

Impacts environnementaux du numérique

Denis Trystram⁽¹⁾ et Philippe Ciblat⁽²⁾

⁽¹⁾ENSIMAG, Université Grenoble Alpes

⁽²⁾Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris

<https://ecoinfo.cnrs.fr/>



Qu'est-ce que recouvre le numérique ?

TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) : ensemble des composants et des techniques pour le traitement et la transmission des informations numérisées

Ce que cela recouvre :

- Equipements terminaux : téléphones, ordinateurs, TV, ...
- Equipements réseaux : câbles, routeurs, stations de base
- Stockage : serveurs, centre de données
- Internet des Objets (IoT), systèmes embarqués

- Des usages (vidéo, etc.)
- Des analyses (IA, phase d'apprentissage)

C'est un domaine en (très) forte croissance

Plan

1. Introduction

- Poids du numérique
- Emballage du numérique
- Numérique et climat : la face cachée

2. Mesure de l'impact environnemental

- Problème complexe aux multiples facettes (cycle de vie)
- car pas que les émissions CO₂
- car paradoxe de Jevons (effet rebond)

3. Un exemple (simple) : courriel

4. Un exemple (plus complexe): 5G

5. Un exemple (ultra-simple) : les congrès virtuels

- Technique de remplacement
- Mais questionnement sur le rapport humain ?

6. Conclusion

Section 1 : Introduction

Quelques données pour commencer...

Avez-vous une idée de la part de numérique dans vos vies ?

6,4 écrans par foyer français en 2016 (source CSA)

- en moyenne 1,9 téléphone mobile par foyer
- Presque 95% des foyers ont au moins un écran
- 84% possèdent un ordinateur
- 56% une télévision connectée
- 45% disposent d'une tablette

78% ont au moins l'ensemble des trois (télévision, ordinateur, mobile/tablette)

Quelques données pour commencer...

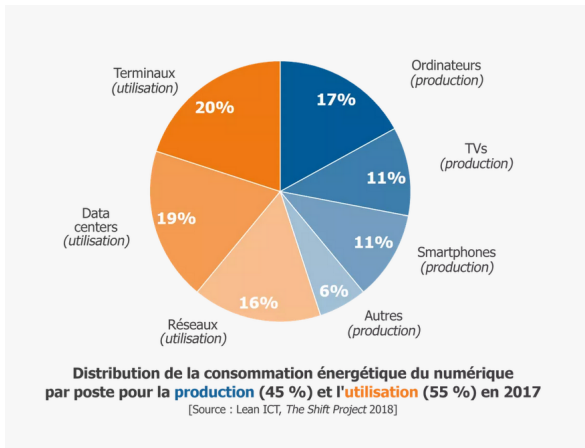
Avez-vous une idée de la part de numérique dans vos vies ?

6,4 écrans par foyer français en 2016 (source CSA)

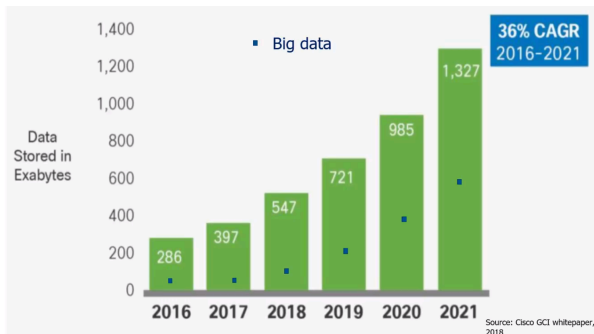
- en moyenne 1,9 téléphone mobile par foyer
- Presque 95% des foyers ont au moins un écran
- 84% possèdent un ordinateur
- 56% une télévision connectée
- 45% disposent d'une tablette

78% ont au moins l'ensemble des trois (télévision, ordinateur, mobile/tablette)

Répartition de la consommation du numérique



Des données en croissance exponentielle

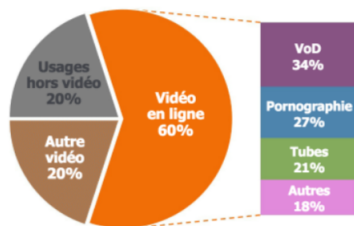


Le volume de données stockées dans les data centers double presque tous les deux ans, correspond pour 80% à des usages en entreprise, et est dopé par la diffusion des approches Big data/Intelligence Artificielle s'appuyant sur des « lacs de données »

CAGR: compound annual growth rate (taux de croissance annuel)

