

# TIC : effets environnementaux indirects, induits, rebond...

Jacques COMBAZ

[Jacques.Combaz@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:Jacques.Combaz@univ-grenoble-alpes.fr)

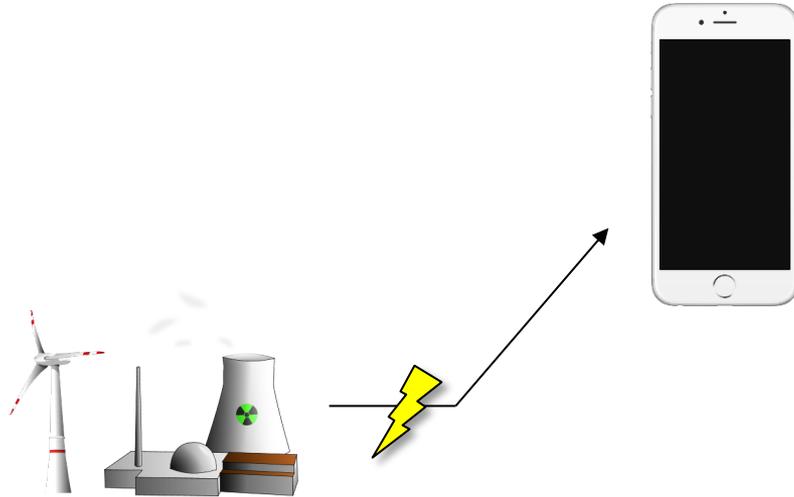
[ecoinfo.cnrs.fr](http://ecoinfo.cnrs.fr)



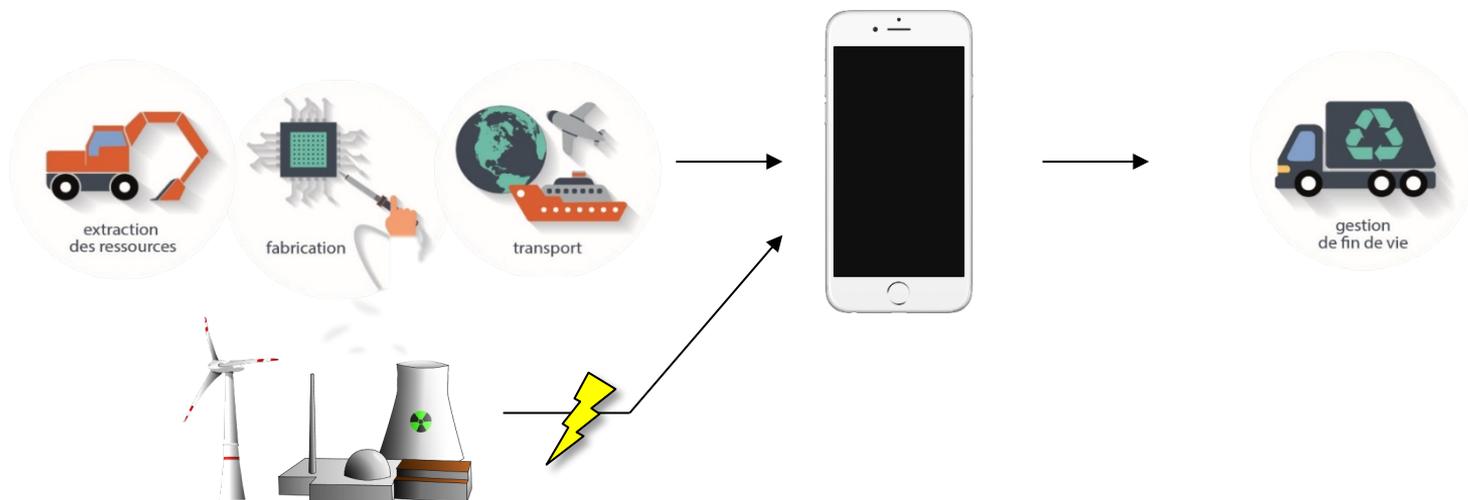
# Impacts environnementaux d'un smartphone



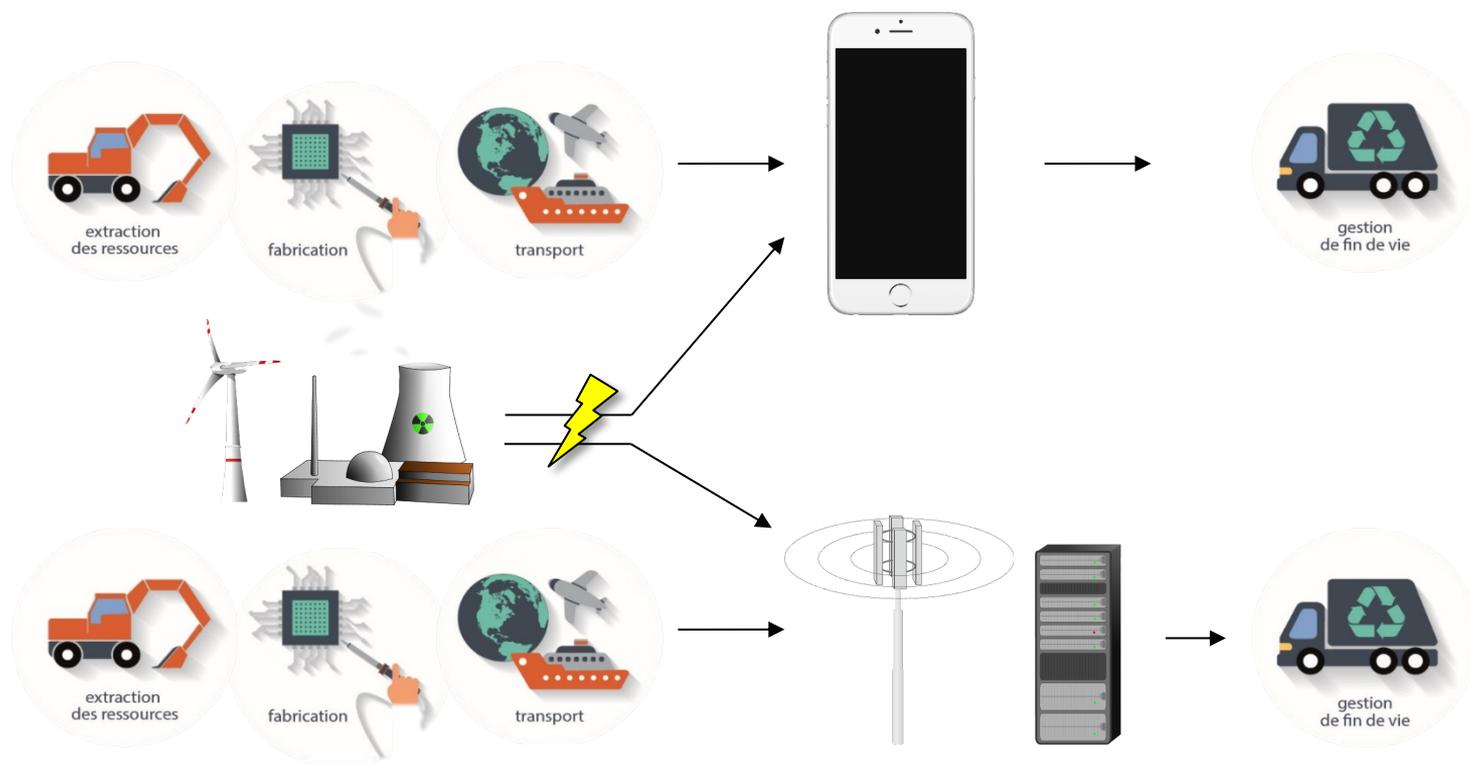
# Impacts environnementaux d'un smartphone



# Impacts environnementaux d'un smartphone



# Impacts environnementaux d'un smartphone



# Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		exemples pour le smartphone
1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		production (énergie, ressources), utilisation (énergie), fin de vie (pollution)
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		
		substitution		
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental</b> <b>structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		
		accélération		
	société	reconfiguration		

# Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		exemples pour le smartphone
1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		production (énergie, ressources), utilisation (énergie), fin de vie (pollution)
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		chemin le plus court avec le GPS
		substitution		
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		
		accélération		
	société	reconfiguration		

# Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		exemples pour le smartphone
1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		production (énergie, ressources), utilisation (énergie), fin de vie (pollution)
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		chemin le plus court avec le GPS
		substitution		dématérialisation, appareil photo, TV...
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental</b> <b>structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		
		accélération		
	société	reconfiguration		

# Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		exemples pour le smartphone
1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		production (énergie, ressources), utilisation (énergie), fin de vie (pollution)
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		chemin le plus court avec le GPS
		substitution		dématérialisation, appareil photo, TV...
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental</b> <b>structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	5G
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		
		accélération		
société	reconfiguration			

# Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		exemples pour le smartphone	
1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		production (énergie, ressources), utilisation (énergie), fin de vie (pollution)	
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		chemin le plus court avec le GPS	
		substitution		dématérialisation, appareil photo, TV...	
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	5G	oreillettes, casques RV...
		rebond direct	et indirect		
	économie	croissance économique			
		accélération			
société	reconfiguration				

# Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		exemples pour le smartphone	
1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		production (énergie, ressources), utilisation (énergie), fin de vie (pollution)	
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		chemin le plus court avec le GPS	
		substitution		dématérialisation, appareil photo, TV...	
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	5G	oreillettes, casques RV...
		rebond direct	et indirect	↗ appareils, usages, consommation	
	économie	croissance économique		nouveaux marchés	
		accélération		e-commerce (24/7), logistique	
société	reconfiguration		Uber		

# Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		outil d'analyse
1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		analyse de cycle de vie du matériel numérique
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		analyse de cycle de vie des services rendus par le numérique
		substitution		
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental</b> <b>structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	microéconomie
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		macroéconomie
		accélération		
société	reconfiguration		sociologie, histoire des techniques	

# Les effets des TIC : une classification possible

type	périmètre	effet		outil d'analyse
1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		analyse de cycle de vie du matériel numérique
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		analyse de cycle de vie des services rendus par le numérique
		substitution		
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental</b> <b>structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	microéconomie
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		macroéconomie
		accélération		
société	reconfiguration		sociologie, histoire des techniques	

# Les impacts environnementaux du télétravail



substitution



# Les impacts environnementaux du télétravail



- trajets →



- carburant



# Les impacts environnementaux du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité



- trajets →



- carburant



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

# Les impacts environnementaux du télétravail



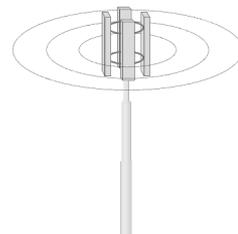
- espace (flexoffice) (?)
- électricité



- trajets



- carburant



*réseaux*

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



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

# Les impacts environnementaux du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité



- trajets →
- carburant
- usure



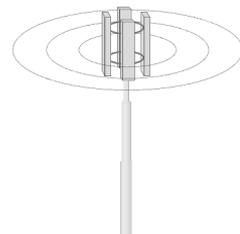
carburant



usure



- infrastructures (?)



réseaux

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



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



- production (?)
- infrastructures (?)

# Les impacts environnementaux du télétravail



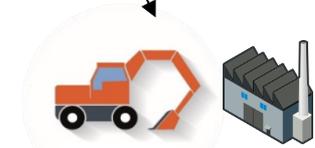
- espace (flexoffice) (?)
- électricité



- trajets → carburant

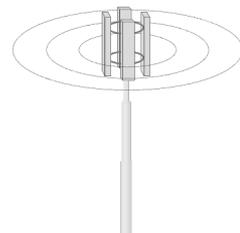


- usure



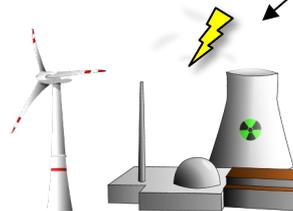
- machines, usines (?)

...



réseaux

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



- production (?)
- infrastructures (?)



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

# Les impacts environnementaux du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité



- trajets → carburant
- usure



carburant



usure

*frontière retenue*

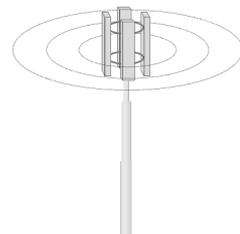


- infrastructures (?)



machines, usines (?)

*exclu  
(négligeable, hors de portée, ...)*



*réseaux*

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



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



*données  
génériques/agrégées*

- production (?)
- infrastructures (?)

# Les impacts environnementaux du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité



- trajets → carburant
- usure



carburant



usure

*frontière retenue*

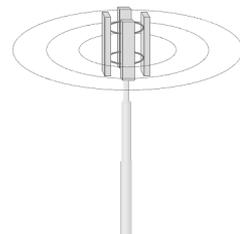


- infrastructures (?)



machines, usines (?)

*exclu  
(négligeable, hors de portée, ...)*



*réseaux*

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



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



*données  
génériques/agrégées*

- production (?)
- infrastructures (?)

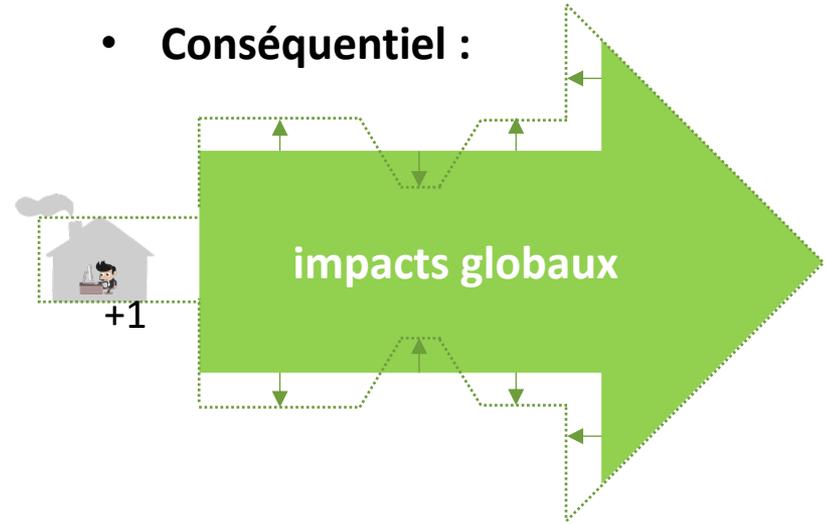
# Deux types de questions / calculs

- *Quels sont les impacts du télétravail ?*
  - attribuer une partie des impacts globaux : « participation » aux impacts globaux ?
  - pas toujours de lien physique : peut être affaire de convention
- *Quelles conséquences sur les impacts si le télétravail se développe ?*
  - lien cause-conséquence
  - temporalité (court terme, long terme ?)

## • Attributionnel :

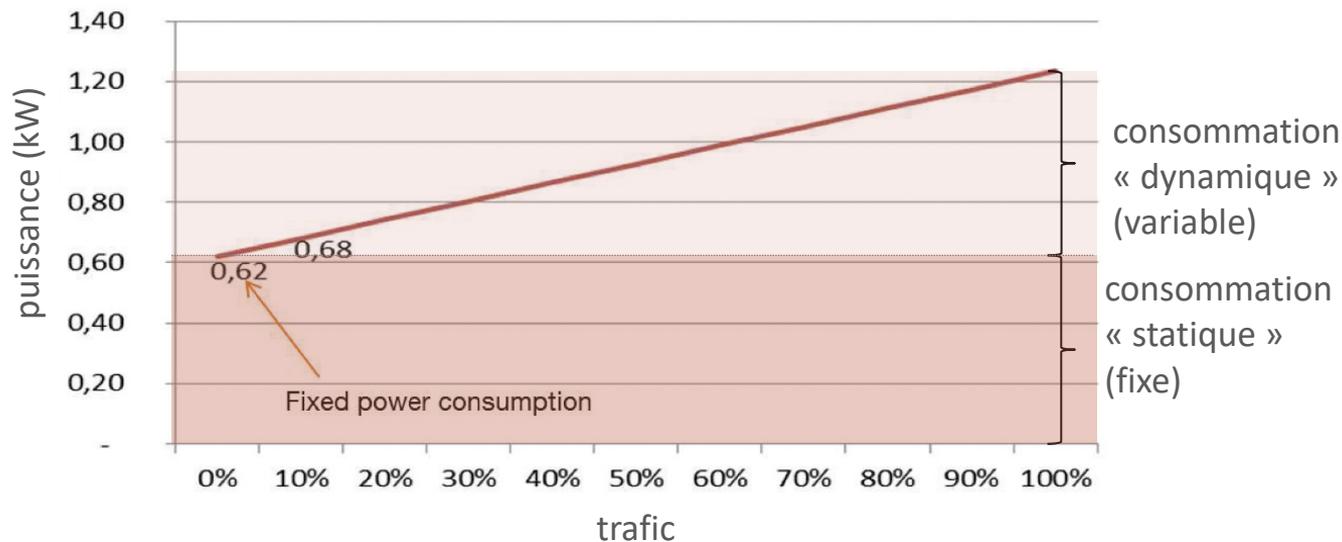
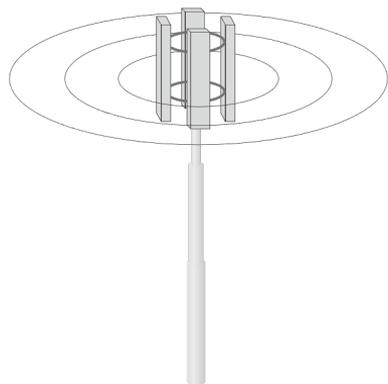


## • Conséquentiel :



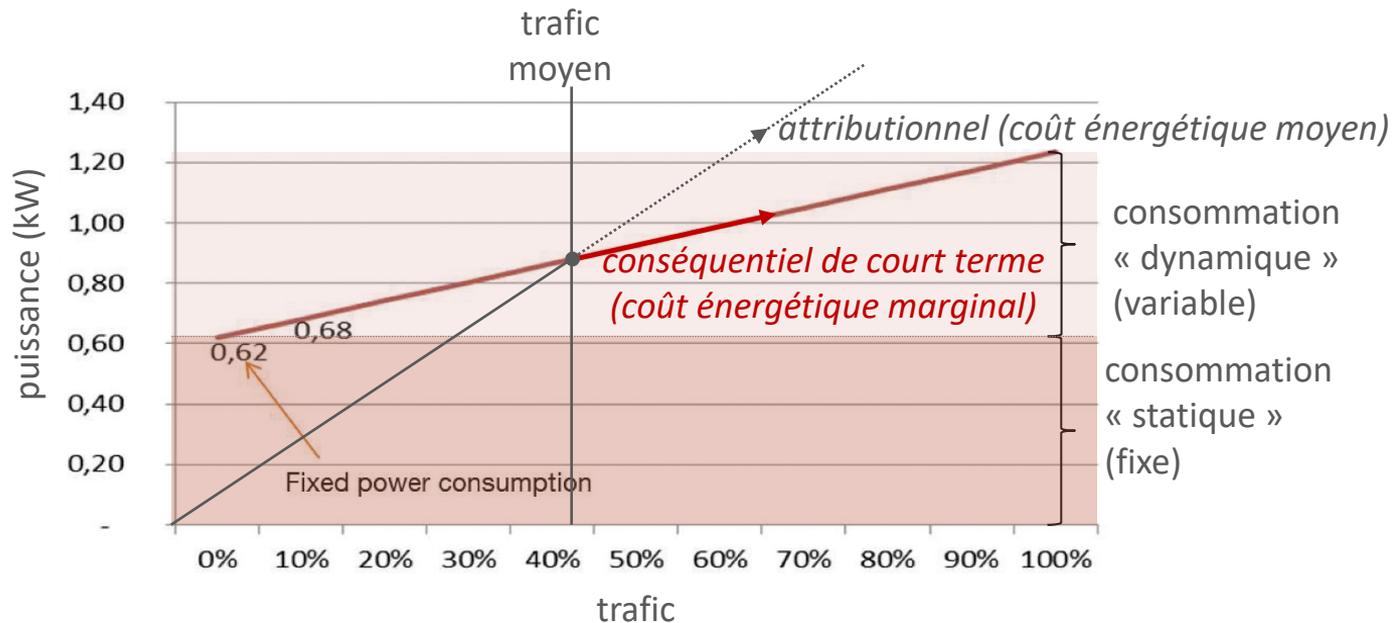
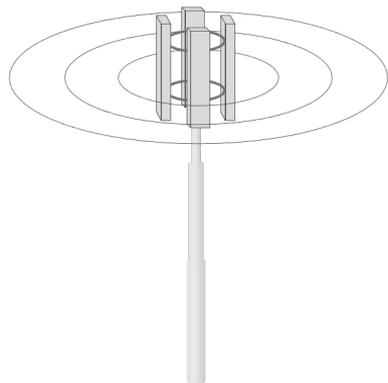
# Les coûts fixes dans les réseaux

## *consommation d'énergie d'une station 4G*



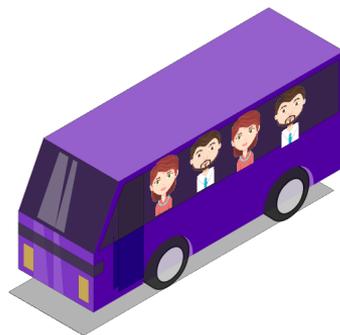
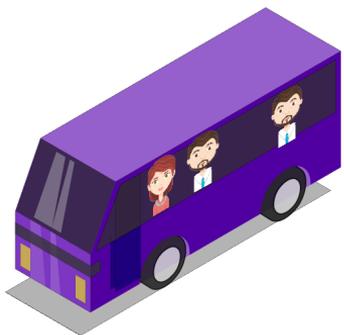
# Les coûts fixes dans les réseaux

## *consommation d'énergie d'une station 4G*



# Attributionnel vs conséquentiel

*exemple d'un bus*



attributionnel :

1540 g/km pour 10 personnes

154 g/km/pers.

(source : Carbone4, bus diesel)

conséquentiel : court terme

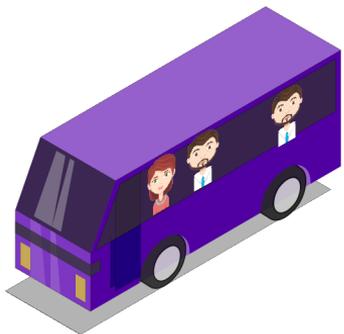


+1 : ~0 g/km



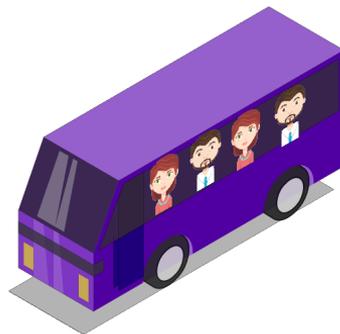
# Attributionnel vs conséquentiel

*exemple d'un bus*



attributionnel :  
1540 g/km pour 10 personnes  
154 g/km/pers.

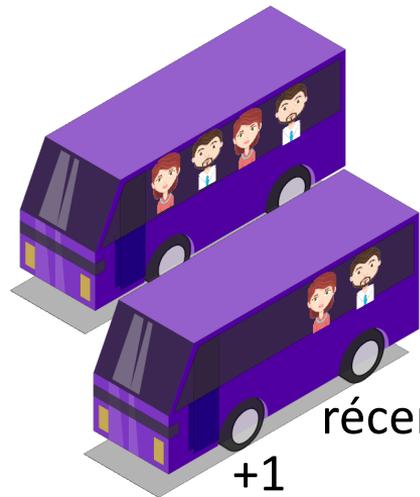
(source : Carbone4, bus diesel)



conséquentiel : court terme long terme



+1 : ~0 g/km

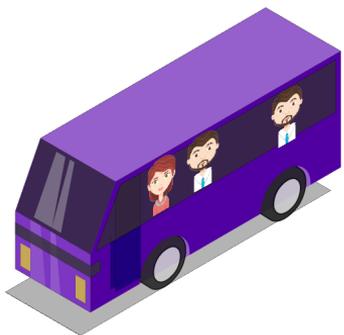


+1 : <+154 g/km



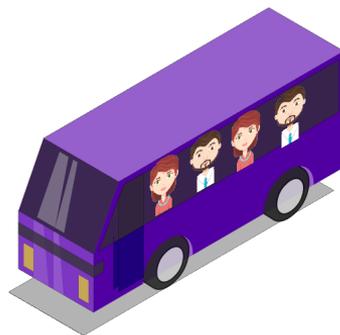
# Attributionnel vs conséquentiel

*exemple d'un bus*



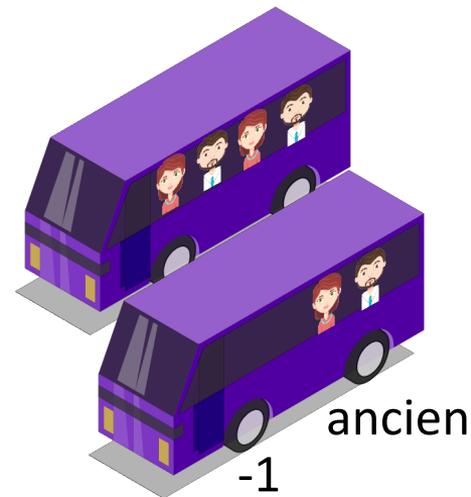
attributionnel :  
1540 g/km pour 10 personnes  
154 g/km/pers.

(source : Carbone4, bus diesel)



conséquentiel : court terme long terme

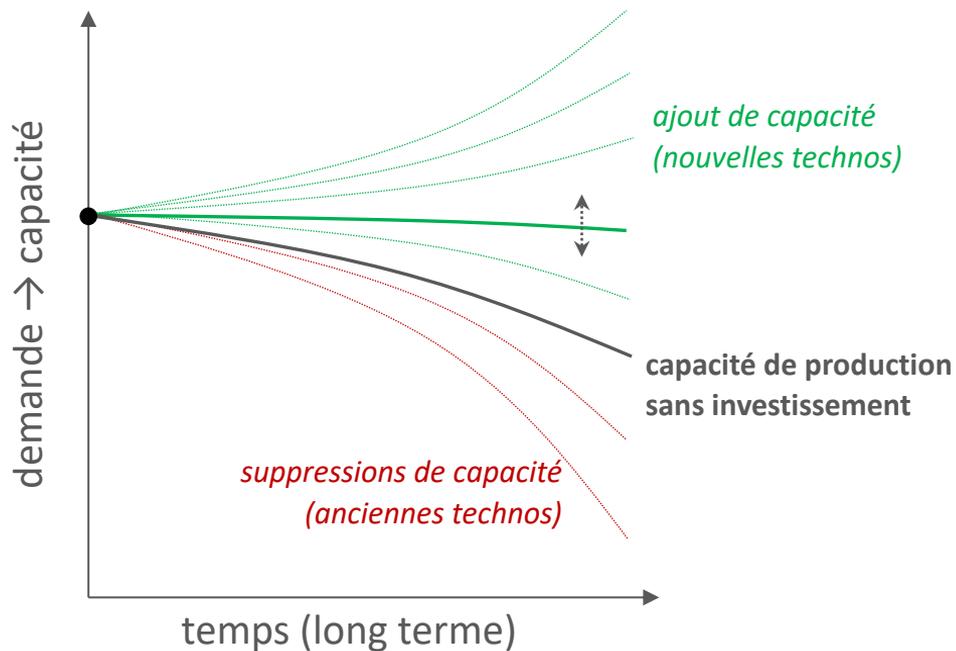
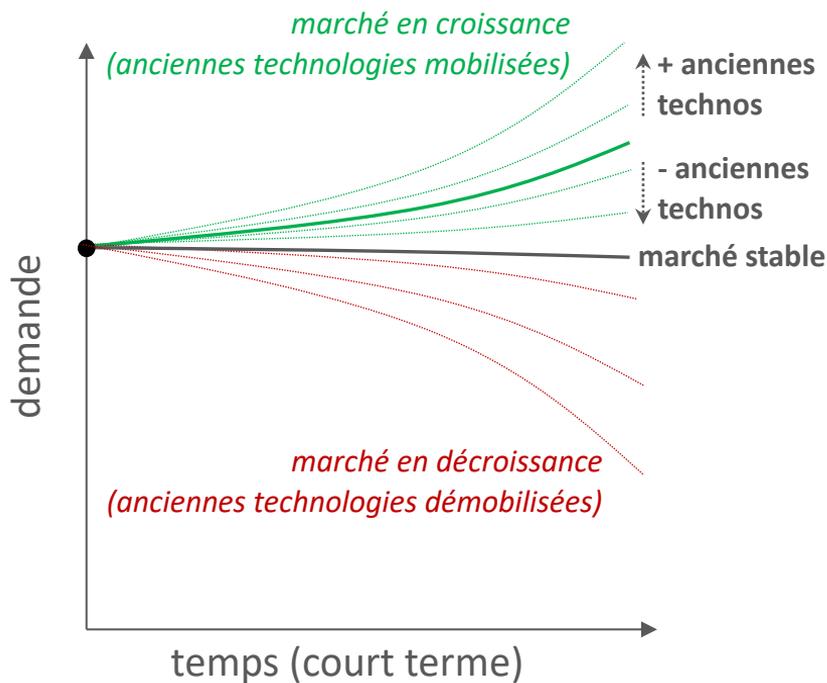
 -1 :  $\sim 0$  g/km



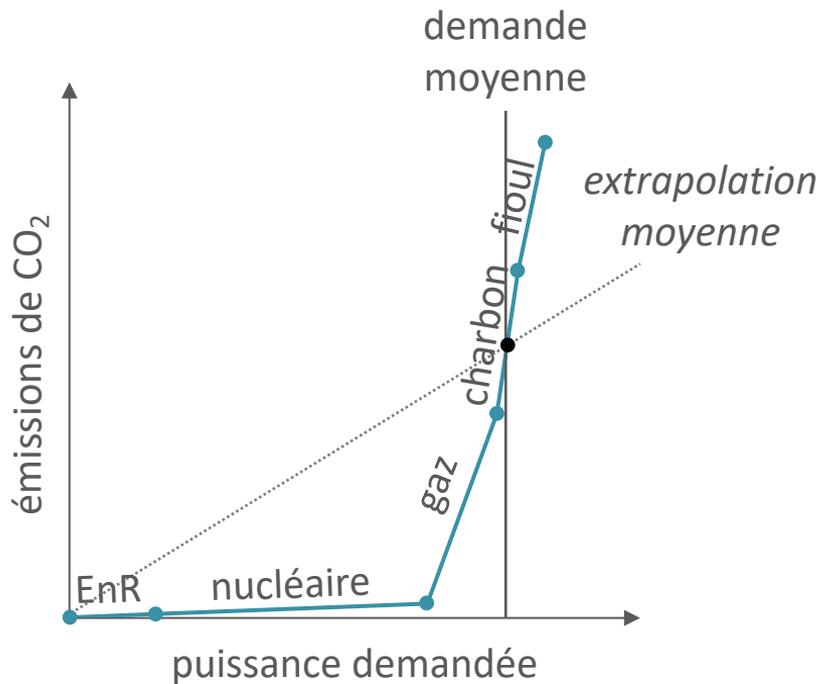
 -1 :  $< -154$  g/km



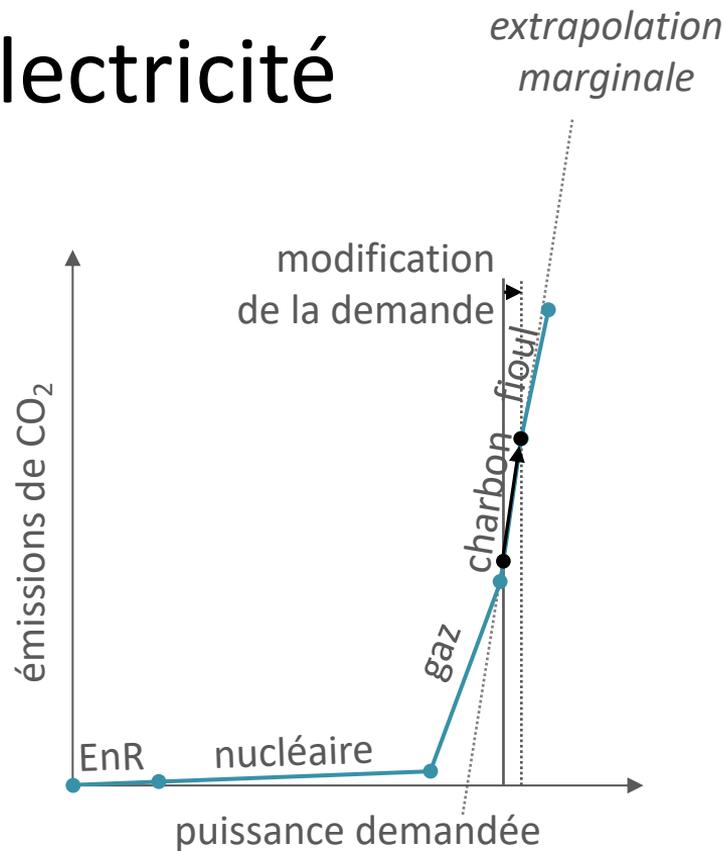
# Analyse conséquentielle : court et long terme



# L'exemple de l'électricité



**attributionnel**



**conséquentiel (court terme)**

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

# L'exemple de l'électricité

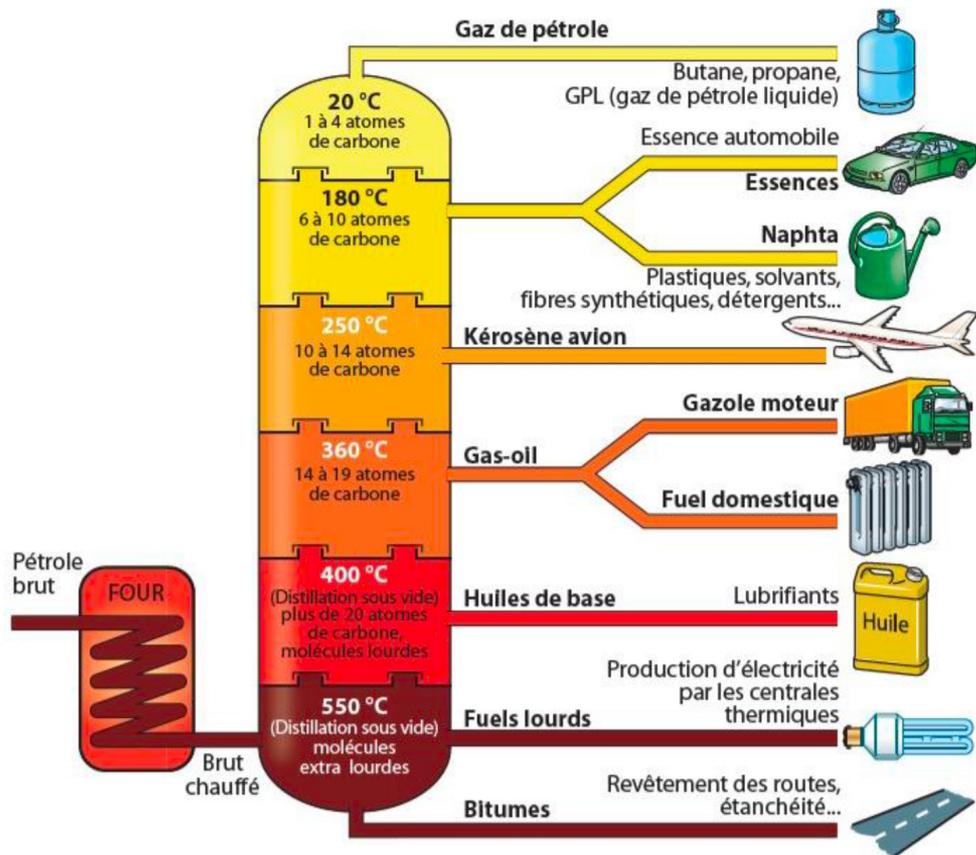
Facteurs d'émission en g éq. CO<sub>2</sub> / kWh

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 (\*\*\*\*)

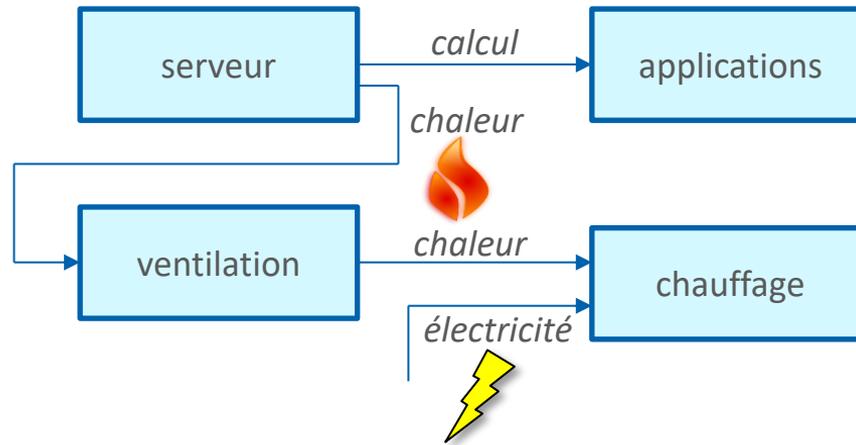
RT2012 (saisonnalisée)	RE2020 (moyen/usage, mensualisé)
180	79 (saisonnalisé, E+C- : 210)

# Attribution et multifonctionnalité



# Cas de la réutilisation de la chaleur

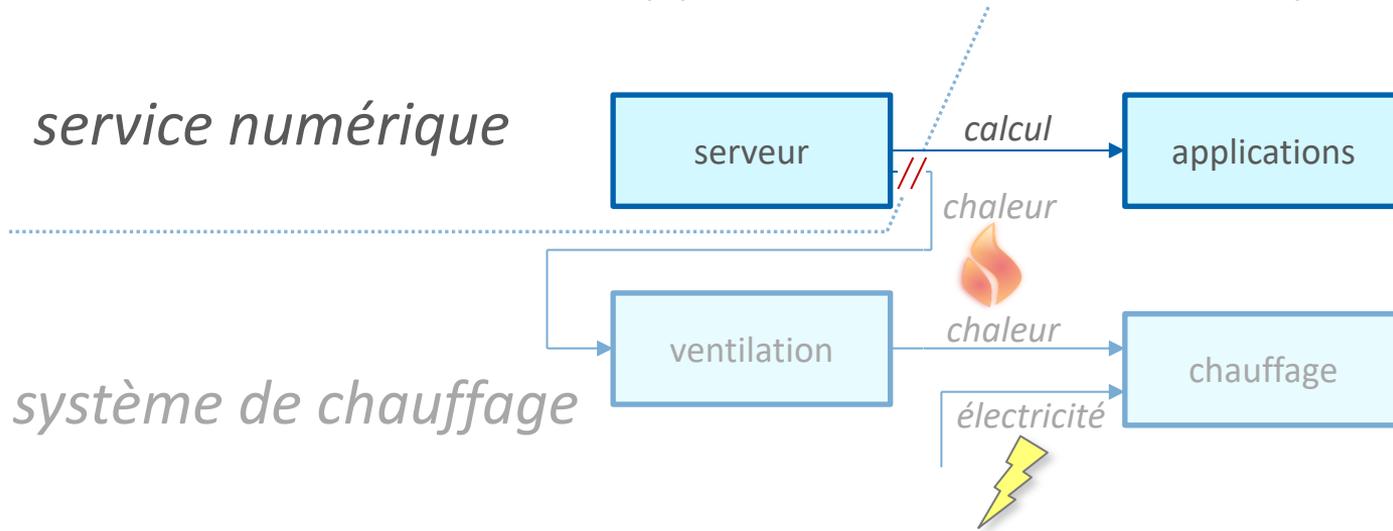
*Comment calculer les impacts d'un service numérique ?*



- Le système a globalement moins d'impacts qu'un système séparé
- À qui attribuer ces bénéfices ?

# Cas de la réutilisation de la chaleur

*approche attributionnelle par cut-off*

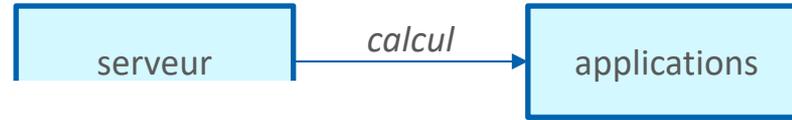


- Le chauffage aide à évacuer la chaleur du serveur (chaleur = déchet)
  - impacts du serveur intégralement alloués au service numérique
  - système de ventilation intégralement alloué au système de chauffage

# Cas de la réutilisation de la chaleur

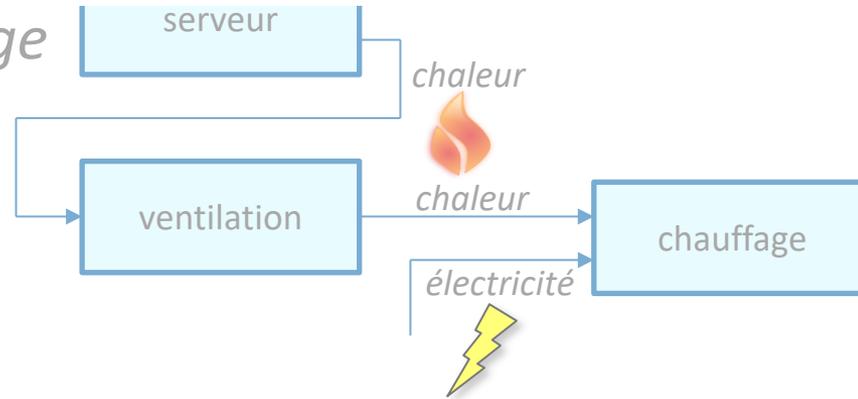
*approche attributionnelle par allocation*

*service numérique*



*critère d'allocation ?*

*système de chauffage*

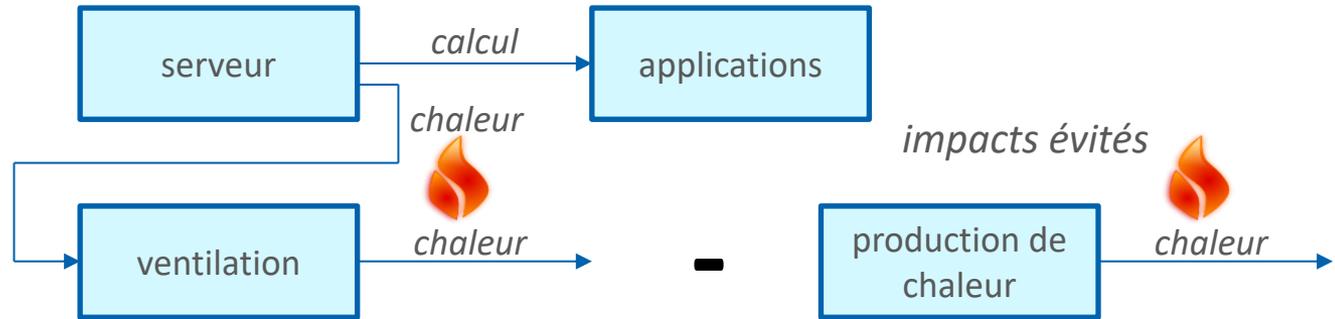


- La chaleur est un déchet mais il est valorisé dans le sys. de chauffage  
→ impacts du serveur répartis entre services num. et sys. de chauffage

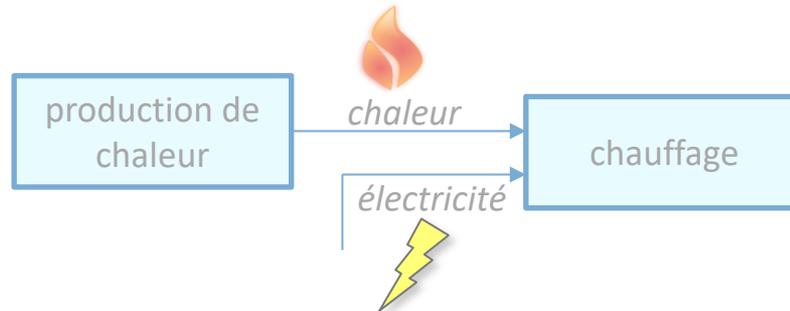
# Cas de la réutilisation de la chaleur

*approche par extension des frontières*

*service numérique*



*système de chauffage*



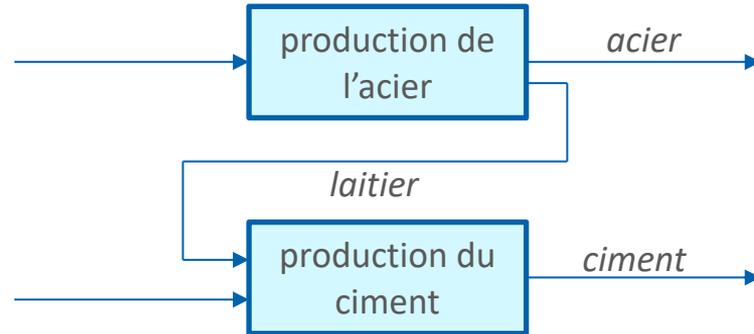
# Quand le ciment et l'acier verdissent par un artifice de comptage du CO2

Des émissions de CO<sub>2</sub> ne sont pas comptées, sidérurgistes et cimentiers se les imputant mutuellement. Cela verdit le ciment fait avec des scories de haut-fourneau et améliore le bilan carbone de l'acier.

[Lire plus tard](#)[Immobilier - BTP](#)[Partager](#)[Commenter](#)

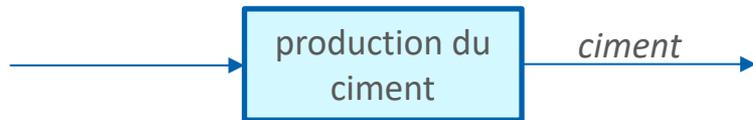
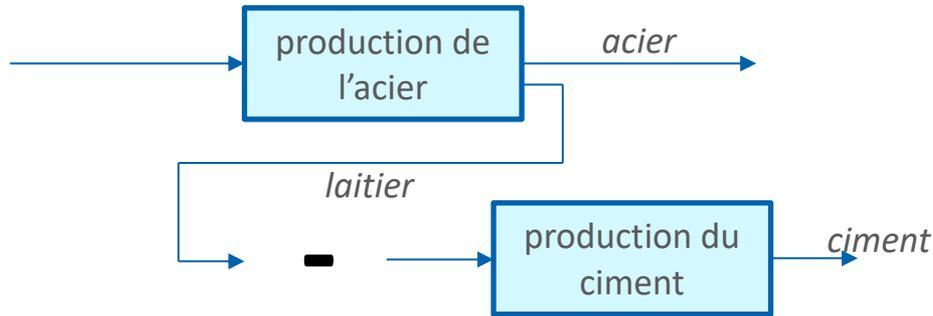
# La multifonctionnalité : le ciment et l'acier

*Comment attribuer les bénéfices du laitier ?*

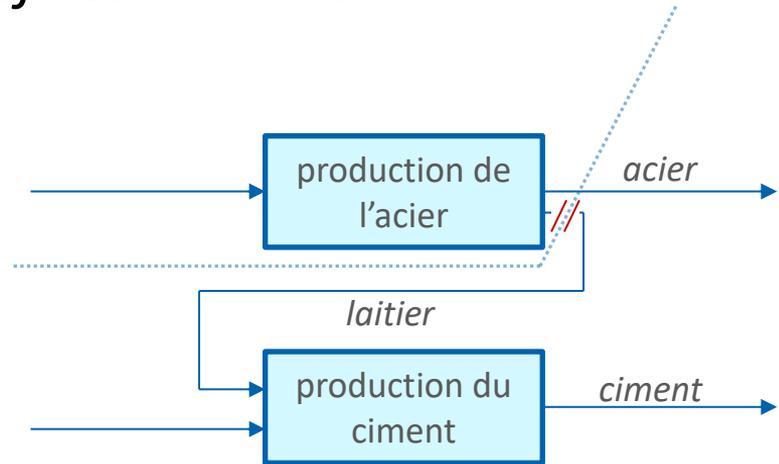


# La multifonctionnalité : le ciment et l'acier

*Comment attribuer les bénéfices du laitier ?*



- Selon les sidérurgistes  
(valorisation → émissions évitées)



- Selon les cimentiers  
(déchet → cut-off)

# Plan

1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		analyse de cycle de vie du matériel numérique
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		analyse de cycle de vie des services rendus par le numérique
		substitution		
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	microéconomie
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		macroéconomie
		accélération		
société	reconfiguration		sociologie, histoire des techniques	

# Les effets directs et indirects du télétravail



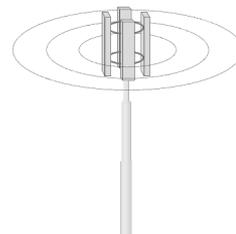
- espace (flexoffice) (?)
- électricité



- trajets



- carburant



*réseaux*

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



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

# Les effets directs et indirects du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité

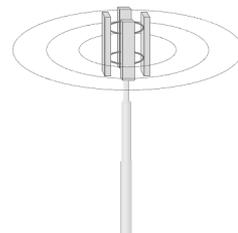
- congestion routière



- trajets



- carburant



*réseaux*

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



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



- + trajets (courses, WE, ...)

# Les effets directs et indirects du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité

trafic induit

↑ *effet rebond direct*

- congestion routière



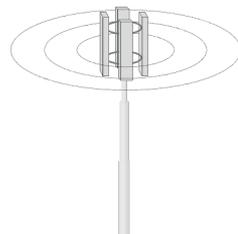
- trajets



- carburant



- + temps



*réseaux*

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



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



*effet rebond direct*

*effet rebond indirect*

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

# Les effets directs et indirects du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité

trafic induit

↑ *effet rebond direct*

- congestion routière



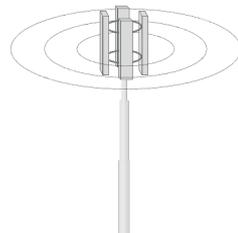
- trajets



- carburant



- + temps



*réseaux*

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



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



*effet rebond direct*

*effet rebond indirect*

*reconfiguration*

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



# Les effets directs et indirects du télétravail



- espace (flexoffice) (?)
- électricité

trafic induit

↑ *effet rebond direct*

- congestion routière

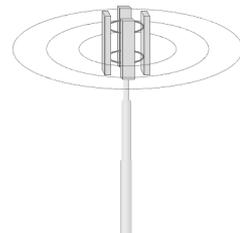


- trajets →
- carburant



- + 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, ...

# Plan

1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		analyse de cycle de vie du matériel numérique
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		analyse de cycle de vie des services rendus par le numérique
		substitution		
3 <sup>ème</sup> ordre <b>comportemental structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	<b>microéconomie</b>
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		macroéconomie
		accélération		
société	reconfiguration		sociologie, histoire des techniques	

# Qu'est-ce que l'effet rebond ?

## *Le paradoxe de Jevons*

efficacité de la machine à vapeur (kg / kWh)

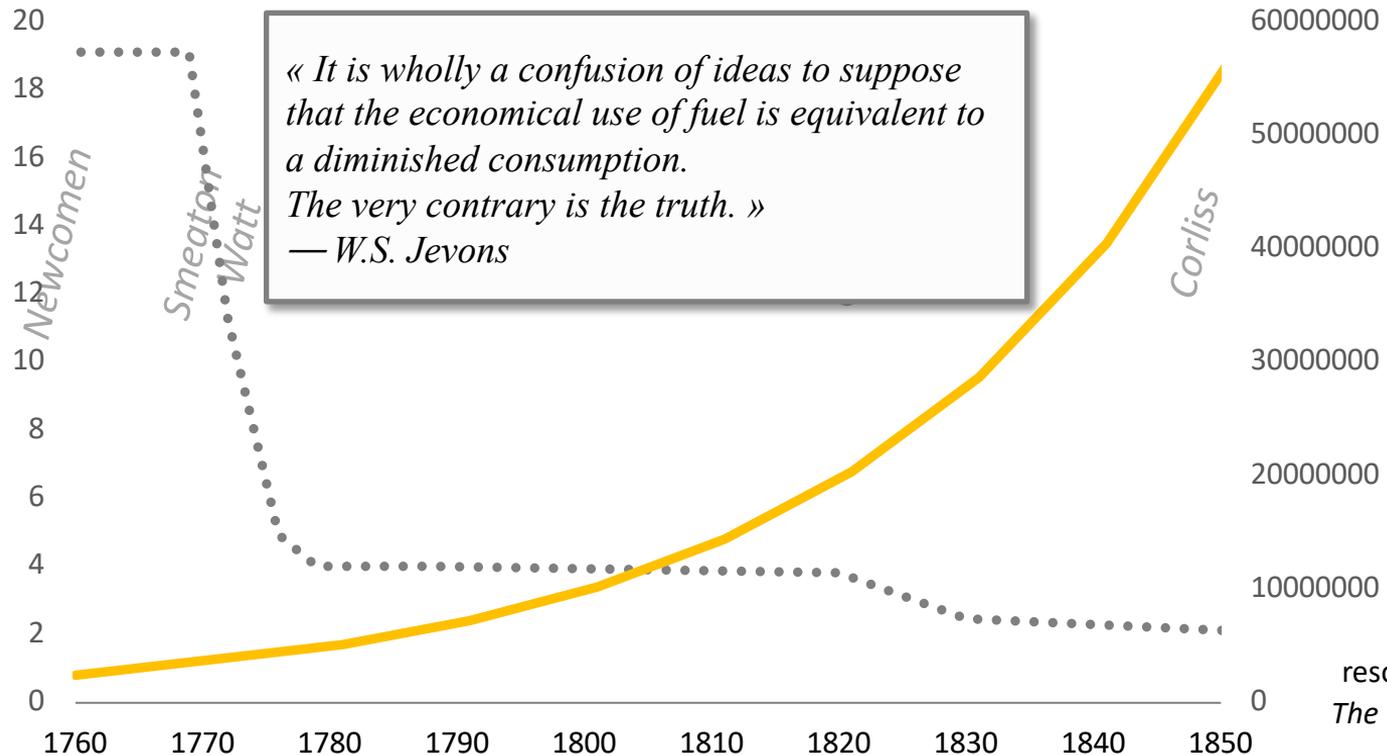


resource: Jevons,  
*The Coal Question*  
(1865)

# Qu'est-ce que l'effet rebond ?

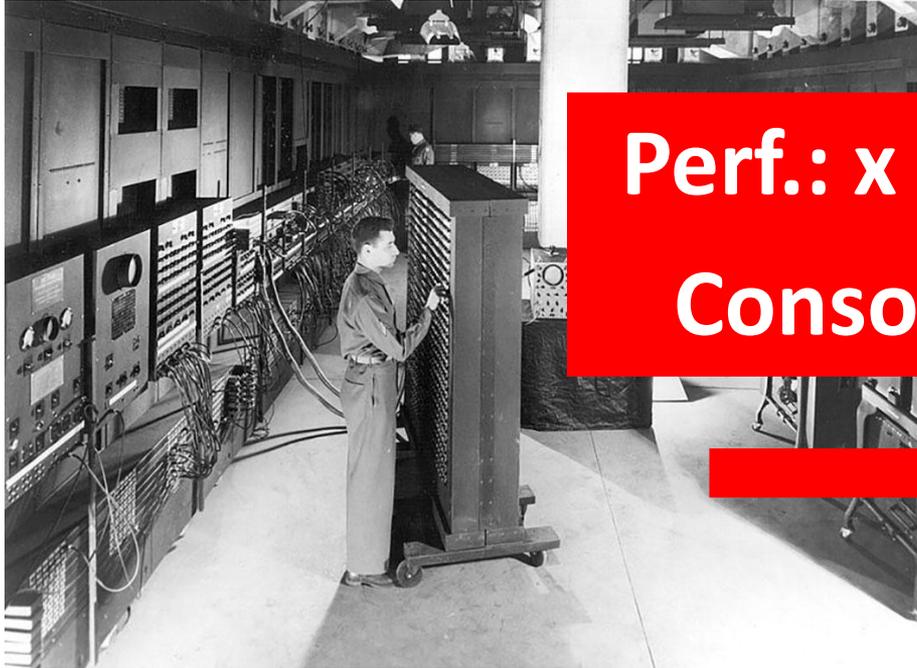
## Le paradoxe de Jevons

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



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

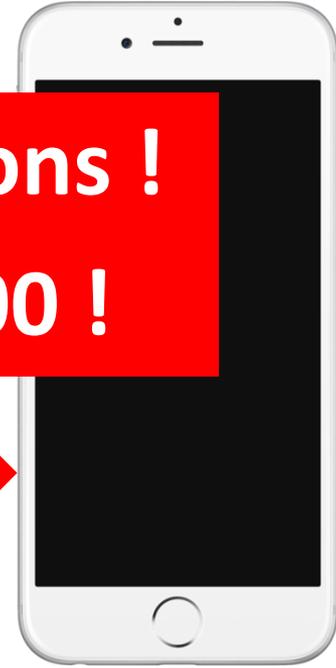
# ENIAC (1945)



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

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

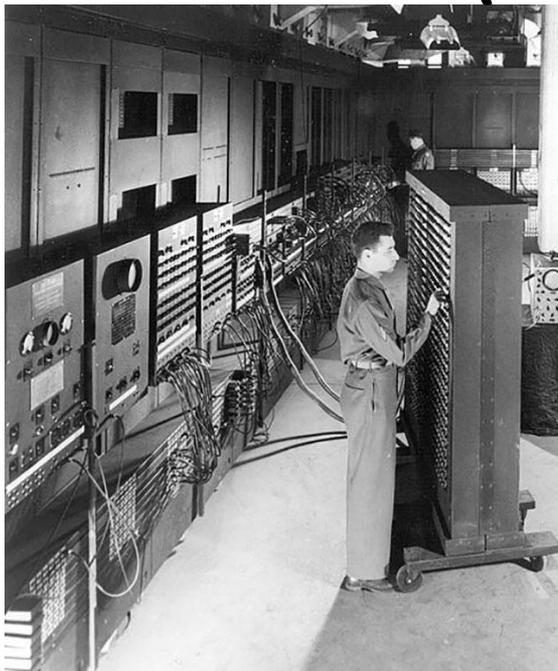
# iPhone 6 (2014)



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

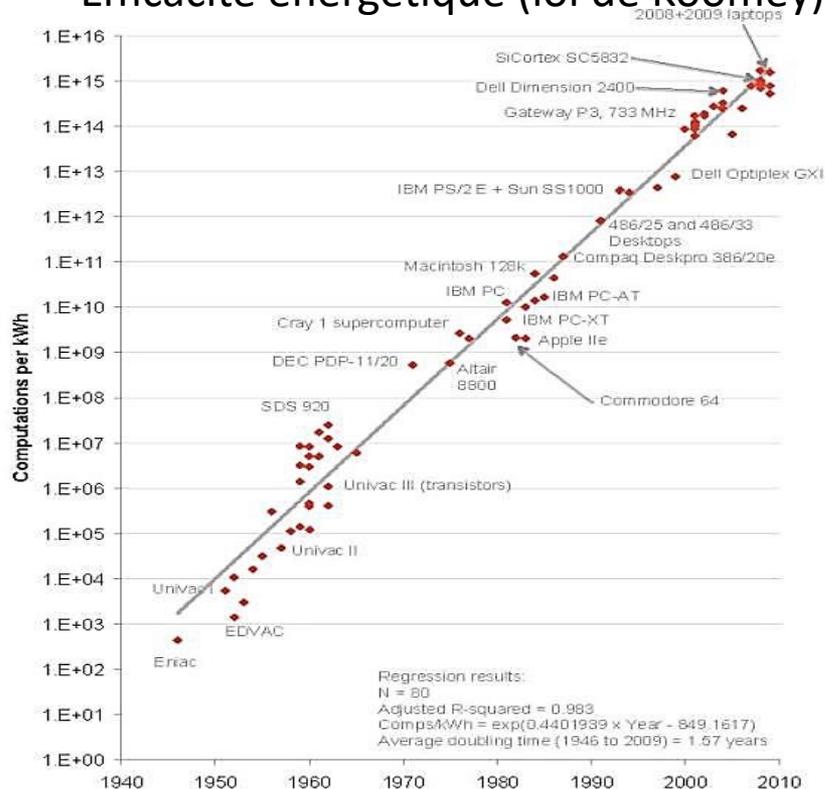
# ENIAC (1945)

# iPhone 6 (2014)



- Poids : 30 t
- Dim. : 30,5 m × 23,5 m × 2,2 m
- Conso. : 150 kW
- Perf. : ~500 FLOPS

## Efficacité énergétique (loi de Koomey)



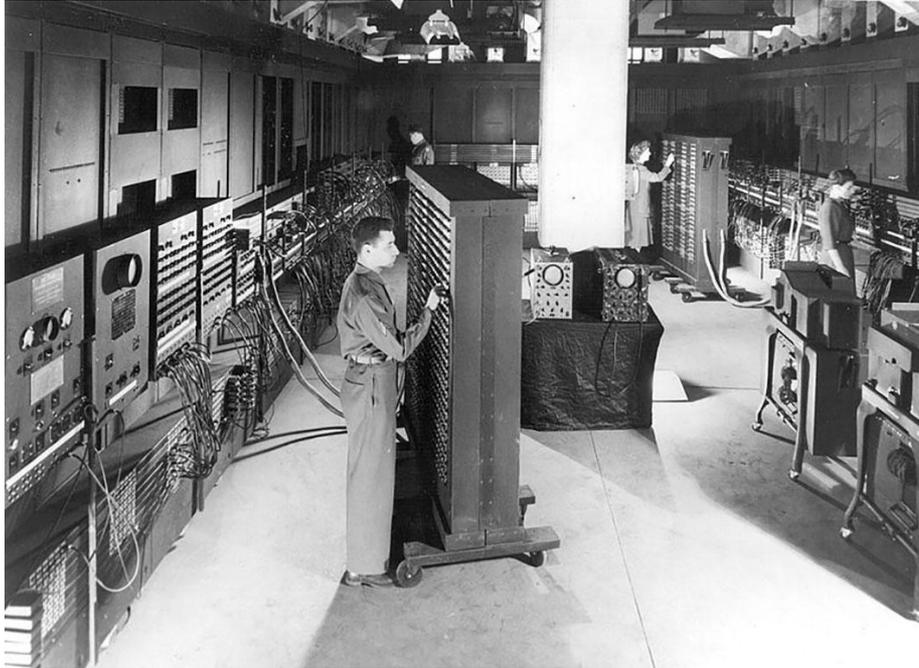
source : Wikipedia, loi de Koomey



140 mm × 7,1 mm

- Perf. : ~130 GFLOPS

# ENIAC

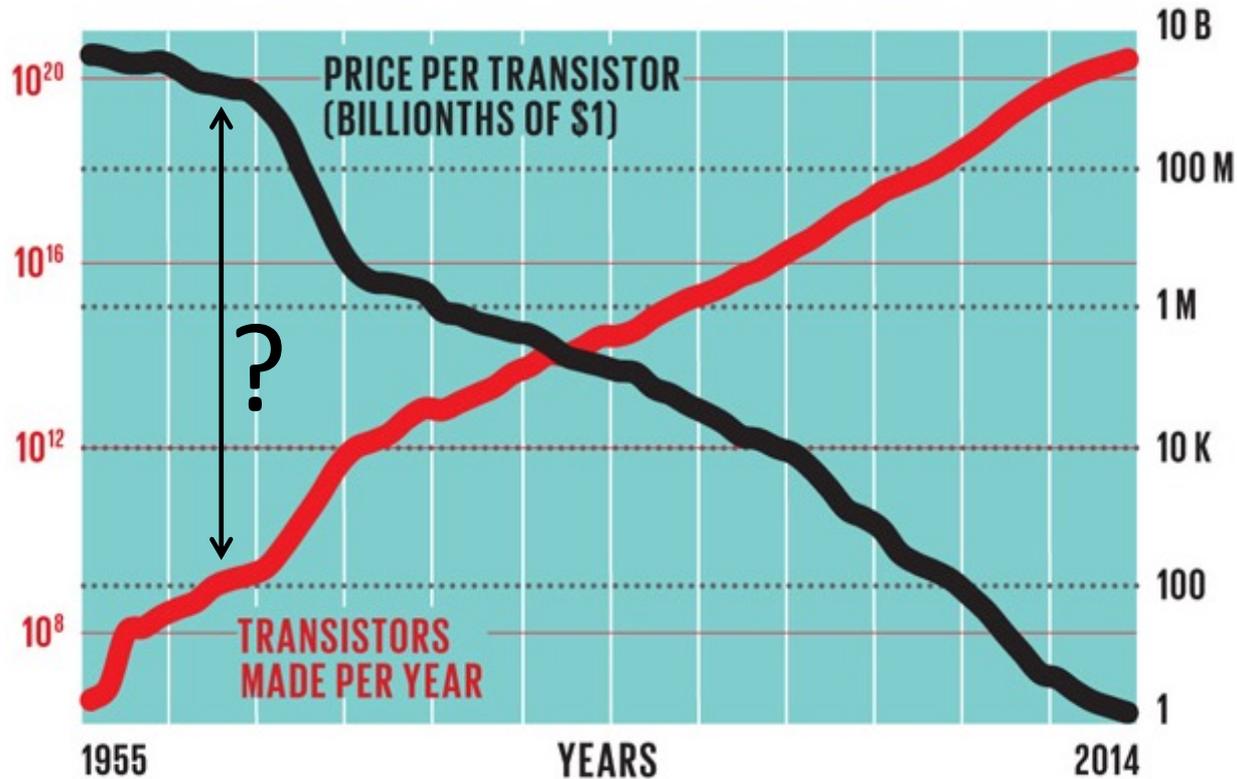


**150 kW**  
(en fonctionnement)



**260 GW**  
(en continu)

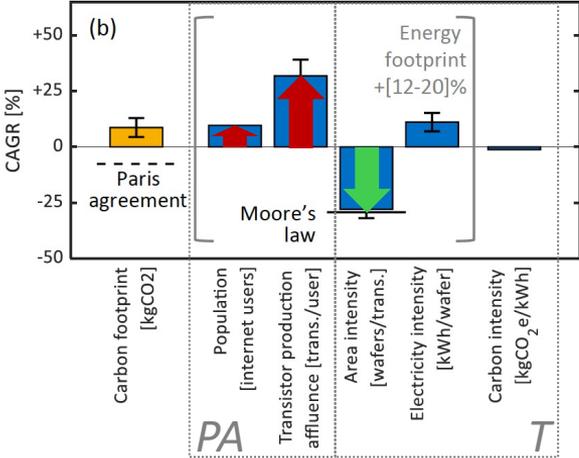
# Effet rebond de la loi de Moore ?



Data Source: VLSI Research

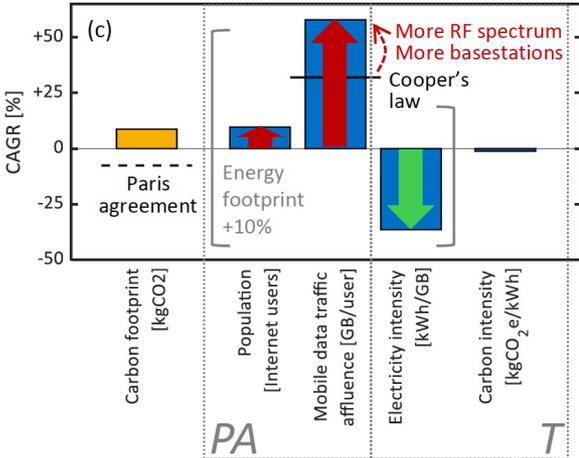
# Émissions de CO<sub>2</sub> des TIC : efficacité vs affluance

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



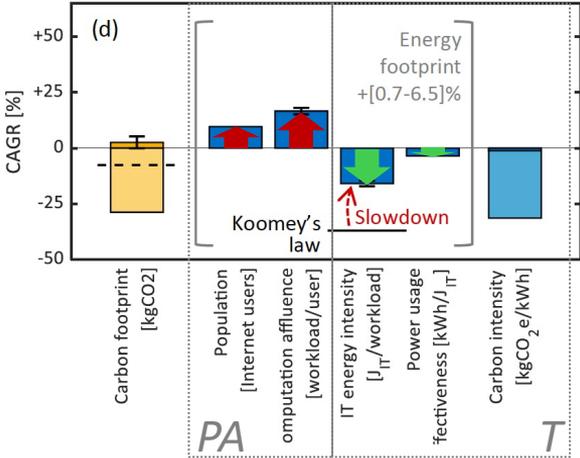
Loi de Moore's  
émissions de CO<sub>2</sub> dues  
à la fabrication des puces  
(2004-2019)

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



Loi de Cooper's  
émissions de CO<sub>2</sub> dues  
à l'Internet mobile  
(2010-2015)

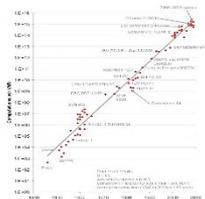
$$O_2e = Users \times \frac{Workload}{User} \times \frac{J_{IT}}{Workload} \times \frac{kWh}{J_{IT}} \times \frac{CO_2e}{kWh}$$



Loi de Koomey's  
émissions de CO<sub>2</sub>  
des centres de calcul  
(2010-2018)

# Différents types d'effets rebond

- Effets rebond :



Loï de Koomey



**direct**

plus de la même chose



*plus de calcul / personne*



**indirect**

plus d'autre chose



*plus de voyages en avion*

- Causé par :



**efficacité**

même utilité

*moins d'énergie / calcul*

ou



**sobriété / suffisance**

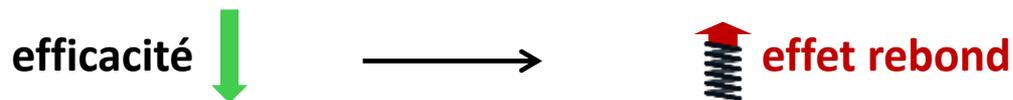
utilité réduite

*limitation du calcul / personne*



# Estimer l'effet rebond

- En principe on cherche une **causalité** :



- C'est à comparer :

scénario **sans**  
gain en efficacité

scénario **avec**  
gain en efficacité

- Mais parfois on se contente de simples corrélations
- Outils : enquêtes, essais randomisés contrôlés, statistiques, modèles, ...

# Effet rebond du consommateur ou du programmeur ?

- Par **transistor** :  
(vue de l'ingénieur,  
du business)

↓ **Loi de Moore**  
**-30 % / year**  
prix, taille...

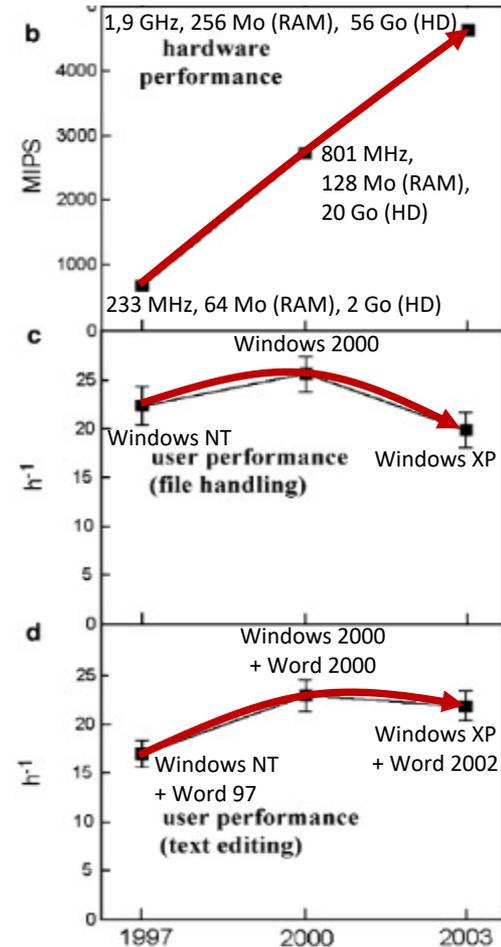
↑ **+50%**  
volume de  
vente

- Par **“unité typique”**  
(microprocesseur) :  
(vue utilisateur)

Où est la  
**loi de Moore ?**

↑ **?**  
volume de  
vente

source: Hilty et al., *Rebound effects of progress in information technology* (2006)



# Effet rebond du consommateur ou des constructeurs automobiles ?

resource: Galvin, *Rebound effects from speed and acceleration in electric and internal combustion engine cars: An empirical and conceptual investigation* (2016)

Applied Energy 172 (2016) 207-216

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Energy

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/apenergy](http://www.elsevier.com/locate/apenergy)

Rebound effects from speed and acceleration in electric and internal combustion engine cars: An empirical and conceptual investigation

Ray Galvin

School of Business and Economics/EON Energy Research Center, Institute for Future Consumer Energy Needs and Behavior, RWTH Aachen University, Mathieustr. 10, Aachen 52074, Germany

## HIGHLIGHTS

- Vehicle rebound effects have been investigated for distance but not speed.
- We investigate speed rebounds for an e- and an ICE-car in controlled lab tests.
- We develop a mathematical model to include these with distance rebound effects.
- The e-car shows 20% speed rebound comparing 1975 and modern driving styles.
- The ICE-car shows speed rebound due to lock-in from auto gear ratios.

## ARTICLE INFO

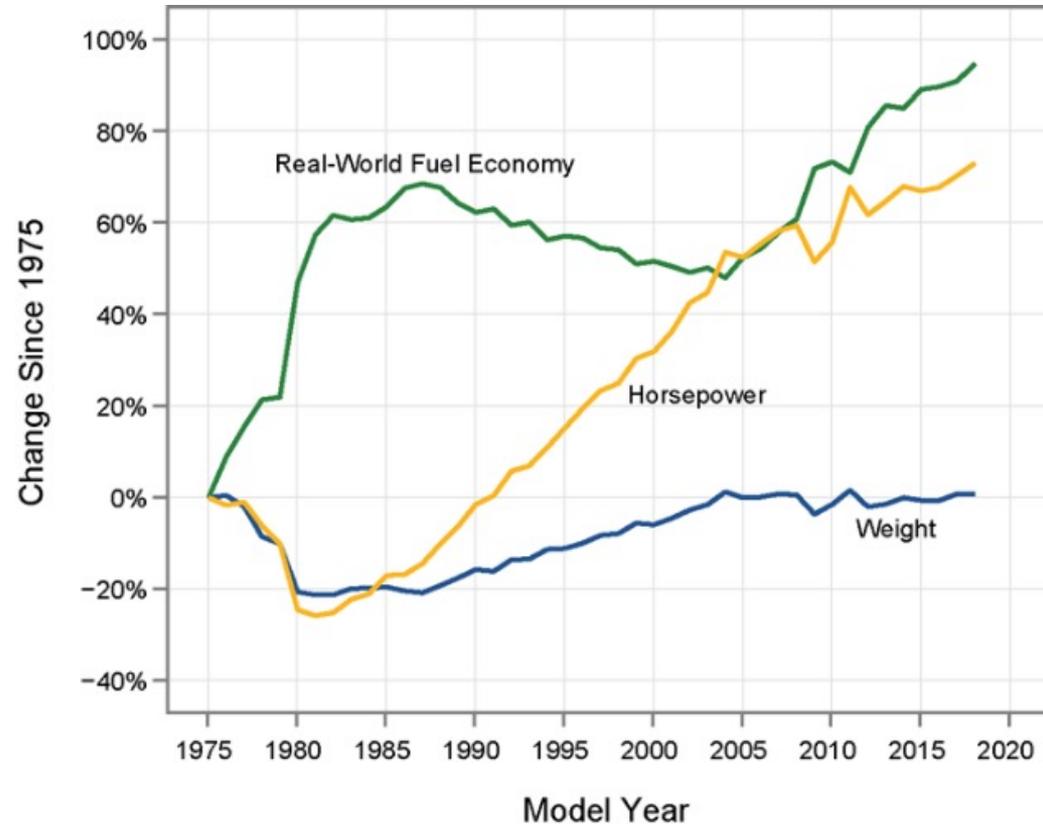
Article history:  
Received 27 November 2015  
Received in revised form 22 February 2016  
Accepted 28 March 2016  
Available online 4 April 2016

Keywords:  
Rebound effect  
Vehicle fuel consumption  
Energy saving  
Speed and acceleration  
Dynamometer tests

## ABSTRACT

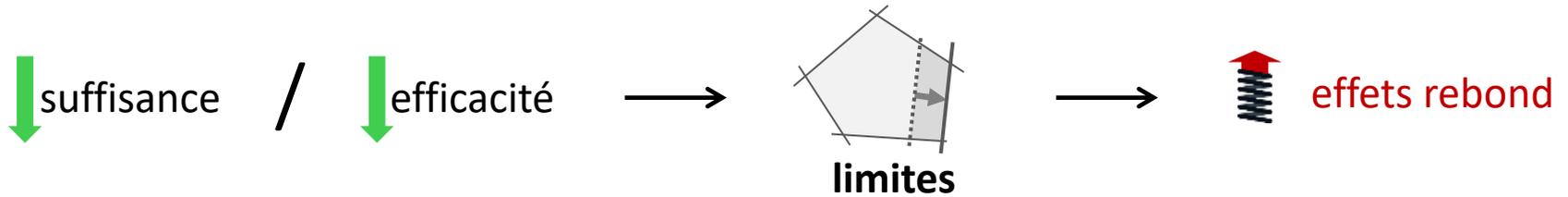
Rebound effect studies of road vehicle travel focus mostly on increases in distance traveled after increases in energy efficiency. Average journeying speed also increases with energy efficiency, but rebound studies avoid quantifying speed-related rebound effects. This may underestimate rebound effects by around 60%. This study offers a first attempt to show how increases in speed and acceleration contribute to rebound effects, and how these can be quantified. Its empirical data is dynamometer test results for a plug-in electric car and an internal combustion engine (ICE) pick-up van with automatic transmission, each on the WLTP and NEDC drive cycles, representing driving styles from today and 1975 styles. Rebound effects are estimated by comparing the WLTP and NEDC results, using typical 1975 energy efficiencies for the NEDC. The electric car shows a 20.5% speed rebound effect, and a mathematical development sets out how speed rebound effects can be included in traditional rebound effect analyses. Results for the ICE-vehicle do not allow a direct rebound effect estimate due to wasteful engine revving on the NEDC and wrong gear ratios for sedate travel. However, this can be seen as a form of 'transformational' rebound effect, where vehicle design locks drivers into fast driving styles.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.



# Effet rebond et limites

- Efficacité/suffisance **repousse les limites de consommation/production** :



- **Limites :**

- économiques (*prix, revenus, ...*)
- physiques, techniques (*temps, espace, ressources, infrastructures, compétences, ...*)
- psychologiques (*désire, morale, danger, ...*)
- sociologique (*habitudes, pratiques, normes, ...*)
- réglementaires
- ...

# Effet rebond et limites

## *Limites temporelles et économiques dans le transport de passagers*

- Limite temporelle : 1 heure ? (Marchetti's constant / Zahavi hypothesis)

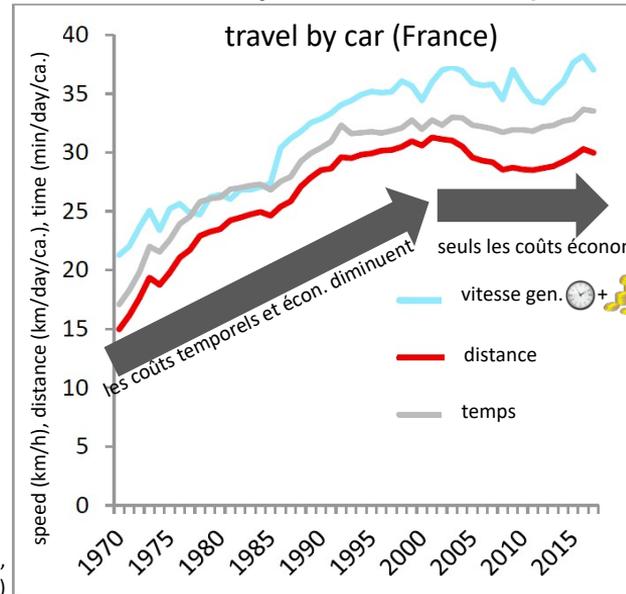


resource: Ausubel et al., *Toward Green Mobility: The Evolution of Transport* (1998)

- Combiner limite temporelle and économique : le coût (la vitesse) généralisé(e) :

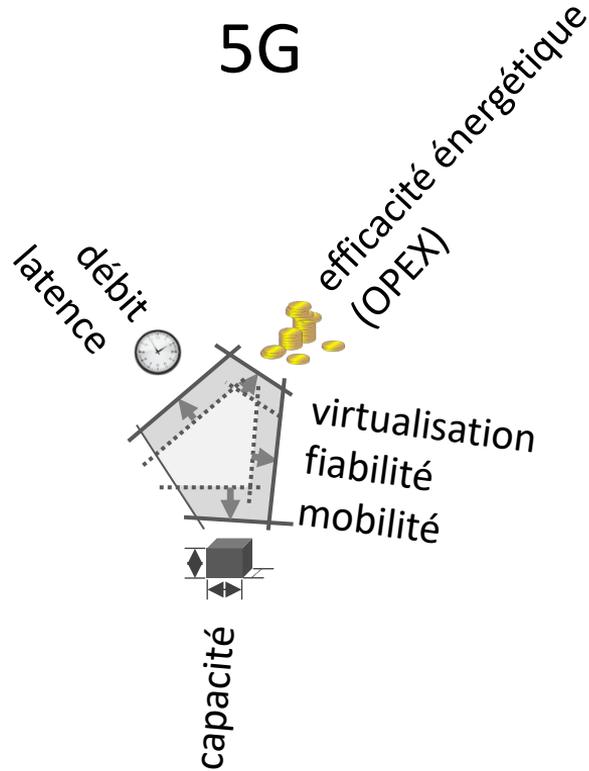


+

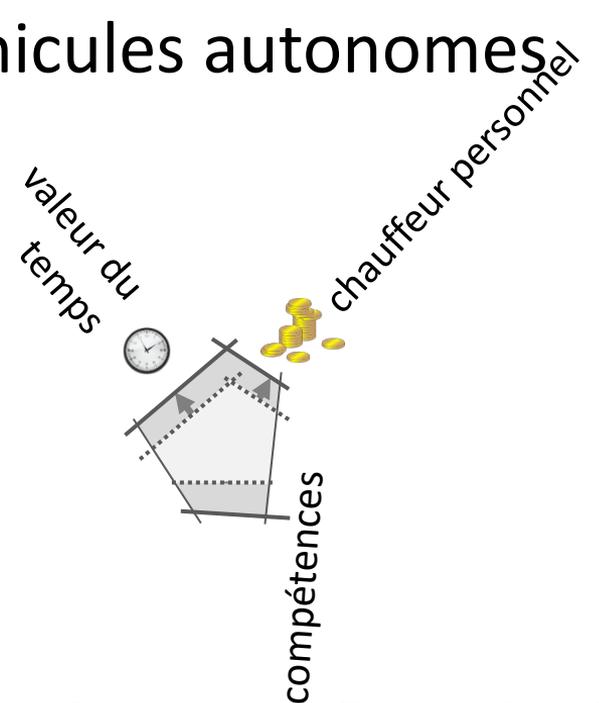


# Effet rebond et limites

*Repousser les limites de et par les TIC*



## Véhicules autonomes



resources: 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)

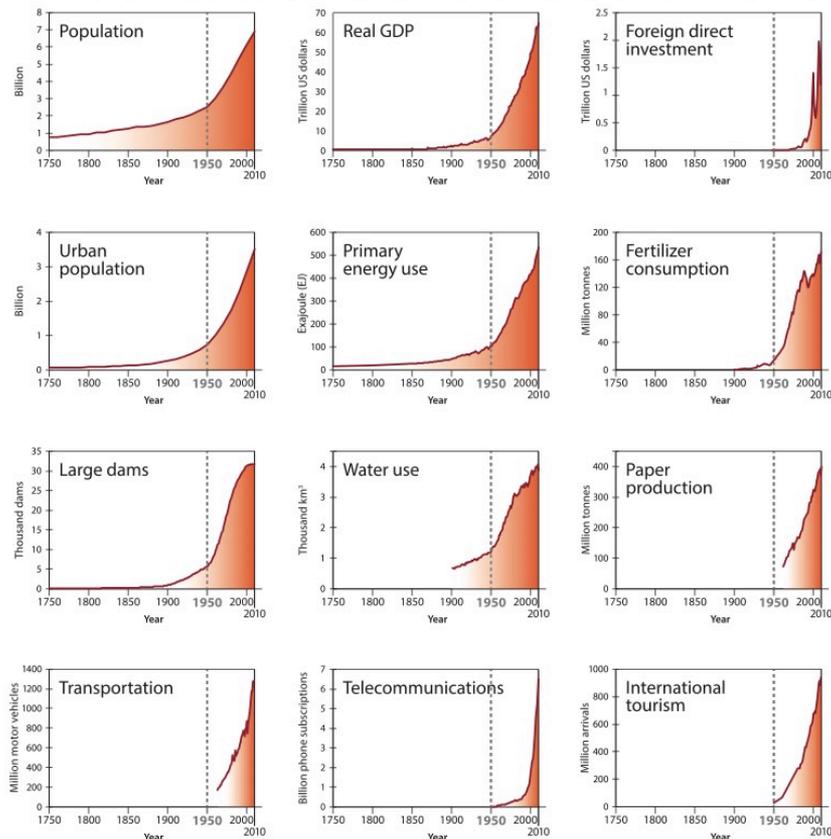
Taiebat et al., *Forecasting the Impact of Connected and Automated Vehicles on Energy Use: A Microeconomic Study of Induced Travel and Energy Rebound* (2019)

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)

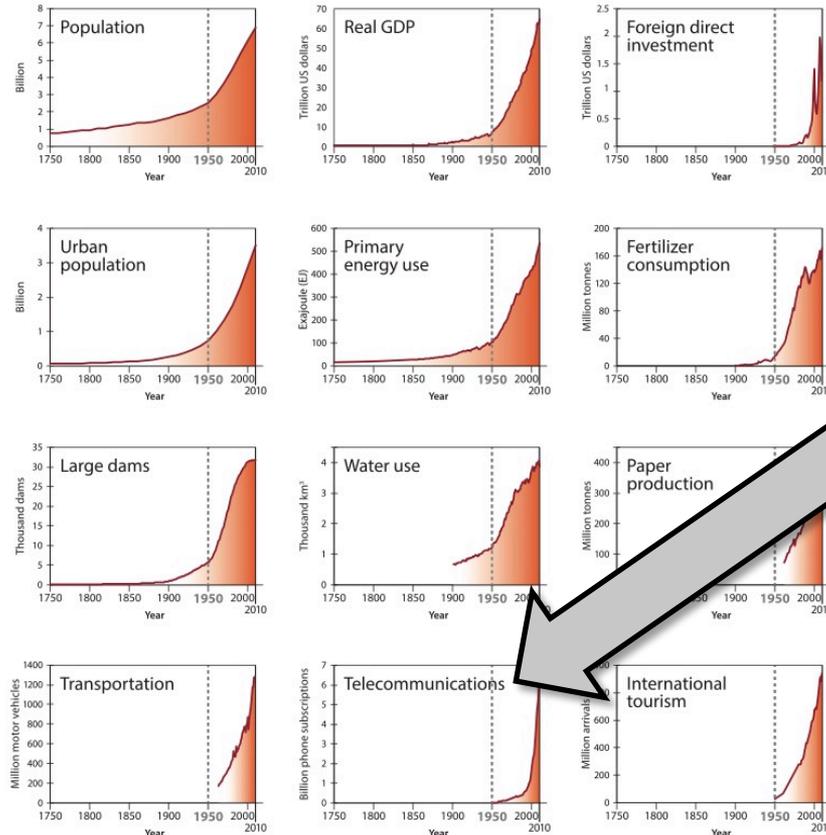
# Plan

1 <sup>er</sup> ordre <b>direct</b>	technologie elle-même	impacts du cycle de vie		analyse de cycle de vie du matériel numérique
2 <sup>ème</sup> ordre <b>indirect</b>	usages et applications	optimisation		analyse de cycle de vie des services rendus par le numérique
		substitution		
<b>3<sup>ème</sup> ordre comportemental structurel</b>	consommateurs producteurs	obsolescence	induction	microéconomie
		rebond direct	et indirect	
	économie	croissance économique		macroéconomie
		accélération		
société	reconfiguration		sociologie, histoire des techniques	

# Le numérique comme outil de décarbonation des autres secteurs ?



# Le numérique comme outil de décarbonation des autres secteurs ?



**Technologie de  
l'information et de la  
communication (TIC)**

# Numérique et consommation d'énergie

Ecological Economics 176 (2020) 106760



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Ecological Economics

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ecolecon](http://www.elsevier.com/locate/ecolecon)



Analysis

Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?

Steffen Lange<sup>a,b,\*</sup>, Johanna Pohl<sup>c</sup>, Tilman Santarius<sup>a,d,e</sup>



<sup>a</sup> Institute for Ecological Economy Research, Berlin, Germany

<sup>b</sup> Resource Economics Group, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany

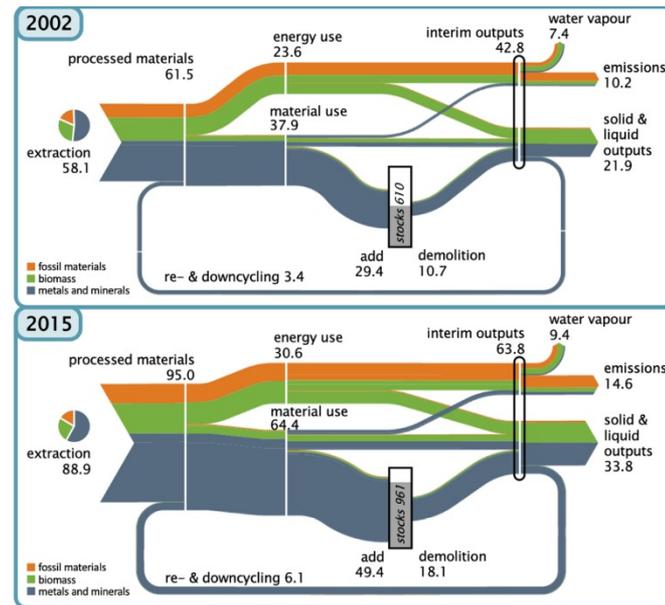
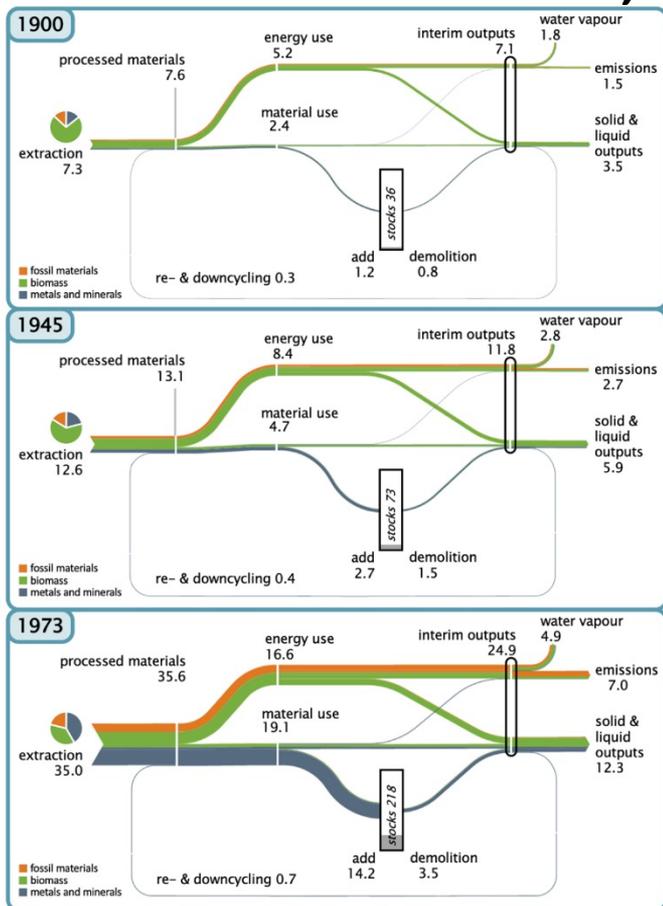
<sup>c</sup> Technische Universität Berlin, Centre for Technology and Society, Berlin, Germany

<sup>d</sup> Technische Universität Berlin, Department of Social Transformation and Sustainable Digitalization, Berlin, Germany

<sup>e</sup> Einstein Centre Digital Futures, Berlin, Germany

*« Instead of saving energy, digitalization has brought additional energy consumption [...].  
This increasing energy consumption is likely to persist as the energy-reducing effects tend to trigger mechanisms leading to the energy increasing effects. »*

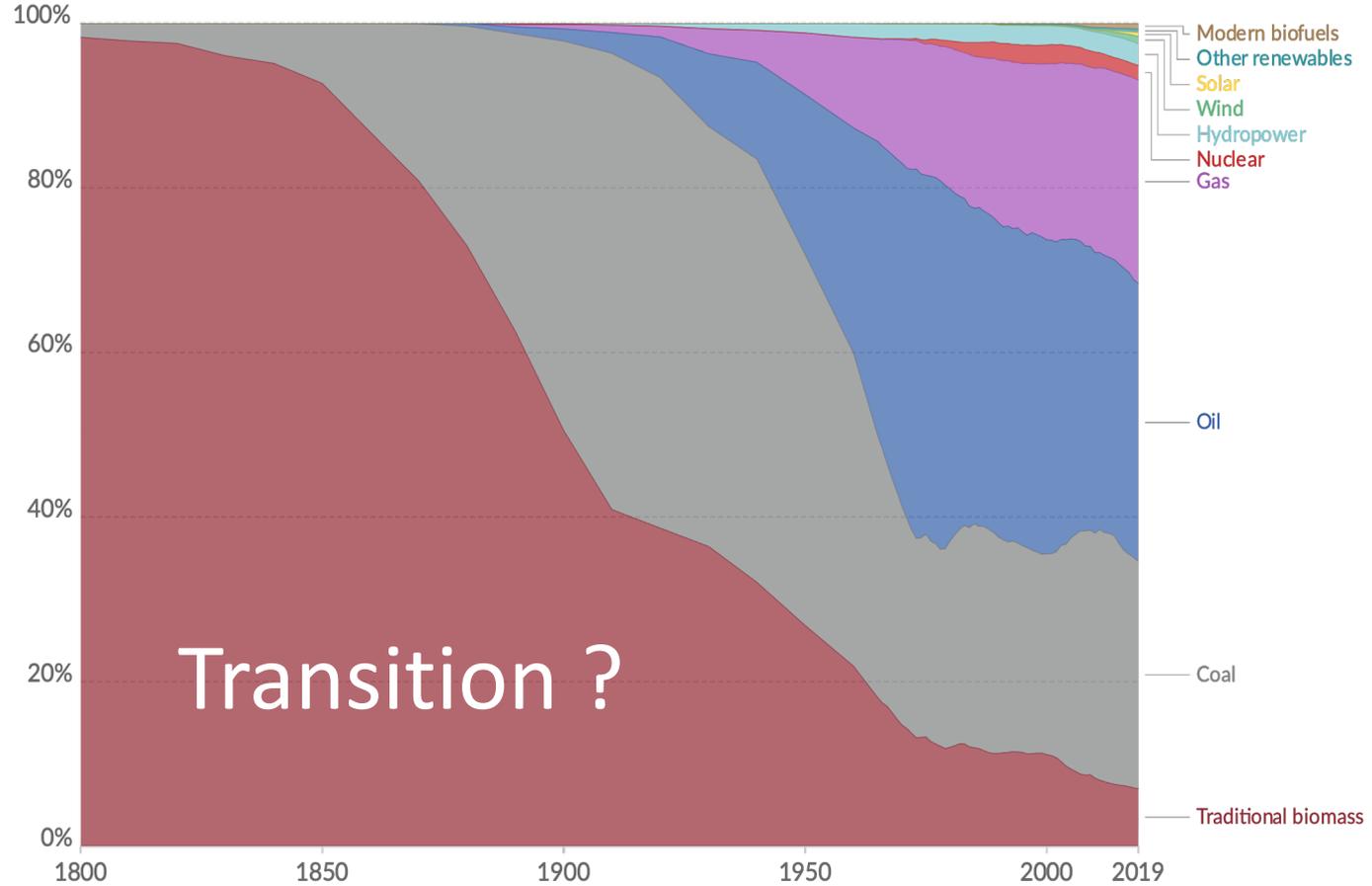
# Circulaire, l'économie ?



source : Haas et al.,  
 Spaceship earth's odyssey to a circular economy - a century long perspective  
 Resources, Conservation & Recycling (2020)

# Global direct primary energy consumption

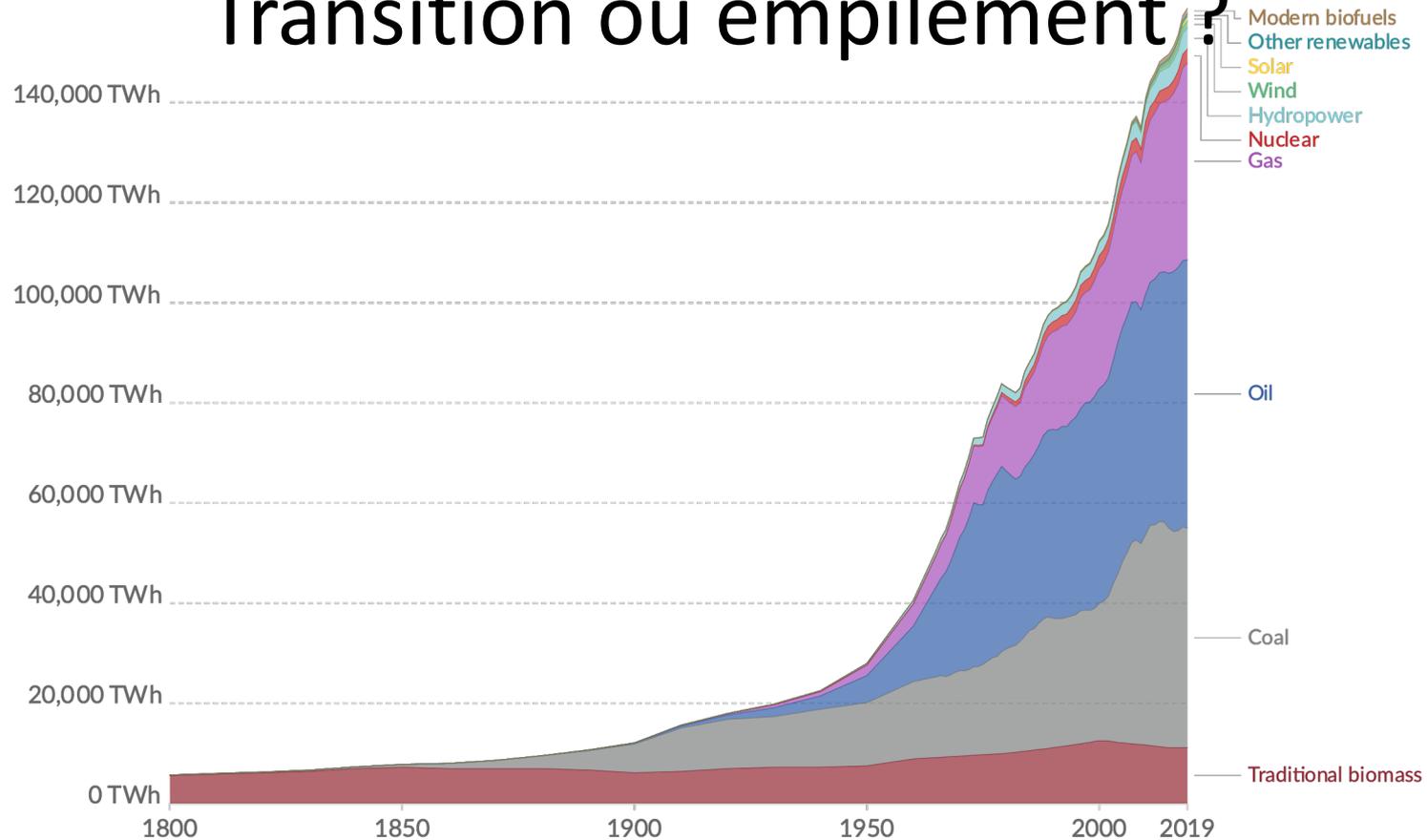
Direct primary energy consumption does not take account of inefficiencies in fossil fuel production.



# Global direct primary energy consumption

Direct primary energy consumption does not take account of inefficiencies in fossil fuel production.

## Transition ou empilement ?



## Transition ou symbiose ?



« Le problème est que cette notion [la transition] ne rendait pas du tout compte de la **nature cumulative et symbiotique du passé énergétique et matériel.** »

**Jean-Baptiste Fressoz**, *Pour une histoire des symbioses énergétiques et matérielles*, Annales des mines, série responsabilité et environnement (2021)

100,000 TWh

augmentation de la consommation  
de bois pour des usages non  
énergétiques (construction, papier, ...)

l'automobile consomme  
autant voire d'avantage de  
charbon que de pétrole  
(fabrication, raffinage, ...)

60,000 TWh



0 TWh

1800

1850

1900

1950

2000

2019

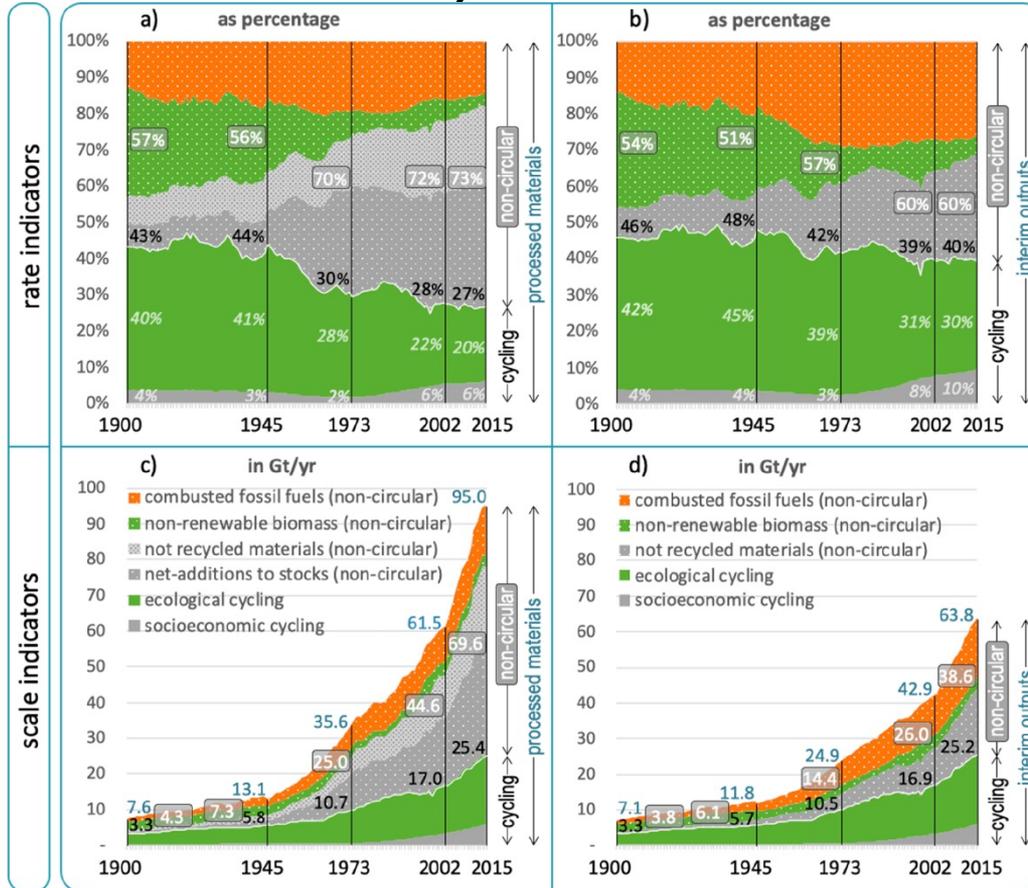
Oil

Coal

Traditional biomass

# Ateliers

# Circulaire, l'économie ?



source : Haas et al.,  
 Ir economy - a century long perspective  
 sources, Conservation & Recycling (2020)

# Ateliers :

## effets environnementaux indirects / rebond des plateformes de l'économie collaborative



leboncoin

1. Travail en sous-groupes (40 minutes)
  - Quels effets indirects (et rebond) voyez-vous (négatifs mais aussi positifs) ?
  - Imaginez des façons de les mesurer...
  - ... et des leviers d'action pour contrer les effets négatifs

→ *Pensez à prendre le temps de préparer la restitution !*
2. Restitution des sous-groupes (20 minutes)

# Ateliers :

## effets environnementaux indirects / rebond des plateformes de l'économie collaborative

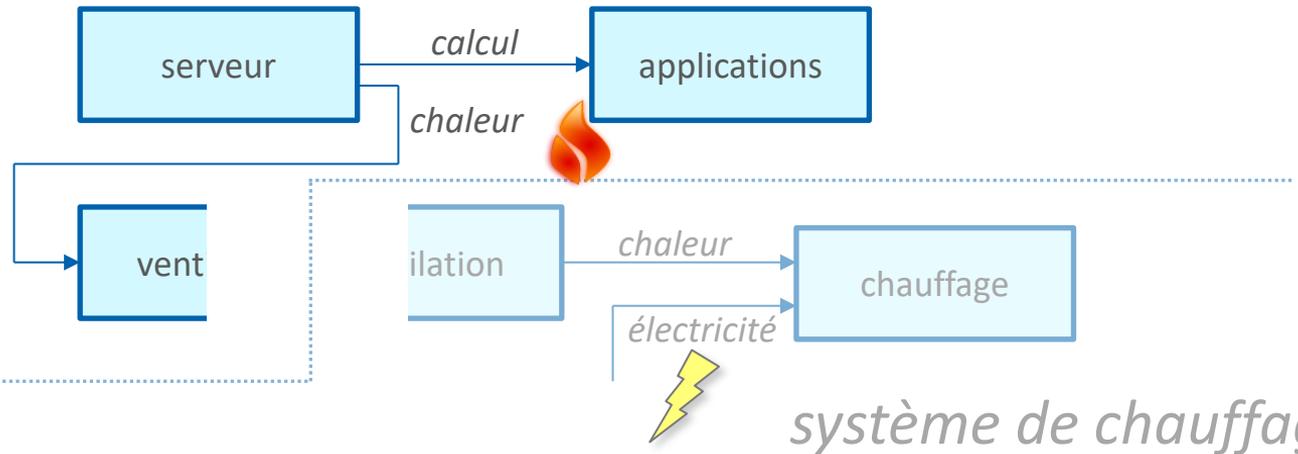
[http://alcor-institute.com/wp-content/uploads/2018/11/02-PicoPaper\\_STUDY\\_13juillet.pdf](http://alcor-institute.com/wp-content/uploads/2018/11/02-PicoPaper_STUDY_13juillet.pdf)

- BlaBlaCar
  - <https://theconversation.com/a-quelles-conditions-le-covoiturage-sera-t-il-un-mode-de-transport-durable-124122>
  - [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/covoiturage\\_longue\\_distance-synthese.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/covoiturage_longue_distance-synthese.pdf)
  - [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/covoiturage\\_longue\\_distance-rapport\\_final.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/covoiturage_longue_distance-rapport_final.pdf)
- AirBnB
- Leboncoin

# Cas de la réutilisation de la chaleur

*approche attributionnelle par allocation (APOS)*

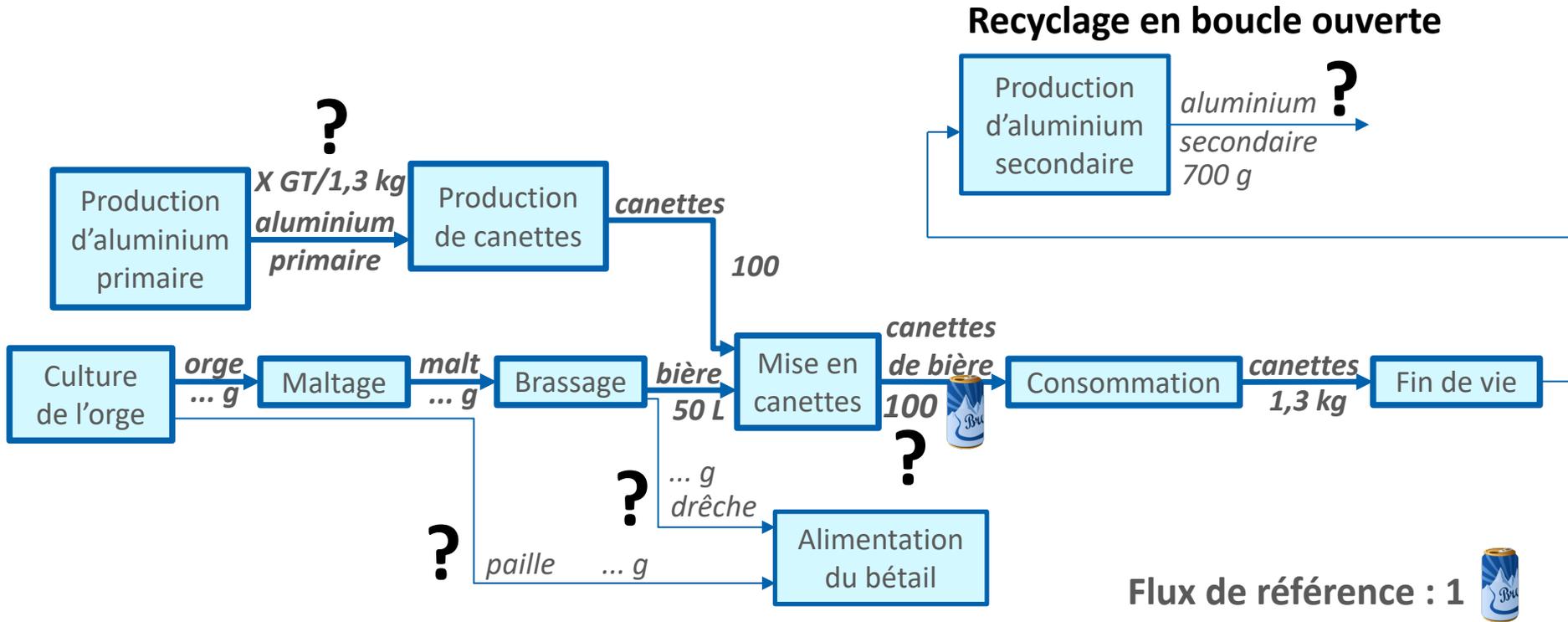
*service numérique*



*critère d'allocation ?*

- Le chauffage aide à évacuer la chaleur du serveur (chaleur = déchet)
  - impacts du serveur intégralement alloués aux services numériques
  - impacts de la ventilation répartis

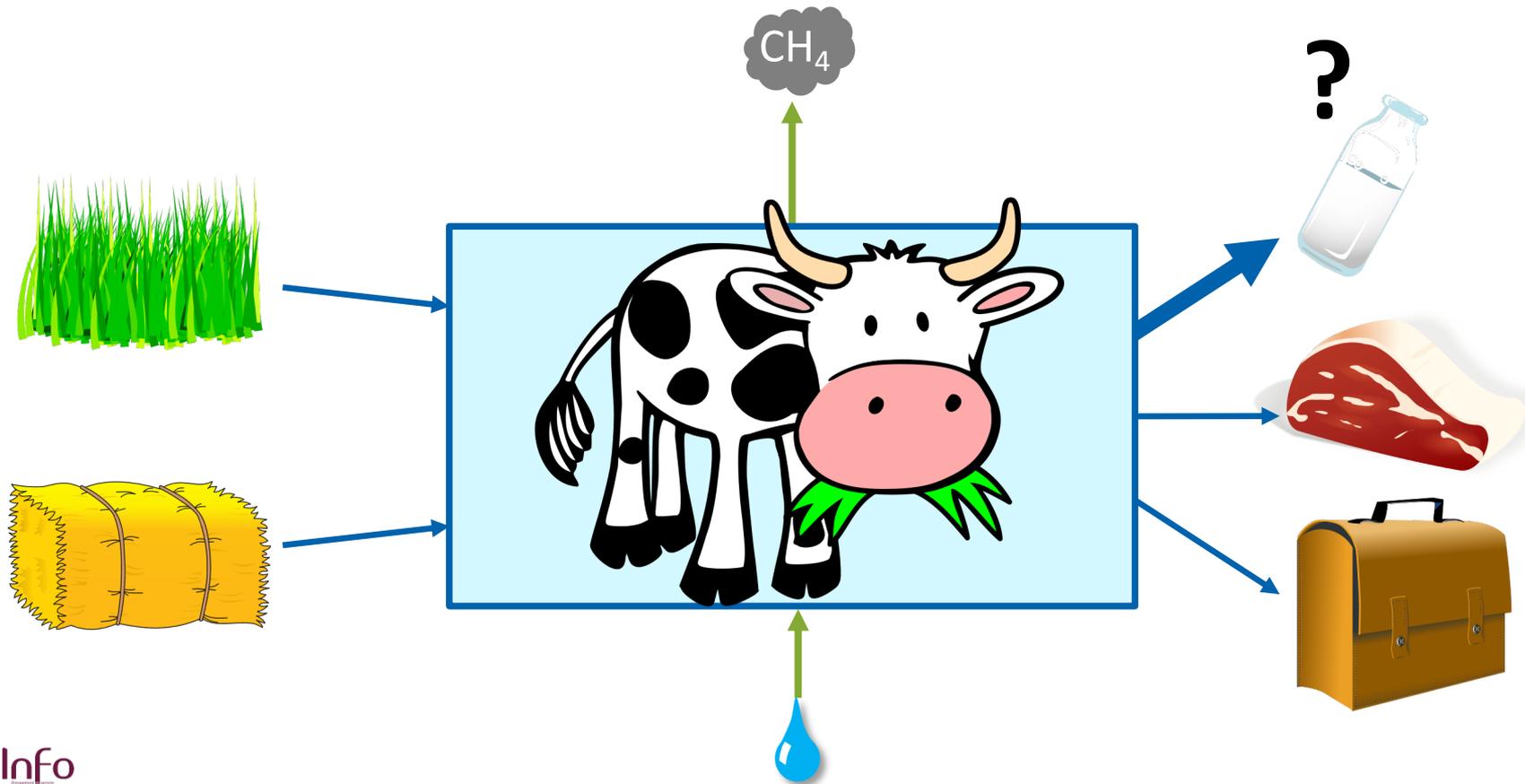
# Impacts environnementaux « d'une bière »



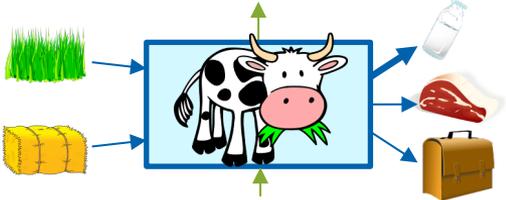
Flux de référence : 1



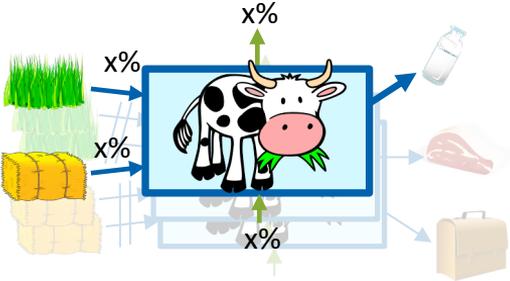
# Exemple de processus multifonctionnel



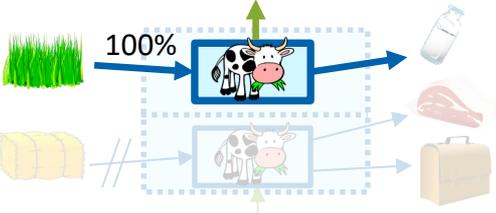
# Traiter la multifonctionnalité



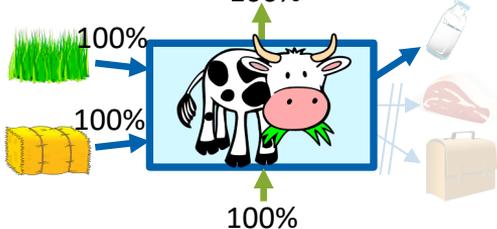
- Allocation (prorata)  
(masse, valeur économique, ...)



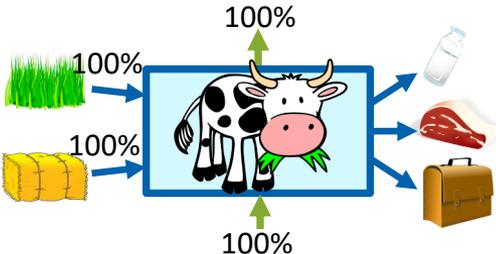
- Division



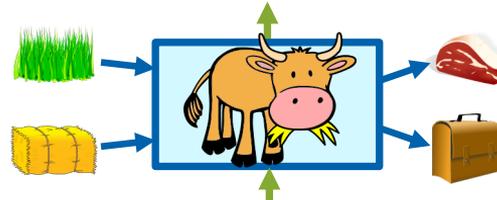
- Cutoff



- Extension des frontières



impacts évités



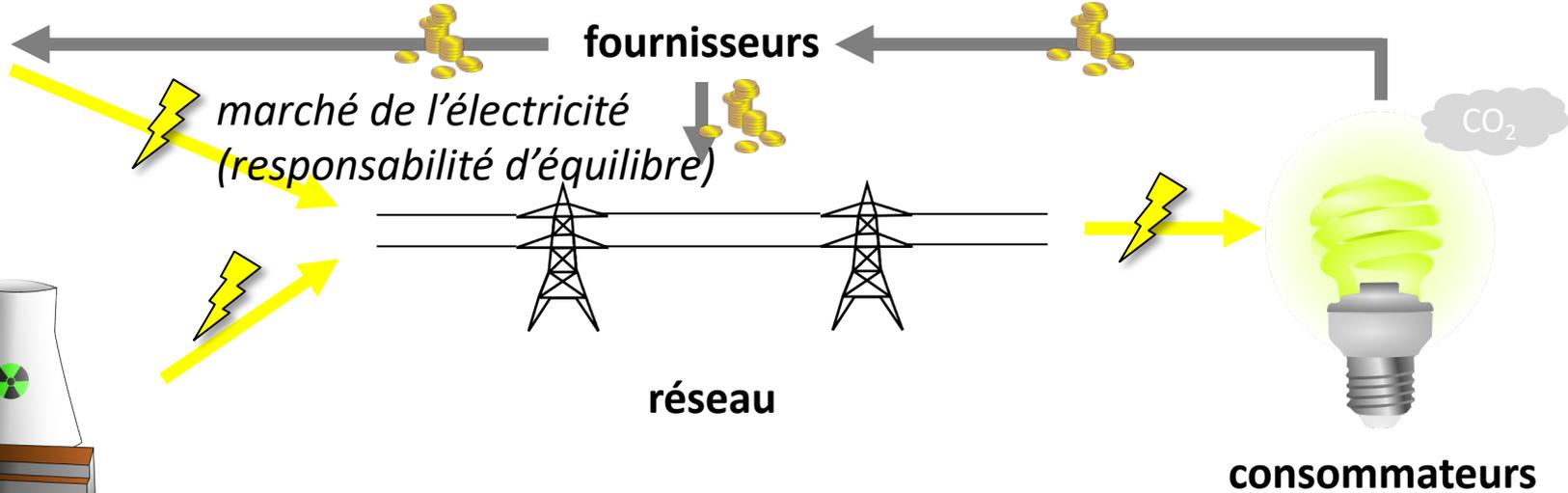
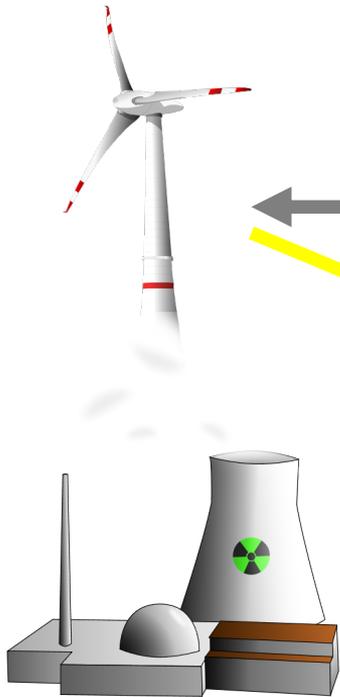
# L'électricité « verte »





# L'électricité « verte »

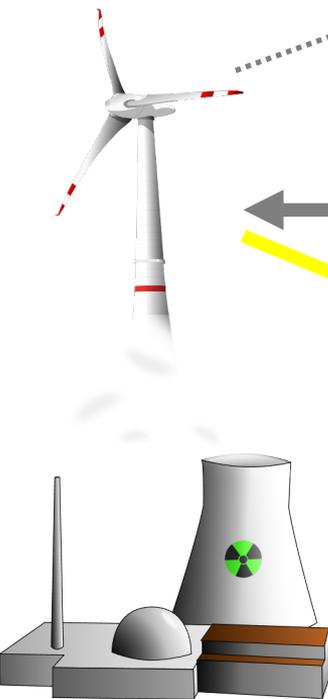
producteurs





# L'électricité « verte »

producteurs



marché des garanties d'origine

fournisseurs

marché de l'électricité  
(responsabilité d'équilibre)

réseau



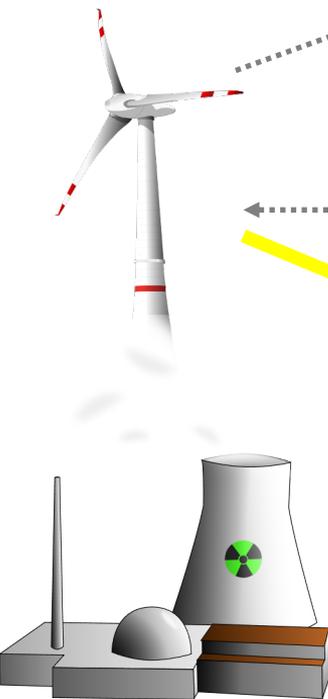
consommateurs





# L'électricité « verte »

producteurs



marché des garanties d'origine

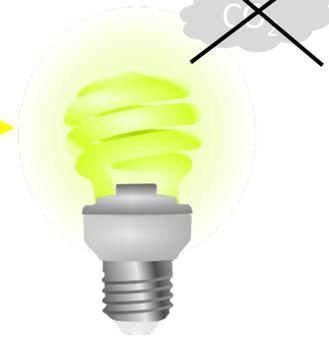
fournisseurs

marché de l'électricité  
(responsabilité d'équilibre)

réseau



consommateurs







# L'électricité « verte »

producteurs



garantie d'origine (1an)  
périmètre : Europe  
marché des garanties d'origine

Allocation des émissions (attributionnel)

garantie d'origine

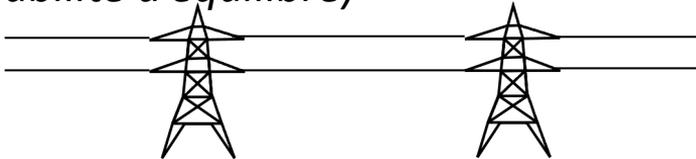
fournisseurs

marché de l'électricité (responsabilité d'équilibre)

Conséquences ?

réseau

consommateurs

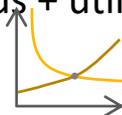


# Différentes vues de l'effet rebond (1/2)

- Vue économique néoclassique :

- microéconomie :

- théorie du consommateur (homo economicus + utilité), théorie du producteur
- équilibre de marché (offre/demande/prix)



resources: Berkhout et al., *Defining the rebound effect* (2000)

Binswanger, *Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?* (2001)

Sorrell et al., *The rebound effect: Microeconomic definitions limitations and extensions* (2007) and Greening et al., *Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey* (2000)

- macroéconomie :

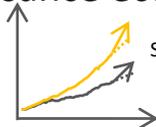
- propagation à l'échelle de l'économie de l'effet de prix (modèles d'équilibre général)
- effets de frontière, croissance économique

resources: Brookes, *Energy efficiency fallacies revisited* (2000)

Saunders, *The Khazzoom-Brookes Postulate and Neoclassical Growth* (1992)

Jenkins et al., *Energy Emergence — Rebound & Backfire as Emergent Phenomena* (2011)

Sorrell et al., *Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications* (2021)



- Vue technique :

- qualité (énergie, mouvement, matériaux, ...), fiabilité, maintenance
- espace (paradoxe de la miniaturisation), temps (dispo., accélération), ...
- standards, infrastructures



(re)sources: Wallenborn, *Rebounds Are Structural Effects of Infrastructures and Markets* (2018)

Nuvolari et al., *The early diffusion of the steam engine in Britain, 1700–1800: a reappraisal* (2011)

Sorrell et al., *Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency* (2008)

Hilty, *Information Technology and Sustainability — Essays on the Relationship between ICT and Sustainable Development* (2008)



# Numérique et consommation d'énergie

Ecological Economics 176 (2020) 106760



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Ecological Economics

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ecolecon](https://www.elsevier.com/locate/ecolecon)



Analysis

Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?

Steffen Lange<sup>a,b,\*</sup>, Johanna Pohl<sup>c</sup>, Tilman Santarius<sup>a,d,e</sup>



<sup>a</sup> Institute for Ecological Economy Research, Berlin, Germany

<sup>b</sup> Resource Economics Group, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany

<sup>c</sup> Technische Universität Berlin, Centre for Technology and Society, Berlin, Germany

<sup>d</sup> Technische Universität Berlin, Department of Social Transformation and Sustainable Digitalization, Berlin, Germany

<sup>e</sup> Einstein Centre Digital Futures, Berlin, Germany

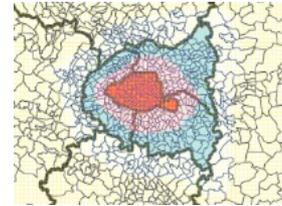
*« Instead of saving energy, digitalization has brought additional energy consumption [...].  
This increasing energy consumption is likely to persist as the energy-reducing effects tend to trigger mechanisms leading to the energy increasing effects. »*

# Différentes vues de l'effet rebond (2/2)

- Vue psychologique : désire, *moral licensing* ...

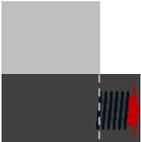
- Vue sociologique (pratiques sociales) :

- augmentation du niveau de vie (confort, propreté, commodité, ...)
- interactions des normes (sociales, techniques, réglementaires)
- dépendance au chemin and irréversibilité
- infrastructures, savoir-faire
- représentations symboliques et significations



- Vue historique : e.g. travaux de Fressoz (histoire des sources d'énergie)

# Estimer l'effet rebond

- On cherche une **causalité**: **efficacité**  →  **effet rebond**

- Comparer:   
scénario **sans**  
gain en efficacité

*cas réel (contrôle)*

*modèle (contrefactuel)*

*cas réel (historique)*

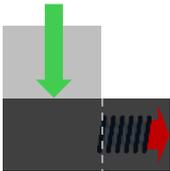
*modèle (prévision)*

vs

vs

vs

vs

-   
scénario **avec**  
gain en efficacité

*cas réel (traité)*

*cas réel (historique)*

*modèle (contrefactuel)*

*modèle (prévision)*

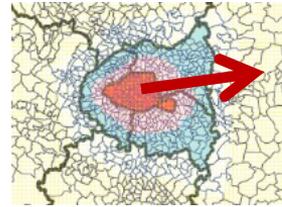
- Outils : enquêtes, essais randomisés contrôlés, statistiques, modèles, ...

# Rechercher une causalité

*Le télétravail est-il source d'étalement urbain ?*



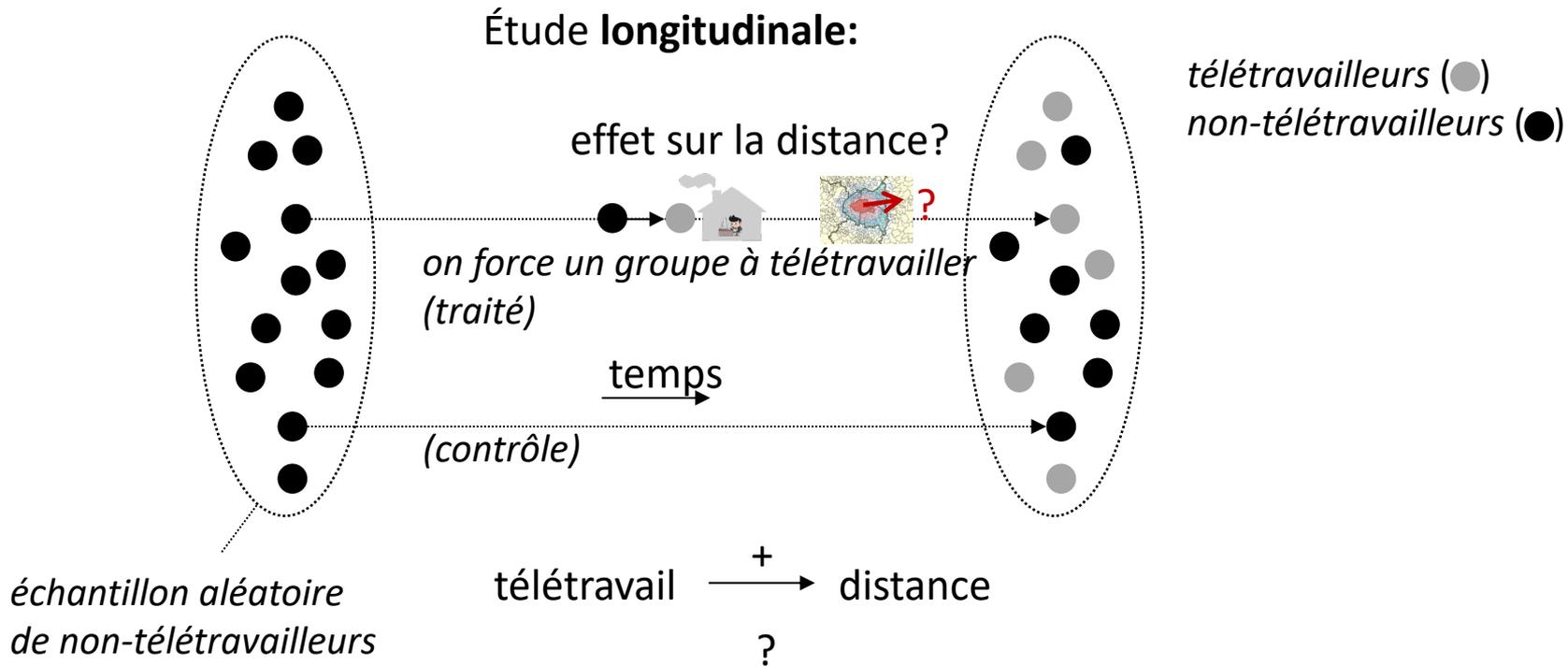
*télétravailleurs  
- de déplacements*



*déménagent-ils plus à  
loin à terme ?*

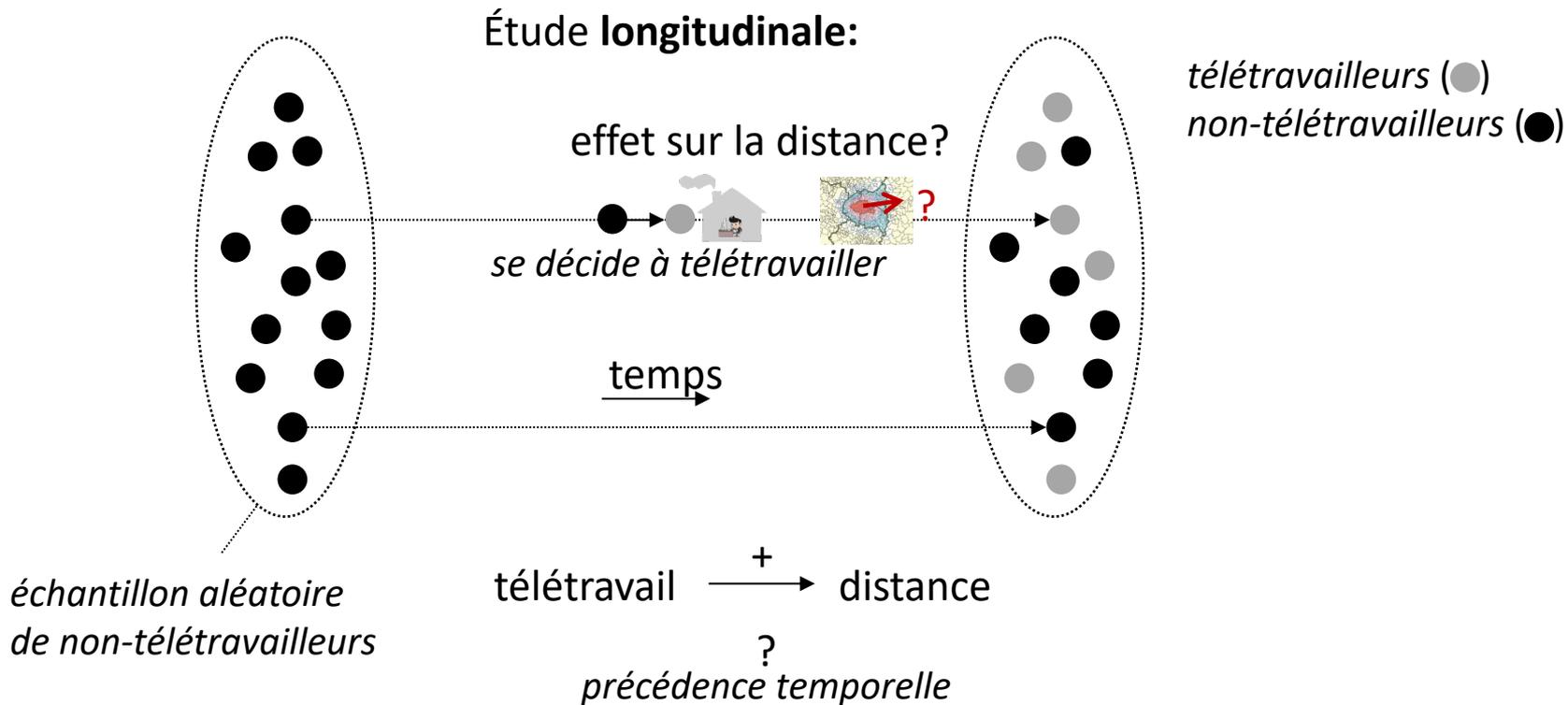
# Rechercher une causalité

*Le télétravail est-il source d'étalement urbain ?*



# Rechercher une causalité

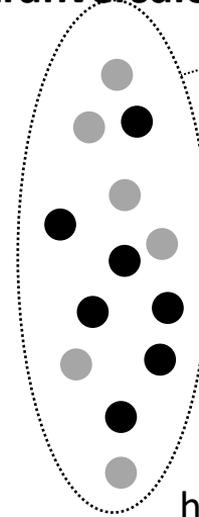
*Le télétravail est-il source d'étalement urbain ?*



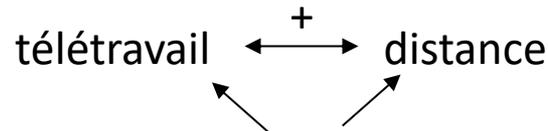
# Rechercher une causalité

*Le télétravail est-il source d'étalement urbain ?*

Étude **transversale** : échantillon aléatoire de télétravailleurs (●) et non-télétravailleurs (●) at un instant donné



en moyenne les télétravailleurs habitent plus loin

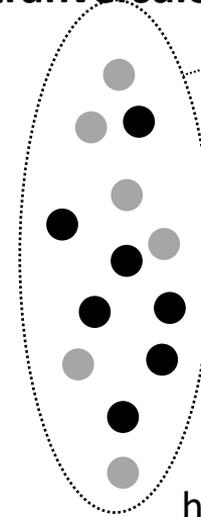


(salaire, âge, sexe, zone, catégorie socio-professionnelle, ...) facteur de confusion ?

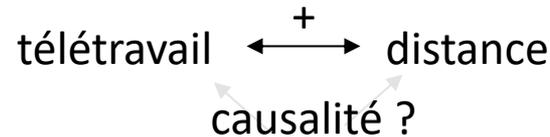
# Rechercher une causalité

*Le télétravail est-il source d'étalement urbain ?*

Étude **transversale** : échantillon aléatoire de télétravailleurs (●) et non-télétravailleurs (●) at un instant donné



en moyenne les télétravailleurs habitent plus loin



(salaire, âge, sexe, zone, catégorie socio-professionnelle, ...) facteur de confusion ?

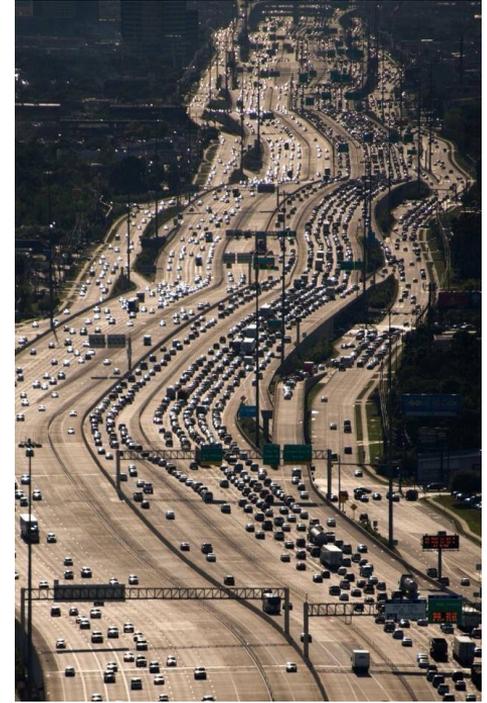
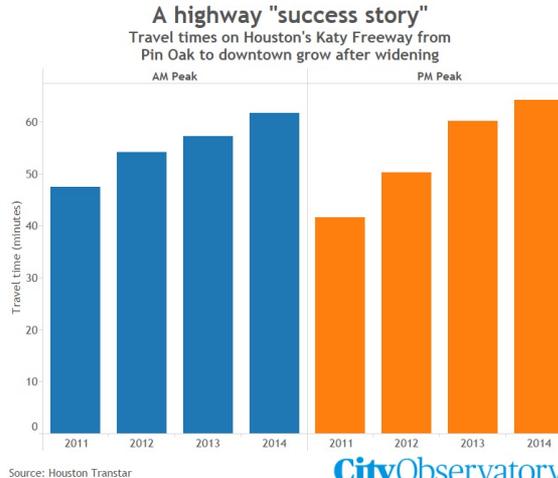
# Qu'est-ce que l'effet rebond ?

## *Le trafic induit*

- Augmentation de la capacité routière  
(pour réduire la congestion routière)



- Augmentation du trafic  
(pas de réduction de la congestion routière)

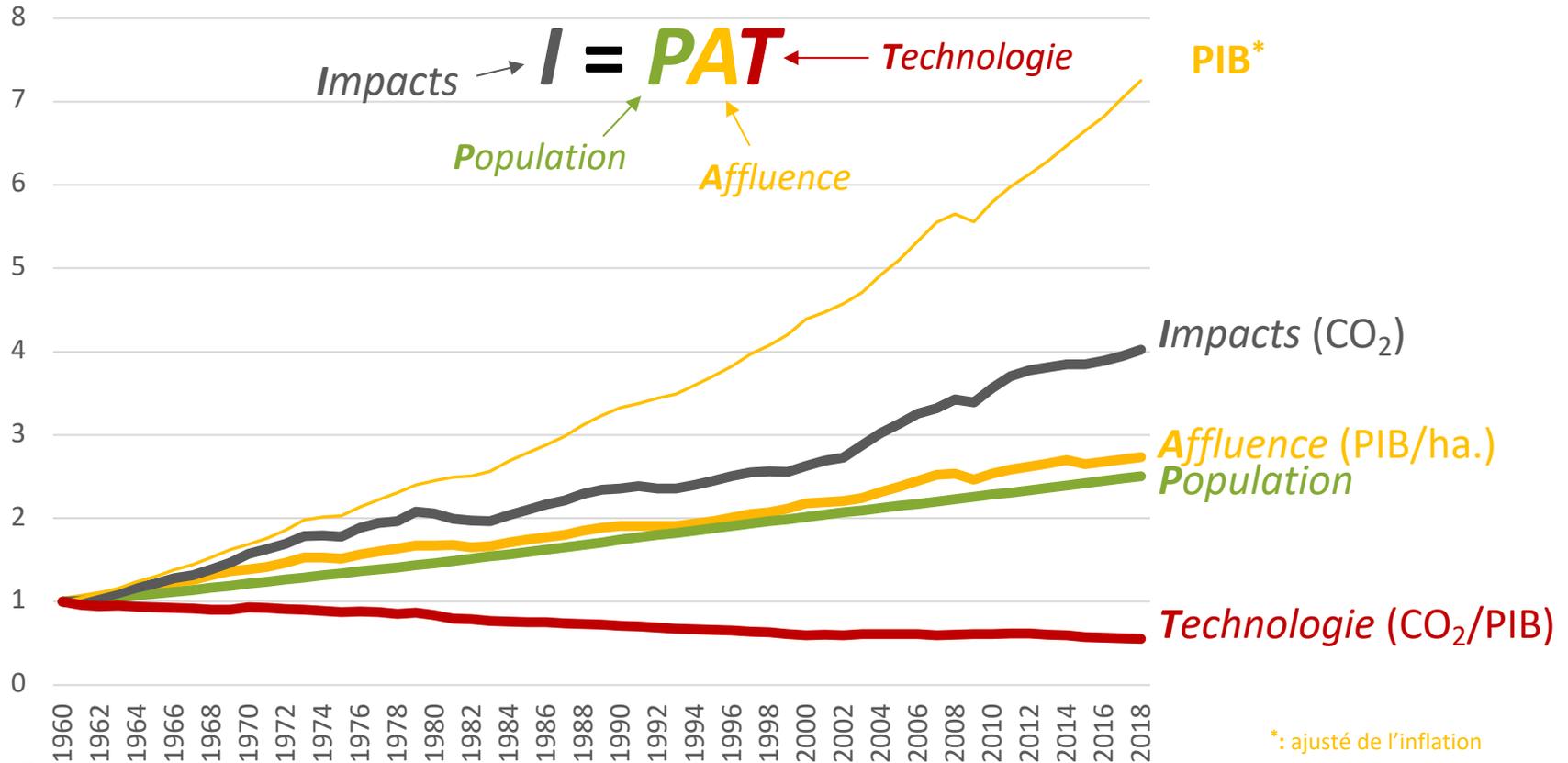


CityObservatory *Houston I-10 Katy Freeway*

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

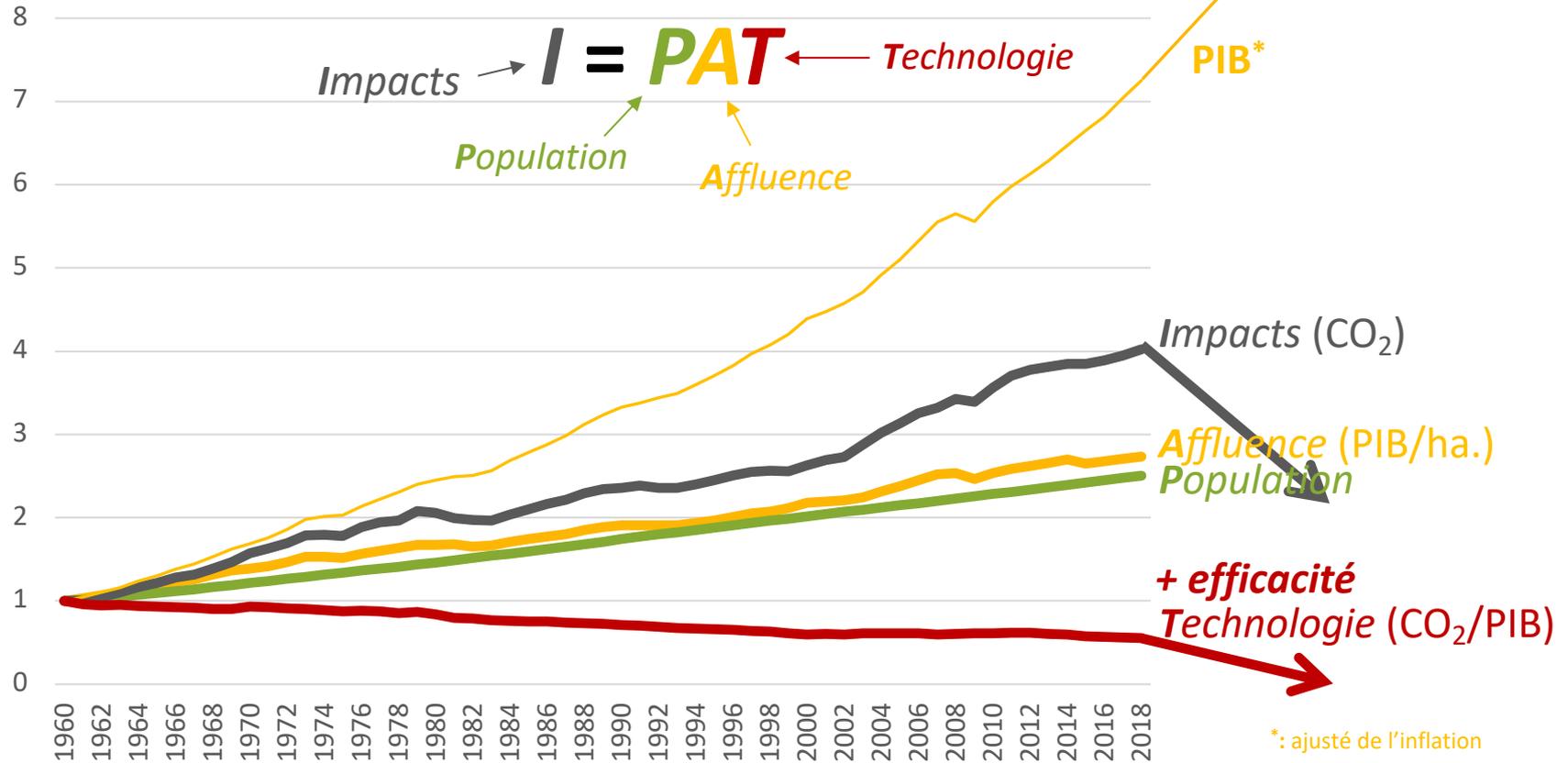
Frédéric Hérain, *Le trafic induit par l'élargissement de l'A480 et l'aménagement de l'échangeur du Rondeau dans la traversée de Grenoble* (2019)

# Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>



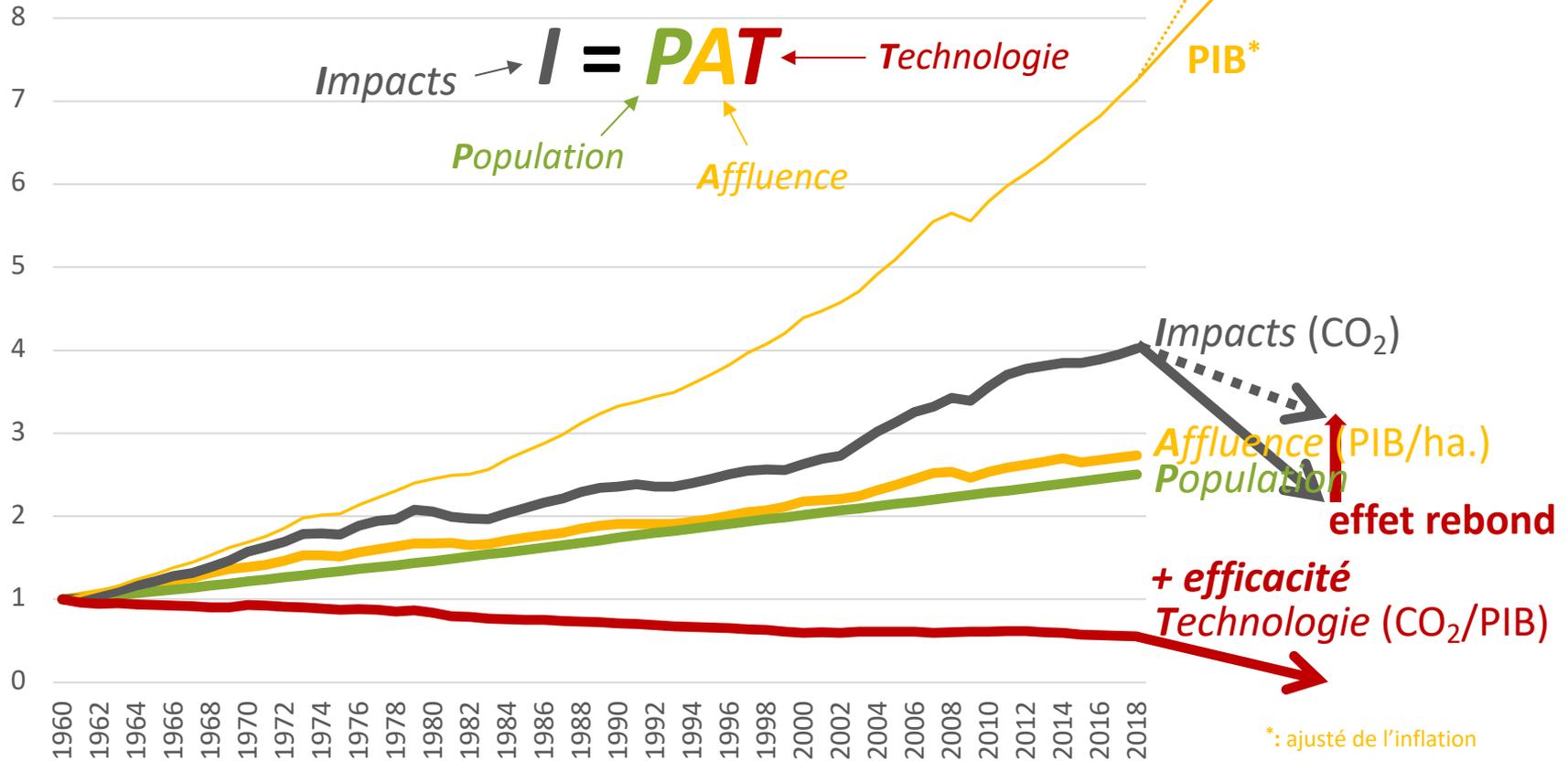
\*: ajusté de l'inflation

# Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>



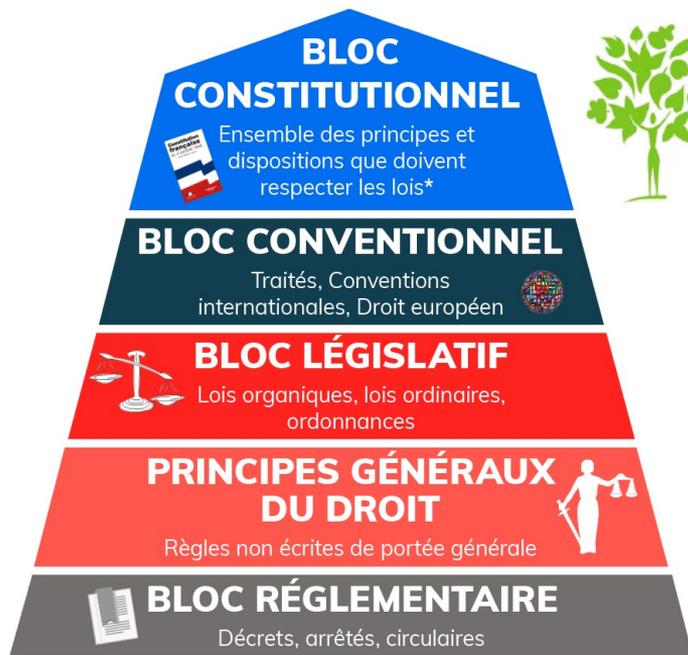
\*: ajusté de l'inflation

# Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>



\*: ajusté de l'inflation

# La hiérarchie des normes



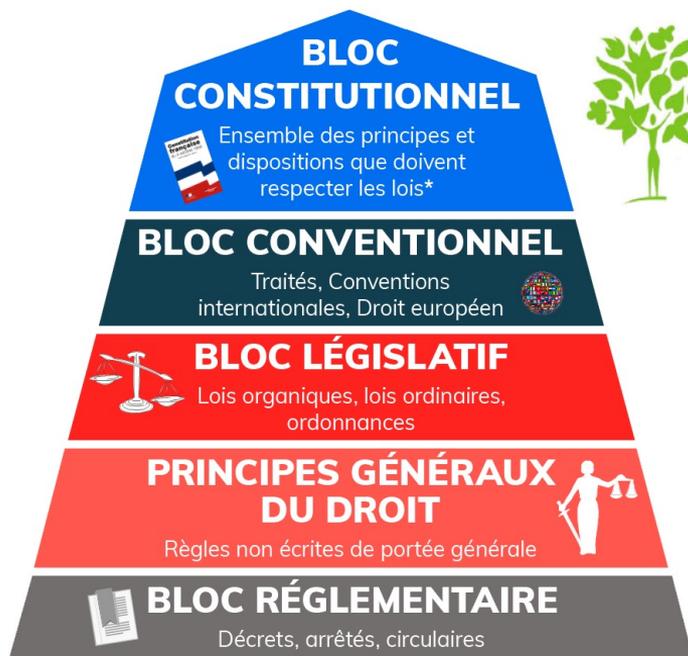
La charte de l'environnement

## Principes ?



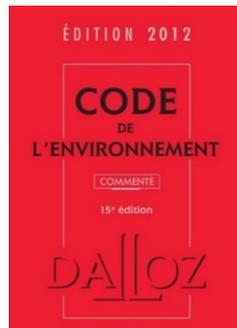
\*Le bloc de constitutionnalité comprend la Constitution de 1958, le Préambule de la Constitution de 1946, la Déclaration des droits de l'Homme de 1789, la charte de l'environnement

# La hiérarchie des normes



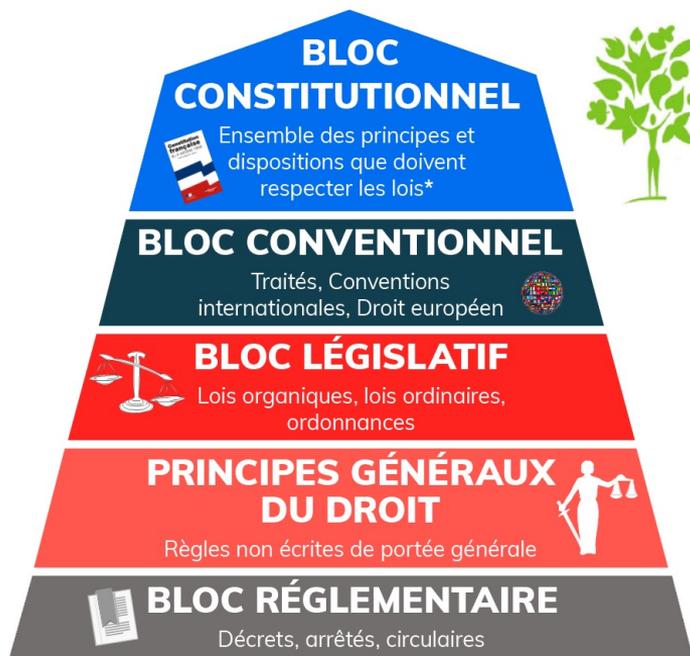
La charte de l'environnement

- **Principe de précaution (Art. 5)**
- **Principe de prévention (Art. 3)**
- **Principe du pollueur-payeur (Art. 4)**
- **Développement durable (Art. 6)**  
« Les politiques publiques doivent promouvoir un développement durable. À cet effet, elles concilient la protection et la mise en valeur de l'environnement, le développement économique et le progrès social. »

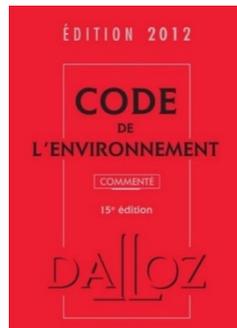


\*Le bloc de constitutionnalité comprend la Constitution de 1958, le Préambule de la Constitution de 1946, la Déclaration des droits de l'Homme de 1789, la charte de l'environnement

# La hiérarchie des normes



La charte de l'environnement

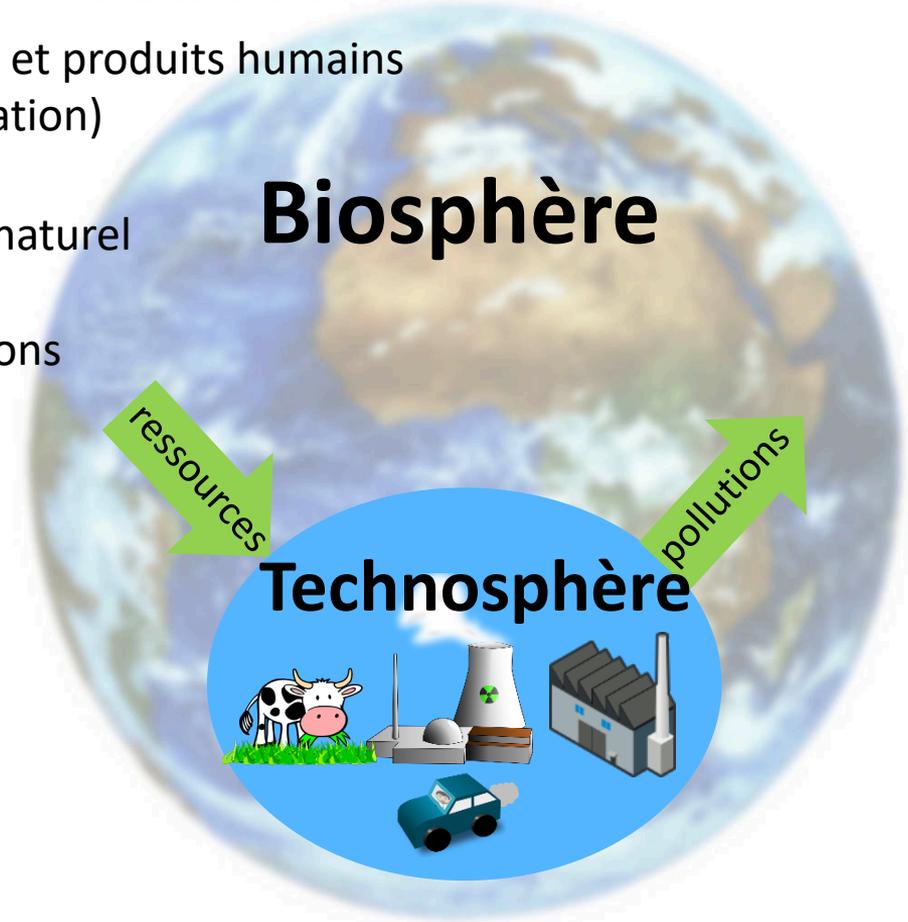


- **Principe de précaution** (Art. 5)
  - **Principe de prévention** (Art. 3)
  - **Principe du pollueur-payeur** (Art. 4)
  - **Développement durable** (Art. 6)
- 
- **Principe de précaution** (Art. L110-1, II, 1°)  
« à un coût économiquement acceptable »
  - **Principe de prévention** (Art. L110-1, II, 2°)  
« à un coût économiquement acceptable »
  - **Principe du pollueur-payeur** (Art. L110-1, II, 3°)
  - **Développement durable** (Art. L110-1, III)
    - 1° La lutte contre le changement climatique
    - 2° La préservation de la biodiversité, des milieux, des ressources ainsi que la sauvegarde des services qu'ils fournissent et des usages qui s'y rattachent
    - 5° La transition vers une économie circulaire.

\*Le bloc de constitutionnalité comprend la Constitution de 1958, le Préambule de la Constitution de 1946, la Déclaration des droits de l'Homme de 1789, la charte de l'environnement

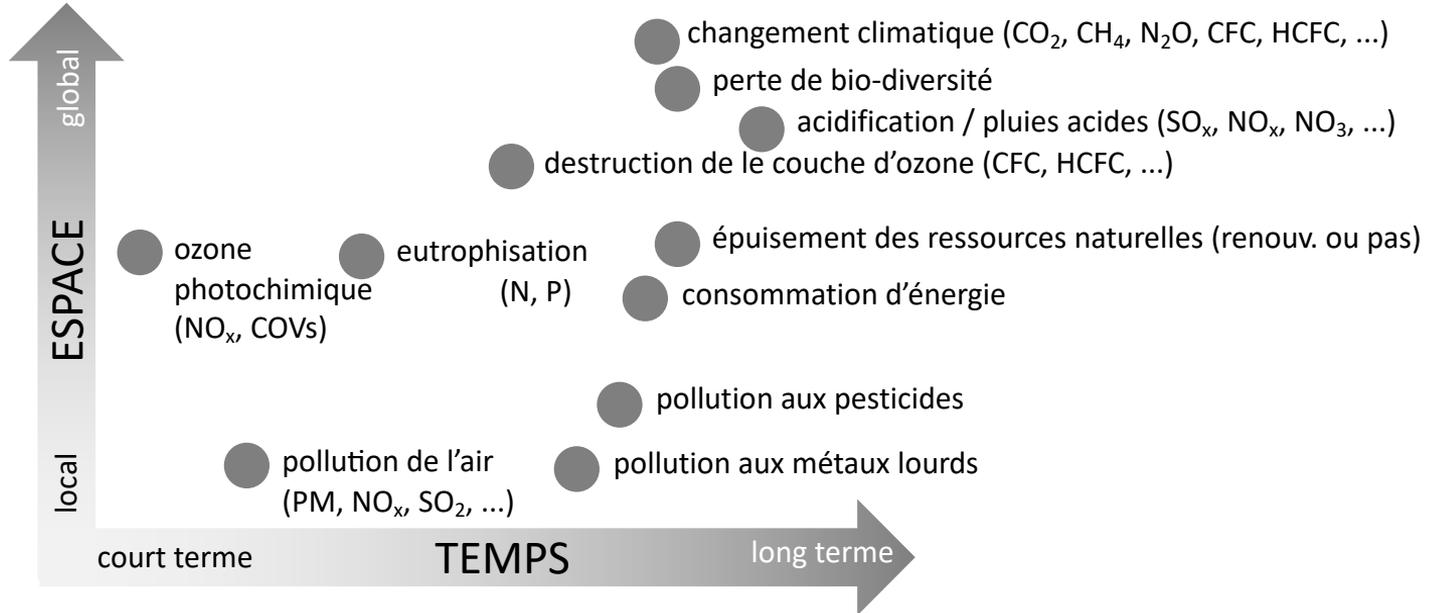
# Un peu de vocabulaire

- Technosphère : l'ensemble des activités et produits humains (production, transformation, consommation)
- Biosphère/écosphère : environnement naturel
- Impacts environnementaux : modifications de la biosphère liées aux activités de la technosphère.



# Les impacts environnementaux

- Différentes échelles :



- Différents types effets :  
itératifs, à retardement, concentrés, à distance, de morcellement, combinés, indirects, abrupts (seuils)