

Impacts environnementaux directs et indirects du numérique

Jacques COMBAZ

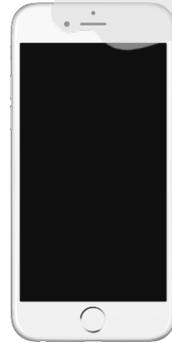
Jacques.Combaz@univ-grenoble-alpes.fr

www-verimag.imag.fr

ecoinfo.cnrs.fr

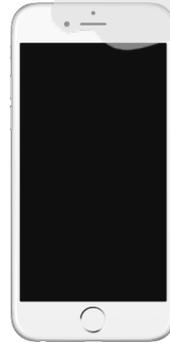


1^{ère} partie



Les impacts
environnementaux du
numérique

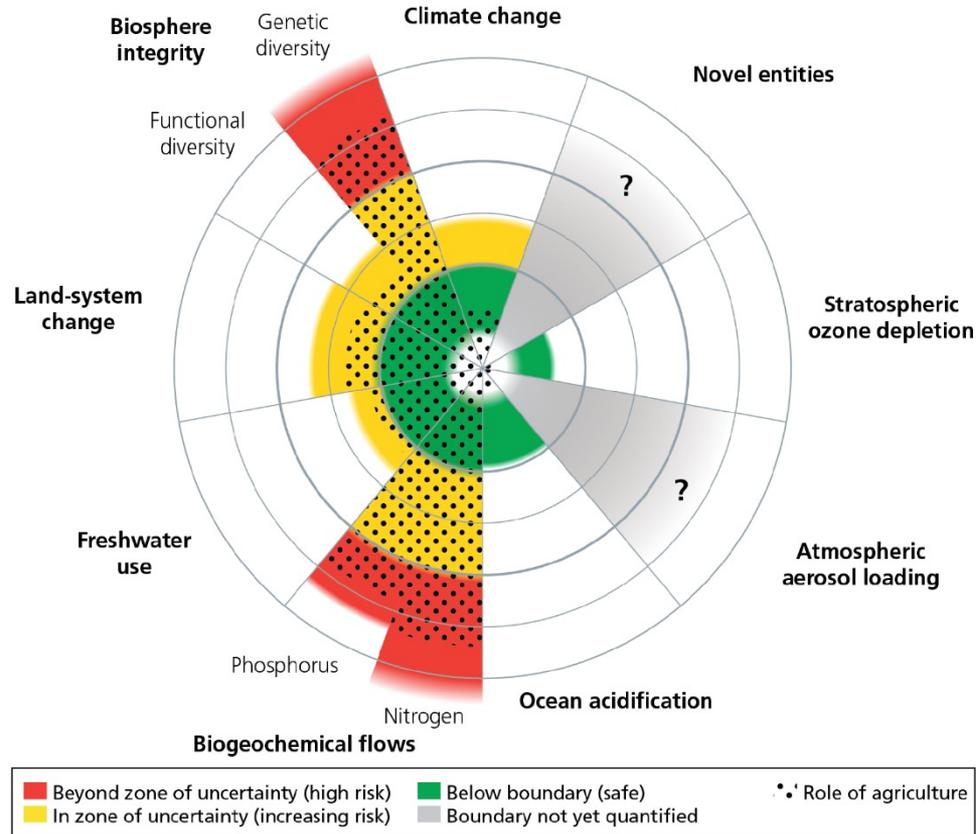
1^{ère} partie



Les impacts
environnementaux du
numérique
enjeux globaux



Bienvenu dans l'Anthropocène

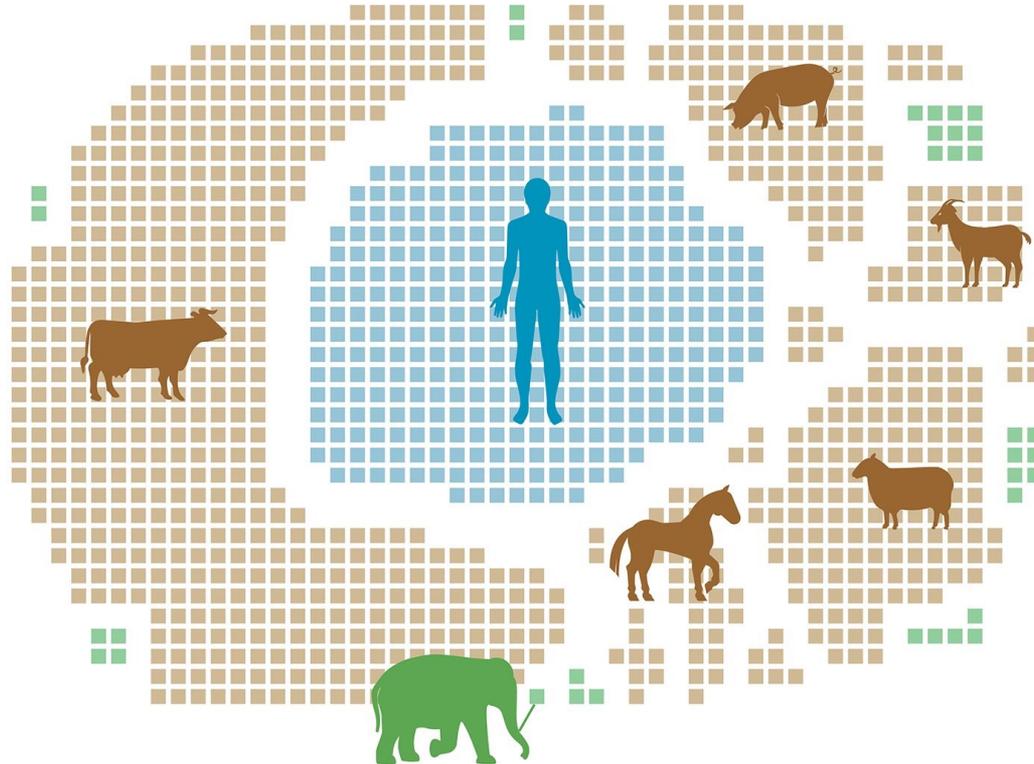


source : Campbell et al., Ecology and Society (2017)

Bienvenu dans l'Anthropocène

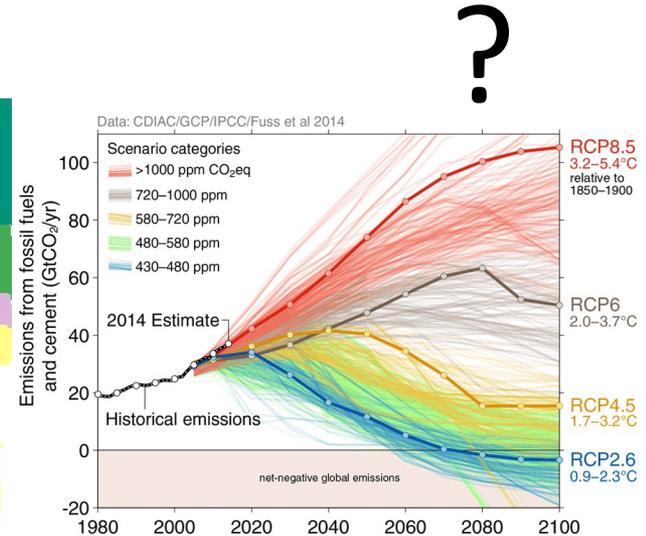
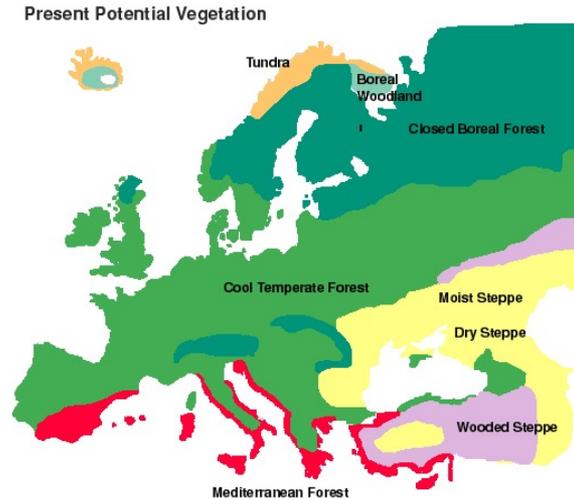
The Earth's Land Mammals by weight
each square is 1,000,000 Tons

- Humans
- Our pets & livestock
- Wild animals



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

+5°C, ça fait quoi ?



2019
0°C

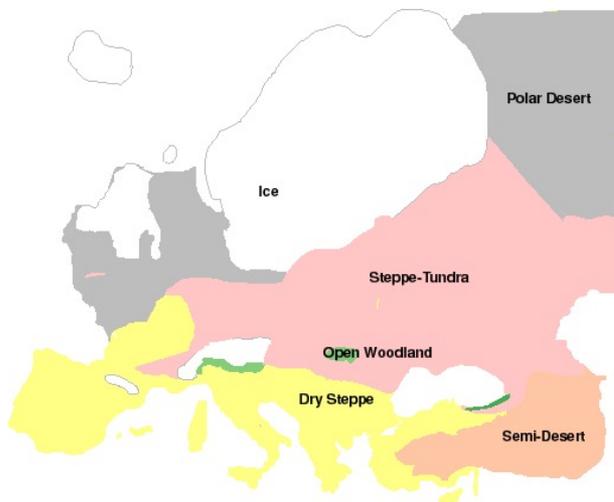
~ 2°C / siècle (actuel)

→

2100
+5°C ?

+5°C, ça fait quoi ?

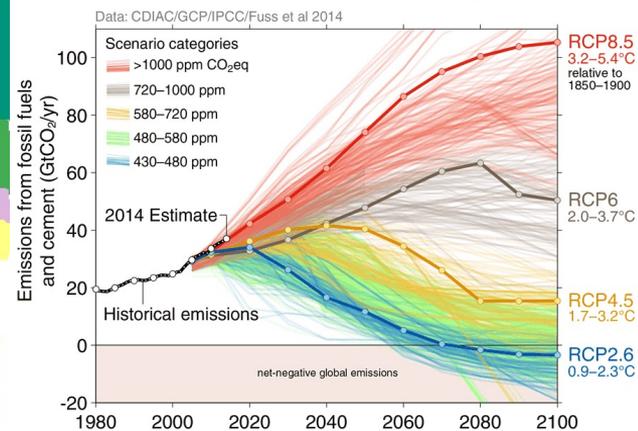
22,000 – 14,000 ¹⁴C years ago



Present Potential Vegetation



?



-20 000
-5°C

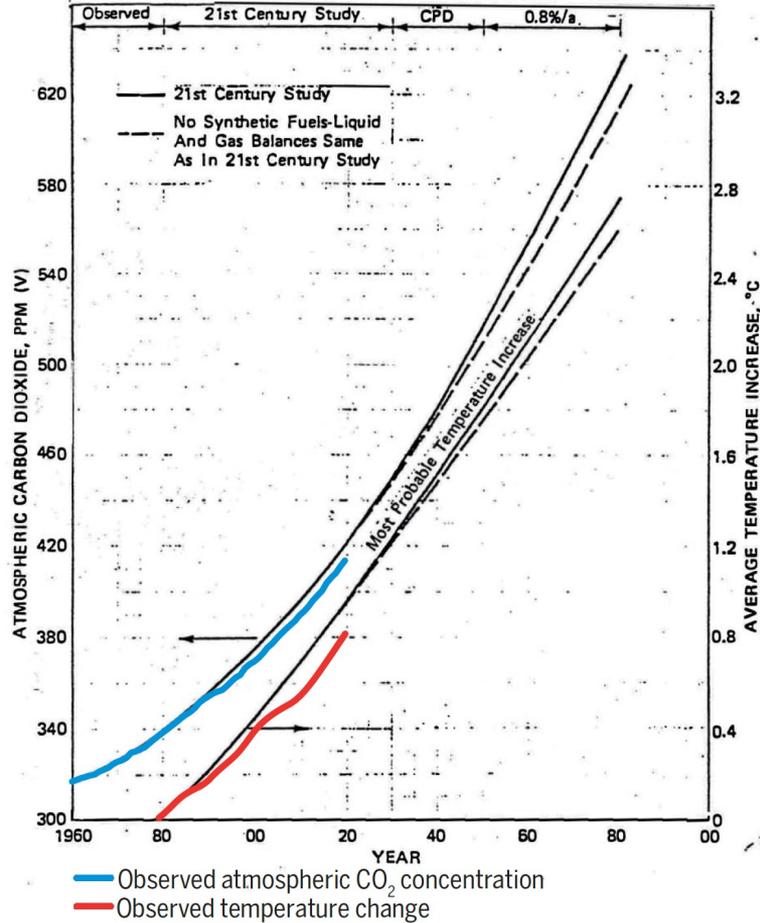
~ 0,1°C / siècle (max)

2019
0°C

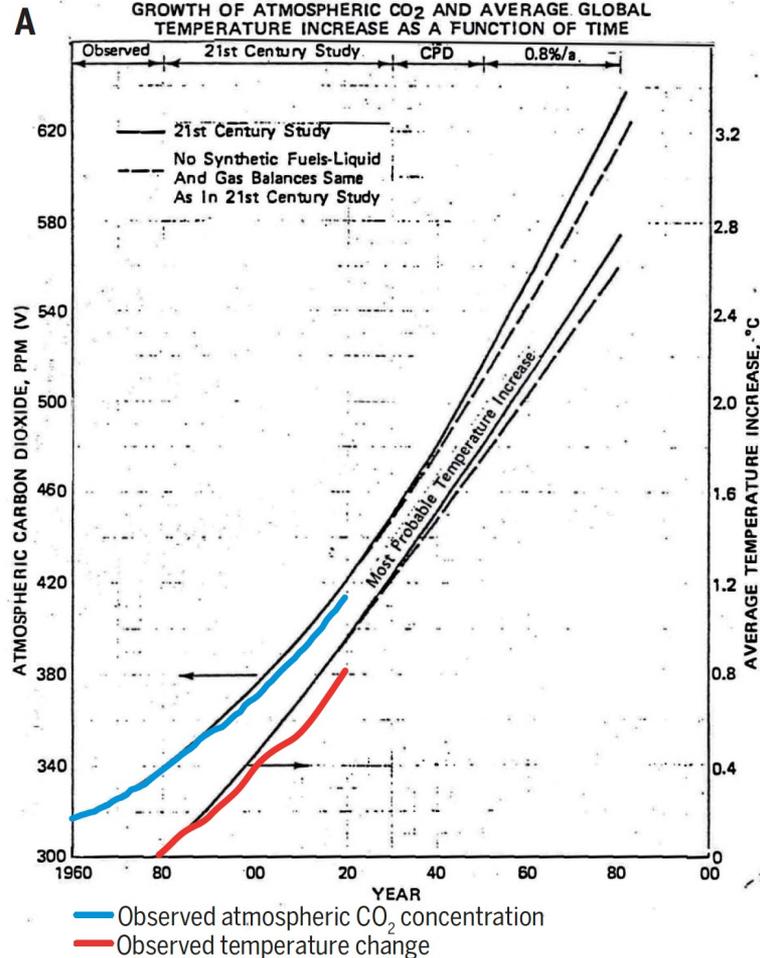
~ 2°C / siècle (actuel)

2100
+5°C ?



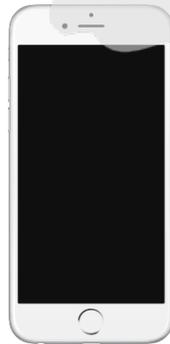
A**GROWTH OF ATMOSPHERIC CO₂ AND AVERAGE GLOBAL TEMPERATURE INCREASE AS A FUNCTION OF TIME**

Projections par Exxon (1982)



source : Supran et al. (Science, 2023)

2^{ème} partie

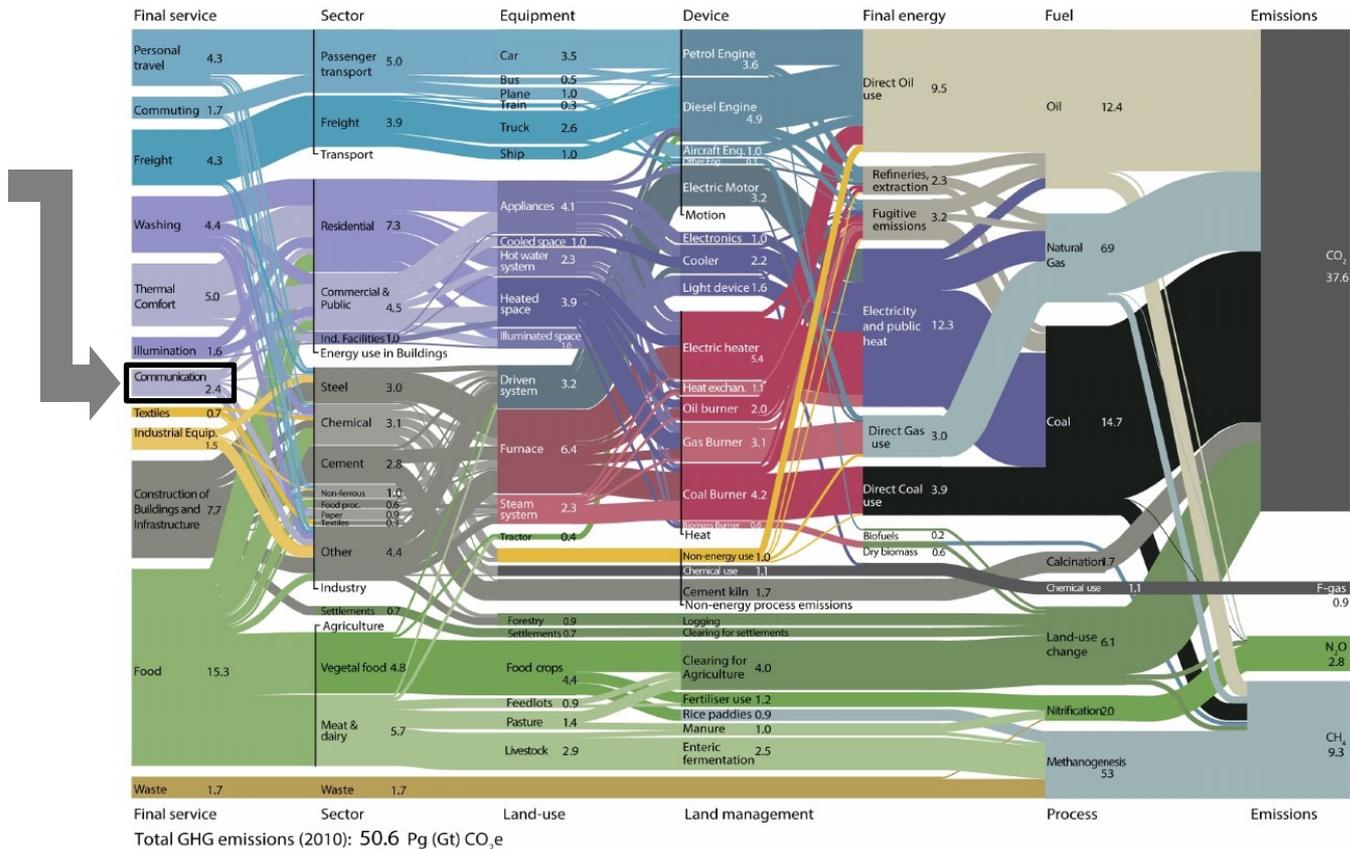


Les impacts environnementaux du numérique

enjeux climatiques du numérique

Numérique et changement climatique

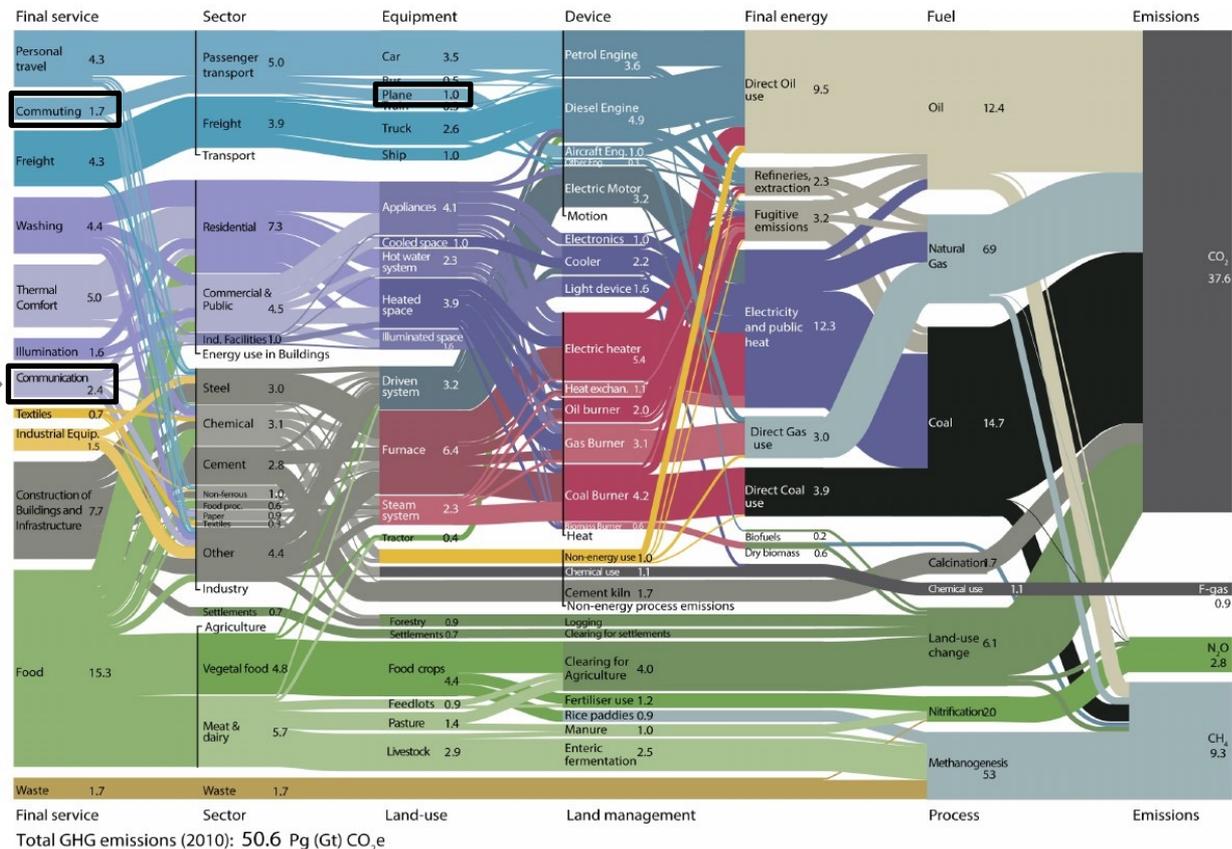
- Numérique :



Numérique et changement climatique

- **Numérique :**
2-4% des GES

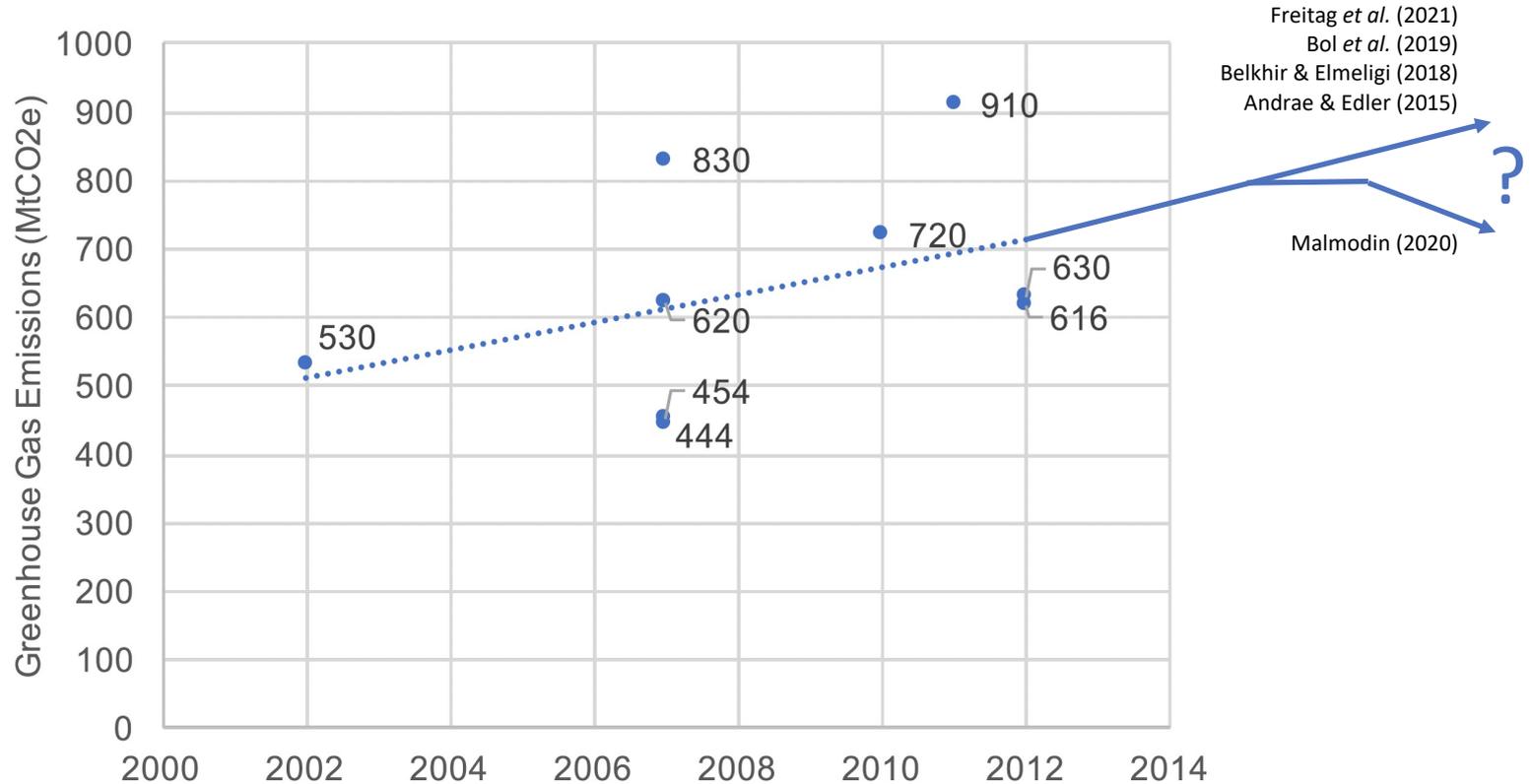
source : Freitag et al., *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations*, Patterns (2021)



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

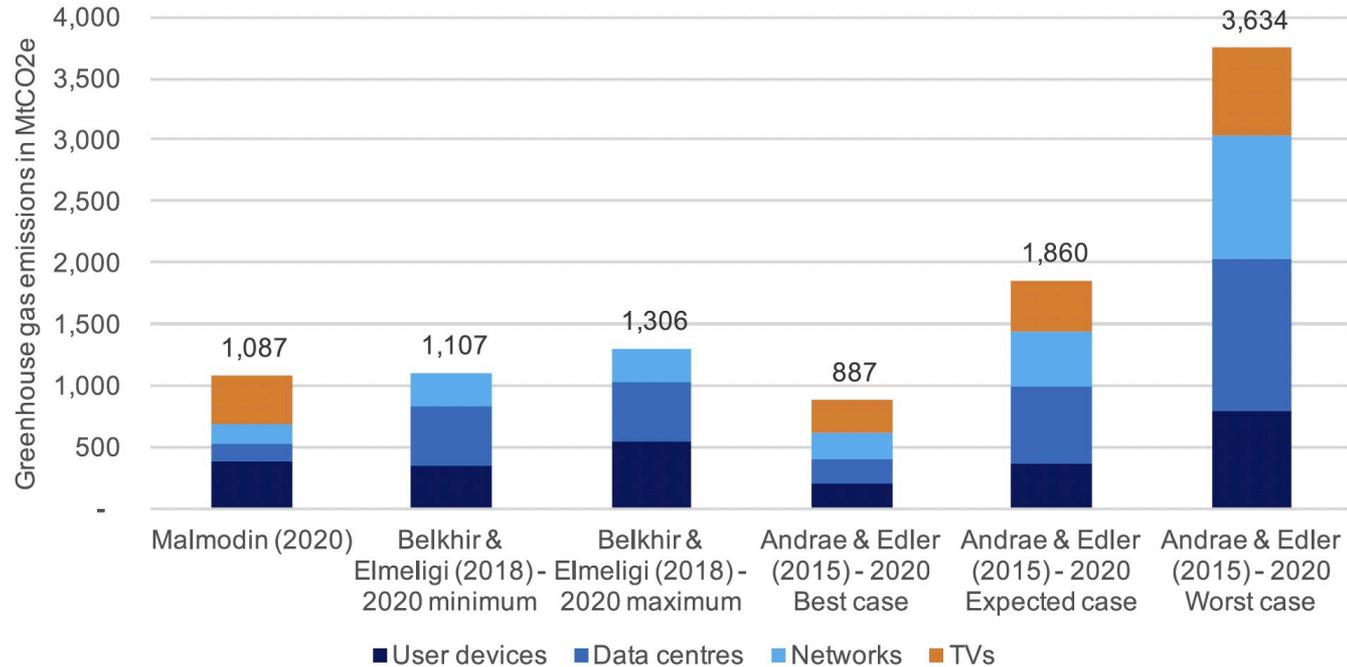
Les émissions mondiales du numérique

tendance



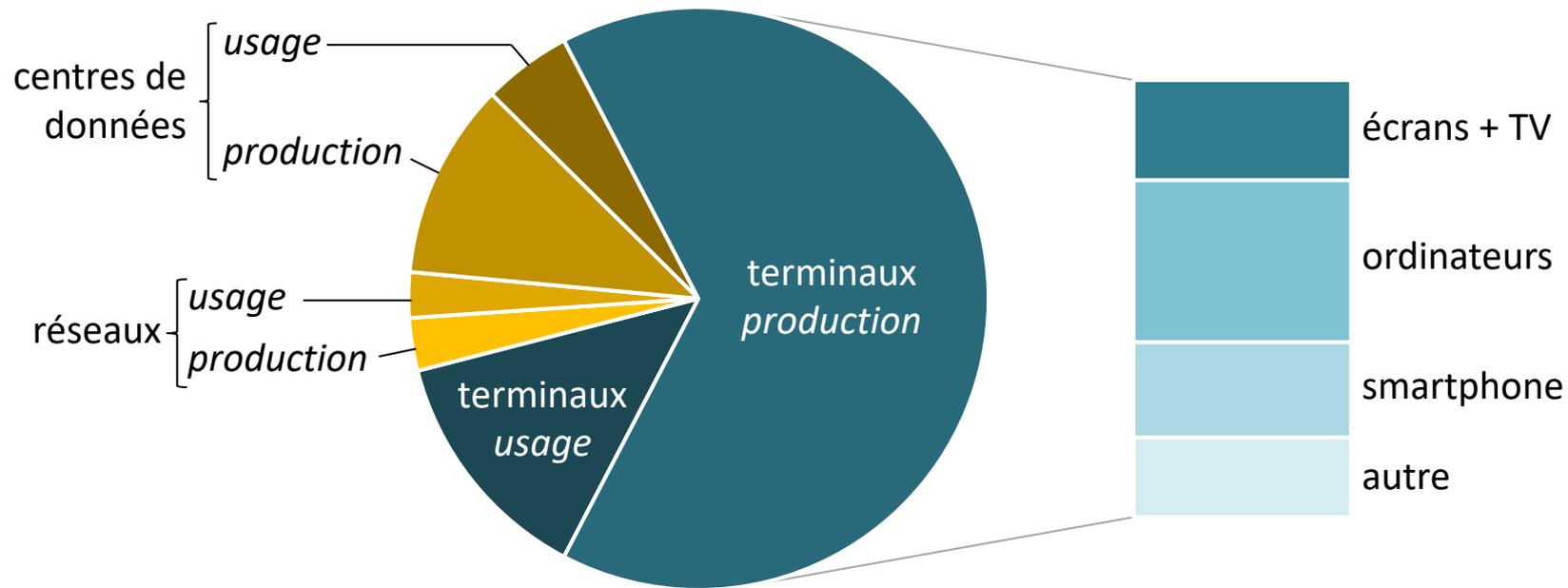
Les émissions mondiaales du numérique

répartition



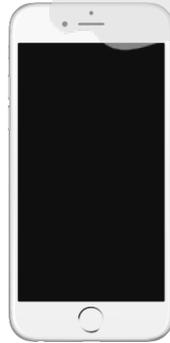
source : Freitag et al., *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations*, Patterns (2021)

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)



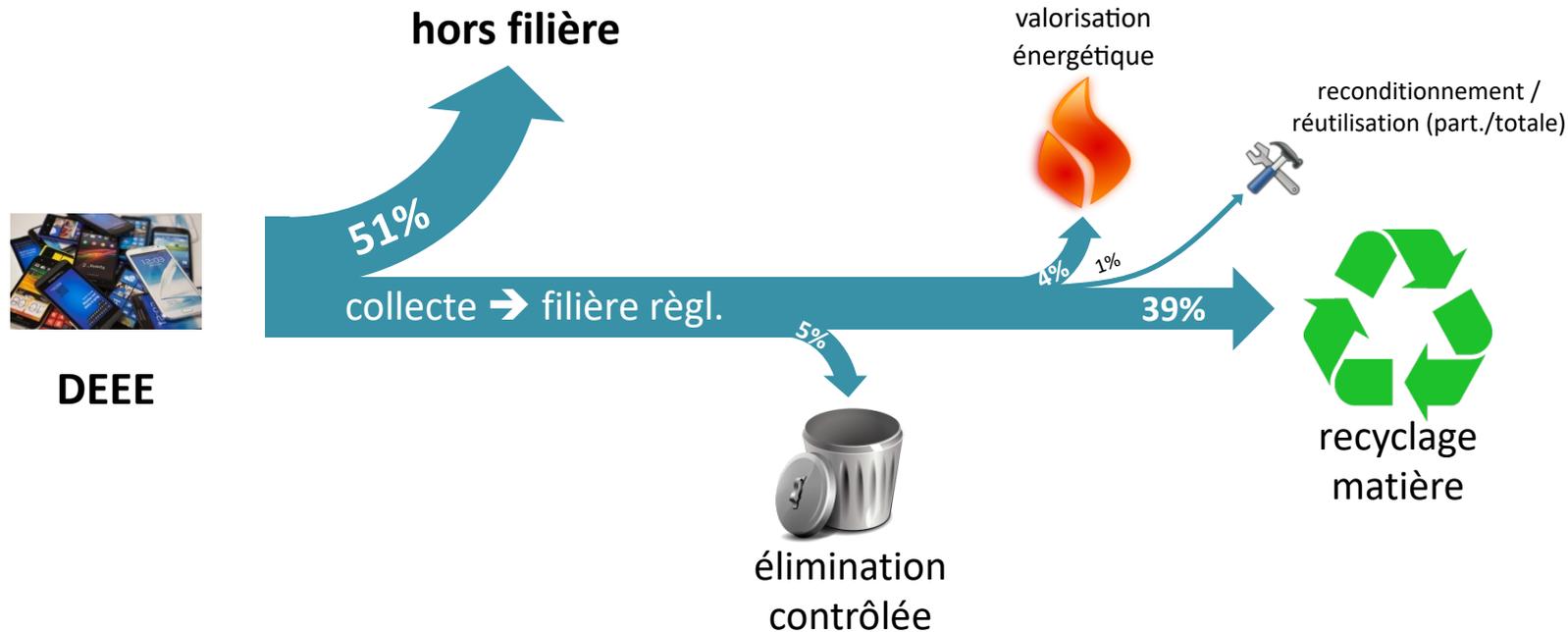
ressource : Aurore Stéphant, SICT (2021)

<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



pas de valorisation

source des données : registre DEEE, Ademe, 2016



Agbogbloshie

es à la fin de vie

filières de valorisation



DEEE

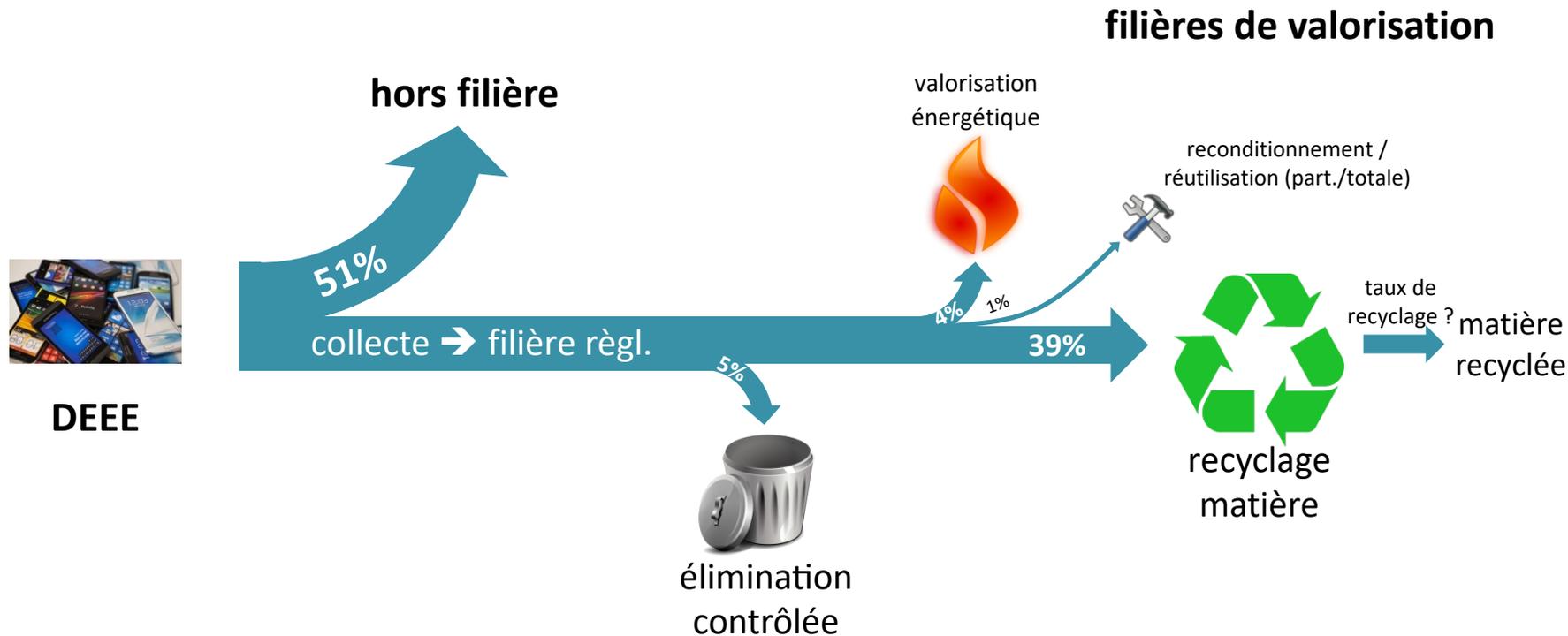


pas de valorisation



source des données : registre DEEE, Ademe, 2016

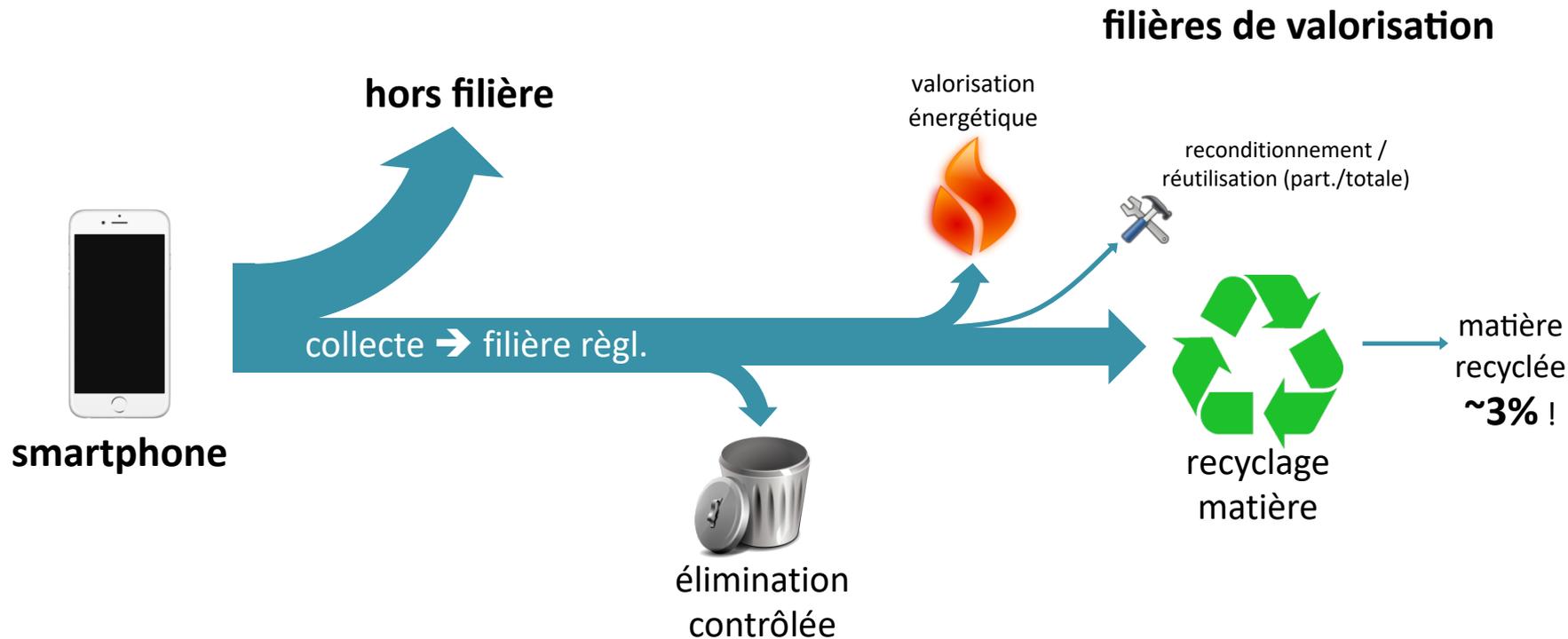
Impacts liés à la fin de vie



pas de valorisation

source des données : registre DEEE, Ademe, 2016

Impacts liés à la fin de vie



pas de valorisation

source des données : registre DEEE, Ademe, 2016

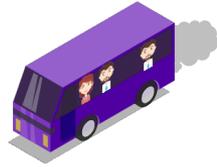


Conclusion

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

ressource : Ensmenger, *The environmental history of computing*, Technology and Culture (2019)

Méthodes de calcul en analyse de cycle de vie

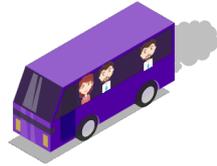


émissions d'un bus diesel :
 1540 g/km^*



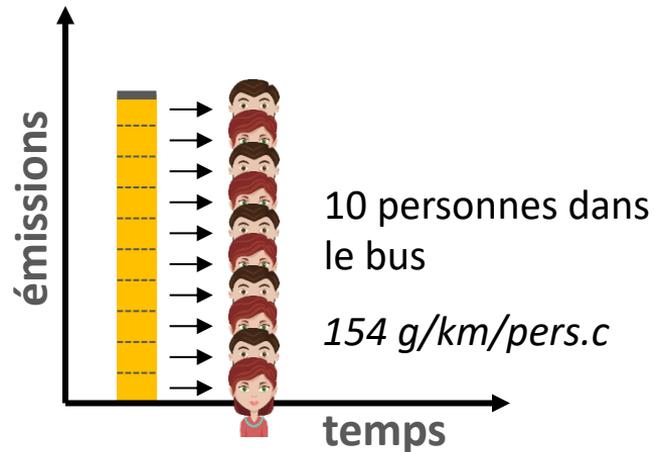
$? \text{ g/km}$

Méthodes de calcul en analyse de cycle de vie

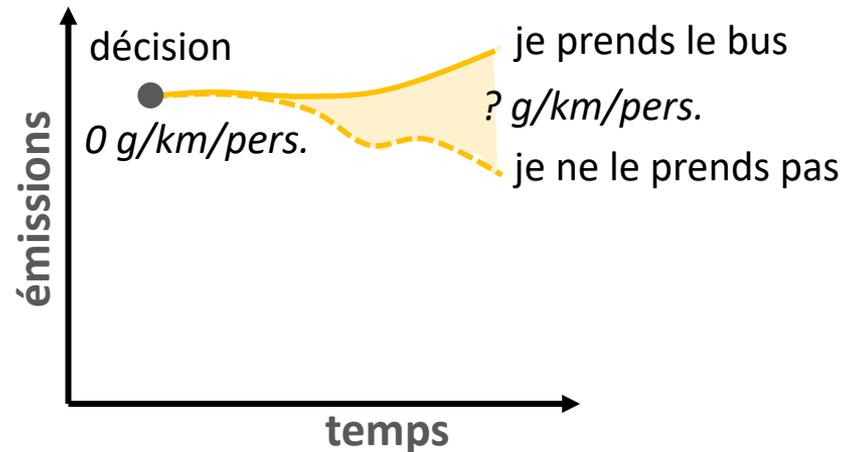


émissions d'un bus diesel :
 1540 g/km^*

Calcul attributionnel
répartition des émissions



Calcul conséquentiel
effets d'une décision



* : source : Carbone4

L'exemple de l'électricité

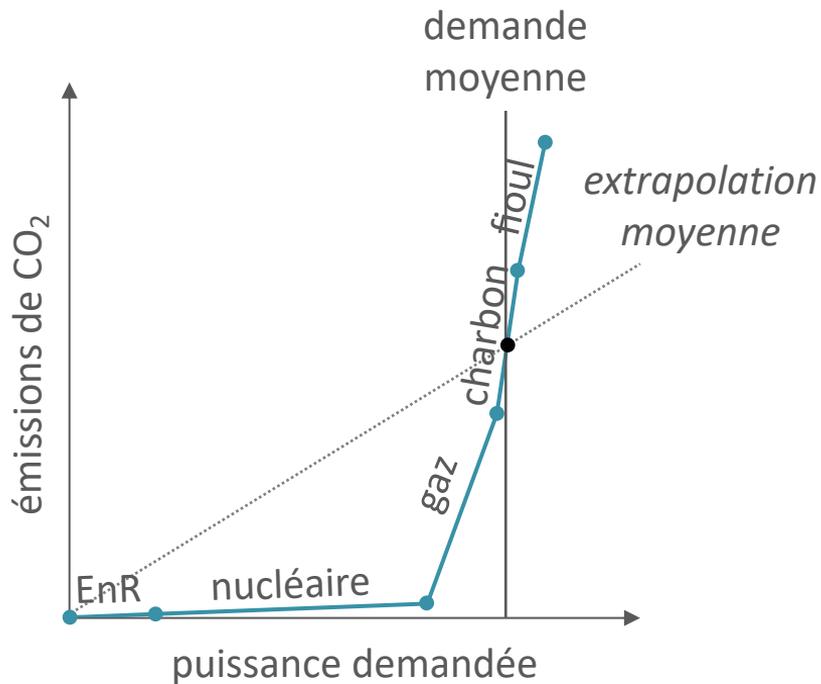
Facteurs d'émission en g éq. CO2 / kWh

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

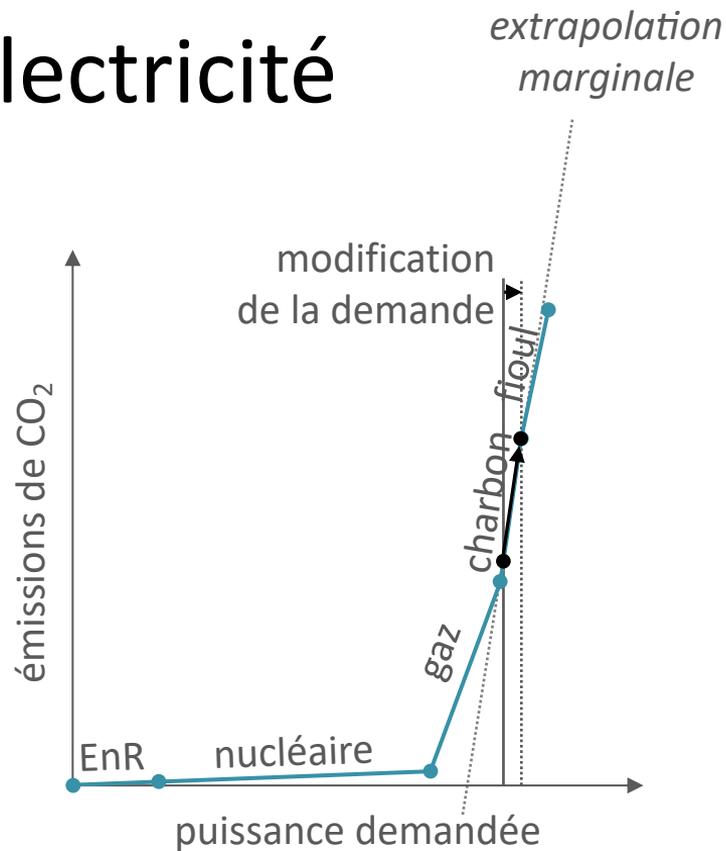
source : ADEME/RTE 2016 (*), 2018 (**), 2007 (***), 2020 (****)

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

L'exemple de l'électricité



attributionnel

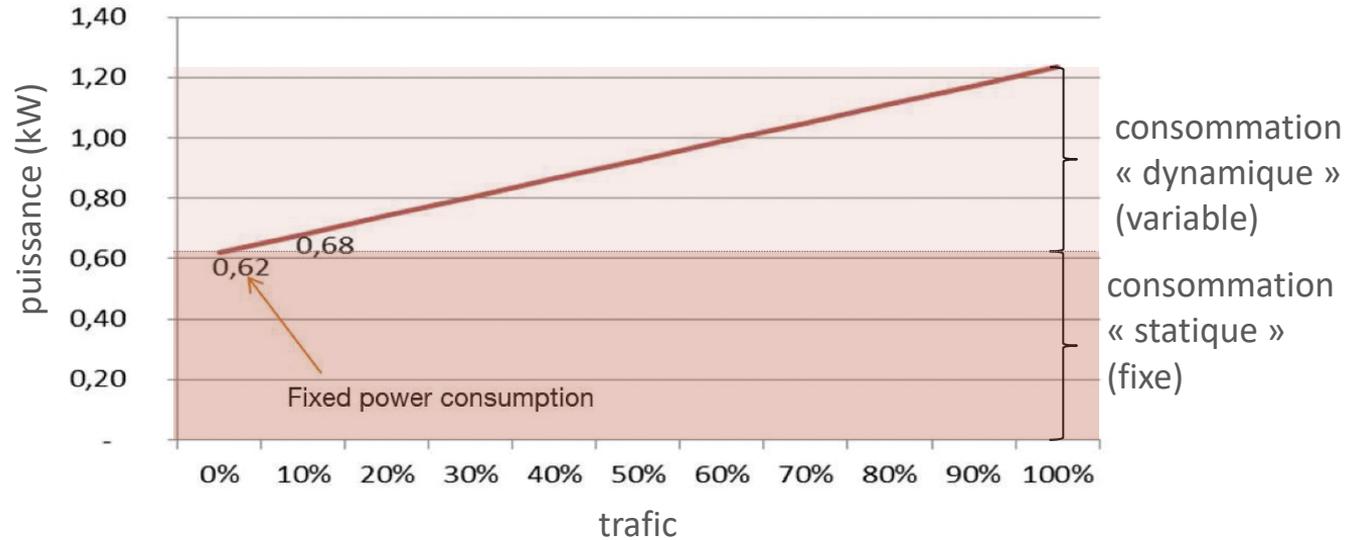
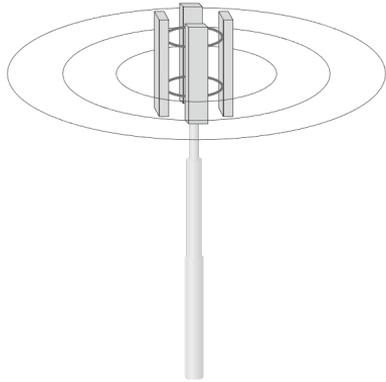


conséquentiel

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

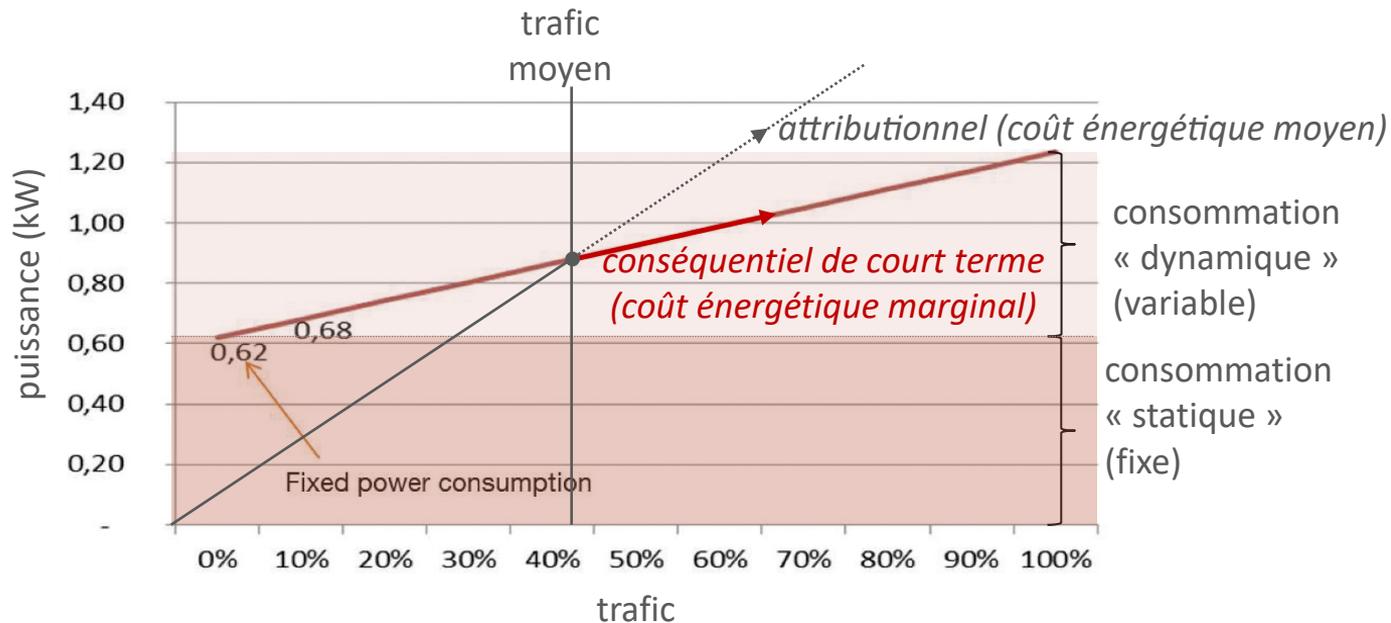
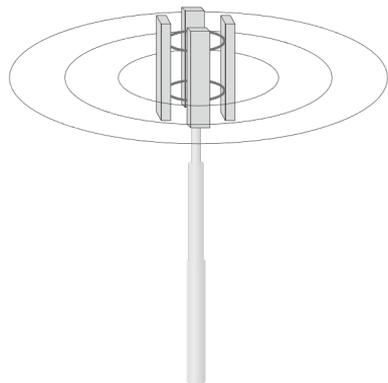
Les coûts fixes dans les réseaux

consommation d'énergie d'une station 4G



Les coûts fixes dans les réseaux

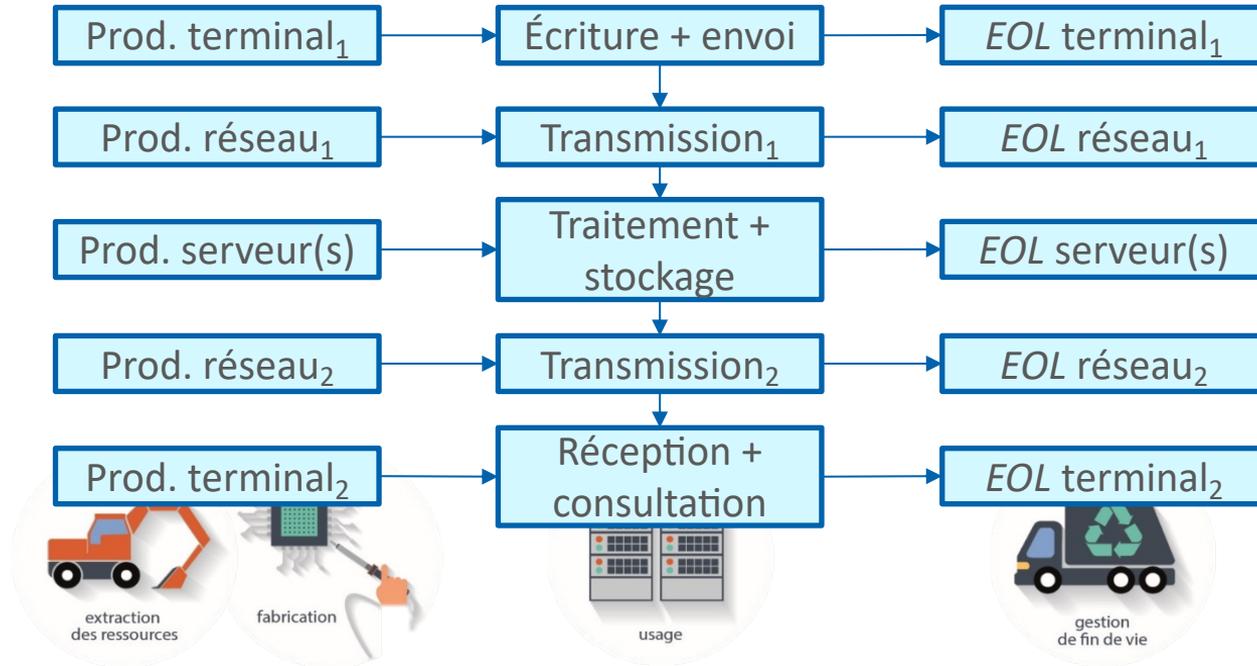
consommation d'énergie d'une station 4G



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

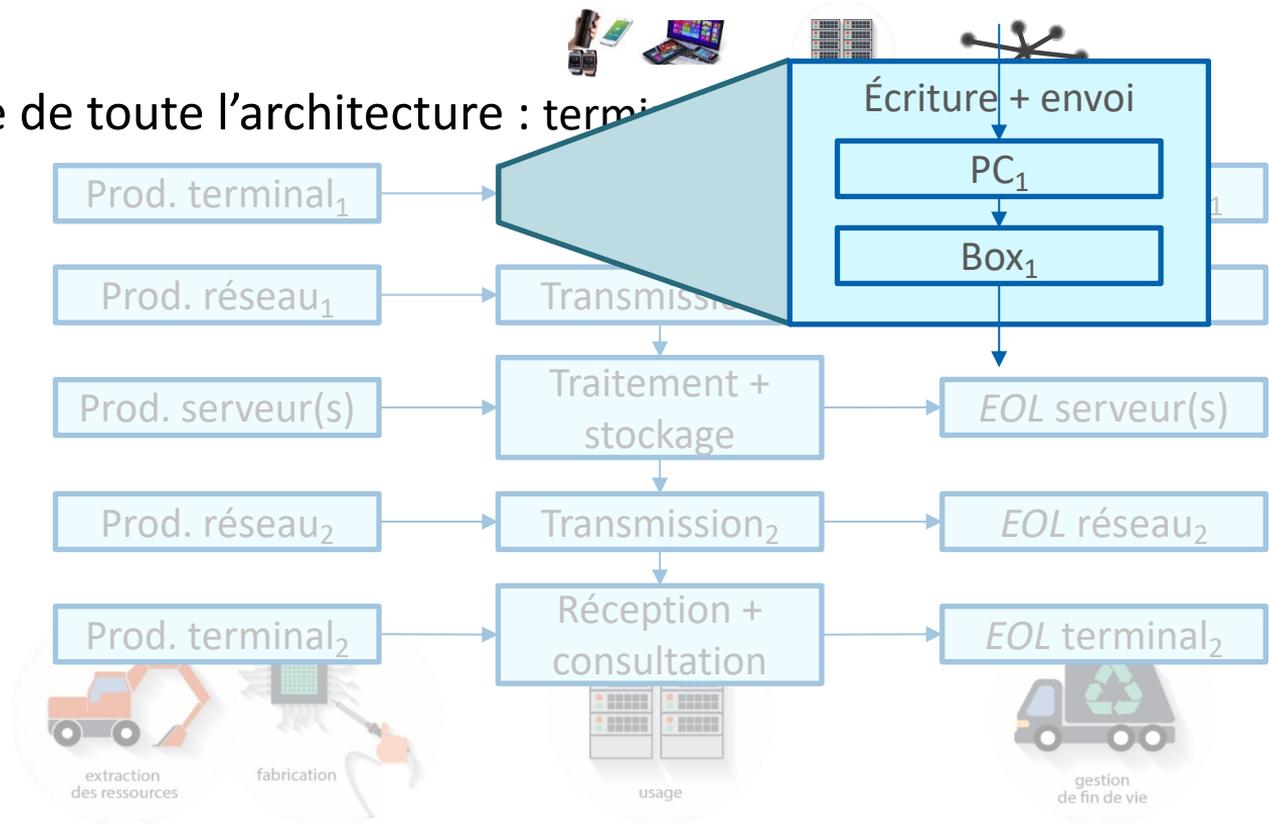


- Cycle de vie de toute l'architecture : terminaux, serveurs, réseaux
- Ex. : 



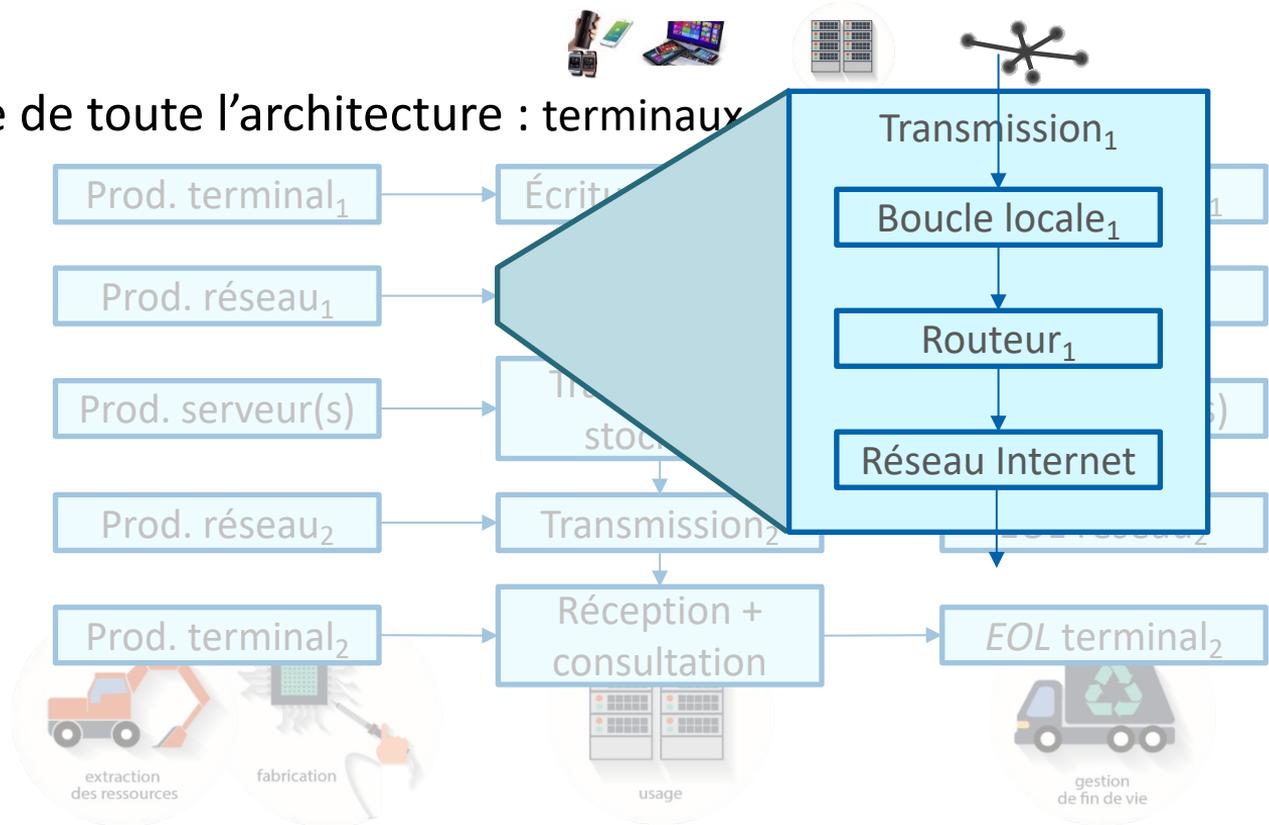
Exemple : l'envoi d'un e-mail (ICV)

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

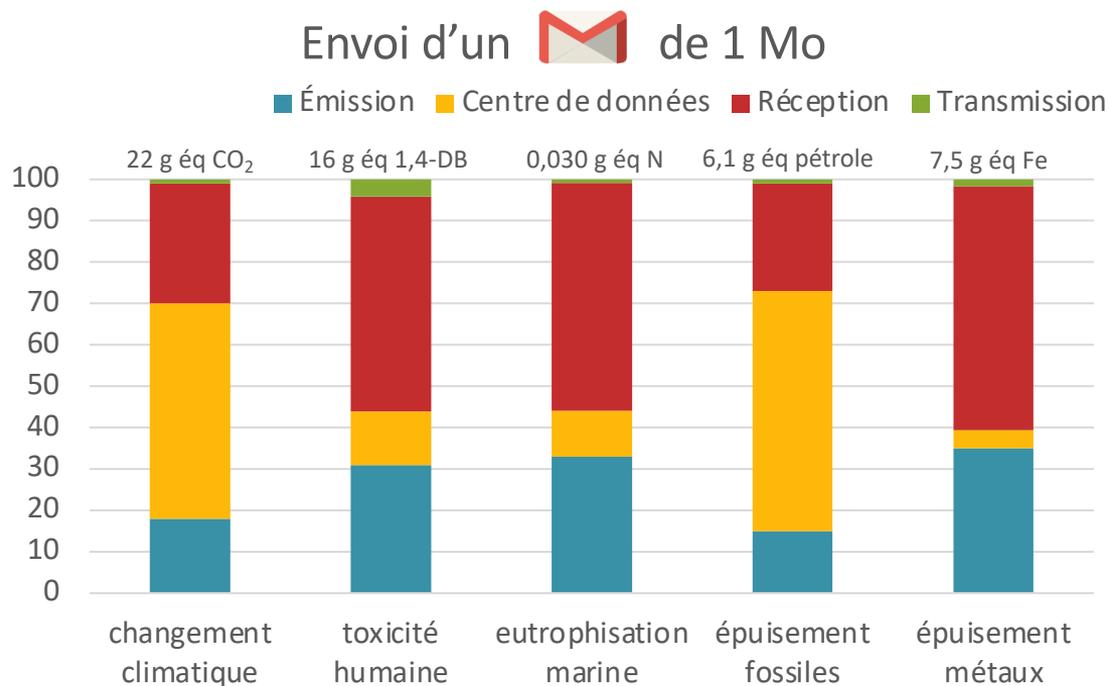


Exemple : l'envoi d'un e-mail (ICV)

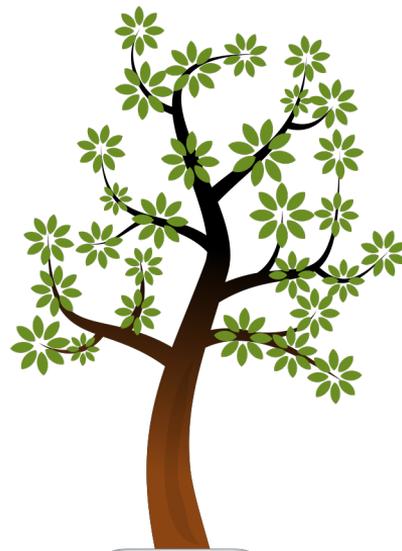
- Cycle de vie de toute l'architecture : terminaux
- Ex. : 



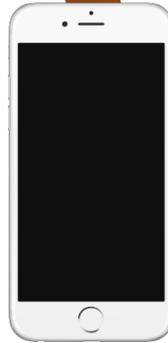
Ex. : l'envoi d'un e-mail (résultats)



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



2^{ème} partie



Les effets « indirects »
du numérique

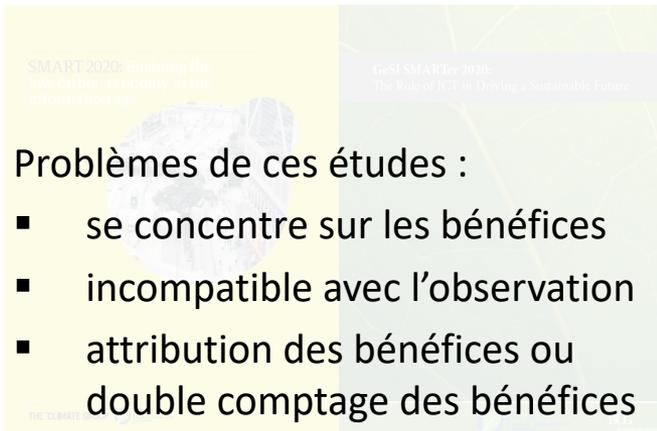
Les promesses des TIC...



Les promesses des TIC...

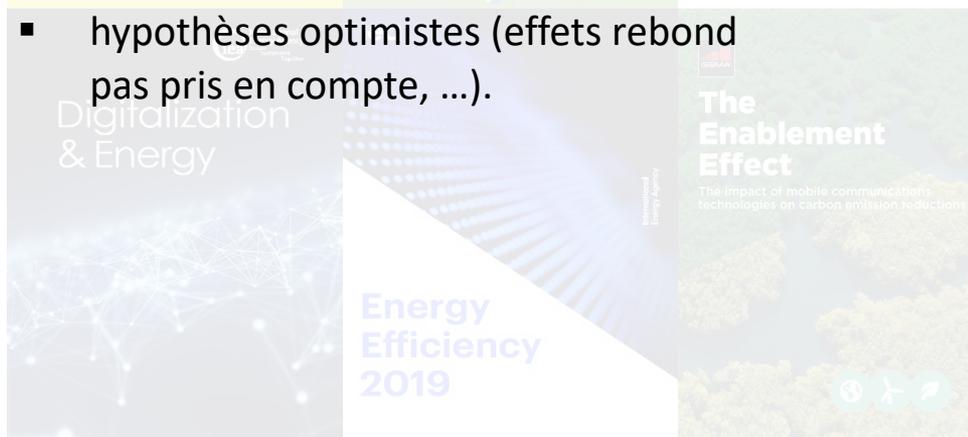


Gauthier Roussilhe,
Que peut le numérique pour la transition écologique ? (2021)



Problèmes de ces études :

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



Les promesses des TIC...



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 producteurs	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		

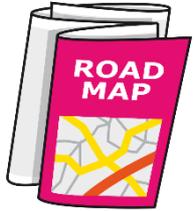
Impacts environnementaux du GPS



substitution



Impacts environnementaux du GPS



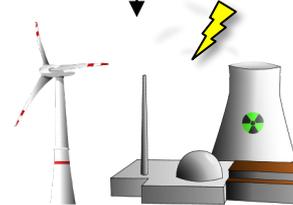
- papier



- production de papier



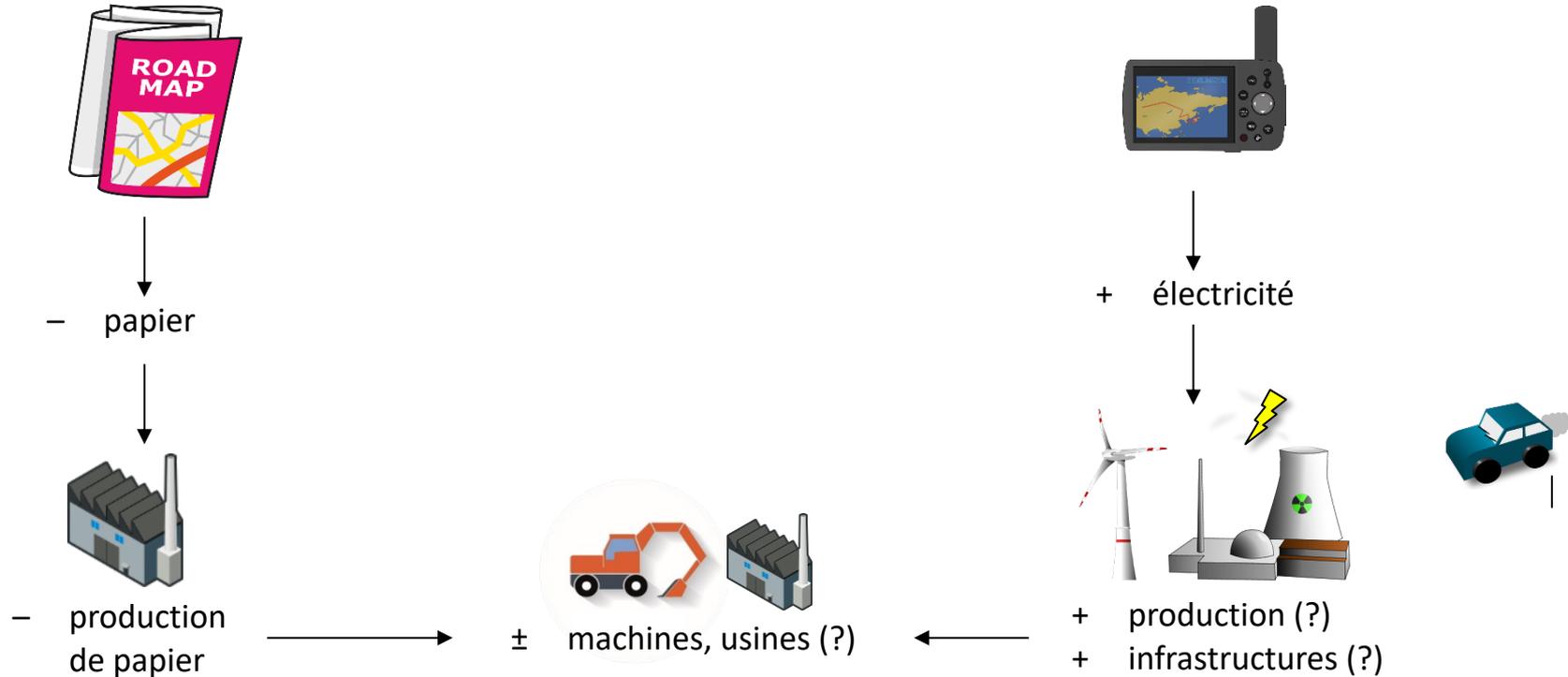
+ électricité



+ production (?)

+ infrastructures (?)

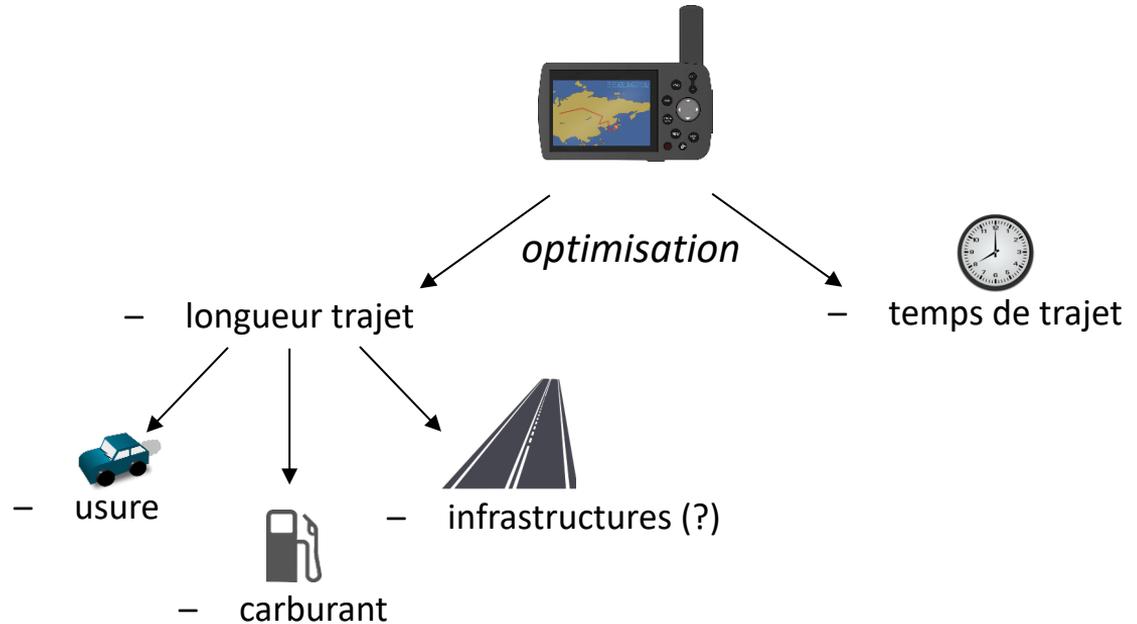
Impacts environnementaux du GPS



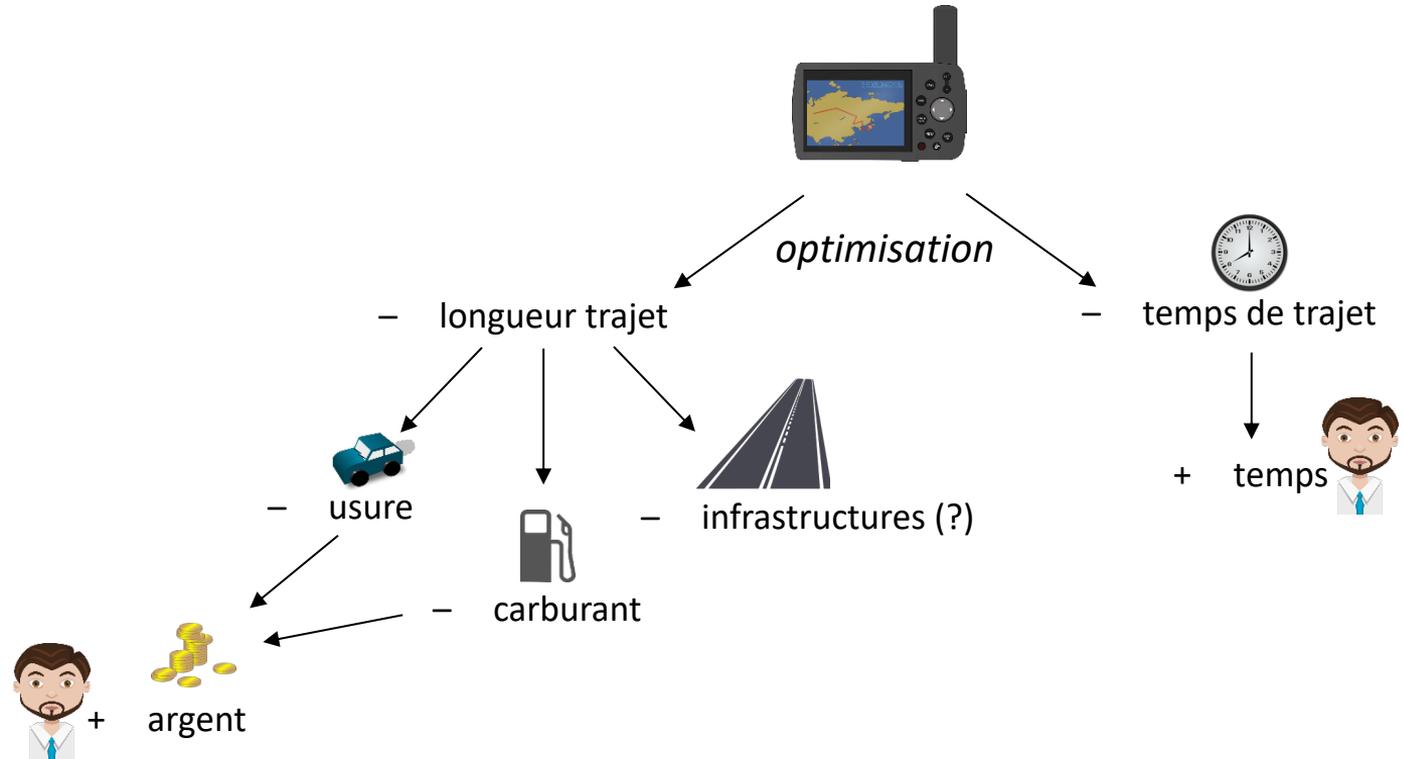
Impacts environnementaux du GPS



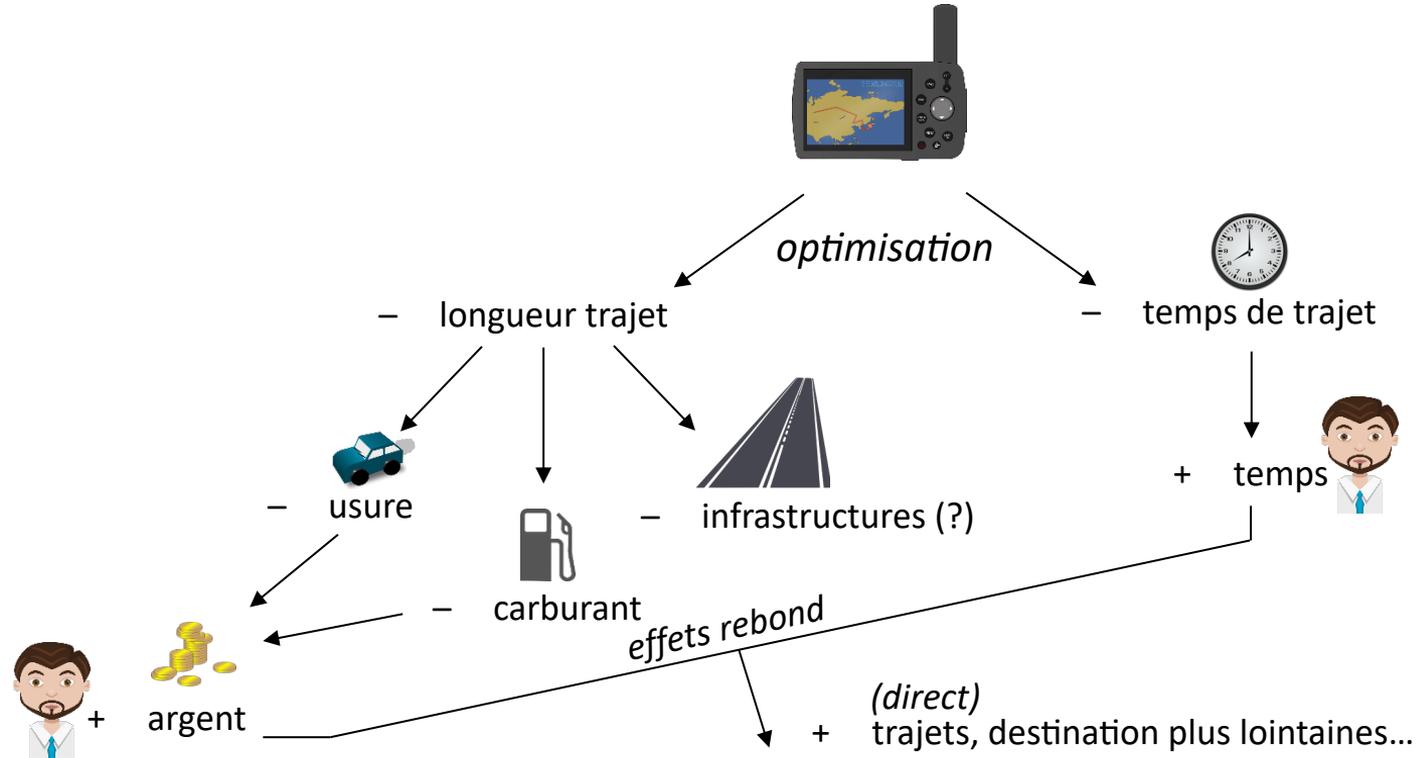
Impacts environnementaux du GPS



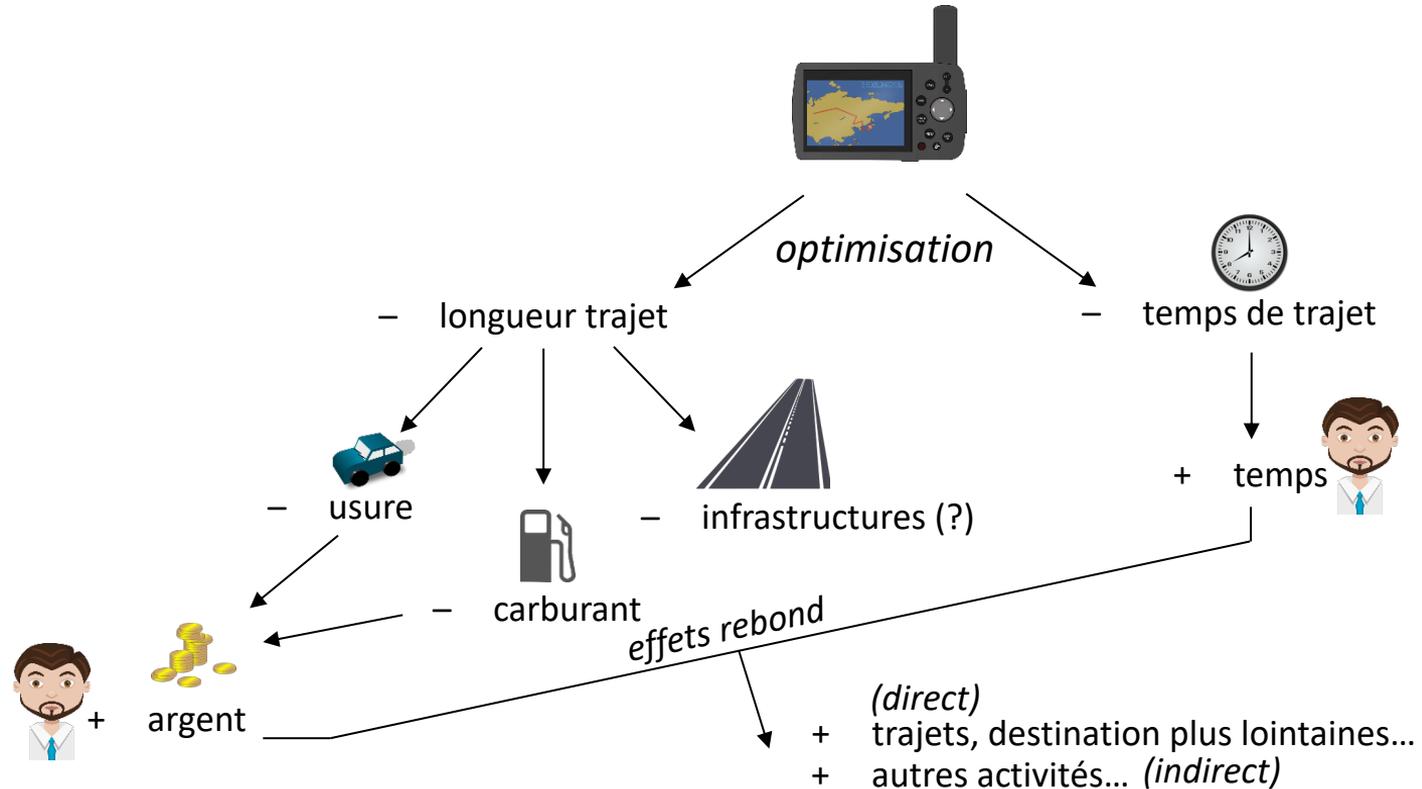
Impacts environnementaux du GPS



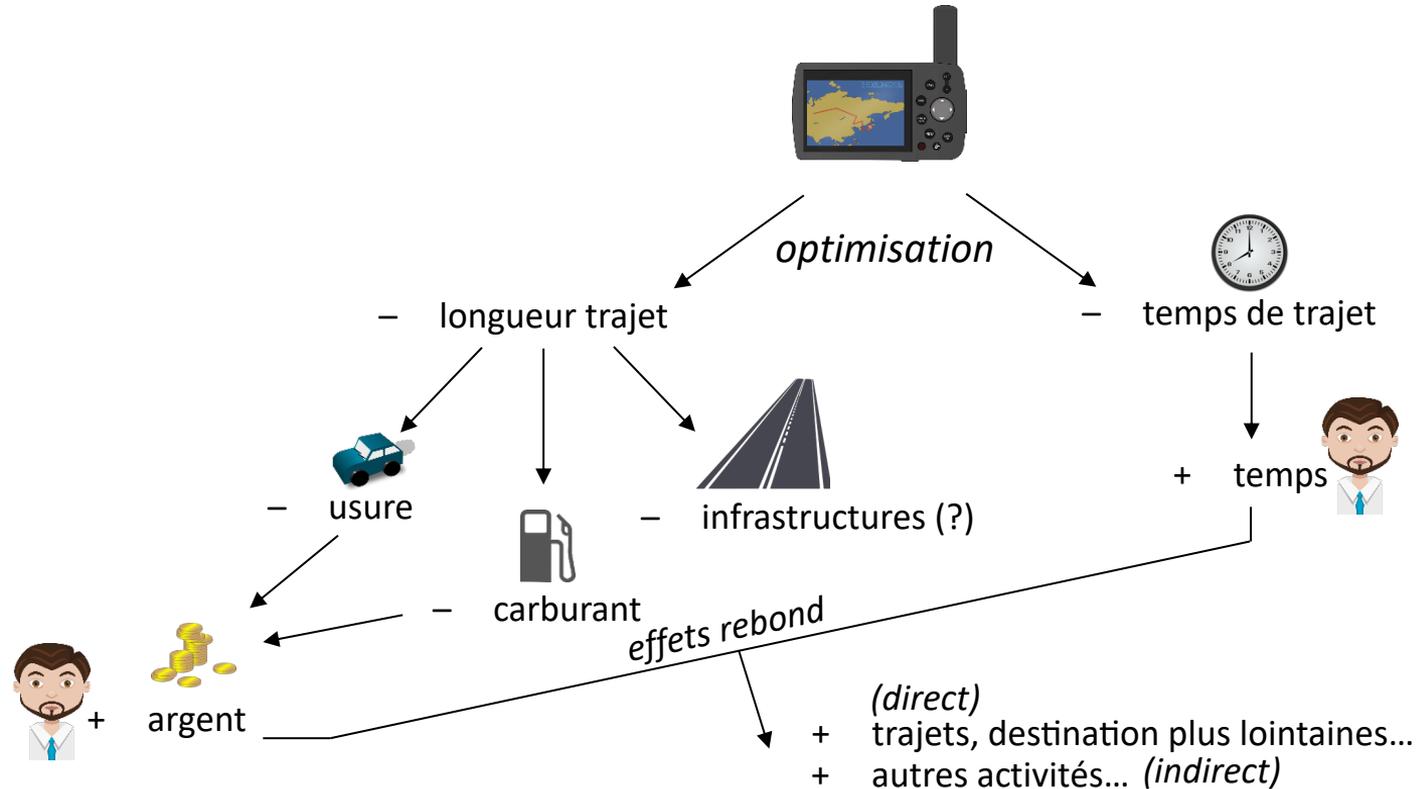
Impacts environnementaux du GPS



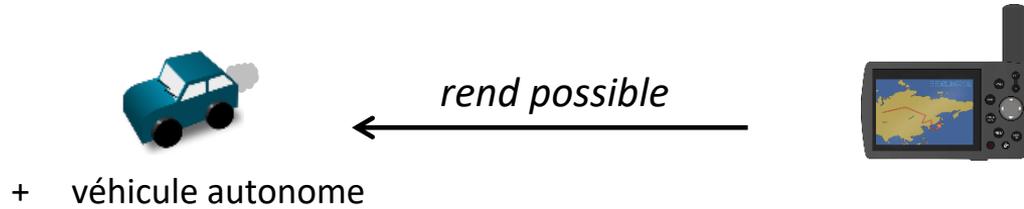
Impacts environnementaux du GPS



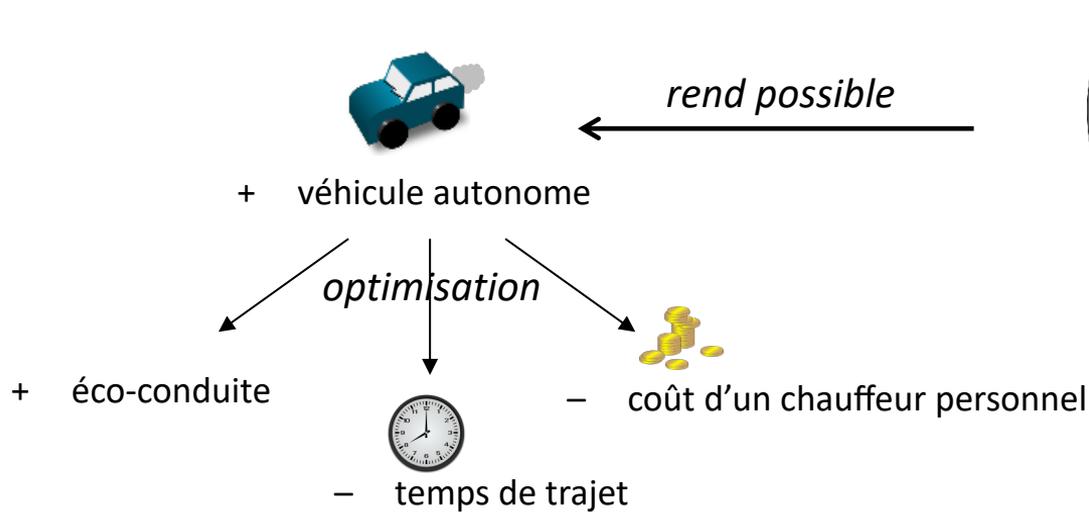
Impacts environnementaux du GPS



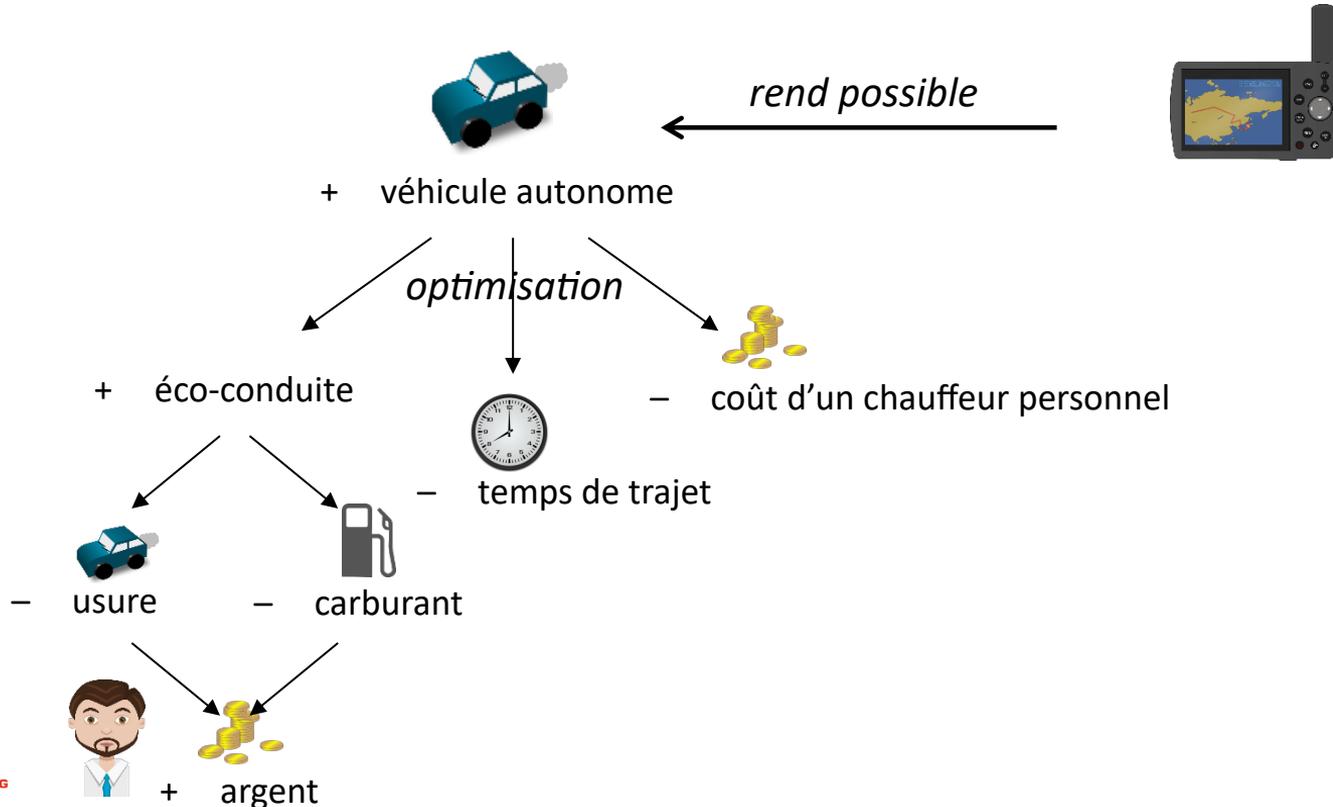
Impacts environnementaux du GPS



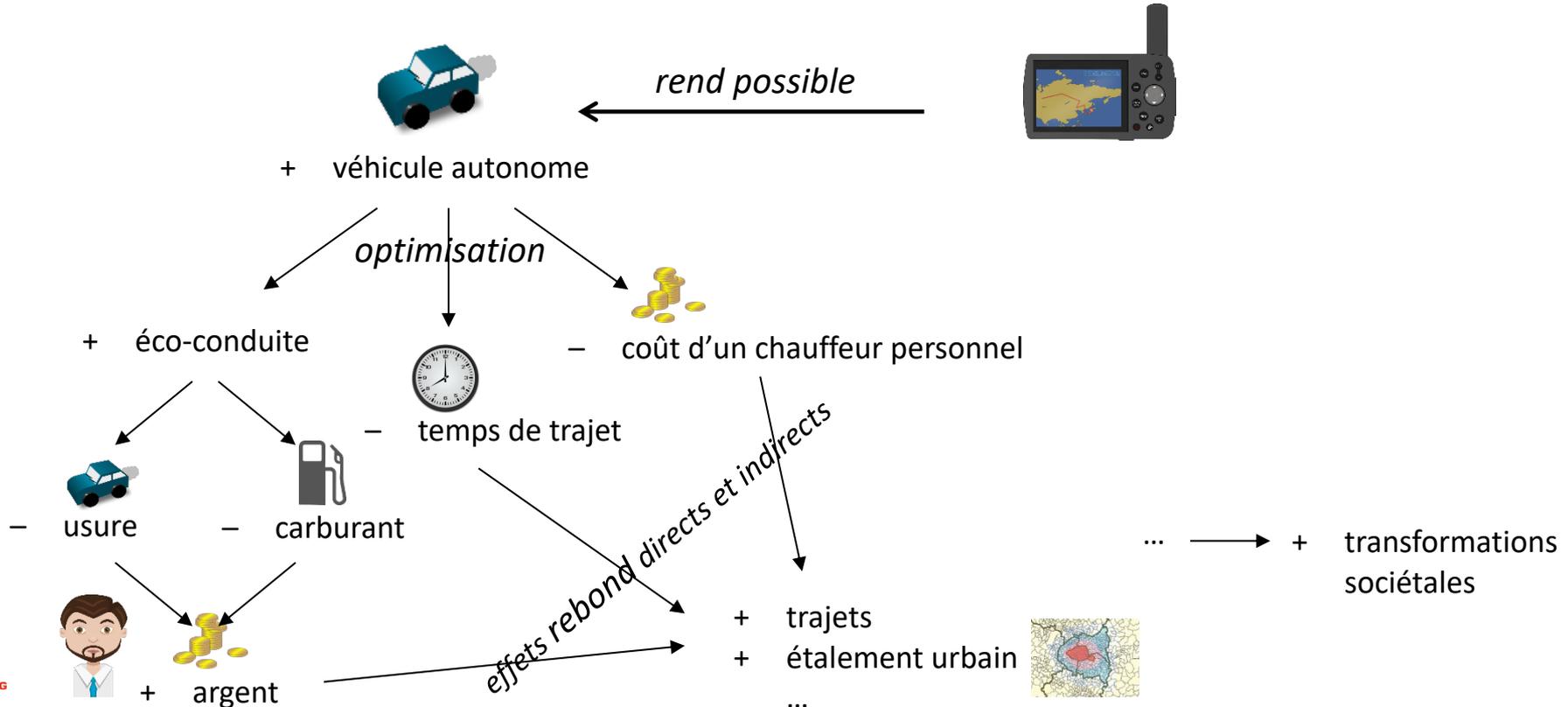
Impacts environnementaux du GPS



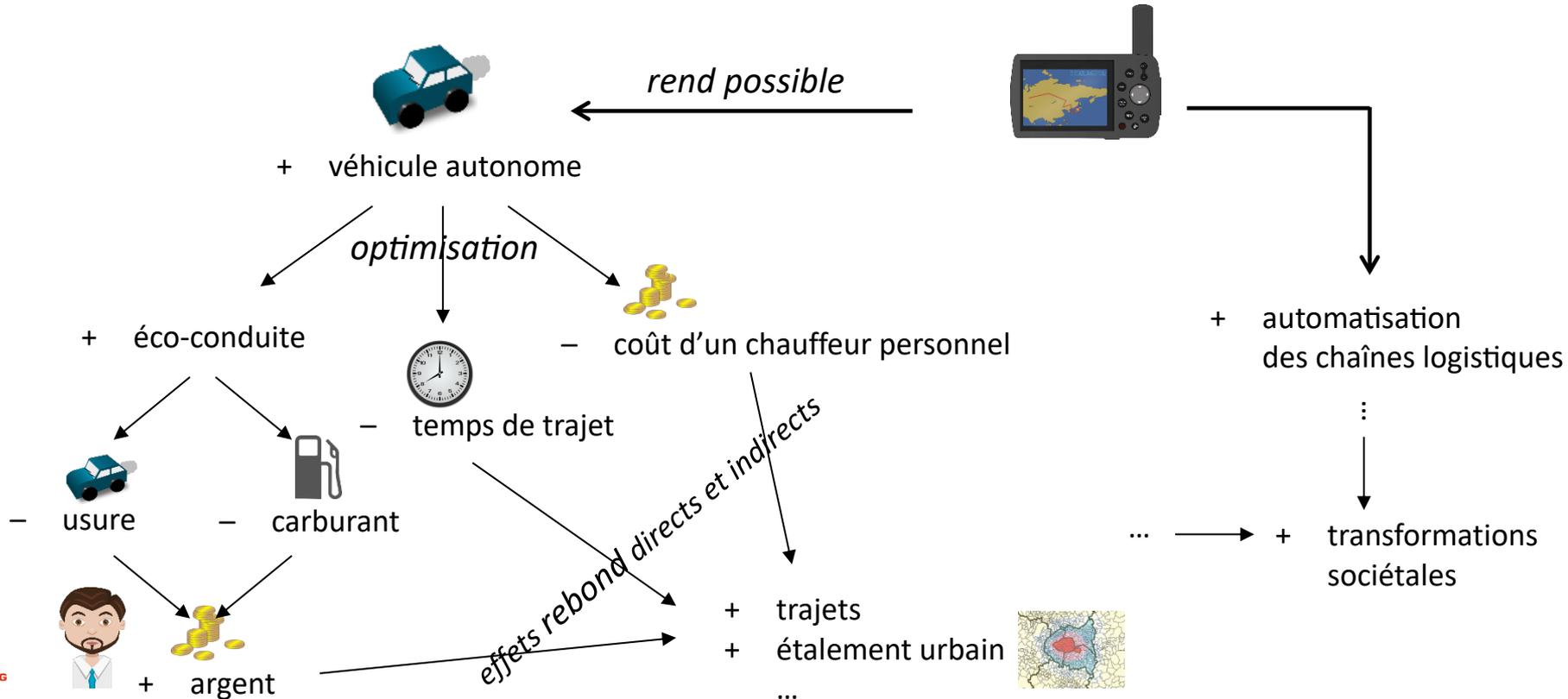
Impacts environnementaux du GPS



Impacts environnementaux du GPS



Impacts environnementaux du GPS



Les impacts environnementaux du télétravail



substitution →



Les impacts environnementaux du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité

trafic induit

↑ *effet rebond direct*

- congestion routière

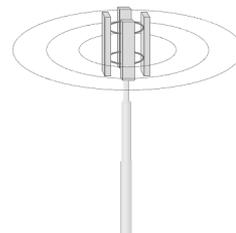


- trajets →
- carburant



- + temps

- + temps de travail
- productivité



réseaux

- + électricité (?)
- + infrastructures (?)



- + équipement (écran, ...) (?)
- + électricité
- + chauffage (?)



effet rebond direct

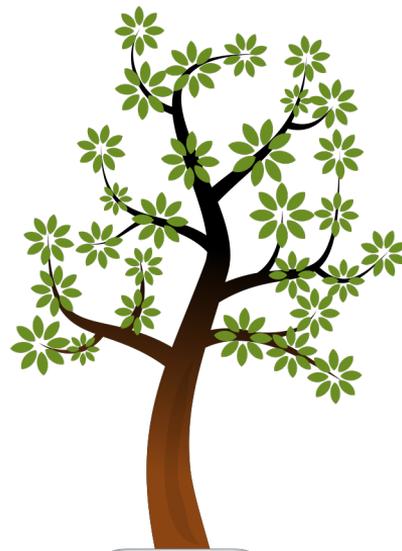
effet rebond indirect

reconfiguration

- + trajets (courses, WE, ...)
- + pouvoir d'achat
- + étalement urbain
- + espace



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



2^{ème} partie

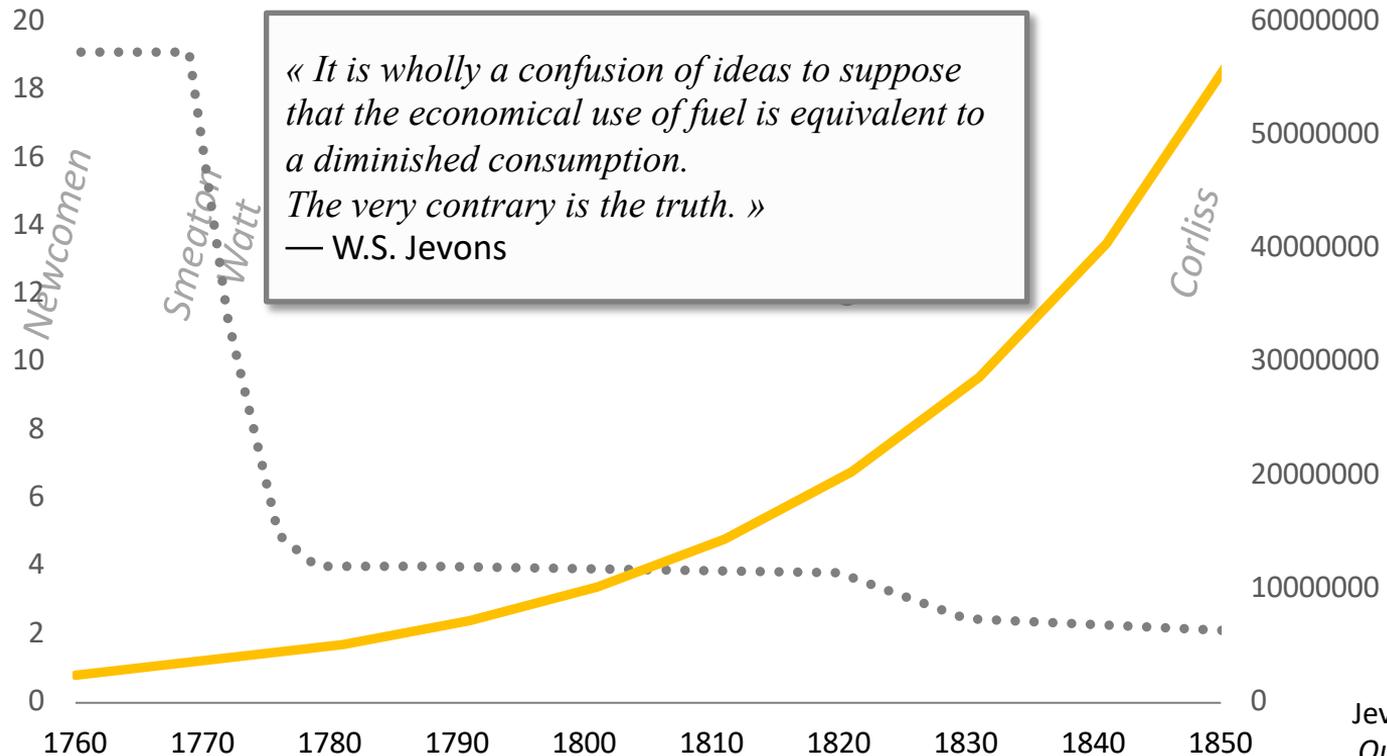
Les effets « indirects »
du numérique

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)**



source :
Jevons, *The Coal Question* (1865)

Exemple d'effet rebond

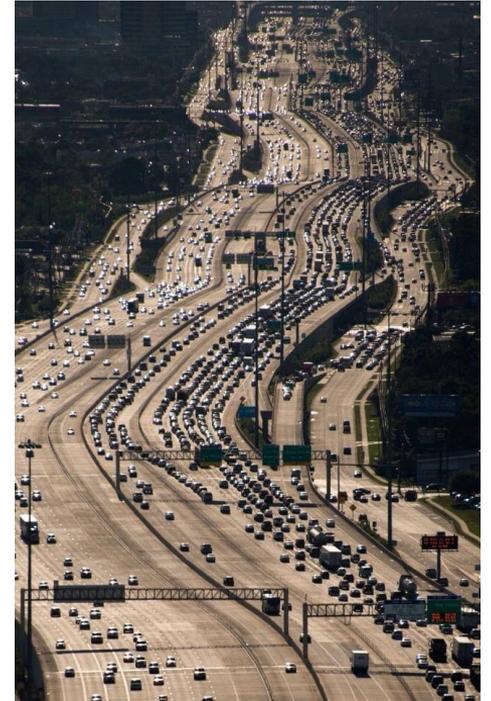
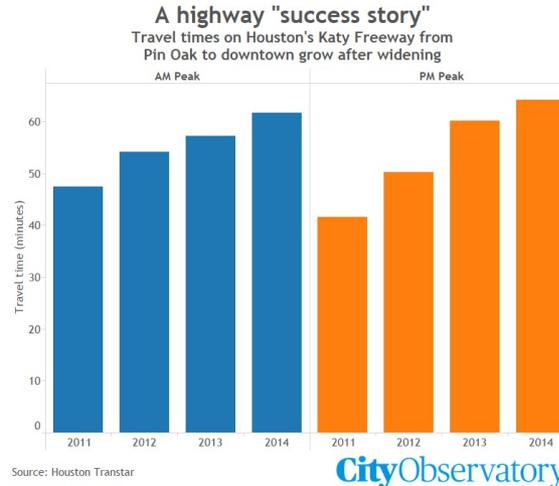
Le trafic induit

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

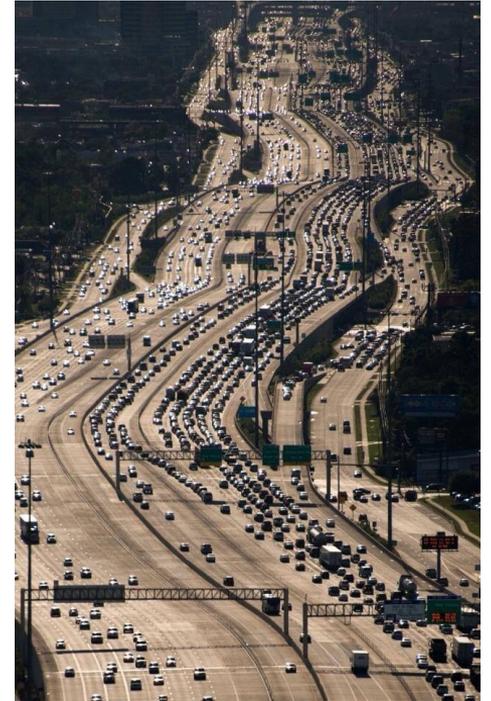
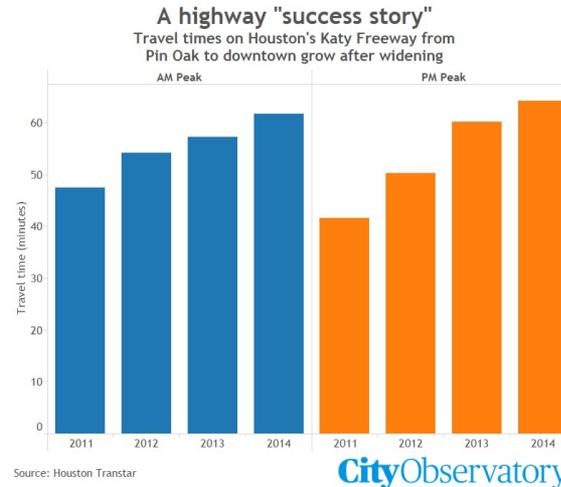
Le trafic induit

Houston I-10 Katy Freeway

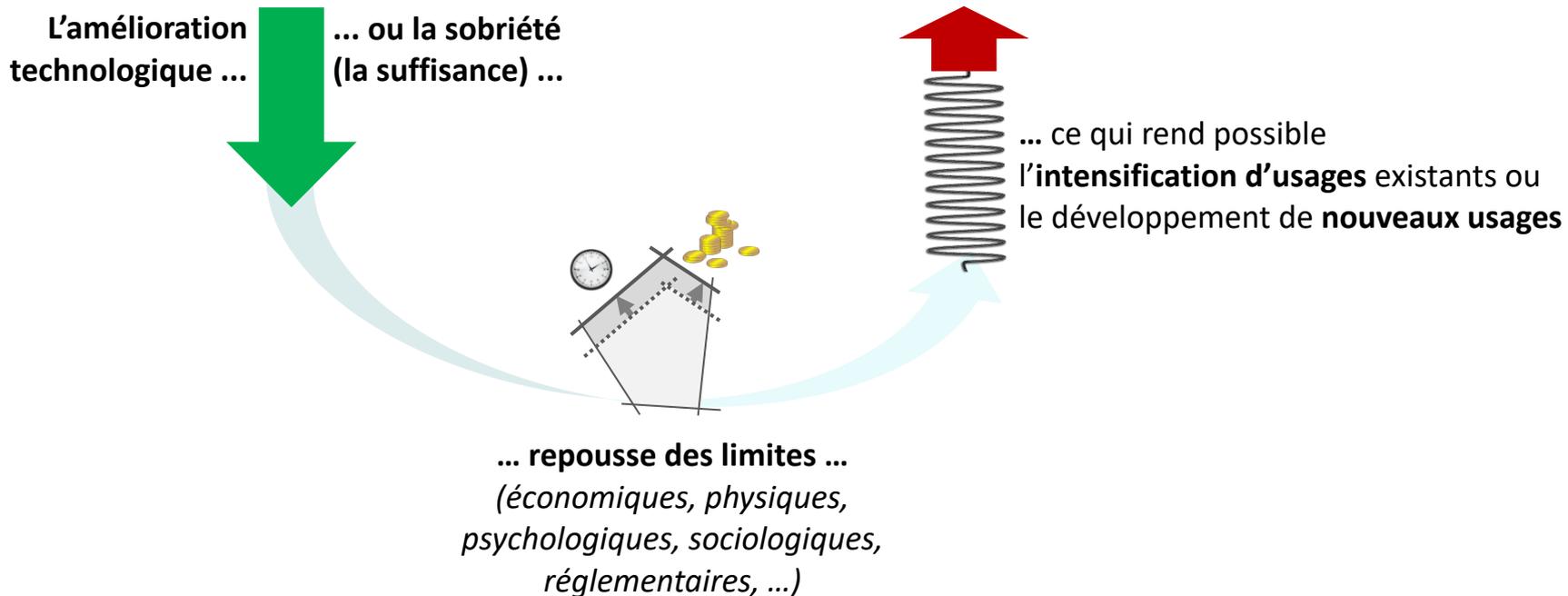
- Augmentation de la capacité du réseau routier
(pour réduire la congestion)

↓
*élasticité
de la demande*

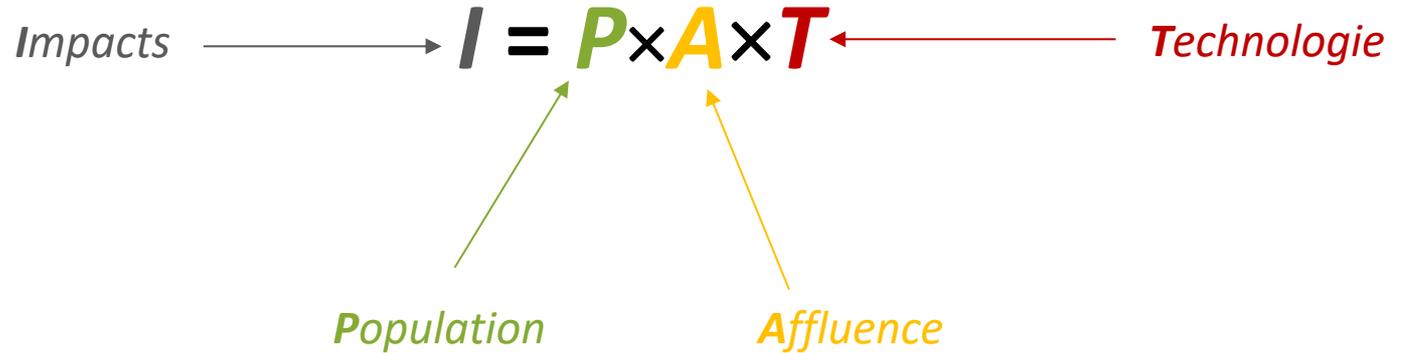
- Augmentation du trafic
(niveau de congestion inchangé)



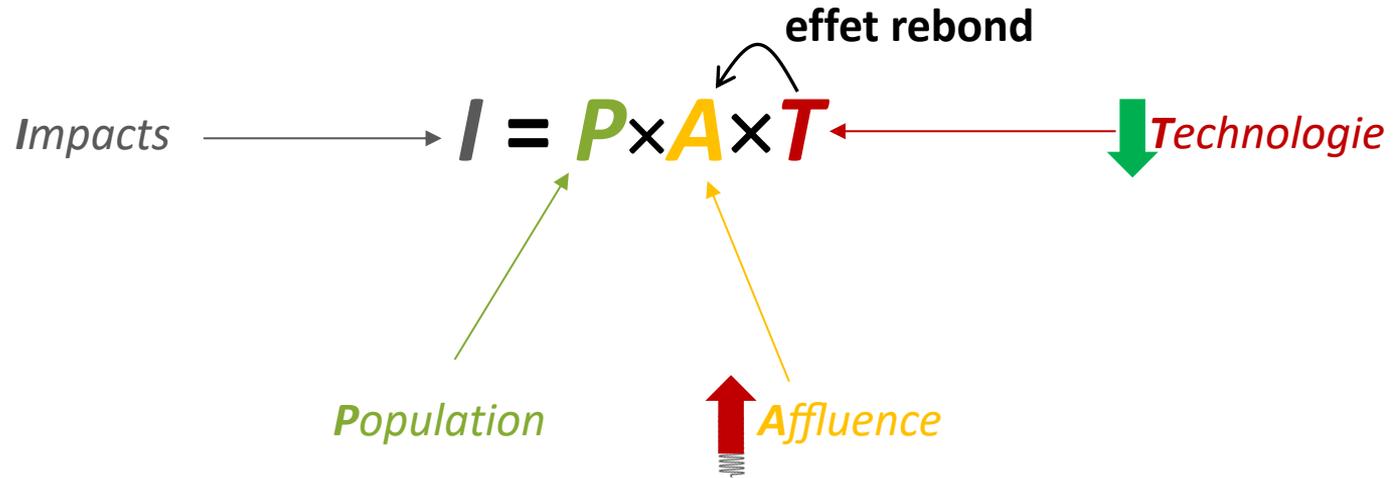
L'effet rebond



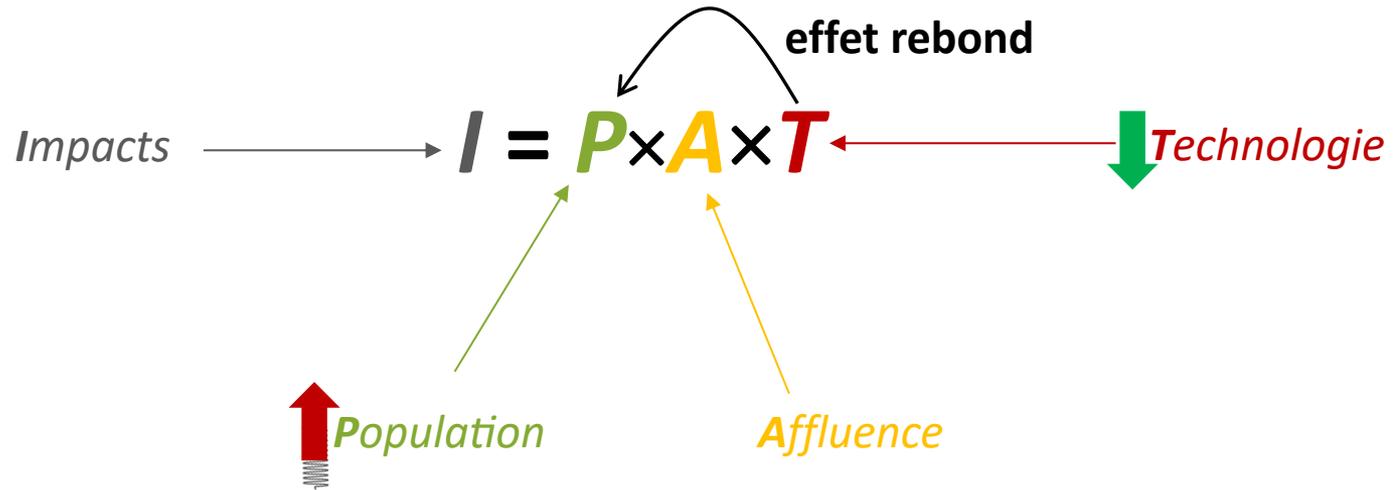
L'effet rebond



L'effet rebond



L'effet rebond



Estimer l'effet rebond

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



effet rebond

- Comparer :



affluence



scénario **sans**
gain en efficacité

scénario **avec**
gain en efficacité

cas réel (contrôle)

vs

cas réel (traité)

modèle (contrefactuel)

vs

cas réel (historique)

cas réel (historique)

vs

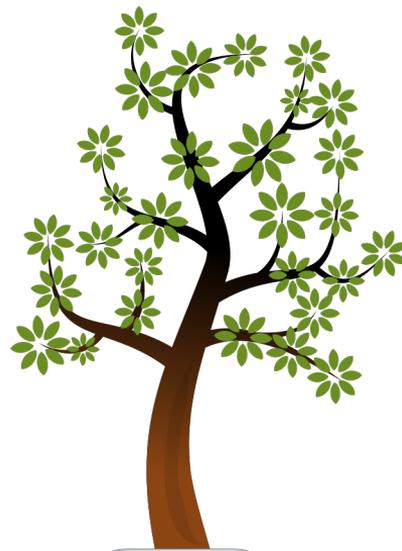
modèle (contrefactuel)

modèle (prévision)

vs

modèle (prévision)

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

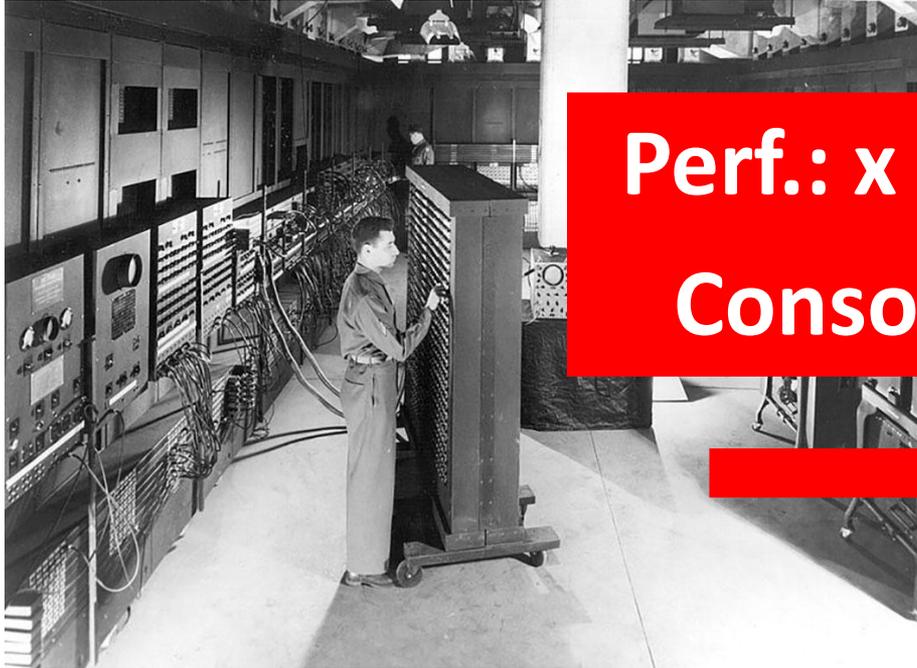


2^{ème} partie

Les effets « indirects »
du numérique

*Les effets rebond
dans le numérique*

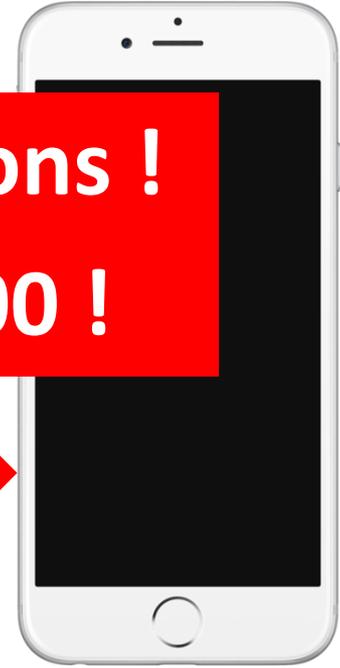
ENIAC (1945)



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

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

iPhone 6 (2014)

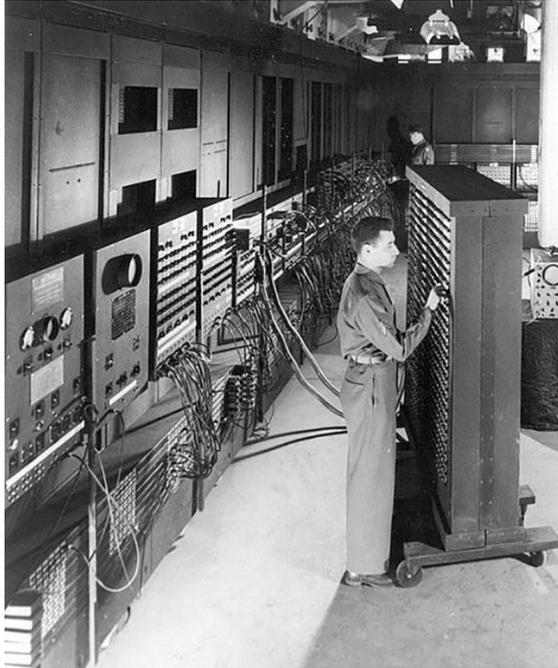


- Poids : 130 g
- Dim. : 158,1 × 77,8 mm × 7,1 mm
- Conso. : ~2 W
- Perf. : ~130 GFLOPS

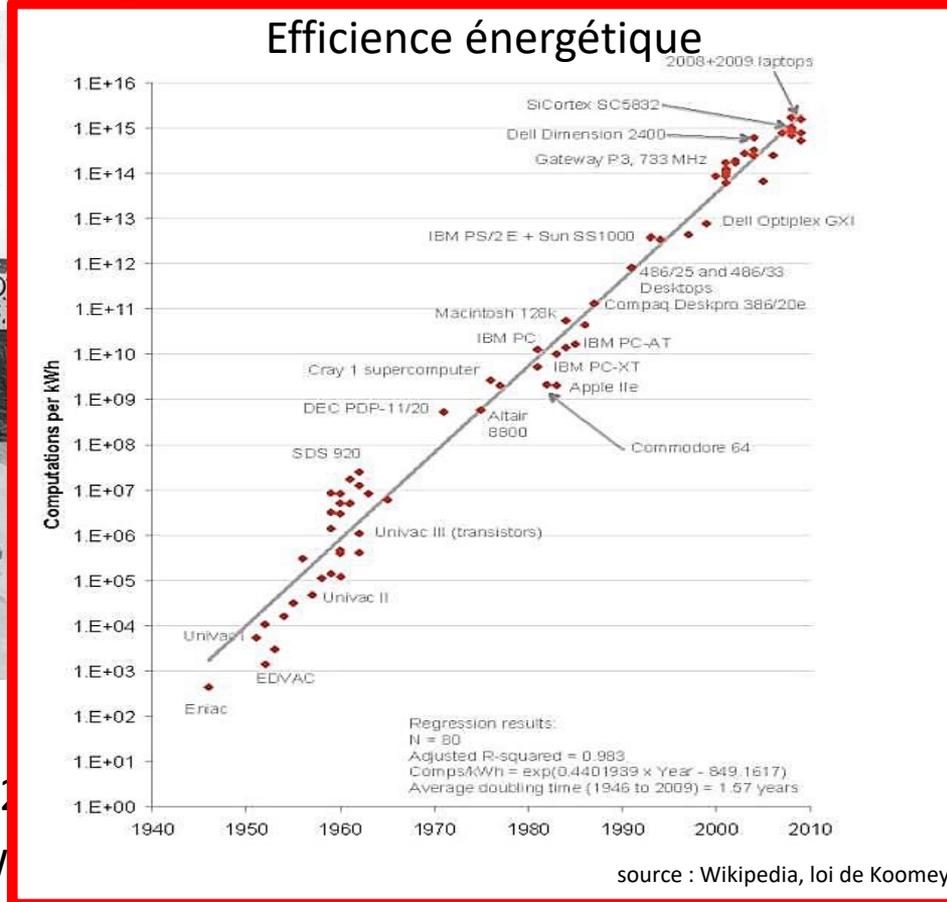


ENIAC (1945)

iPhone 6 (2014)



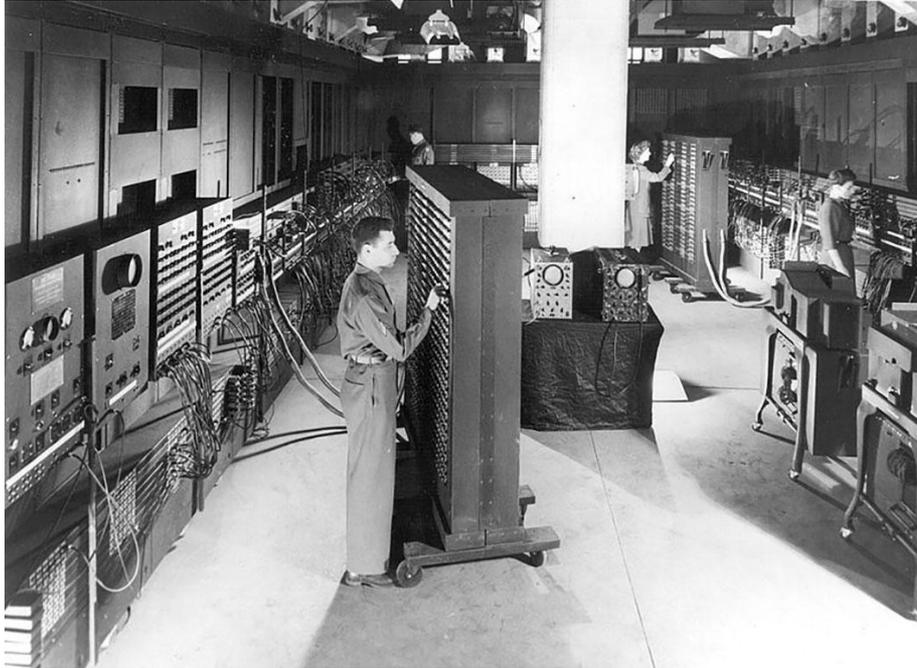
- Poids : 30 t
- Dim. : 30,5 m × 23 m
- Conso. : 150 kW
- Perf. : ~500 FLOPS



140 mm × 7,1 mm

- Perf. : ~130 GFLOPS

ENIAC

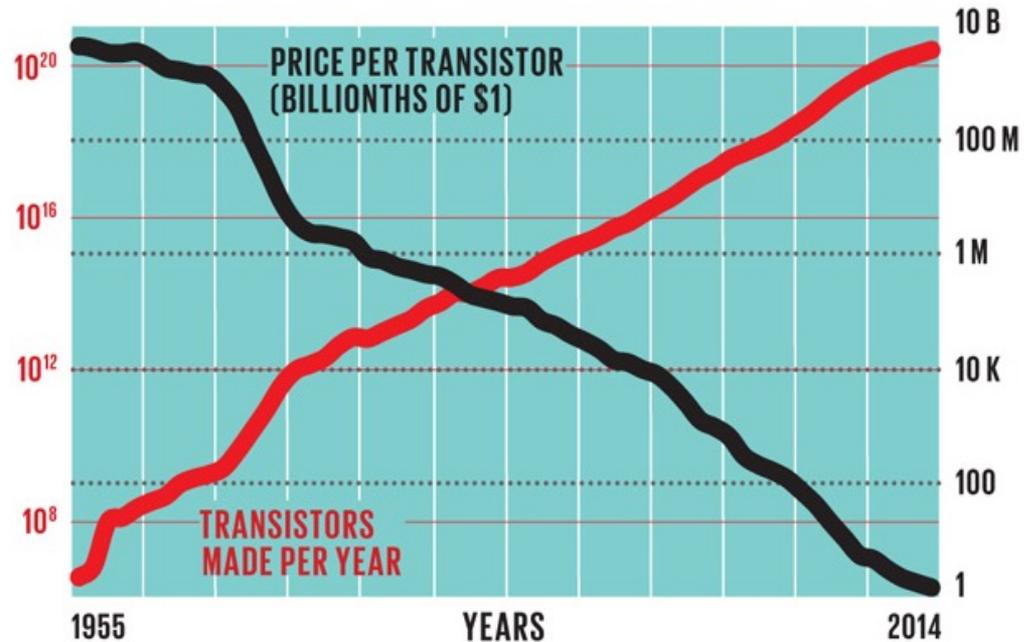
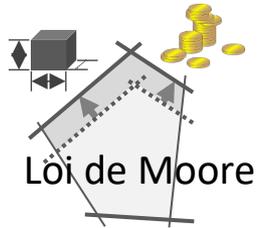


150 kW
(en fonctionnement)



260 GW
(en continu)

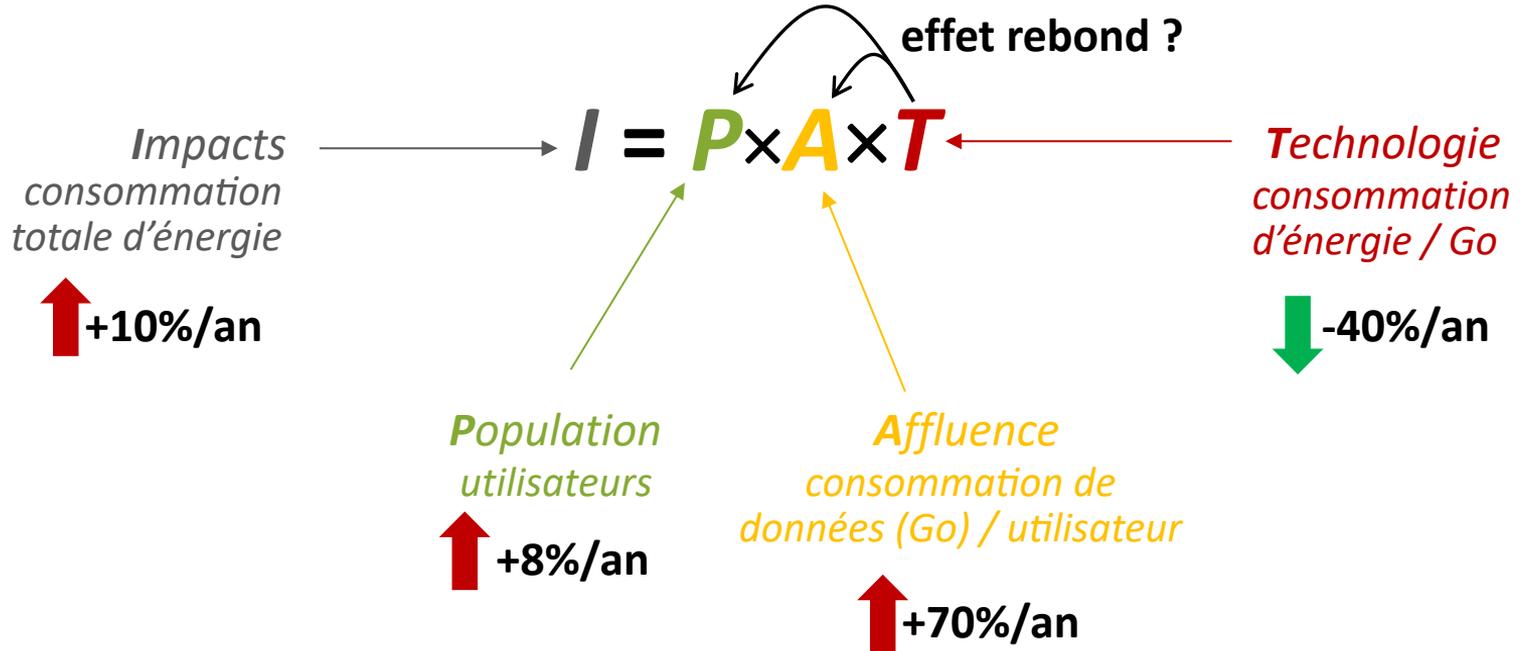
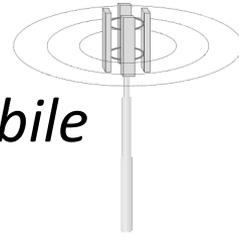
Loi de Moore



Data Source: VLSI Research

L'effet rebond

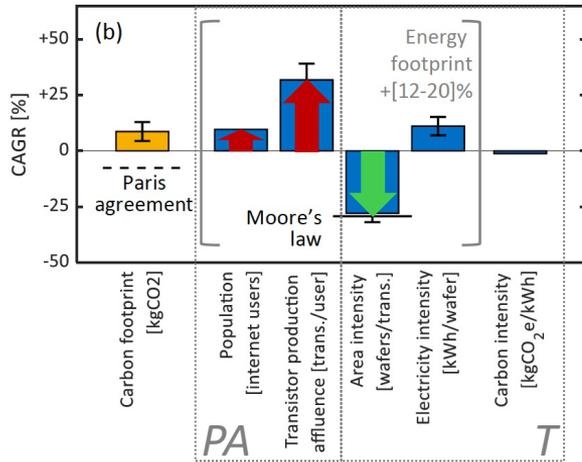
Exemple de l'internet mobile



Émissions des CO₂

Les gains en efficacité et la croissance des « besoins »

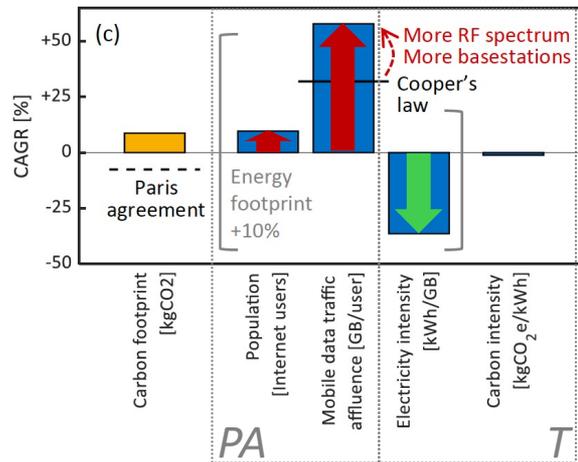
$$CO_2e = Users \times \frac{Transistors}{User} \times \frac{Wafers}{Transistor} \times \frac{kWh}{Wafer} \times \frac{CO_2e}{kWh}$$



Loi de Moore

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

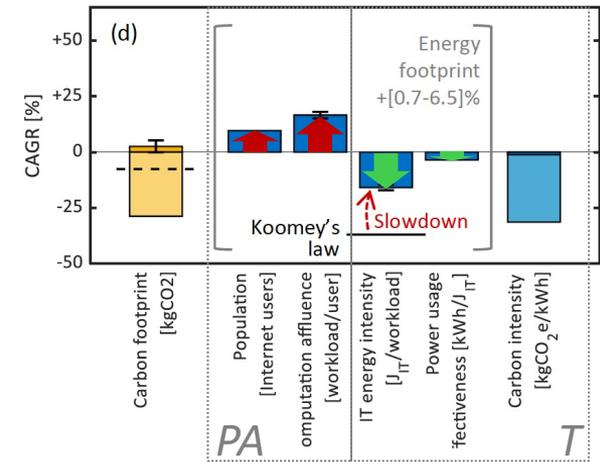
$$CO_2e = Users \times \frac{GB}{User} \times \frac{kWh}{GB} \times \frac{CO_2e}{kWh}$$



Loi de Cooper

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

$$CO_2e = Users \times \frac{Workload}{User} \times \frac{J_{IT}}{Workload} \times \frac{kWh}{J_{IT}} \times \frac{CO_2e}{kWh}$$

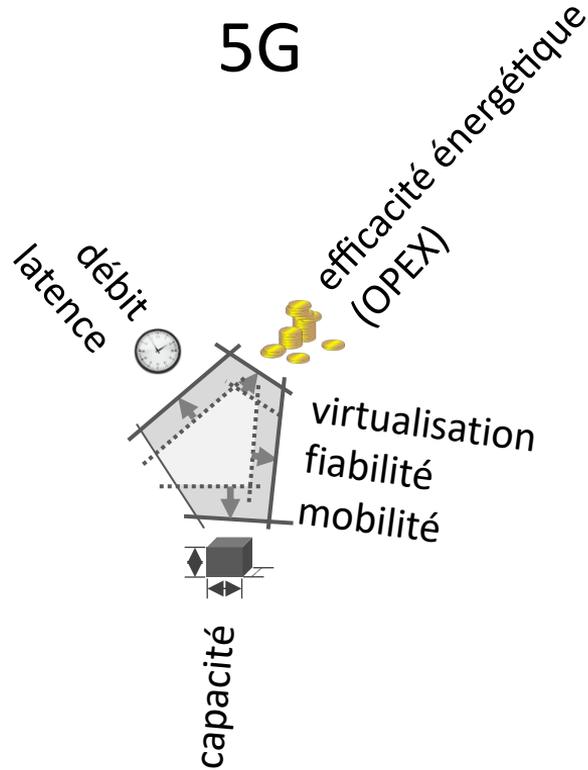


Loi de Koomey

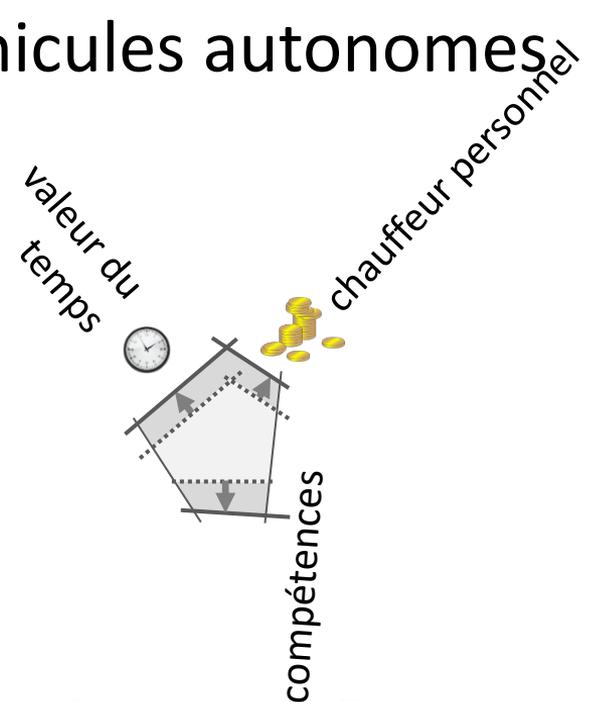
émissions de CO₂ du calcul dans les centres de données (2010-2018)

Effet rebond et limites

Repousser les limites de et par les TIC



Véhicules autonomes



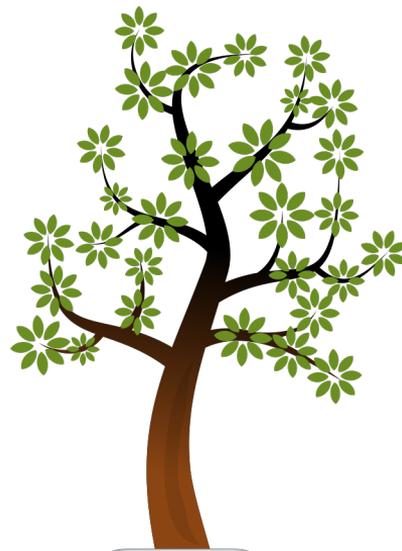
ressources : Gossart, *Rebound effects and ICT: a review of the literature* (2014)

Wadud et al., *Help of 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)

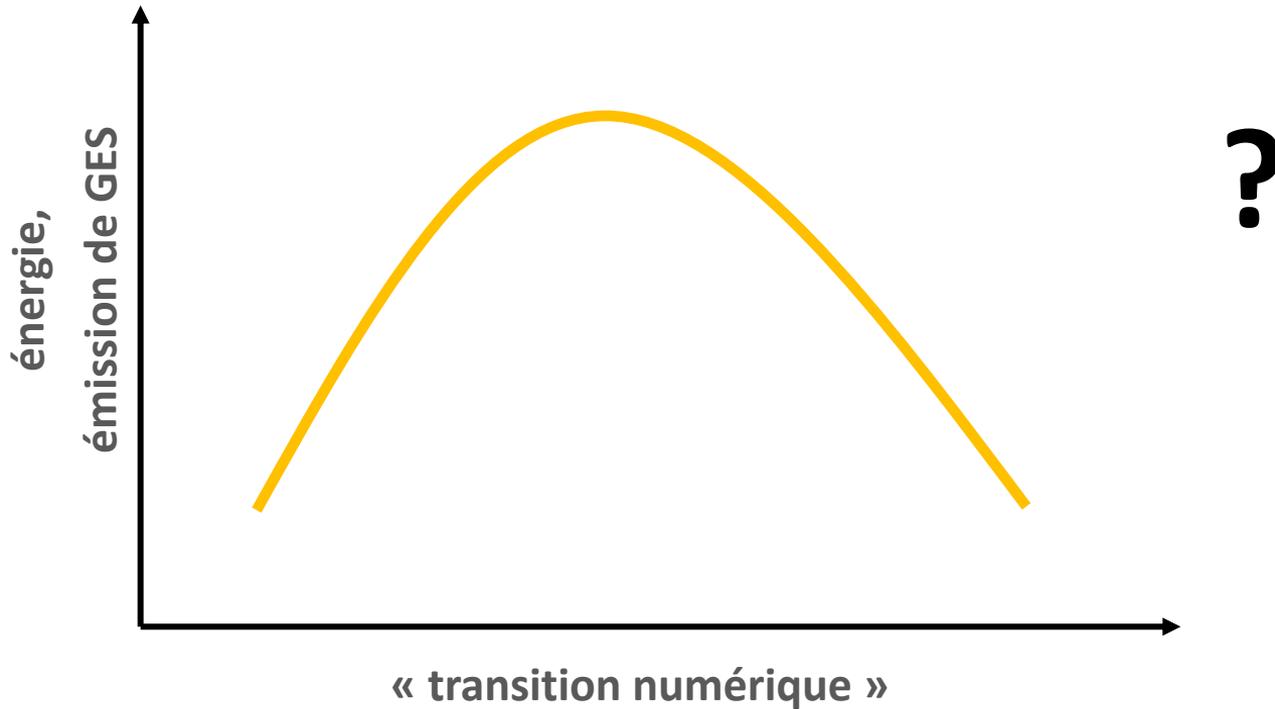


2^{ème} partie

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)

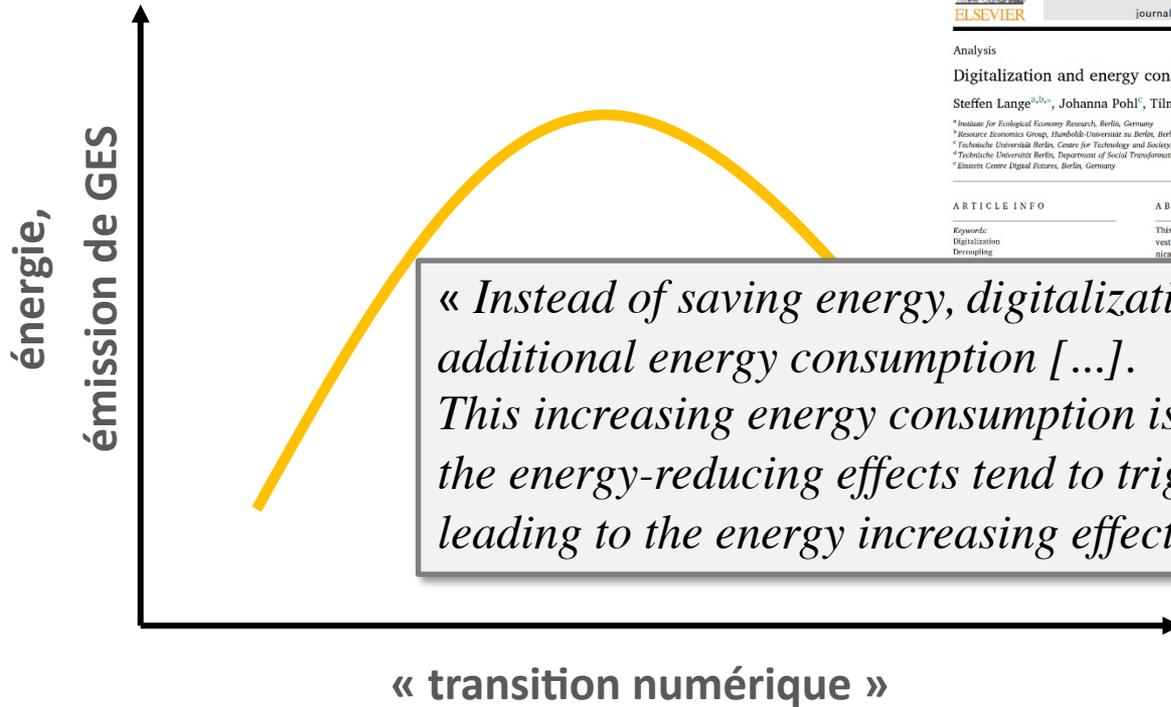
Avoma et al. : ICT and environmental quality in Sub-Saharan Africa: Effects and transmission channels (2020)

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 matters? (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/ecoecon

ELSEVIER

Analysis

Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?

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

^a Institute for Ecological Economy Research, Berlin, Germany
^b Research Economics Group, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany
^c Technische Universität Berlin, Centre for Technology and Society, Berlin, Germany
^d Technische Universität Berlin, Department of Social Transformation and Sustainable Digitalization, Berlin, Germany
^e Eliastra Centre Digital Future, Berlin, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:
Digitalization
Decoupling

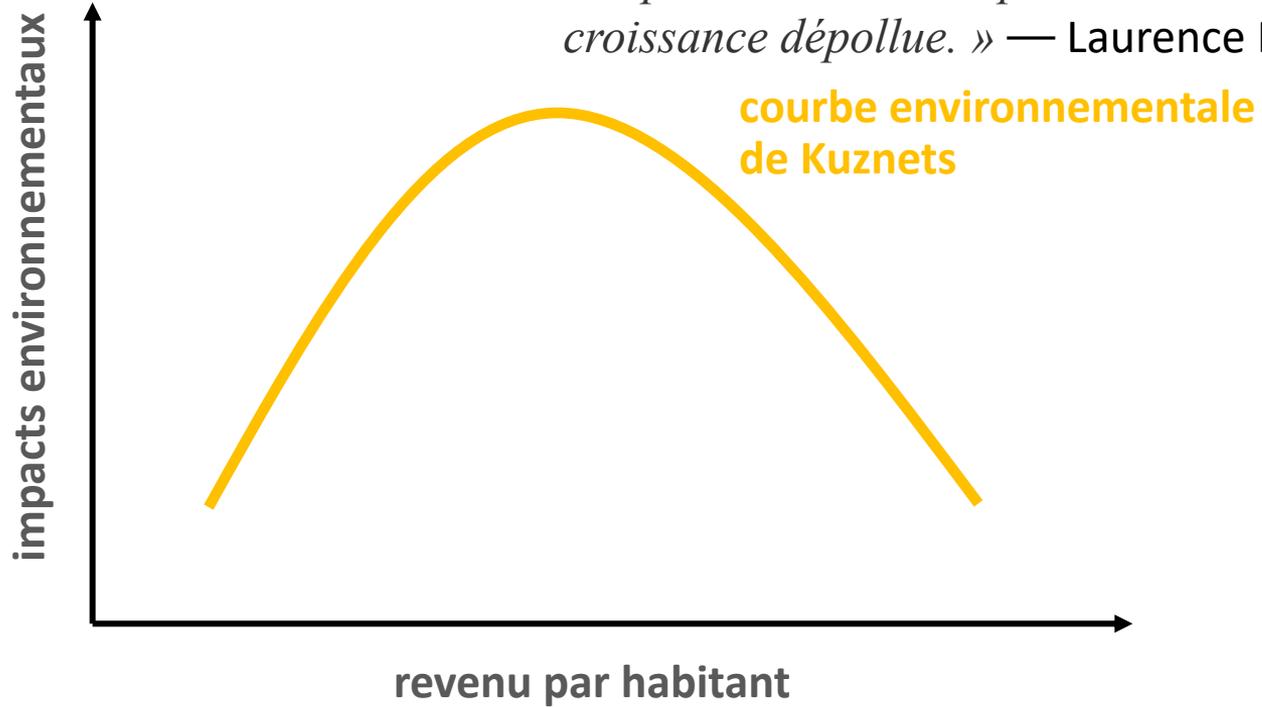
ABSTRACT

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-

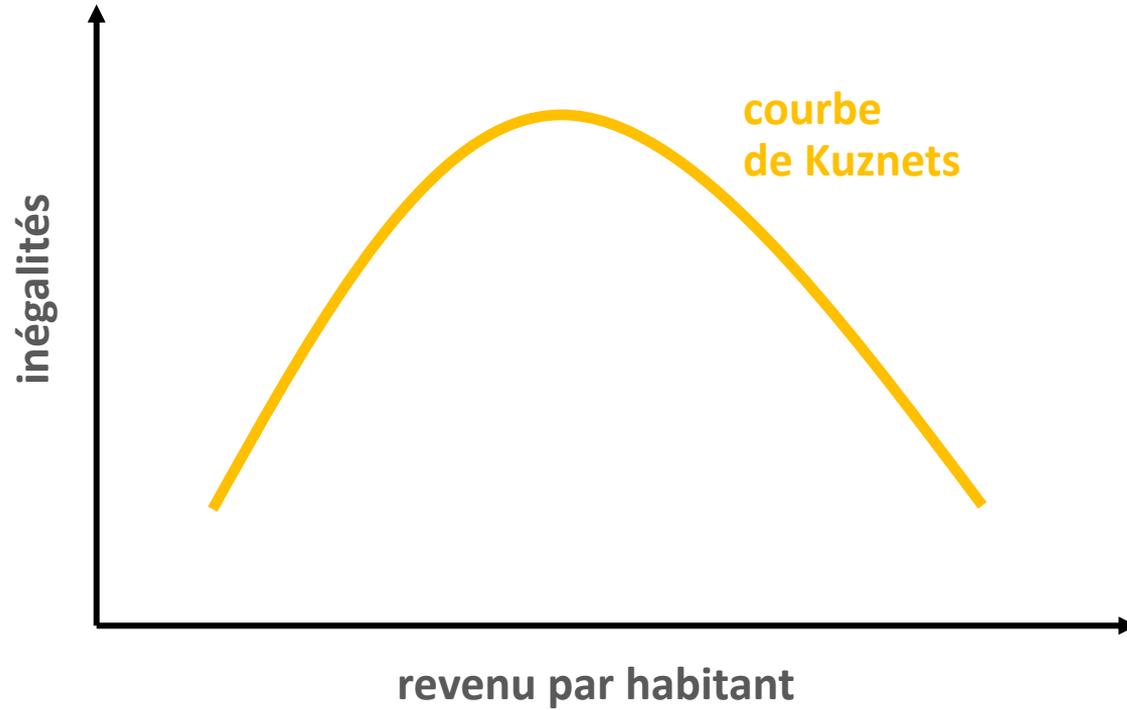
- ressources : Haldar et Sethi : Environmental effects of Information and Communication Technology - Exploring the roles of renewable energy, innovation, trade and financial development (2022)
- Avoma et al. : ICT and environmental quality in Sub-Saharan Africa: Effects and transmission channels (2020)
- 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 matters? (2018)
- Moyer et Hughe : ICTs: Do they contribute to increased carbon emissions? (2012)

Le découplage

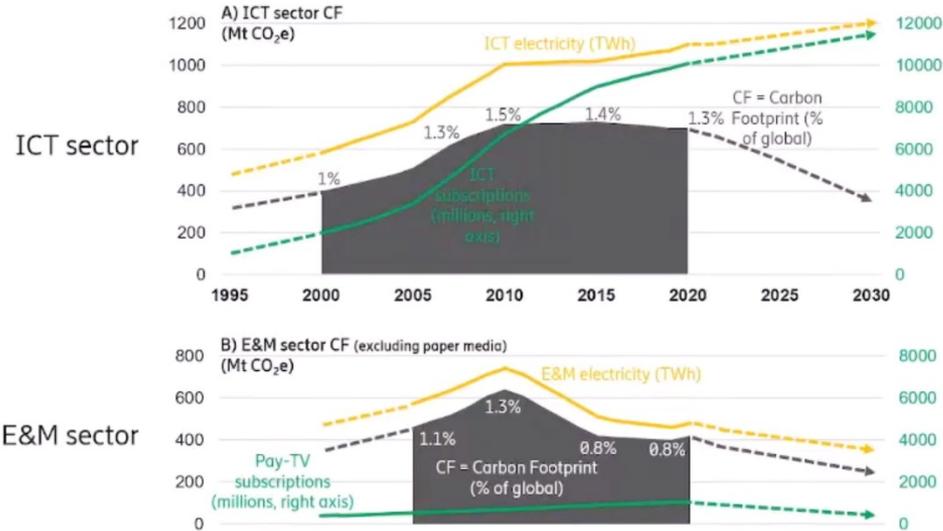
« Un peu de croissance polluée, beaucoup de croissance dépolluée. » — Laurence Parisot



Le découplage



Le découplage dans les TIC ?



source : Malmodin, SICT (2021)

TechRxiv™
Powered by IEEE

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

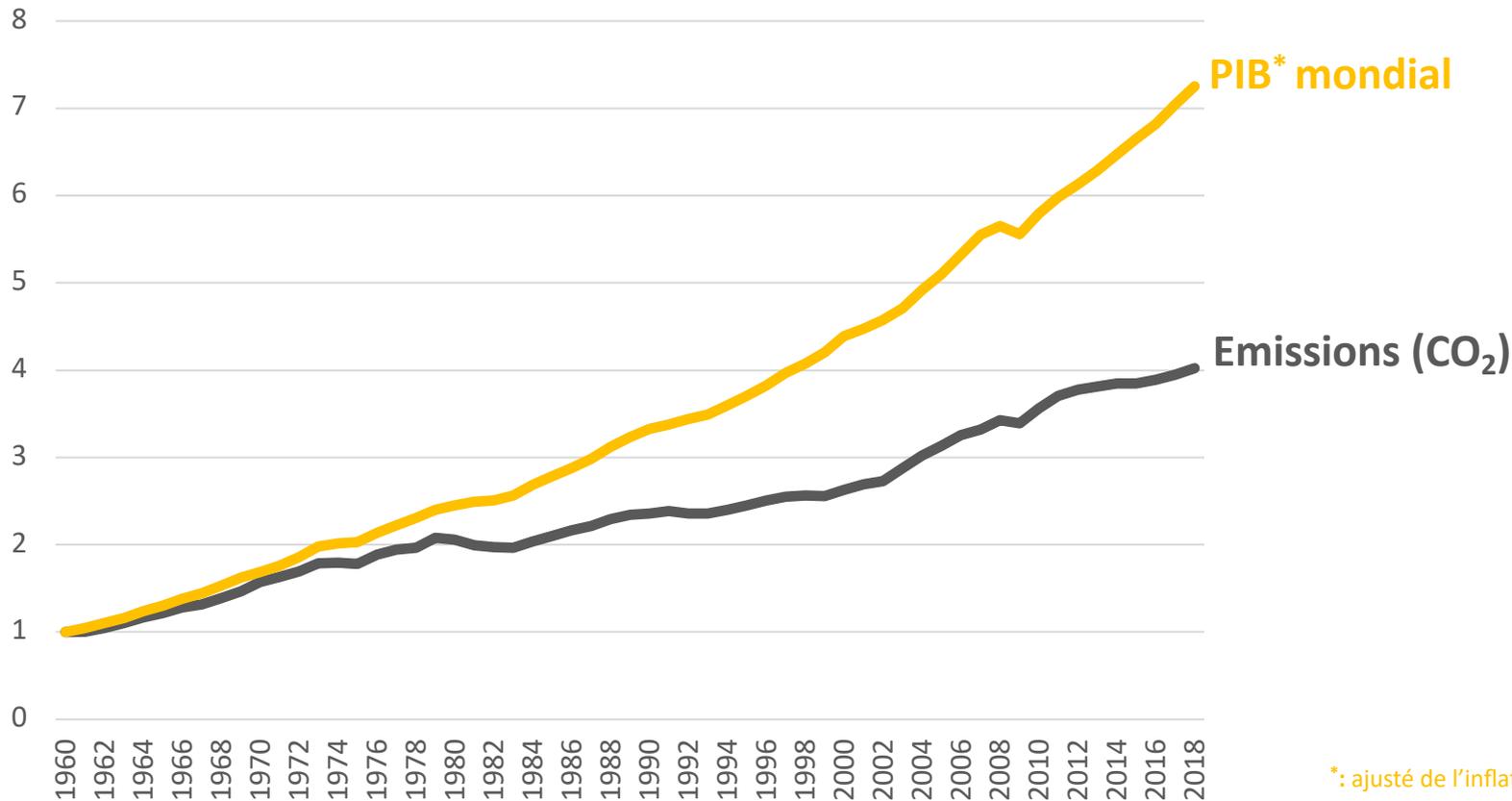
CITATION

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)

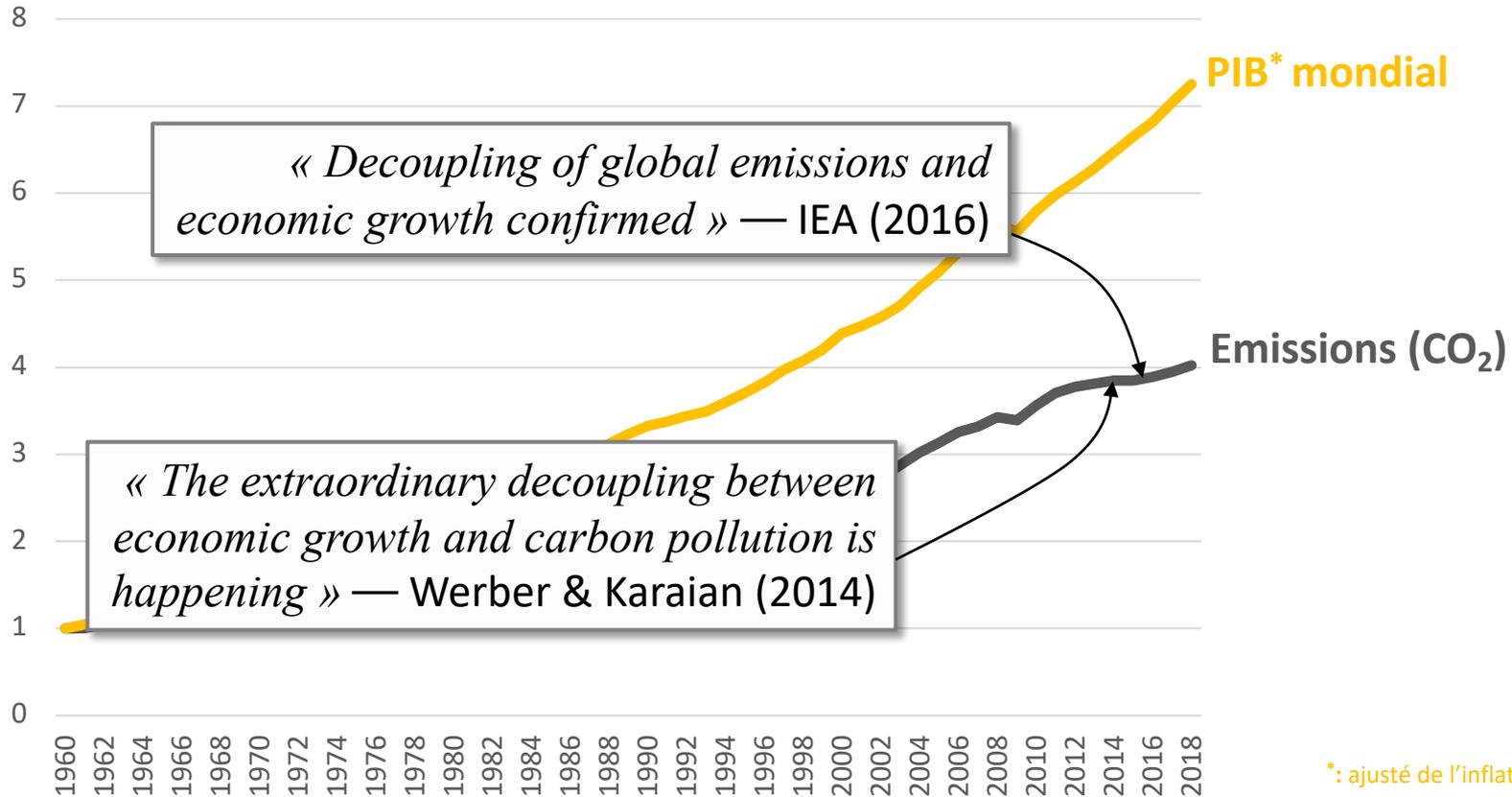
Le découplage PIB-émissions



*: ajusté de l'inflation

source des données : World Bank

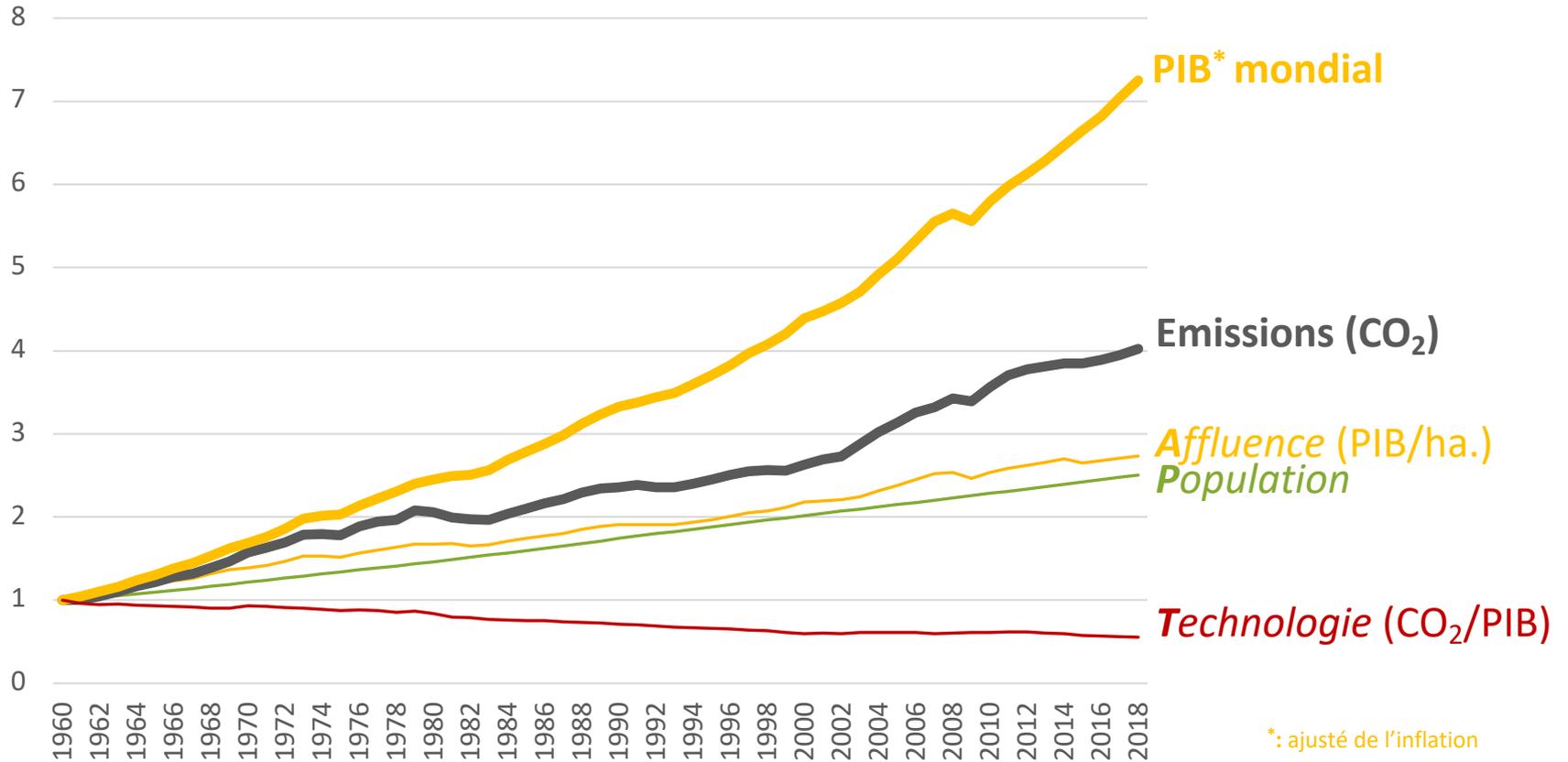
Le découplage PIB-émissions



*: ajusté de l'inflation

source des données : World Bank

Le découplage PIB-émissions

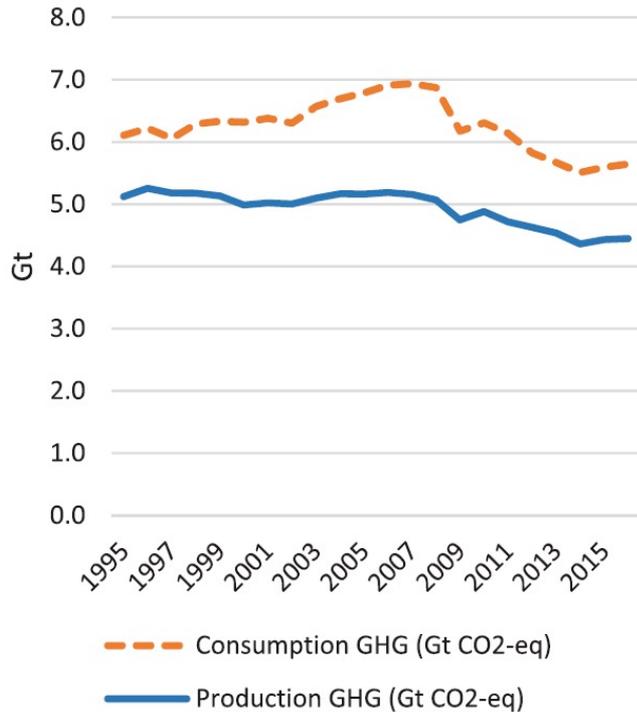


*: ajusté de l'inflation

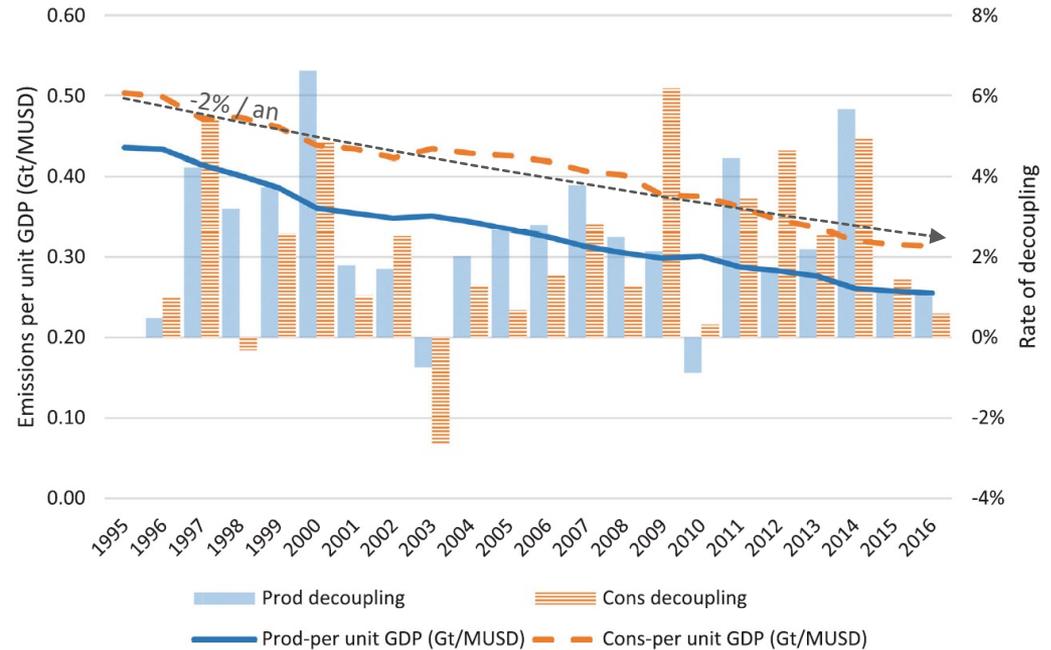
source des données : World Bank

Le découplage PIB-émissions *en Europe*

EU28 emissions

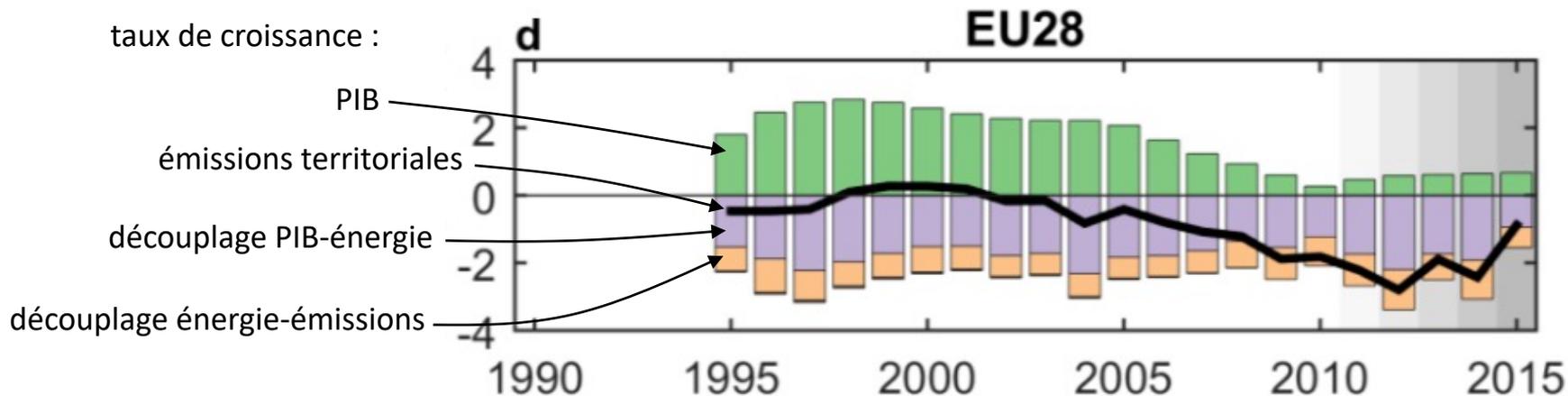


Carbon efficiency & Decoupling factors



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

Le découplage PIB-émissions *en Europe*



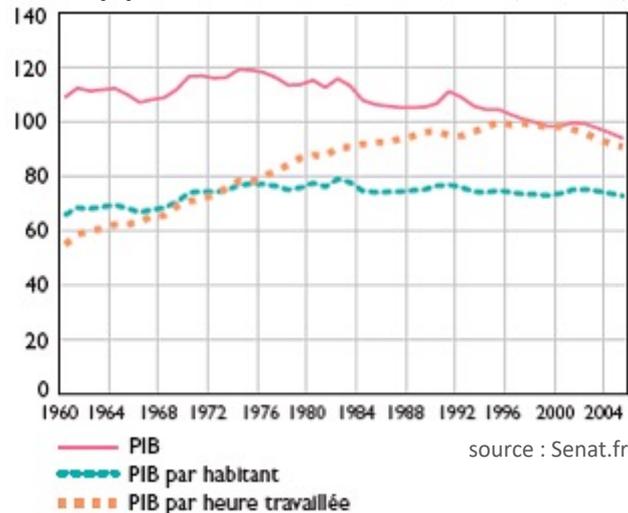
source : Peters et al: Key indicators
to track current progress and future
ambition of the Paris Agreement
(2017)

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)

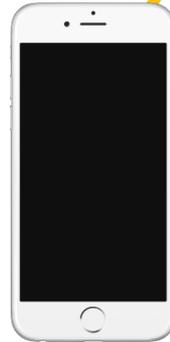


source : Longaretti et Berthoud : *Le numérique, espoir pour la transition écologique ?* (2021)

« 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)