

Les enjeux environnementaux du numérique

Sylvain Bouveret

Ateliers Ensimag, 7 et 17 mars 2022

Laboratoire d'Informatique de Grenoble, Ensimag, EcoInfo

Ce cours est plus ou moins directement inspiré des sources suivantes :

- Mooc Impacts environnementaux du numérique de l'Inria : <https://learninglab.gitlabpages.inria.fr...>
- Séminaire de Jacques Combaz (Toulouse, 7 novembre 2019) : *TIC : effets directs, rebond et indirects*
- Cours de Julien Lefèvre (Aix-Marseille Université, 28 may 2021) : *Introduction to the major environmental issues... and what we can do !*
- Cours d'Anne-Laure Ligozat (CentraleSupélec, mars 2021) : *IA responsable*
- + plein d'autres ressources ÉcolInfo

Menu du jour

Amuse-bouche : le numérique

Entrée : l'état du monde

Plat de résistance : les impacts directs

Dessert : Effets rebonds et indirects

Conclusion

Numérique ?

Numérique \approx écosystème formé par l'ensemble des dispositifs qui permettent de manipuler de l'information sous forme électronique.

Numérique ?

Numérique \approx écosystème formé par l'ensemble des dispositifs qui permettent de manipuler de l'information sous forme électronique.

Usages principaux :

- communiquer
- partager
- calculer, simuler
- se divertir
- optimiser

Numérique ?

Numérique \approx écosystème formé par l'ensemble des dispositifs qui permettent de manipuler de l'information sous forme électronique.

Usages principaux :

- communiquer
- partager
- calculer, simuler
- se divertir
- optimiser

Répartition :

- Terminaux
- Réseaux
- Datacentres

Chiffres-clefs pour le monde¹

34 milliards d'équipements, 4.1 milliards d'utilisateurs.

¹Bordage, 2019.

Le numérique mondial

Chiffres-clefs pour le monde¹

34 milliards d'équipements, 4.1 milliards d'utilisateurs.

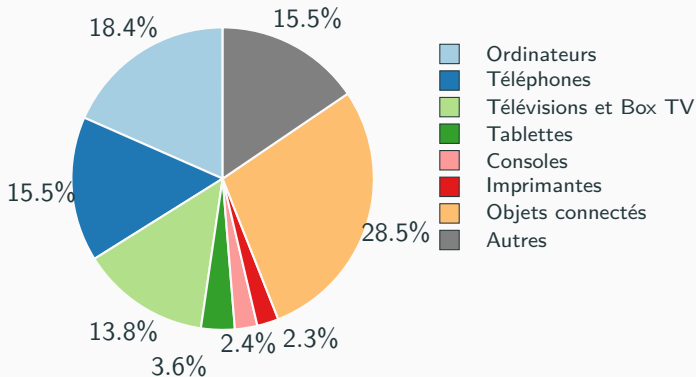
Terminaux	Smartphones	3,5 milliards
	autres téléphones	3,8 milliards
	disp. affichage	3,1 milliards
	objets connectés	19 milliards [3-30 milliards]
Réseaux	box DSL/fibre	1,1 milliard
	Antennes relais	10 millions
	autres équip. actifs	200 millions
Datacentres	serveurs	67 millions de serveurs

¹Bordage, 2019.

Le numérique en France : les équipements

Chiffres-clefs pour la France²

631 millions d'équipements, 58 millions d'utilisateurs (environ 11 appareils / utilisateur)



²Bordage, Montenay, and Vergeynst, 2021.

Quelques chiffres³ (France, 2019) :

- 88 % des Français connectés
- Taux d'équipement : téléphones 95 %, dont smartphones 77 %, ordinateurs 76 %
- Dispositifs utilisés pour se connecter majoritairement à Internet : smartphone 51 %, ordinateur 31 %, tablette 6 %

³Crédoc, 2019.

Quelques chiffres³ (France, 2019) :

- 88 % des Français connectés
- Taux d'équipement : téléphones 95 %, dont smartphones 77 %, ordinateurs 76 %
- Dispositifs utilisés pour se connecter majoritairement à Internet : smartphone 51 %, ordinateur 31 %, tablette 6 %

En résumé : une population française ultra-équipée, ultra connectée, et avec un usage surtout mobile des réseaux (NB : attention aux disparités que ces chiffres cachent).

³Crédoc, 2019.

⁴Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.

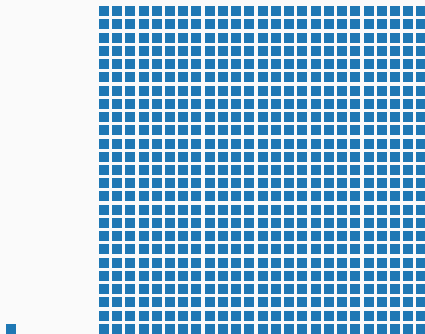
Usage des réseaux⁴

- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 ZO (= $1,5 \times 10^{21}$ O = 1,5 milliards de disques 1 TO)
- 2002 : 3,2 EO ($\approx 500 \times$ moins)

⁴Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.

Usage des réseaux⁴

- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 ZO (= $1,5 \times 10^{21}$ O = 1,5 milliards de disques 1 TO)
- 2002 : 3,2 EO ($\approx 500 \times$ moins)

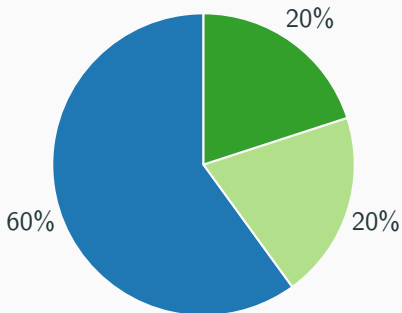


⁴Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.

Usage des réseaux⁴

- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 ZO (= $1,5 \times 10^{21}$ O = 1,5 milliards de disques 1 TO)
- 2002 : 3,2 EO ($\approx 500 \times$ moins)

Répartition du trafic :

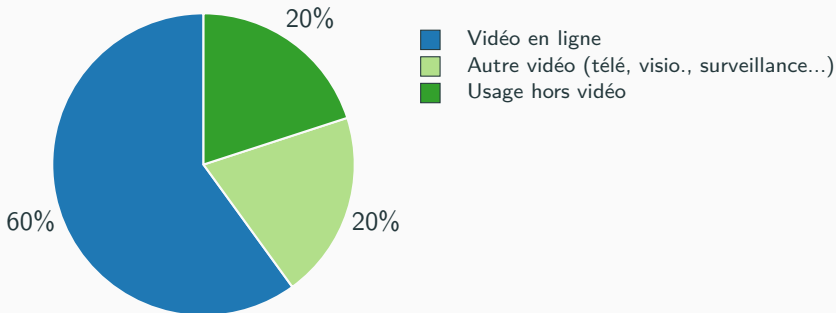


⁴Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.

Usage des réseaux⁴

- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 ZO (= $1,5 \times 10^{21}$ O = 1,5 milliards de disques 1 TO)
- 2002 : 3,2 EO ($\approx 500 \times$ moins)

Répartition du trafic :

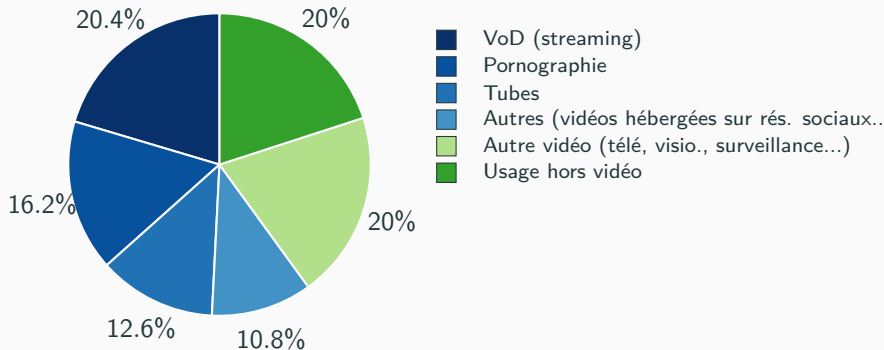


⁴Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.

Usage des réseaux⁴

- 2017, ensemble du trafic IP : 1,5 ZO (= $1,5 \times 10^{21}$ O = 1,5 milliards de disques 1 TO)
- 2002 : 3,2 EO ($\approx 500 \times$ moins)

Répartition du trafic :



⁴Cisco, 2019; The Shift Project, 2019.

Quelques chiffres pour le Web⁵

⁵Internet Archive, 2021; Internet Live Stats, 2021.

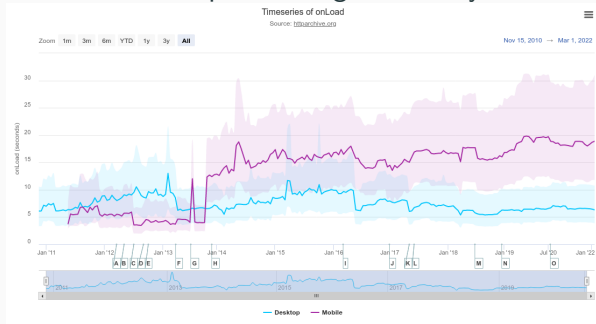
Quelques chiffres pour le Web⁵

- environ $1,9 \times 10^9$ sites web (2021)
- dont environ 200×10^6 actifs

⁵Internet Archive, 2021; Internet Live Stats, 2021.

Quelques chiffres pour le Web⁵

Focus sur le temps de chargement moyen d'une page Web :



⁵Internet Archive, 2021; Internet Live Stats, 2021.

Quelques chiffres pour le Web⁵

Focus sur le temps de chargement moyen d'une page Web :

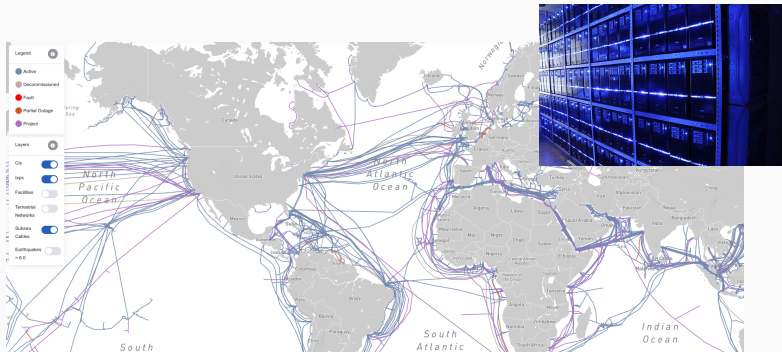


Question à emporter : *Pensez-vous que les dispositifs ont eu une puissance de calcul constante sur cette période ?*

⁵Internet Archive, 2021; Internet Live Stats, 2021.

Derrière les réseaux...

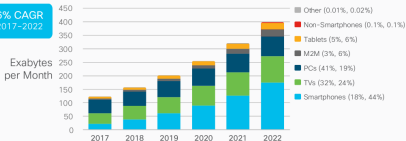
Et encore une fois, tout ceci n'a rien de virtuel...



(source <https://www.infrapedia.com/app>)

Une très forte croissance⁶

26% CAGR
2017-2022



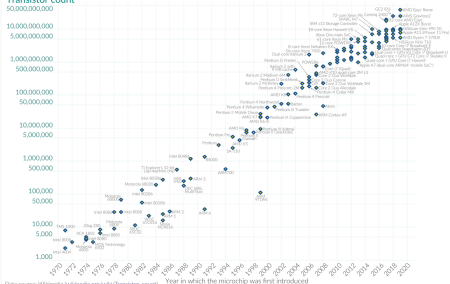
* Figures (n) refer to 2017, 2022 traffic share
Source: Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years

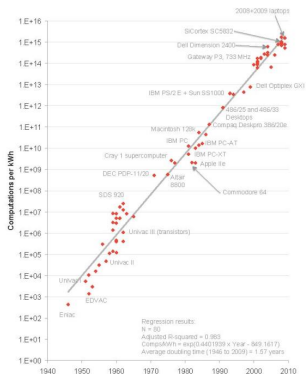
Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing - such as processing speed or the price of computers.

Our World
in Data

Transistor count



Data source: Wikipedia (wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
OurWorldInData.org - Research and data to make progress against the world's largest problems.
Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.



Regression results:
N = 80
Adjusted R-squared = 0.983
CompSWH = exp(0.4401939 * Year - 969.1617)
Average doubling time (1946 to 2009) = 1.57 years

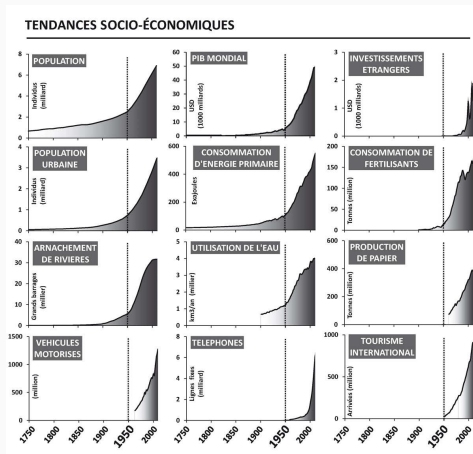
⁶Sources : Cisco, OurWorldInData, J.Koomey

La grande accélération : les usages

Cela vous rappelle quelque chose ?

La grande accélération : les usages

Cela vous rappelle quelque chose ?



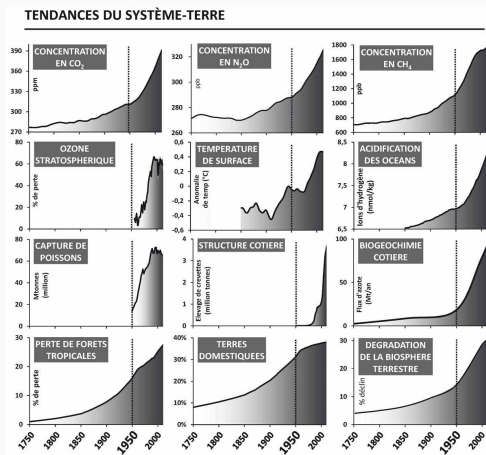
Servigne and
Stevens, 2015; W.
Steffen et al., 2015

La grande accélération : les impacts

Tendances socio-économiques → impacts sur le système-Terre ?

La grande accélération : les impacts

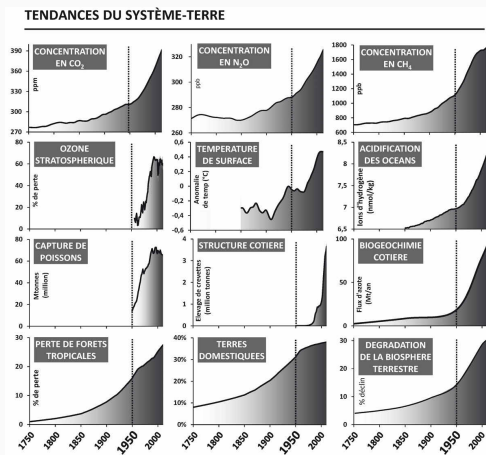
Tendances socio-économiques → impacts sur le système-Terre ?



Servigne and Stevens,
2015; W. Steffen et
al., 2015

La grande accélération : les impacts

Tendances socio-économiques → impacts sur le système-Terre ?



Servigne and Stevens,
2015; W. Steffen et
al., 2015

→ Le numérique a donc probablement un impact sur la planète.

Message à emporter

- Numérique \neq virtuel / immatériel
- Nous sommes envahis d'objets numériques bien réels
- Le nombre de ces objets est en forte croissance (en particulier objets connectés)
- L'usage du numérique connaît une croissance exponentielle

Menu du jour

Amuse-bouche : le numérique

Entrée : l'état du monde

Plat de résistance : les impacts directs

Dessert : Effets rebonds et indirects

Conclusion

- Trois groupes de travail :
 - **Groupe 1** : aspects scientifiques du changement climatique
 - **Groupe 2** : conséquences, vulnérabilité et adaptation
 - **Groupe 3** : atténuation du changement climatique (politiques)
- Dernier rapport du WG1 (AR6, août 2021) : 234 participants (par Zoom...), 65 pays, 14000+ publications
- Dernier rapport du WG2 (AR6) sorti en février 2022

À propos de climat : quelques chiffres

- Émissions cumulées depuis 1850 ≈ 2400 GTeqCO₂
- Émissions actuelles ≈ 45 GTeqCO₂
- Origine anthropique **avérée**

$\Delta \overline{T}_{global}$	< 1.5°C (RCP1.9)	< 2°C (RCP2.6)
Budget (GtCO ₂)	< 500 GtCO ₂	≈ 1000 GtCO ₂
50% de réduction en	2030 (7%/an)	2050 (2.5%/an)
Émissions nettes 0 (neutralité)	2050	2080
Émissions nettes négatives	nécessaires	nécessaires

- Neutralité carbone en France d'ici 2050
 - 12 TeqCO₂ → 2 TeqCO₂
 - Concept de neutralité carbone / neutralité climatique ?

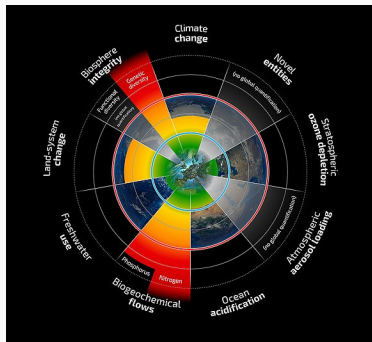
Chiffres issus de la présentation de G. Panthou à l'Ensimag

Les limites planétaires

En fait, le climat n'est qu'une petite partie du problème...

Les limites planétaires

En fait, le climat n'est qu'une petite partie du problème...

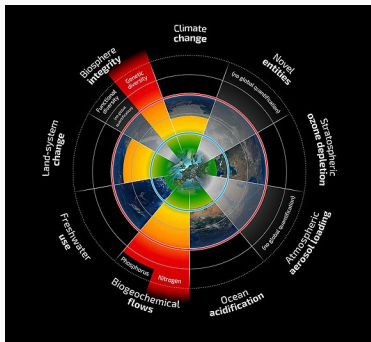


(Owenmgaffney, CC BY-SA 4.0)

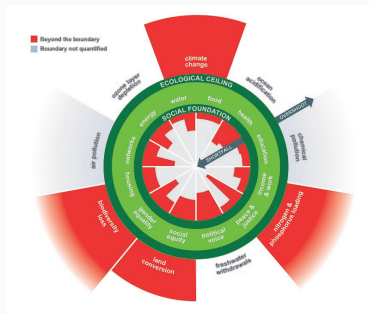
Travail original de Rockström
et al., 2009,
réactualisé par Will Steffen et
al., 2015

Les limites planétaires

En fait, le climat n'est qu'une petite partie du problème...



(Owenmgaffney, CC BY-SA 4.0)
Travail original de Rockström
et al., 2009,
réactualisé par Will Steffen et
al., 2015



(DoughnutEconomics, CC BY-SA
4.0)

Menu du jour

Amuse-bouche : le numérique

Entrée : l'état du monde

Plat de résistance : les impacts directs

Dessert : Effets rebonds et indirects

Conclusion

Numérique et environnement⁷

Bon. Maintenant quel est le lien entre numérique et environnement ?

⁷Chiffres et tendances des prochains slides : étude GreenIT (Bordage, 2019)

Bon. Maintenant quel est le lien entre numérique et environnement ?

D'abord quelques chiffres globaux...

Attention

Ces chiffres ne sont pas à prendre au pied de la lettre, mais en tant qu'ordres de grandeur.

- Consommation d'énergie primaire (EP) : 4,2 %
- Émissions de GES (GES) : 3,8 %
- Consommation d'eau (eau) : 0,2 %
- Consommation d'électricité (Elec.) : 5,5 %

≈ 2-3 × la France

⁷Chiffres et tendances des prochains slides : étude GreenIT (Bordage, 2019)

Bon. Maintenant quel est le lien entre numérique et environnement ?

D'abord quelques chiffres globaux...

Attention

Ces chiffres ne sont pas à prendre au pied de la lettre, mais en tant qu'ordres de grandeur.

- Consommation d'énergie primaire (EP) : 4,2 %
- Émissions de GES (GES) : 3,8 % $\approx 1,6 \times$ aviation
- Consommation d'eau (eau) : 0,2 %
- Consommation d'électricité (Elec.) : 5,5 %

$\approx 2-3 \times$ la France

⁷Chiffres et tendances des prochains slides : étude GreenIT (Bordage, 2019)

Quiz

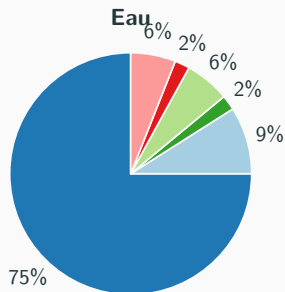
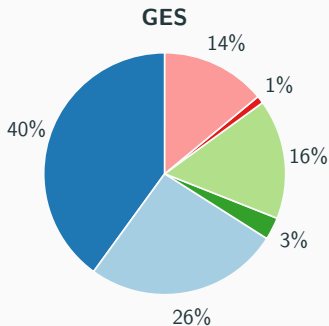
À votre avis, quelle est la source principale des impacts environnementaux (GES, eau) du numérique ?

- Fabrication terminaux
- Utilisation terminaux
- Fabrication Eq. Réseau
- Utilisation Eq. Réseau
- Fabrication datacenters
- Utilisation datacenters

Quiz

À votre avis, quelle est la source principale des impacts environnementaux (GES, eau) du numérique ?

- Fabrication terminaux
- Utilisation terminaux
- Fabrication Eq. Réseau
- Utilisation Eq. Réseau
- Fabrication datacenters
- Utilisation datacenters



Quelques tendances...

Entre 2010 et 2025 :

- GES \times 3,1
- Eau \times 2,4
- Ressources \times 2,1

Quelques tendances...

Entre 2010 et 2025 :

- GES $\times 3,1$
- Eau $\times 2,4$
- Ressources $\times 2,1$

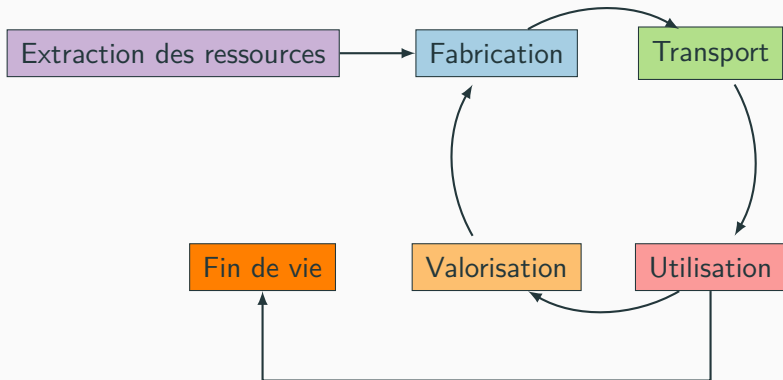
Pourquoi ?

- Objets connectés ($\times 48$)
- Doublement de la taille des écrans
- Tassement des gains en termes d'efficacité énergétique
- Équipement des pays émergents

Pour bien comprendre les impacts du numérique, il faut analyser *tout* le cycle de vie

Cycle de vie et impacts

Pour bien comprendre les impacts du numérique, il faut analyser *tout* le cycle de vie



l'Analyse de Cycle de Vie

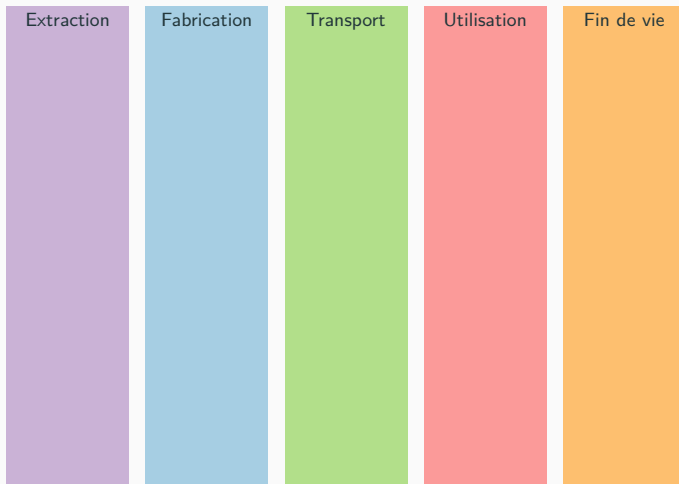
Méthodologie normalisée pour quantifier ces impacts : l'ACV.

Démarche :

L'Analyse de Cycle de Vie

Méthodologie normalisée pour quantifier ces impacts : l'ACV.

Démarche : multi-étapes



L'Analyse de Cycle de Vie

Méthodologie normalisée pour quantifier ces impacts : l'**ACV**.

Démarche : multi-étapes, multicritère

	Extraction	Fabrication	Transport	Utilisation	Fin de vie
Consommation d'énergie primaire : consommation des ressources naturelles énergétiques					
Changement climatique : émissions de gaz à effet de serre					
Destruction de la couche d'ozone					
Toxicité humaine : émissions dans l'air, l'eau, et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour l'homme					
Ecotoxicité aquatique : émissions dans l'air, l'eau et le sol de substances toxiques présentant un risque potentiel pour la faune et la flore aquatiques					
Eutrophisation des eaux : diminution de la faune et la flore aquatique due à la formation excessive d'algues consommatrices d'O ₂ favorisée par une concentration excessive de nutriments					
Consommation d'eau : consommation d'eau tout au long du cycle de vie					

Quelques mots sur l'ACV

- Méthodologie de quantification des impacts environnementaux
- Multi-étapes, multicritère
- Produit ou service (unité fonctionnelle)
- Deux grandes familles d'ACV :
 - attributionnelle : quelle part peut-être attribuée à X ?
 - conséquentielle : comment X affecte-t-il les impacts environnementaux ?

Quelques mots sur l'ACV

- Méthodologie de quantification des impacts environnementaux
- Multi-étapes, multicritère
- Produit ou service (unité fonctionnelle)
- Deux grandes familles d'ACV :
 - attributionnelle : quelle part peut-être attribuée à X ?
 - conséquentielle : comment X affecte-t-il les impacts environnementaux ?

Dans la suite de l'exposé, nous allons donner quelques clefs pour comprendre les impacts du numérique selon les étapes du cycle de vie.

Matériaux et Fabrication

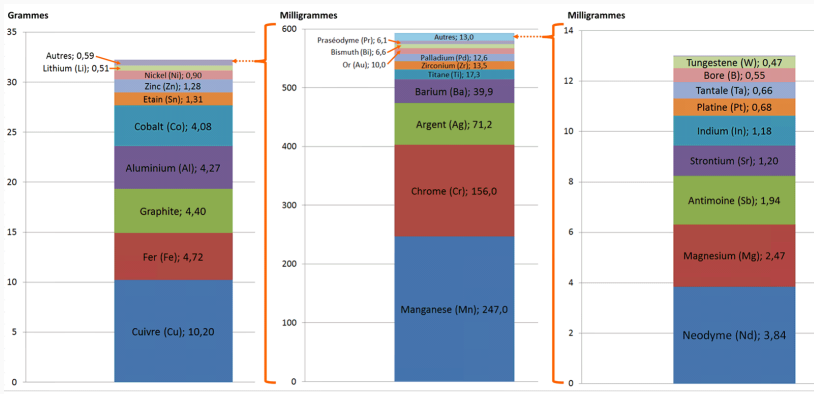
Qu'y a-t-il dans votre smartphone ?

Quiz

Parmi les éléments chimiques, on compte 86 métaux et 7 métalloïdes.

En 1950, un téléphone fixe contenait environ 12 métaux différents. Combien y en a-t-il environ dans un Smartphone de 2022 ?

Les métaux des Smartphones



Source : Sénat, 2016

Les métaux des Smartphones

Pourquoi tant de métaux ? Quelques exemples :

- Indium + étain : écrans capacitifs (tactiles)
- Gallium + autre composé (couleur) : LEDS
- Néodyme, praséodyme, terbium et dysprosium + tungstène : vibreurs
- Lithium + cobalt : batteries
- ...

Voir : <https://www.systext.org/sites/all/animationreveal/mtxsmpl/>

Les métaux des Smartphones

Pourquoi tant de métaux ? Quelques exemples :

- Indium + étain : écrans capacitifs (tactiles)
- Gallium + autre composé (couleur) : LEDS
- Néodyme, praséodyme, terbium et dysprosium + tungstène : vibreurs
- Lithium + cobalt : batteries
- ...

Voir : <https://www.systext.org/sites/all/animationreveal/mtxsmpl/>

Mais les métaux ne représentent que 40 % à 60 % du poids des éléments d'un smartphone (autres éléments : plastiques et matières synthétiques 30 % à 50 %, verre et céramique 10 % à 20 %)

De l'extraction...



De l'extraction...

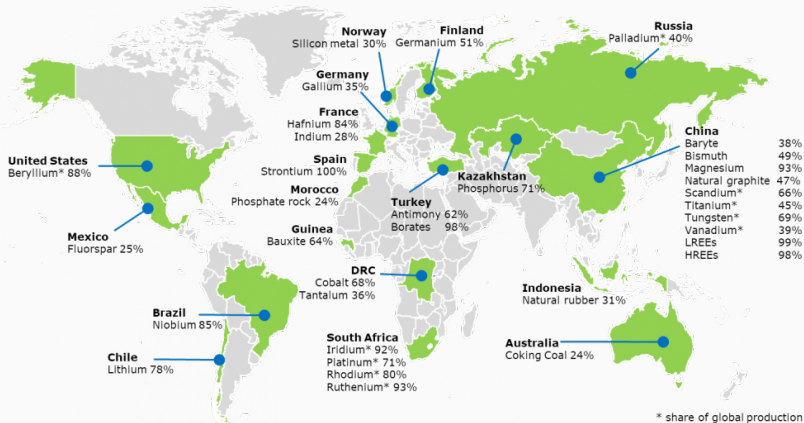


- Procédés complexes
- Très polluant : rejets d'acides, de bases, de solvants, de métaux lourds ou de déchets radioactifs
- Grandes quantités d'eau
- Des réserves limitées (quantité restante ?)...
- ...ou des concentrations très faibles (cf terres rares)

cf Aurore Stéphant (<https://www.youtube.com/watch?v=xx3PsG2mr-Y>)

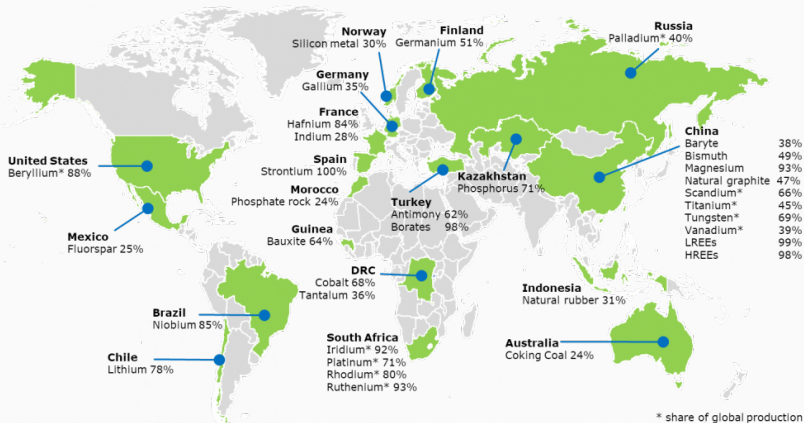
De l'extraction...

Des origines géographiques diverses (European Commission, 2018).



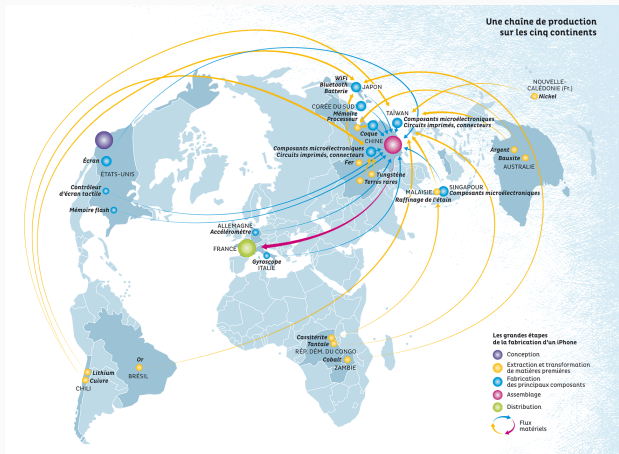
De l'extraction...

Des origines géographiques diverses (European Commission, 2018).



Avec de nombreux problèmes géopolitiques et sociaux à la clef...

...À la fabrication



Source : *Le Monde Diplomatique*, juin 2015

- Très petit nombre d'acteurs (Samsung / TSMC pour le 7nm)
- Processus d'extrême précision → matériaux ultra-purs
- → utilisation massive de produits chimiques et d'eau
- ex : > 150000 tonnes d'eau par jour pour TSMC en 2019⁸ → Problème majeur pour Taiwan en 2021⁹

⁸TSMC, 2019.

⁹Dutermé, 2021.

Usage

Phase d'usage d'un équipement

- Impact principal de la phase d'usage : *consommation d'électricité*

Phase d'usage d'un équipement

- Impact principal de la phase d'usage : *consommation d'électricité*
- La consommation électrique se mesure en Watts (puissance) et Wattheures / Joules (énergie)
- Ce **n'est pas** un indicateur environnemental pertinent
- Traduction en impact (carbone) très dépendant de la région du monde !

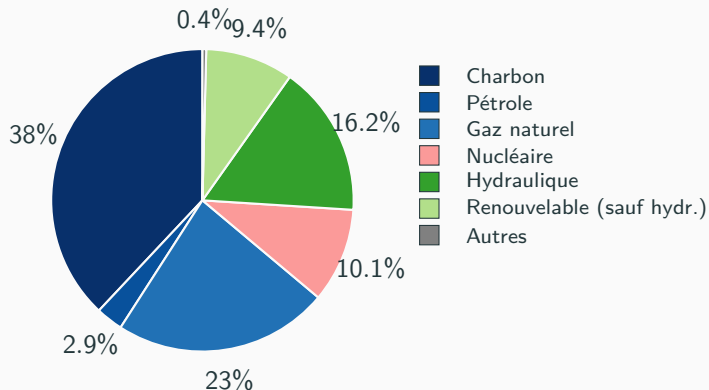
Phase d'usage d'un équipement

- Impact principal de la phase d'usage : *consommation d'électricité*
- La consommation électrique se mesure en Watts (puissance) et Wattheures / Joules (énergie)
- Ce **n'est pas** un indicateur environnemental pertinent
- Traduction en impact (carbone) très dépendant de la région du monde !

Quiz

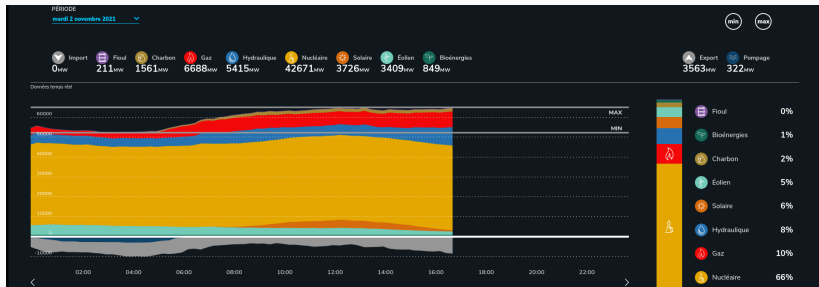
Quelle est la source d'énergie la plus utilisée pour produire de l'électricité dans le monde ?

Sources de l'énergie électrique



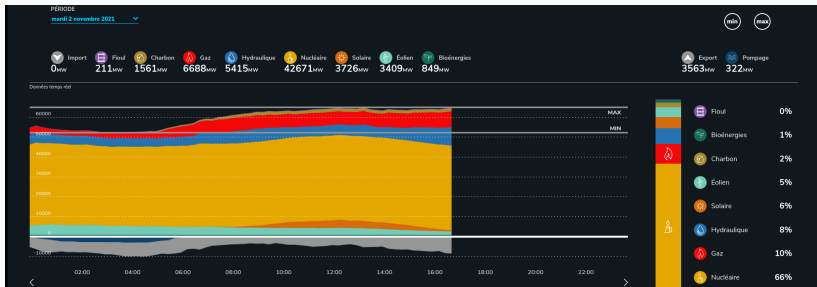
(Source Agence Internationale de l'Énergie, 2018)

Et en France...



Source <https://www.rte-france.com/eco2mix/>

Et en France...



Source <https://www.rte-france.com/eco2mix/>

France, environ 80 g/kWh ; monde : entre 2 g/kWh et 1,9 g/kWh

→ Il est primordial de prendre en compte la *région d'usage* lors d'une analyse d'impact.

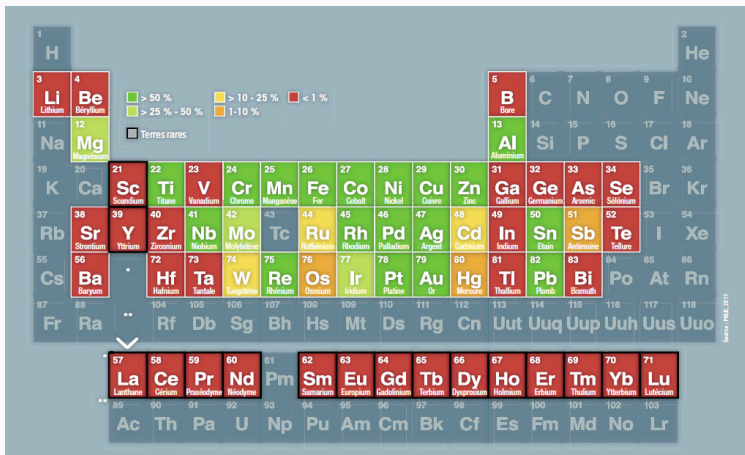
Fin de vie

- Équipement qui n'est plus utilisé → déchet
- Équipements numériques \subset Déchets d'Équipement Électriques et Électroniques (DEEE)
- Monde (2019) : collecte $\approx 17\%$ (en poids)
- France (2019) : collecte $\approx 50\%$ (en poids)

- Équipement qui n'est plus utilisé → déchet
- Équipements numériques \subset Déchets d'Équipement Électriques et Électroniques (DEEE)
- Monde (2019) : collecte $\approx 17\%$ (en poids)
- France (2019) : collecte $\approx 50\%$ (en poids)

Mais pour les dispositifs numériques...

Recyclabilité des matériaux



Source : [https://www.alternatives-economiques.fr/\[...\]](https://www.alternatives-economiques.fr/[...])

+ matériaux en quantité infime + mélangés.

Et quand ce n'est pas collecté ?

Et quand ce n'est pas collecté ?

- stocké chez les particuliers
- mis en décharge
- brûlé
- commerce ou traitement illégal...

Et quand ce n'est pas collecté ?

- stocké chez les particuliers
- mis en décharge
- brûlé
- commerce ou traitement illégal...



Message à emporter

- L'impact du numérique ne se limite pas à l'usage (loin de là)
- L'impact du numérique ne se limite pas à l'émission de GES (loin de là)
- Les dispositifs numériques actuels sont extrêmement complexes, gourmands en matériaux, et très mal recyclés
- En général, la phase la plus impactante est (de loin) la fabrication et l'extraction des matériaux
- Bien analyser les impacts est complexe : nécessite de faire une ACV (produit ou service)

Menu du jour

Amuse-bouche : le numérique

Entrée : l'état du monde

Plat de résistance : les impacts directs

Dessert : Effets rebonds et indirects

Conclusion

Solutions évidentes aux problèmes d'impact :

- augmenter l'efficacité énergétique des dispositifs
- diminuer l'impact de la fabrication
- augmenter le réemploi des dispositifs en fin de vie

Mais...

L'éléphant dans la pièce...

Solutions évidentes aux problèmes d'impact :

- augmenter l'efficacité énergétique des dispositifs
- diminuer l'impact de la fabrication
- augmenter le réemploi des dispositifs en fin de vie

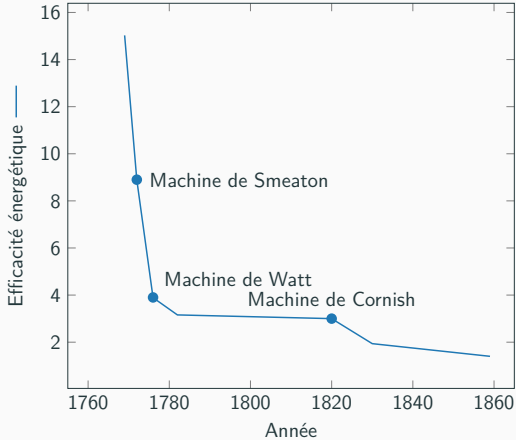
Mais...

...L'éléphant dans la pièce : les effets rebonds et indirects

Quiz

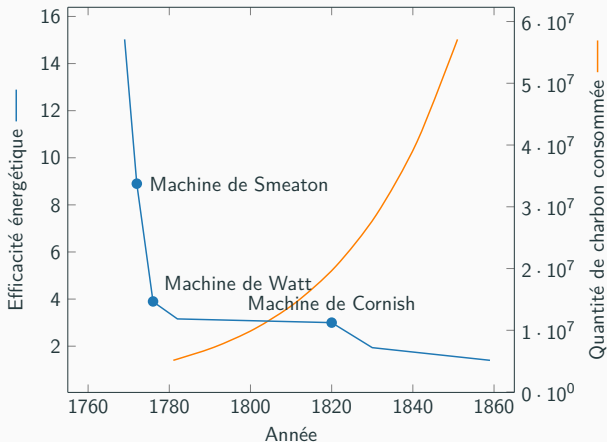
Avez-vous déjà entendu parler de l'effet rebond et du paradoxe de Jevons ?

La question du charbon



- Efficacité énergétique exprimée en nombre de livres de charbon nécessaires pour élever 1×10^6 livres d'eau d'un pied (cf Jevons, 1866 page 128)

La question du charbon



- Efficacité énergétique exprimée en nombre de livres de charbon nécessaires pour élever 1×10^6 livres d'eau d'un pied (cf Jevons, 1866 page 128)
- Quantité de charbon consommée (UK) exprimée en tonnes (cf ibid. page 238)

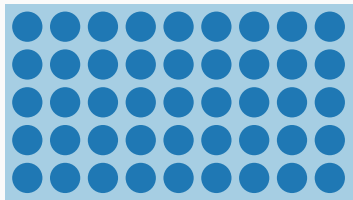
L'effet rebond



Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...

(figure inspirée de Françoise Berthoud)

L'effet rebond



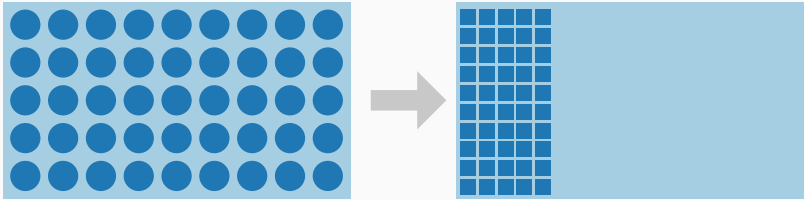
Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



Machin qui consomme de la ressource

(figure inspirée de Françoise Berthoud)

L'effet rebond



Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



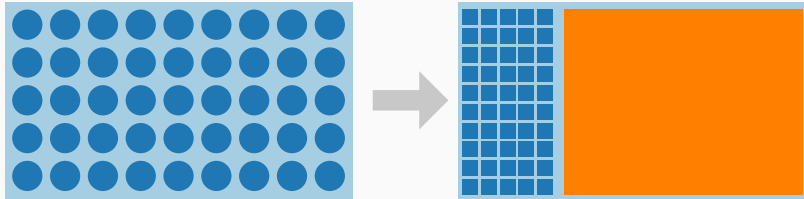
Machin qui consomme de la ressource



Truc plus efficace qui consomme de la ressource

(figure inspirée de Françoise Berthoud)

L'effet rebond



Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



Machin qui consomme de la ressource



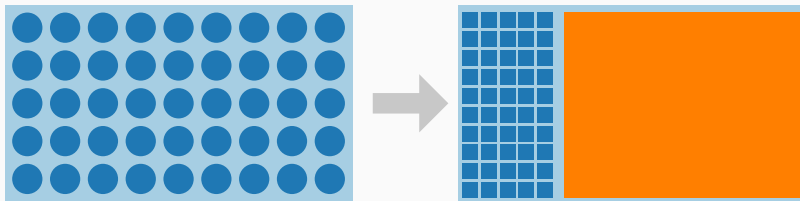
Truc plus efficace qui consomme de la ressource



Ressource libérée

(figure inspirée de Françoise Berthoud)

L'effet rebond



Ressource : matériaux, énergie, temps, argent...



Machin qui consomme de la ressource



Truc plus efficace qui consomme de la ressource

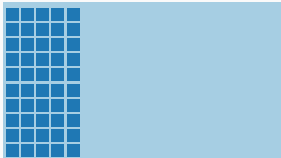


Ressource libérée

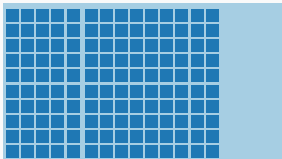
Que fait-on de cette ressource libérée ?

(figure inspirée de Françoise Berthoud)

L'effet rebond

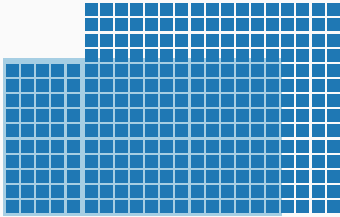


L'effet rebond



- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)

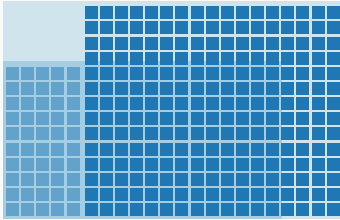
L'effet rebond



Backfire!

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)

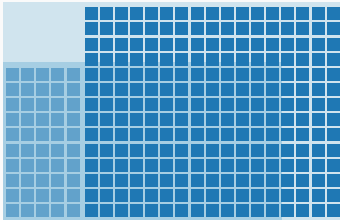
L'effet rebond



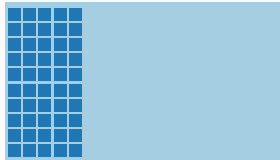
Backfire!

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)

L'effet rebond

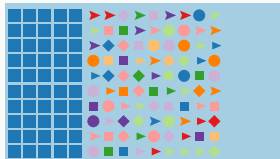
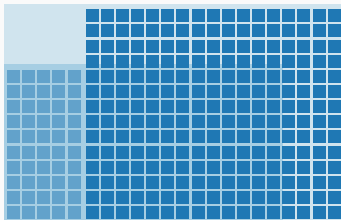


Backfire!



- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)

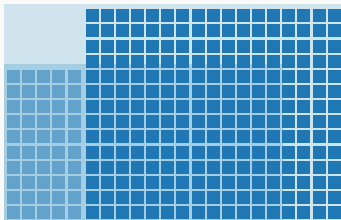
L'effet rebond



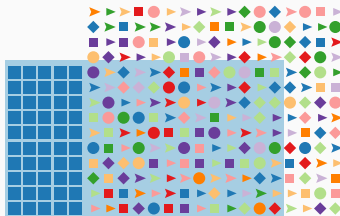
Backfire!

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)

L'effet rebond



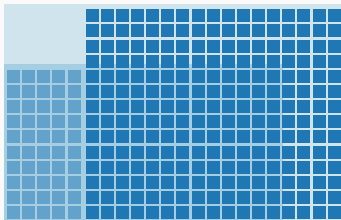
Backfire!



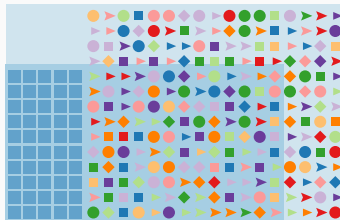
Backfire!

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)

L'effet rebond



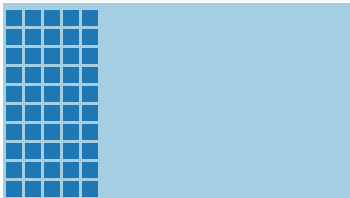
Backfire!



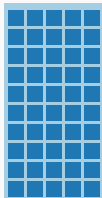
Backfire!

- On fait plus de la même chose (effets rebonds directs)
- On utilise la ressource pour autre chose (effets rebonds indirects)

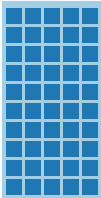
Ce qu'il faudrait (probablement) faire :



Ce qu'il faudrait (probablement) faire :



Ce qu'il faudrait (probablement) faire :



Taxonomie des effets

Taxonomie et exemple inspirés de Horner, Shehabi, and Azevedo, 2016

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie

Taxonomie des effets

Taxonomie et exemple inspirés de Horner, Shehabi, and Azevedo, 2016

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie

Exemple : déploiement d'un système GPS pour la navigation routière

- Impact de fabrication d'un système GPS
- Impact d'utilisation d'un système GPS
- Impact de traitement d'un système GPS à la fin de sa vie

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation

Exemple : déploiement d'un système GPS pour la navigation routière

- Fluidité du trafic accrue grâce au système de navigation

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution

Exemple : déploiement d'un système GPS pour la navigation routière

- Remplacement des cartes papier

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
3ème ordre		substitution
		rebond direct

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
3ème ordre		substitution
		rebond direct

Exemple : déploiement d'un système GPS pour la navigation routière

- Davantage de déplacements à cause d'un coût unitaire de déplacement diminué (trafic plus fluide)

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
substitution		
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond direct
		rebond indirect

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
substitution		
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond direct
		rebond indirect

Exemple : Système GPS pour la navigation routière

- Le temps et le coût économisés avec des services plus efficaces sont réinvestis dans des trajets en avion par exemple

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond direct
		rebond indirect
	Indirect : économie	changement structurel

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
3ème ordre		Indirect : services complémentaires
	Indirect : économie	changement structurel

Exemple : Système GPS pour la navigation routière

- Le GPS permet le déploiement de véhicules autonomes, ce qui induit une production accrue de ces nouveaux systèmes

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
		rebond direct
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond indirect
	Indirect : économie	changement structurel
	Indirect : société	transformation systémique

Taxonomie des effets

type	périmètre	effet
1er ordre	direct	impact fabrication
		impact utilisation
		impact fin de vie
2ème ordre	Indirect : service unique	optimisation
		substitution
		rebond direct
3ème ordre	Indirect : services complémentaires	rebond indirect
	Indirect : économie	changement structurel
	Indirect : société	transformation systémique

- L'arrivée des véhicules autonomes modifie en profondeur le comportement des individus, qui vont choisir par exemple d'habiter plus loin de leur lieu de travail

Le télétravail, c'est bon pour l'environnement, non ?

¹⁰[https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37\[...\]](https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37[...])

Un exemple : le télétravail

Le télétravail, c'est bon pour l'environnement, non ?

À la base, oui (cf Étude Ademe¹⁰) :

- -271 kgeqCO₂ par an et par jour de travail hebdomadaire

¹⁰[https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37\[...\]](https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37[...])

Le télétravail, c'est bon pour l'environnement, non ?

À la base, oui (cf Étude Ademe¹⁰) :

- -271 kgeqCO₂ par an et par jour de travail hebdomadaire

Quid des effets indirects ?

¹⁰[https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37\[...\]](https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/37[...])

Télétravail : effets indirects

- (-) Augmentation des flux vidéo
- (-) Nouvelles consommations énergétiques au domicile
- (-) Étapes du trajet domicile-bureau (courses, enfants...) réalisées quand même
- (-) Nouvelles mobilités quotidiennes
- (+) Réduction des surfaces de bureaux en entreprise si flex office

- (-) Augmentation des flux vidéo
- (-) Nouvelles consommations énergétiques au domicile
- (-) Étapes du trajet domicile-bureau (courses, enfants...) réalisées quand même
- (-) Nouvelles mobilités quotidiennes
- (+) Réduction des surfaces de bureaux en entreprise si flex office

Conclusion de l'Ademe : entre -31 % et 52 % de minoration / majoration des effets selon mise en place du flex office.

Télétravail : effets indirects

- (-) Augmentation des flux vidéo
- (-) Nouvelles consommations énergétiques au domicile
- (-) Étapes du trajet domicile-bureau (courses, enfants...) réalisées quand même
- (-) Nouvelles mobilités quotidiennes
- (+) Réduction des surfaces de bureaux en entreprise si flex office

Conclusion de l'Ademe : entre -31 % et 52 % de minoration / majoration des effets selon mise en place du flex office.

C'est tout ?

Des effets systémiques à suivre :

- (-) Accroissement de l'équipement numérique
- (-) Éloignement du domicile
- (+) Réduction des déplacements professionnels
- (+) Réduction de la congestion routière
- (-) Augmentation des week-ends de villégiature
- (-) Extension des domiciles privés

Des effets systémiques à suivre :

- (-) Accroissement de l'équipement numérique
- (-) Éloignement du domicile
- (+) Réduction des déplacements professionnels
- (+) Réduction de la congestion routière
- (-) Augmentation des week-ends de villégiature
- (-) Extension des domiciles privés

Tout cela reste extrêmement difficile à évaluer...

Message à emporter

- Diminution locale d'impact \nrightarrow Diminution globale d'impact
- Souvent, c'est même le contraire !
- Effets indirects (surtout systémiques) difficiles à quantifier, mais il faut les avoir en tête
- Penser de façon systémique

Menu du jour

Amuse-bouche : le numérique

Entrée : l'état du monde

Plat de résistance : les impacts directs

Dessert : Effets rebonds et indirects

Conclusion

Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent

Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent
- L'écosystème numérique a un impact considérable tout au long du cycle de vie

Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent
- L'écosystème numérique a un impact considérable tout au long du cycle de vie
- Le monde numérique connaît une croissance très importante

Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent
- L'écosystème numérique a un impact considérable tout au long du cycle de vie
- Le monde numérique connaît une croissance très importante
- Il contribue également à la grande accélération

Ce que nous avons vu aujourd'hui

- Nous avons un problème environnemental urgent
- L'écosystème numérique a un impact considérable tout au long du cycle de vie
- Le monde numérique connaît une croissance très importante
- Il contribue également à la grande accélération
- Augmenter l'efficacité énergétique ne prémunit pas contre les effets rebonds et indirects

Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

1. De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...

Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

1. De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...
2. Des changements sociétaux qui imposent des limites drastiques (contraintes choisies → objectif 0 émission)

Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

1. De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...
2. Des changements sociétaux qui imposent des limites drastiques (contraintes choisies → objectif 0 émission)
3. Un miracle technologique qui nous permet de produire de l'énergie sans polluer

Un peu de prospective pour la suite

Comment se présente l'avenir numérique ?

Plusieurs scénarios possibles à envisager (horizon 2030 ?) :

1. De grands bouleversements compromettent notre capacité à faire et utiliser le numérique : coupures d'accès au réseau électrique, pénuries d'approvisionnement...
2. Des changements sociétaux qui imposent des limites drastiques (contraintes choisies → objectif 0 émission)
3. Un miracle technologique qui nous permet de produire de l'énergie sans polluer
4. D'autres idées ?

De la science-fiction ?

- *Semi-conducteurs: la sécheresse à Taïwan risque d'amplifier la pénurie mondiale*¹¹ (Le Figaro, 21/04/21)
- *La pénurie de nickel menace la transition énergétique*¹² (Les Échos, 06/10/20)

¹¹[https://www.lefigaro.fr/flash-eco/semi-c\[...\]](https://www.lefigaro.fr/flash-eco/semi-c[...])

¹²<https://www.lesechos.fr/idees-debats/editos-analyses/la-penurie-de-ni>

Message à emporter

L'informatique de demain est une informatique pensée *avec des limites*.

Message à emporter

L'informatique de demain est une informatique pensée *avec des limites*.





Questions à emporter :

- Que fera-t-on lorsque l'on n'aura plus suffisamment de ressources pour faire fonctionner l'informatique telle qu'on la connaît aujourd'hui ?
- Quelles applications sont-elles fondamentales ? Quelles applications vous paraissent relever du luxe ?
- Si vous deviez parier sur l'informatique en 2030, dans quel genre d'applications investiriez-vous ?

-  Bordage, Frédéric (2019). *Empreinte environnementale du numérique mondial*. GreenIT.fr. URL: https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-rapport-accessible.VF_.pdf (visited on 10/01/2019).
-  Bordage, Frédéric, Lorraine de Montenay, and Olivier Vergeynst (2021). *Impacts environnementaux du numérique en France*. GreenIT.fr. URL: <https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2021/02/2021-01-iNum-etude-impacts-numerique-France-rapport-0.8.pdf> (visited on 01/17/2021).
-  Cisco (Feb. 2019). *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022 White Paper*. Tech. rep. Document ID:1551296909190103. Cisco.

-  Crédoc (2019). *Baromètre du Numérique 2019*. URL: <https://www.credoc.fr/publications/barometre-du-numerique-2019> [version%20t%C3%A9charg%C3%A9] (./ressources/BarometreNumerique2019.pdf (visited on 11/01/2021)).
-  Duterme, Renaud (May 2021). “L’industrie mondiale bientôt à sec ?” In: *Mediapart*.
-  European Commission (May 2018). *Report on critical raw materials and the circular economy*. Tech. rep. European Commission.
-  Ficher, Marion et al. (Mar. 2021). *Évaluation de l’empreinte carbone de la transmission d’un gigaoctet de données sur le réseau RENATER*. Tech. rep. <https://ecoinfo.cnrs.fr/wp->

content/uploads/2020/12/Rapport-revise-1Go-VF02-2021.pdf. Renater et Écoinfo.

-  Horner, Nathaniel C, Arman Shehabi, and Inês L Azevedo (2016). “Known unknowns: Indirect energy effects of information and communication technology”. In: *Environmental Research Letters* 11.10, p. 103001.
-  Internet Archive (2021). *State of the Web*. URL: <https://www.httparchive.org/reports/state-of-the-web> (visited on 11/02/2021).
-  Internet Live Stats (2021). *Total number of websites*. URL: <https://www.internetlivestats.com/total-number-of-websites/> (visited on 11/02/2021).
-  Jevons, William Stanley (1866). *The coal question: an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. Macmillan London.

-  Meadows, D. H. et al. (1972). *The Limits to Growth*. New York: Universe Books.
-  Meadows, D.H., J. Randers, and D.L. Meadows (2004). *The limits to growth: the 30-year update*. Chelsea Green Publishing.
-  Rockström, Johan et al. (2009). “A safe operating space for humanity”. In: *Nature* 461, pp. 472–475.
-  Sénat (2016). *100 millions de téléphones portables usagés : l'urgence d'une stratégie*. URL: <https://www.senat.fr/rap/r15-850/r15-8501.html> (visited on 11/02/2021).
-  Servigne, P. and R. Stevens (2015). *Comment tout peut s'effondrer*. Éditions du Seuil.
-  Steffen, W. et al. (2015). “The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration”. In: *The Anthropocene Review* 2.1, pp. 81–98.

-  Steffen, Will et al. (2015). “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet”. In: *Science* 347.6223.
-  The Shift Project (2019). *Climat : l'Insoutenable Usage de la Vidéo en Ligne*. Tech. rep. The Shift Project.
-  TSMC (2019). *TSMC Corporate Social Responsibility Report*. URL: <https://esg.tsmc.com/download/csr/2019-csr-report/english/pdf/e-all.pdf> (visited on 11/02/2021).
-  Turner, Graham M (2012). “On the cusp of global collapse? Updated comparison of The Limits to Growth with historical data”. In: *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society* 21.2, pp. 116–124.
-  Vitousek, Peter M et al. (1997). “Human domination of Earth’s ecosystems”. In: *Science* 277.5325, pp. 494–499.