Quelles données ? la vidéo en ligne

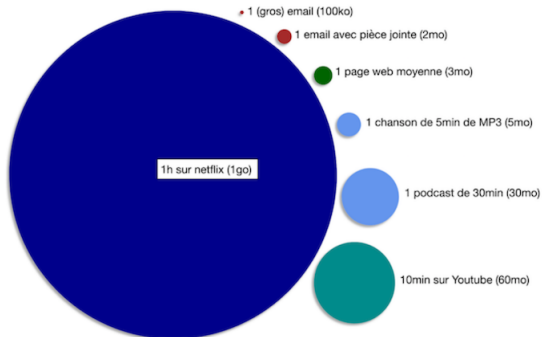
La vidéo représente 80% du trafic de données sur Internet



Répartition des flux de données en ligne
entre les différents usages en 2018 dans le monde

[Source : The Shift Project 2019 - à partir de (Sandvine 2018),
(Cisco 2018) et (SimilarWeb 2019)]

Taille des fichiers



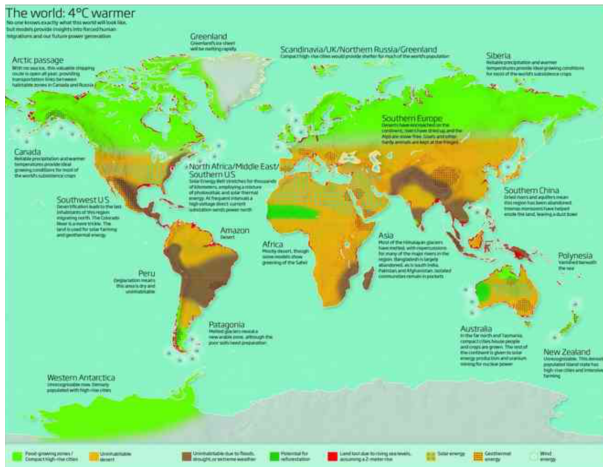
Exemple : 100 gros courriels = 2 chansons sur Deezer !

Problèmes

- Utilisation transparente et semble être gratuite...
- Croissance forte du trafic (dans le futur : 5G/6G, IoT)
- Renouvellement rapide des équipements par obsolescence

Est-ce grave ? rappel sur le réchauffement climatique

- Projection à 4 degrés en 2100 si aucun effort n'est consenti
- La France se retrouve avec le climat actuel de l'Algérie



Constat sur l'impact du numérique

L'équation

composants numériques \wedge *circulation des données*
 \Rightarrow *impact environnemental (réchauffement)*

Réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre / CO₂

Le numérique représente actuellement de 3,5 à 4% des émissions mondiales et 8 à 9% de croissance annuelle^a.

^aSource: Lean ICT, rapport du Shift Project 2018

- C'est plus que l'aviation civile... (et en forte croissance !).
- Le numérique devrait atteindre le niveau de l'automobile en 2025 si l'on reste sur les prévisions actuelles.

Constat sur l'impact du numérique

L'équation

composants numériques \wedge *circulation des données*

\Rightarrow *impact environnemental (réchauffement)*

Réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre / CO₂

Le numérique représente actuellement de 3,5 à 4% des émissions mondiales et 8 à 9% de croissance annuelle^a.

^aSource: Lean ICT, rapport du Shift Project 2018

- C'est plus que l'aviation civile... (et en forte croissance !).
- Le numérique devrait atteindre le niveau de l'automobile en 2025 si l'on reste sur les prévisions actuelles.

Constat sur l'impact du numérique

L'équation

composants numériques \wedge *circulation des données*

\Rightarrow *impact environnemental (réchauffement)*

Réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre / CO₂

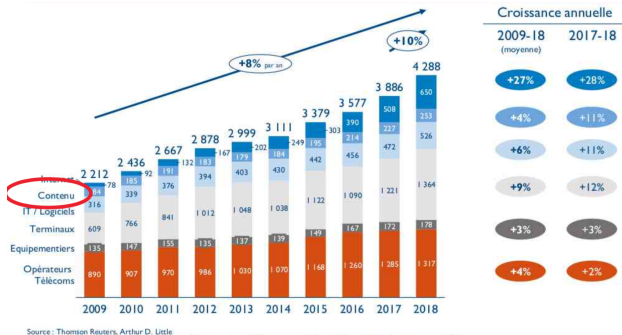
Le numérique représente actuellement de 3,5 à 4% des émissions mondiales et 8 à 9% de croissance annuelle^a.

^aSource: Lean ICT, rapport du Shift Project 2018

- C'est plus que l'aviation civile... (et en forte croissance !).
- Le numérique devrait atteindre le niveau de l'automobile en 2025 si l'on reste sur les prévisions actuelles.

Croissance du numérique...

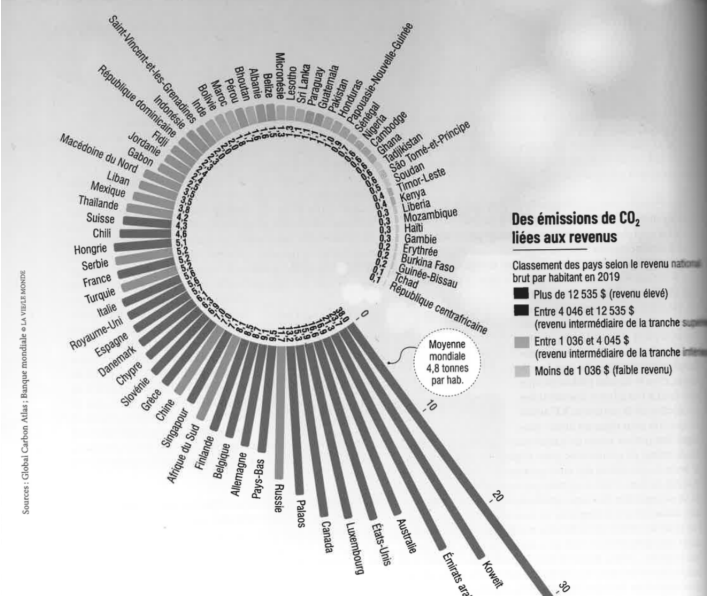
Ce n'est pas fini ! Marché mondial en milliards d'euros.



Techniques de résolution

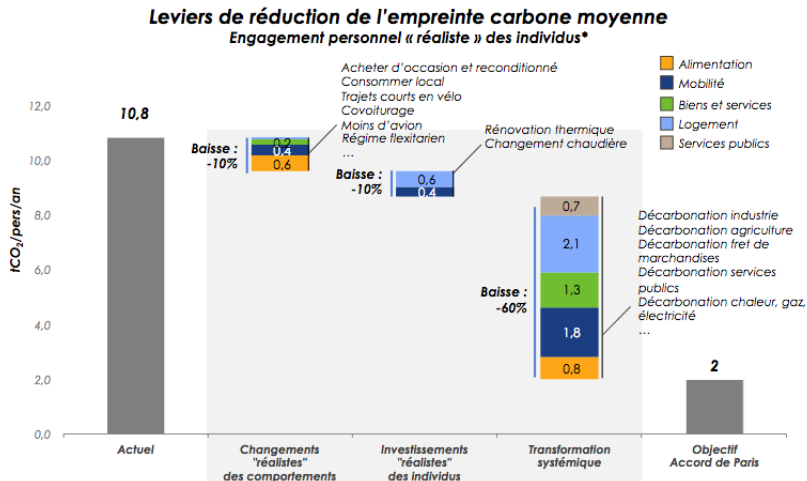
- Du TIC vert/verdâtre
- Du TIC pour le vert (villes intelligentes ?)
- C'est plus compliqué !

Répartition mondiale



Objectif des accords de Paris (COP21 en 2015)

Cible : limitation à 1,5 degré maximum en 2030
(source Carbone4).



Section 2 : Mesure de l'impact environnemental

Comment évaluer/mesurer tout cela ?

Il existe de fortes disparités dans la manière de mesurer.

Exemple : requête sur Internet

mobilise un terminal (téléphone ou ordinateur), connexion sans fil 4G/Wifi, box Internet, routeurs/réseau, pare-feu, serveurs dans un gros centre de données, et ceci dans les deux sens !

Des difficultés structurelles

- Pas ou peu de statistiques disponibles
- Peu de données accessibles (concurrentiel)
- ACV constructeurs biaisées (trop optimistes)
- Fortes disparités des composants et évolutions trop rapides
- Complexité des modèles (multi-factoriel)

Comment évaluer/mesurer tout cela ?

Il existe de fortes disparités dans la manière de mesurer.

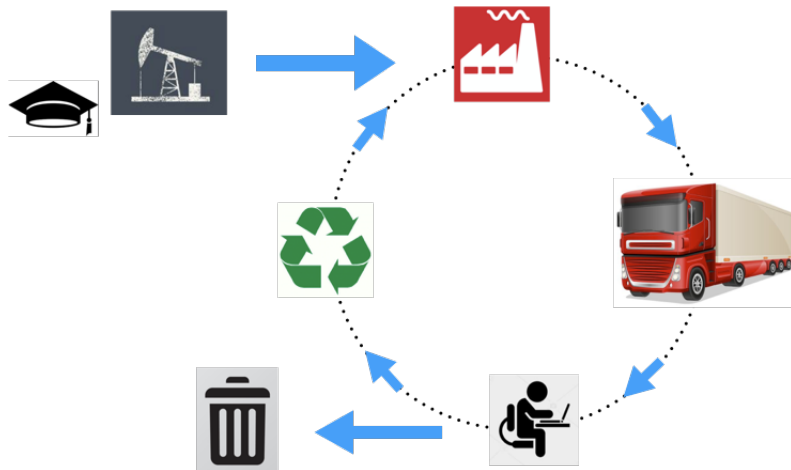
Exemple : requête sur Internet

mobilise un terminal (téléphone ou ordinateur), connexion sans fil 4G/Wifi, box Internet, routeurs/réseau, pare-feu, serveurs dans un gros centre de données, et ceci dans les deux sens !

Des difficultés structurelles

- Pas ou peu de statistiques disponibles
- Peu de données accessibles (concurrentiel)
- ACV constructeurs biaisées (trop optimistes)
- Fortes disparités des composants et évolutions trop rapides
- Complexité des modèles (multi-factoriel)

Analyse du cycle de vie (ordinateur portable)



Conception // Matières premières / fabrication /
transport-distribution / utilisation / valorisation // fin de vie

Avez-vous une idée de la répartition dans chaque phase ?










L'impact de l'utilisation n'est pas forcément la plus grande part !
Nous allons développer différents volets :

- extraction de matières premières
- fabrication
- fin de vie

Une lourde contribution pour la planète

Les principaux métaux utilisés dans le Numérique (source Ecoinfo)

Grroupe → ↓ Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo		44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi			
7			**															
	*Lanthanides (Terres rares)			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd		62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
	**Actinides				90 Th		92 U											

	Conducteurs, contacteurs, interrupteurs		Soudures		Optoélectronique
	Batteries		Condensateurs		Divers (autres)
	Retardateur de flamme		Divers (précieux)		Autres

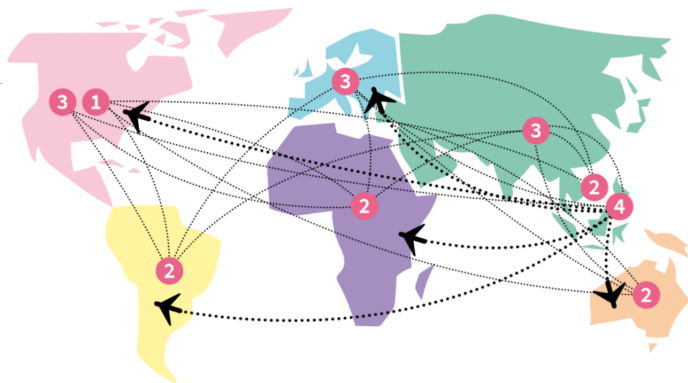
Pour donner une idée : il faut 8.500 kg de roche pour extraire 1 kg de Vanadium (batteries)

Mine à ciel ouvert



Coût énergétique de la fabrication

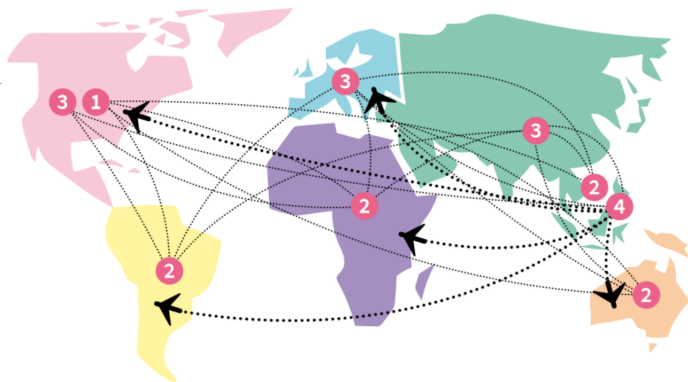
A travers l'exemple d'un smartphone (source Ecoinfo)



Le saviez-vous ? Il a fait presque 4 fois le tour du monde !

Coût énergétique de la fabrication

A travers l'exemple d'un smartphone (source Ecoinfo)



Le saviez-vous ? Il a fait presque 4 fois le tour du monde !

Un premier exemple

Etude d'Apple en 2019 sur les portables MacBook 16 pouces stockage 512 Go, fréquence 2,6 GHz.

- La phase d'utilisation en première main est considérée à 4 ans.
- l'empreinte Carbone est de 394 kgCO₂e
- la fabrication constituant alors 75%
- le transport 5%, l'utilisation 19%
- la fin de vie le 1% restant.

Il faudrait utiliser cet ordinateur 4 fois plus longtemps pour que la part de l'utilisation soit du même ordre que la fabrication.

Etude similaire chez Dell en 2018 avec des conclusions similaires

Un premier exemple

Etude d'Apple en 2019 sur les portables MacBook 16 pouces stockage 512 Go, fréquence 2,6 GHz.

- La phase d'utilisation en première main est considérée à 4 ans.
- l'empreinte Carbone est de 394 kgCO₂e
- la fabrication constituant alors 75%
- le transport 5%, l'utilisation 19%
- la fin de vie le 1% restant.

Il faudrait utiliser cet ordinateur **4 fois plus longtemps** pour que la part de l'utilisation soit du même ordre que la fabrication.

Etude similaire chez Dell en 2018 avec des conclusions similaires

Un second exemple (encore pire)

Le composant Thermostat connecté *GoogleNest*, destiné à améliorer l'efficacité du chauffage, a une empreinte de 30 kgCO₂e.

La phase de production représente 82% du coût contre 15% pour l'utilisation (sur 10 ans).

Il faudrait garder le composant 55 ans pour équilibrer les deux¹.

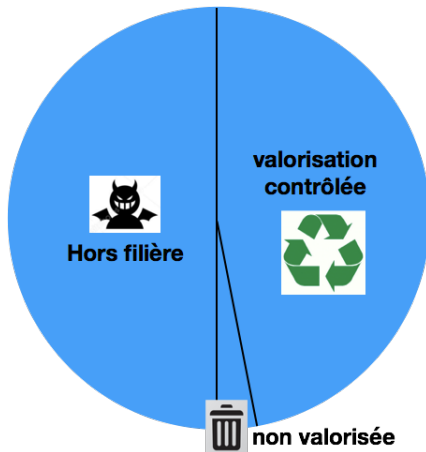
Un second exemple (encore pire)

Le composant Thermostat connecté *GoogleNest*, destiné à améliorer l'efficacité du chauffage, a une empreinte de 30 kgCO₂e.

La phase de production représente 82% du coût contre 15% pour l'utilisation (sur 10 ans).

Il faudrait garder le composant 55 ans pour équilibrer les deux¹.

La fin de vie



Décharge au Ghana



La problématique des déchets

Le problème n'est pas tant sur les émissions GES que sur la pollution.

- Hors filière – en gros la moitié
 - exports illégaux, décharges
 - oubliés dans les tiroirs
- Filières contrôlées (officielles et agréées)
 - Valorisés
 - Recyclés – 40% environ
mais seulement partiellement
 - Éliminés (poubelle)

Ce sont des ordres de grandeur, difficile à vérifier et à tenir à jour !

Recommandation

Qui n'a pas changé son équipement numérique alors qu'il fonctionnait encore ?

86% des français ont changé leur portable alors que l'ancien fonctionnait encore

Le geste le plus efficace est de **faire durer ses équipements**
Privilégier la réparation au remplacement !

Exemple : c'est un des effets non évalués du passage 4G → 5G

Un effet peut en cacher un autre: paradoxe de Jevons

Les progrès scientifiques et techniques permettent d'améliorer l'efficacité des composants électriques et électroniques ou des logiciels.

- Consommation plus frugale
- Longévité des batteries
- Pratiques plus vertueuses, etc.

Effet rebond

- Une technologie s'améliore
- L'utilisation s'en retrouve augmentée

Des exemples connus :

- Chemin de fer au XIXème siècle – développement du tourisme (J.B. Fressoz)
- *BlaBlaCar* – article sur son effet rebond dans *Le Monde* du 10 mars 2021 !

Un effet peut en cacher un autre: paradoxe de Jevons

Les progrès scientifiques et techniques permettent d'améliorer l'efficacité des composants électriques et électroniques ou des logiciels.

- Consommation plus frugale
- Longévité des batteries
- Pratiques plus vertueuses, etc.

Effet rebond

- Une technologie s'améliore
- L'utilisation s'en retrouve augmentée

Des exemples connus :

- