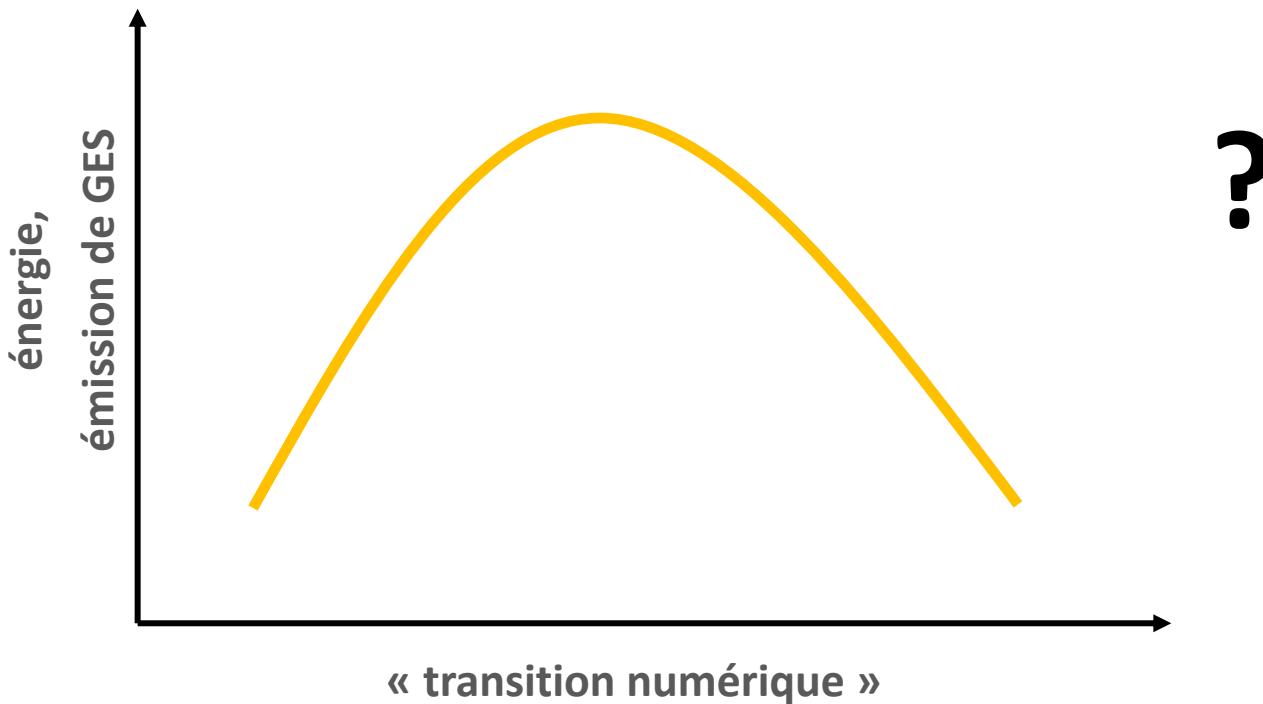
2^{ème} partie



Les effets « indirects » du numérique

*Le numérique peut-il aider à
décarboner le reste de l'économie ?*

Effet de décarbonation des TIC ?



ressources : Haldar et Sethi : Environmental effects of Information and Communication Technology - Exploring the roles of renewable energy, innovation, trade and financial development (2022)

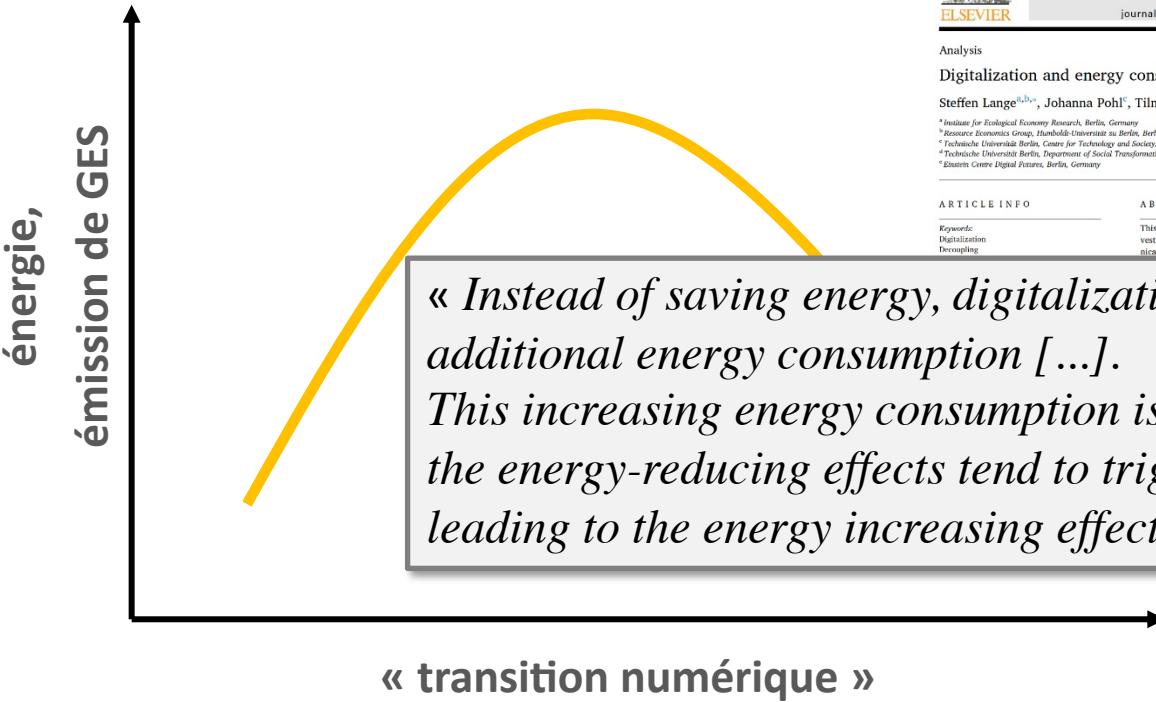
Avoma et al. : ICT and environmental quality in Sub-Saharan Africa: Effects and transmission channels (2020)

Lange et al. : Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? (2020)

Danish et al. : The effect of ICT on CO₂ emissions in emerging economies: does the level of income matter? (2018)

Moyer et Hughe : ICTs: Do they contribute to increased carbon emissions? (2012)

Effet de recouplage des TIC ?



Ecological Economics 176 (2020) 106760



Contents lists available at ScienceDirect

Ecological Economics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecocon

Analysis

Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?

Steffen Lange^{a,b,*}, Johanna Pohl^b, Tilman Santarius^{a,c}

^a Institut für Ecological Economics Research, Berlin, Germany

^b Resource Economics Group, Humboldt University zu Berlin, Berlin, Germany

^c Technische Universität Berlin, Center for Technology and Society, Berlin, Germany

^d Technische Universität Berlin, Department of Social Transformation and Sustainable Digitalization, Berlin, Germany

^e Einstein Centre Digital Future, Berlin, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:
Digitalization
Decoupling

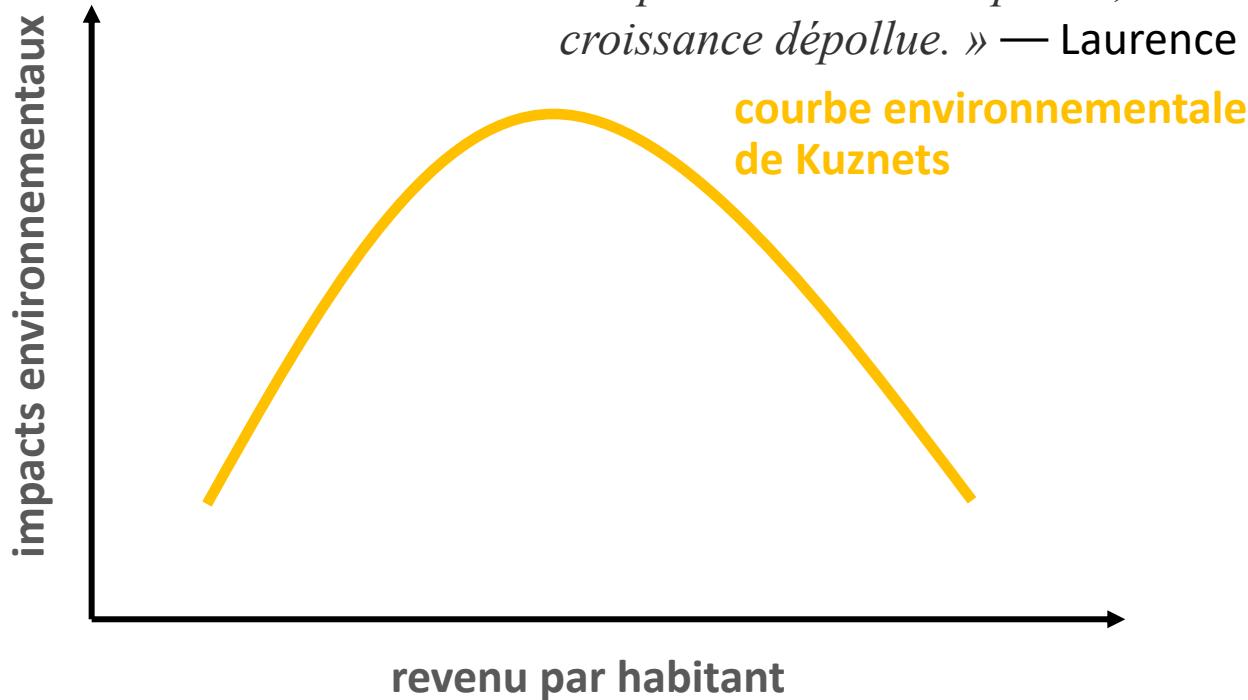
ABSTRACT

This article investigates the effect of digitalization on energy consumption. Using an analytical model, we investigate four effects: (1) direct effects from the production, usage and disposal of information and communication technologies (ICT), (2) energy efficiency increases from digitalization, (3) economic growth from in-

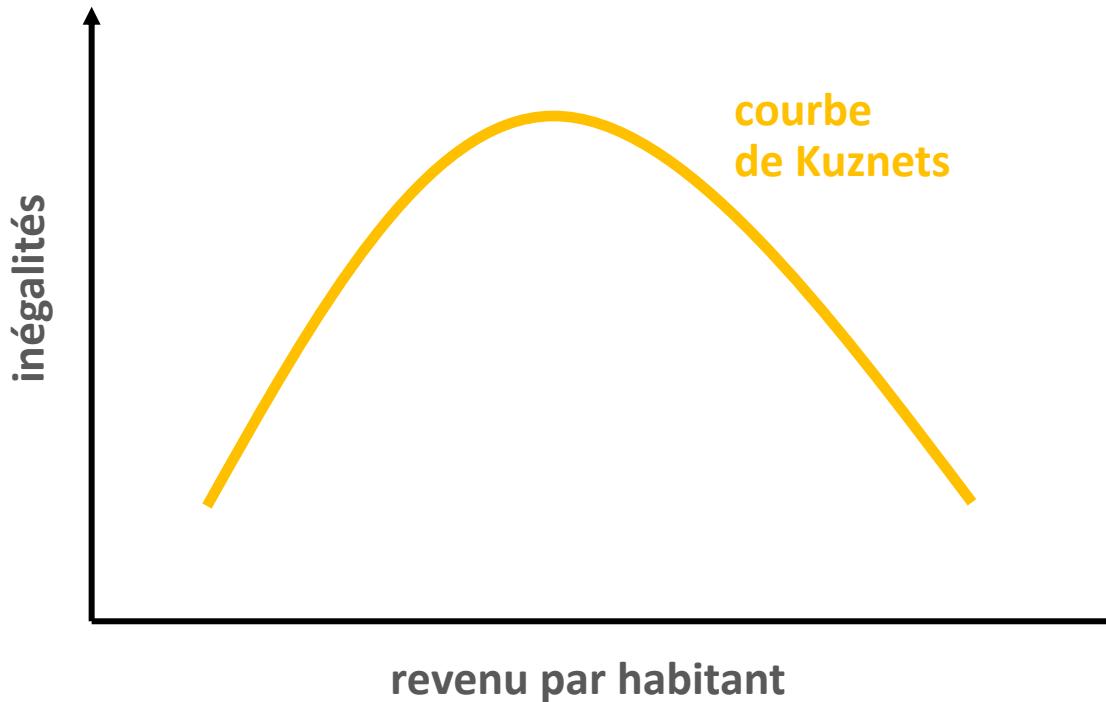
- ressources : Haldar et Sethi : Environmental effects of Information and Communication Technology - Exploring the roles of renewable energy, innovation, trade and financial development (2022)
- Avoma et al. : ICT and environmental quality in Sub-Saharan Africa: Effects and transmission channels (2020)
- Lange et al. : Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? (2020)
- Danish et al. : The effect of ICT on CO₂ emissions in emerging economies: does the level of income matter? (2018)
- Moyer et Hugue : ICTs: Do they contribute to increased carbon emissions? (2012)

Le découplage

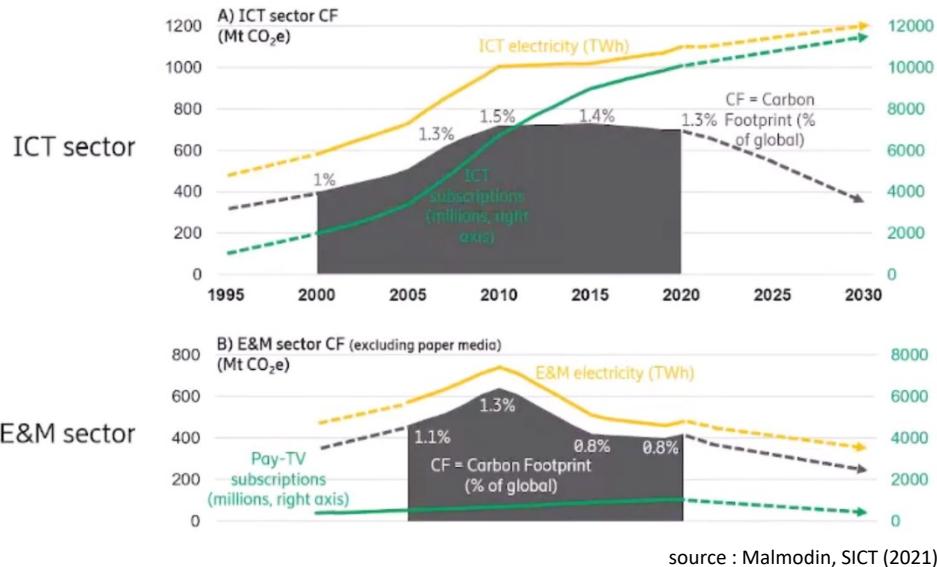
« *Un peu de croissance pollue, beaucoup de croissance dépollue.* » — Laurence Parisot



Le découplage



Le découplage dans les TIC ?



The Carbon Footprint of Machine Learning Training Will Plateau, Then Shrink

This paper was downloaded from TechRxiv (<https://www.techrxiv.org>).

LICENSE

CC BY 4.0

SUBMISSION DATE / POSTED DATE

08-02-2022 / 03-03-2022

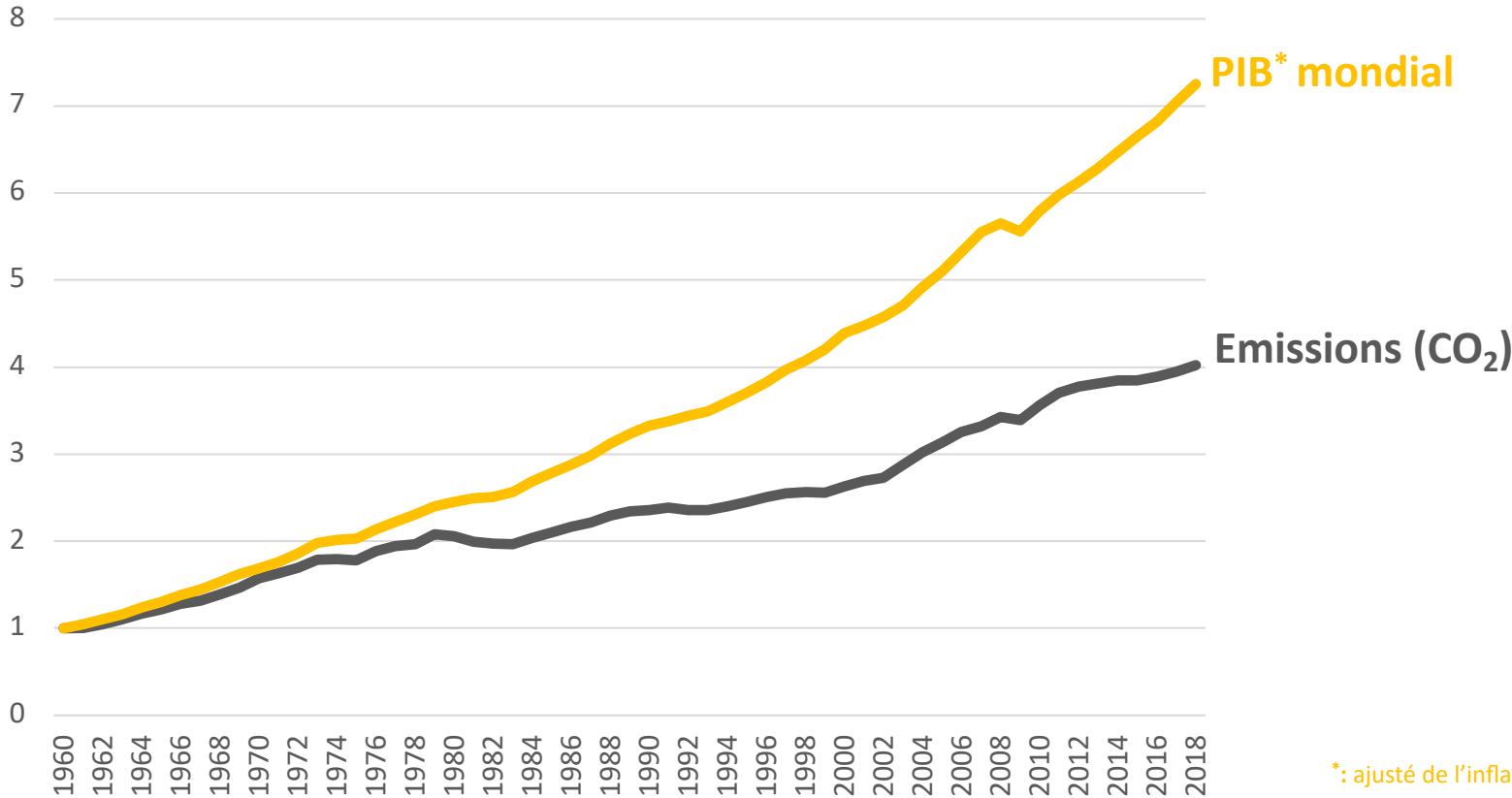
CITATION

Patterson, David; Gonzalez, Joseph; Hölzle, Urs; Le, Quoc Hung; Liang, Chen; Munguia, Lluís-Miquel; et al. (2022): The Carbon Footprint of Machine Learning Training Will Plateau, Then Shrink. TechRxiv. Preprint. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.19139645.v3>

DOI

[10.36227/techrxiv.19139645.v3](https://doi.org/10.36227/techrxiv.19139645.v3)

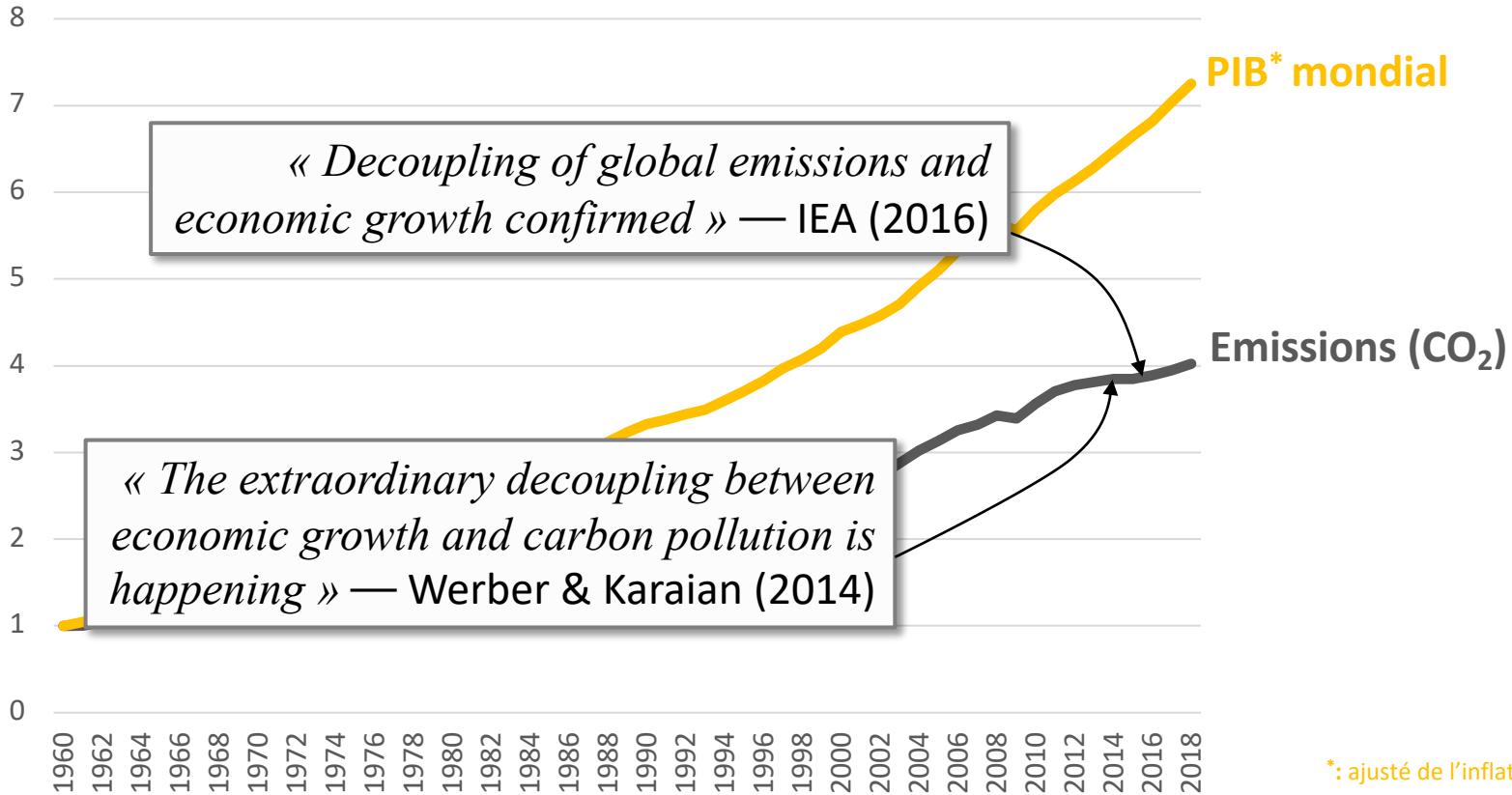
Le découplage PIB-émissions



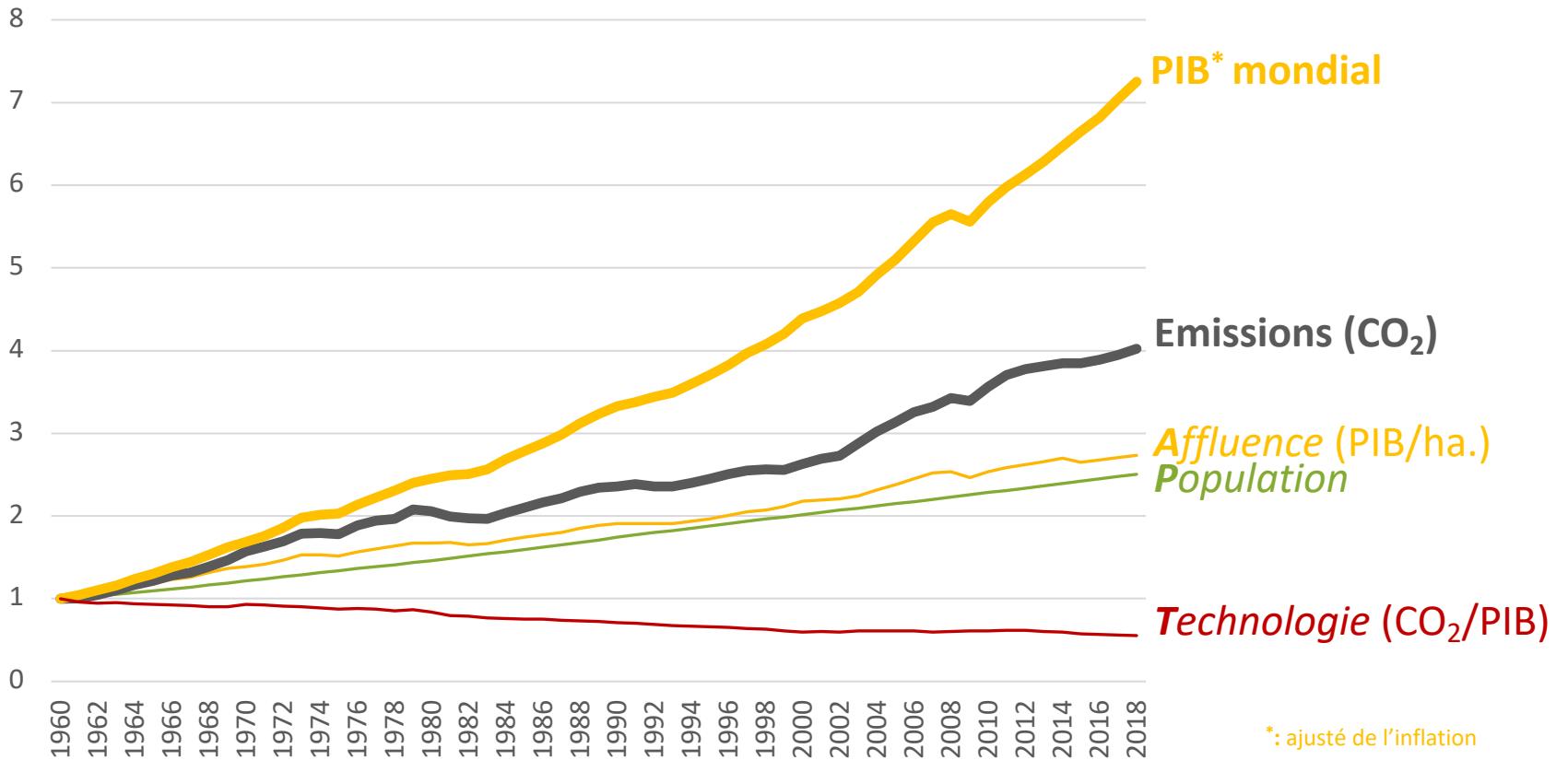
*: ajusté de l'inflation

source des données : World Bank

Le découplage PIB-émissions



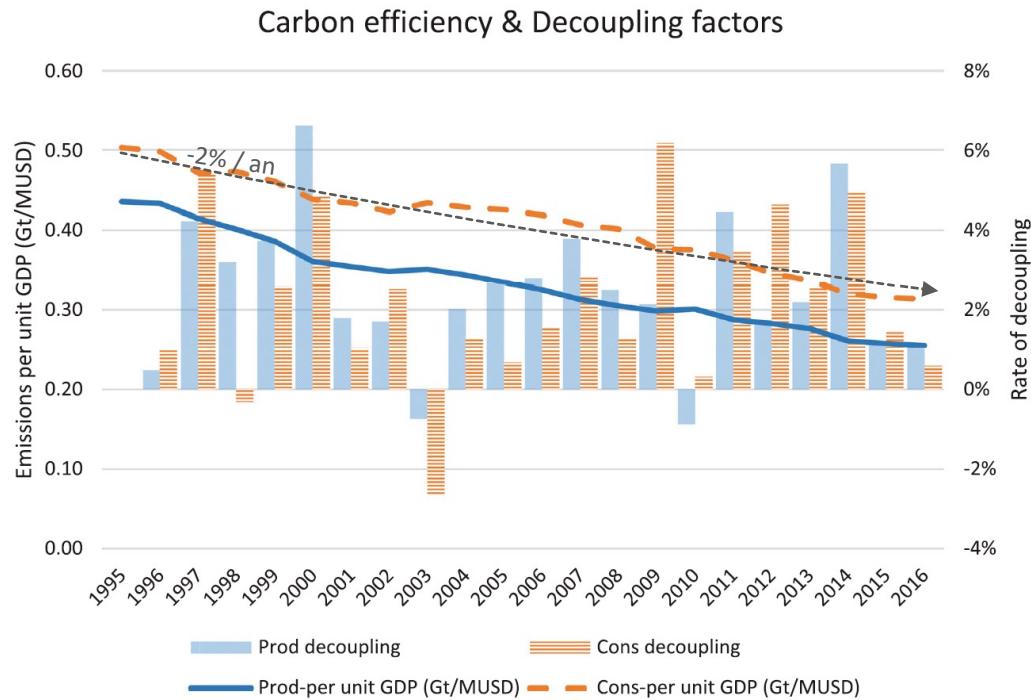
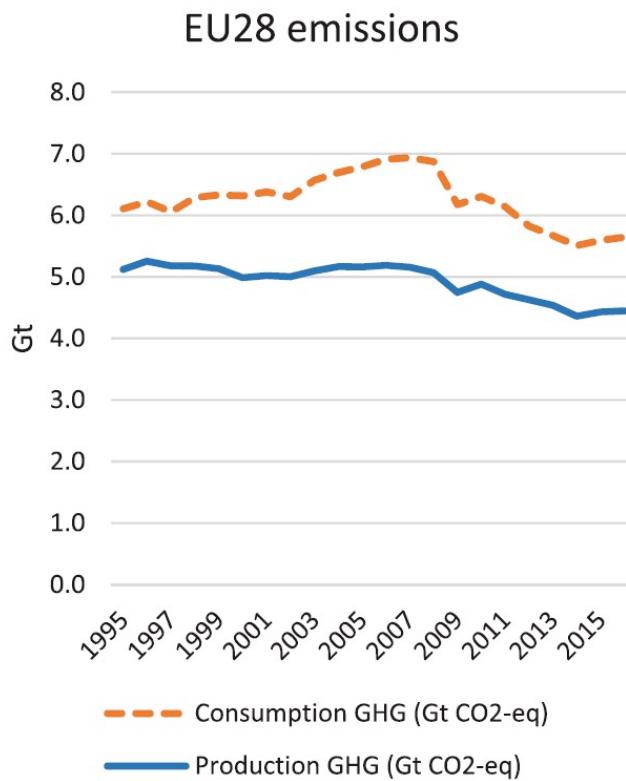
Le découplage PIB-émissions



*: ajusté de l'inflation

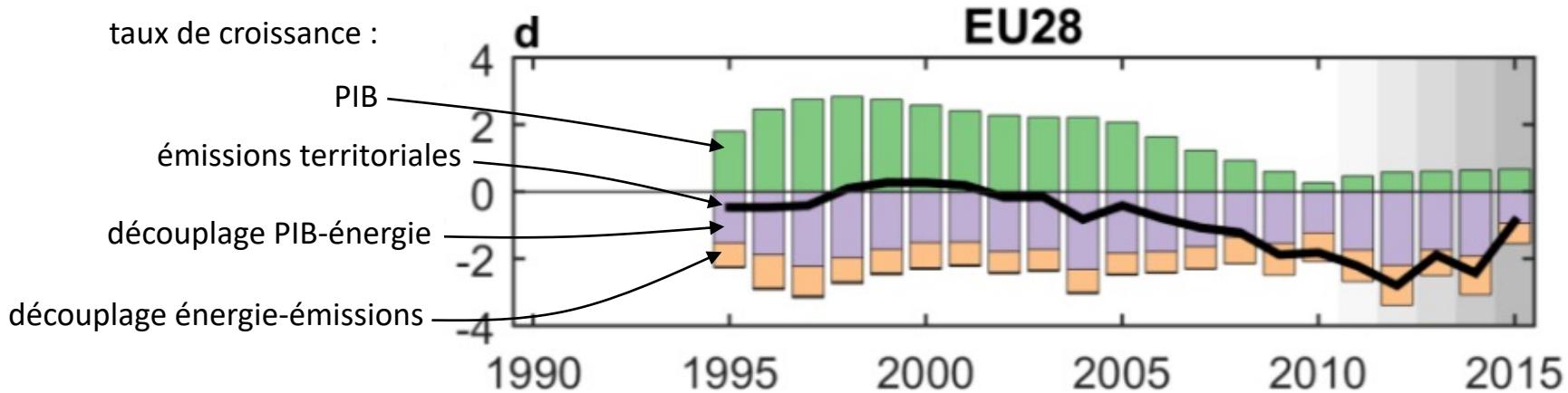
source des données : World Bank

Le découplage PIB-émissions en Europe



source : Wood et al: The structure, drivers and policy implications of the European carbon footprint (2020)

Le découplage PIB-émissions en Europe



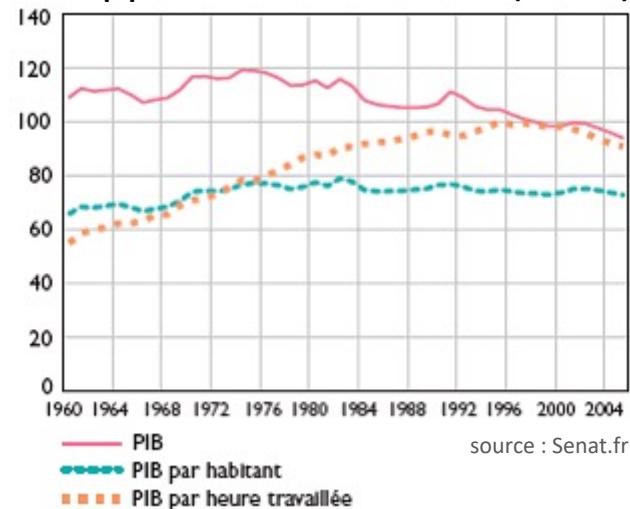
source : Peters et al: Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement (2017)

Les promesses des TIC... ... avant tout économiques

La stratégie de Lisbonne (Union Européenne) :

- 2000 : faire de l'Union européenne « *l'économie de la connaissance la plus compétitive et la plus dynamique du monde d'ici à 2010, capable d'une croissance économique durable accompagnée d'une amélioration quantitative et qualitative de l'emploi et d'une plus grande cohésion sociale* »
- mise à jour en 2001 : « *mettre les objectifs environnementaux en balance avec leur impact économique et social, ce qui implique, dans la mesure du possible, la mise au point de solutions qui soient favorables à la fois à l'économie, à l'emploi et à l'environnement* »

Performance UE-15 par rapport aux États-Unis (=100)

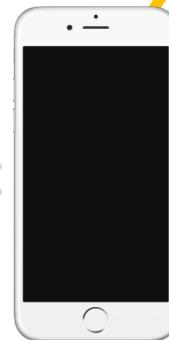


source : Senat.fr

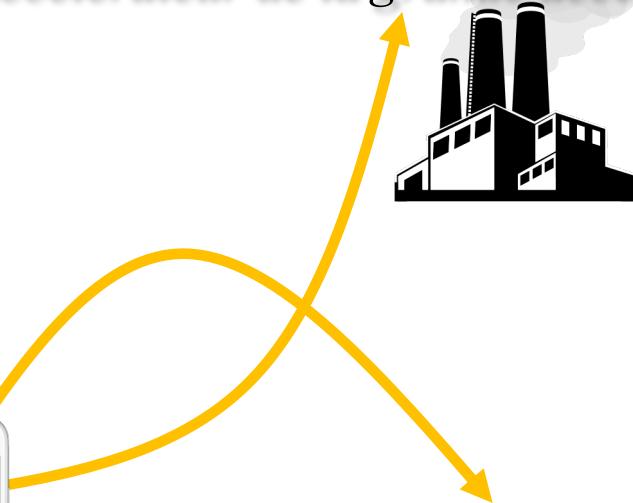
source : Longaretti et Berthoud : *Le numérique, espoir pour la transition écologique ?* (2021)

« accélérateur de la grande accélération » ?

Conclusion numérique et décarbonation



« accélérateur de la transition écologique » ?



source : Iddri, FING, WWF France, GreenIT.fr, et CNNUM : Livre Blanc numérique et environnement — Faire de la transition numérique un accélérateur de la transition écologique (2018)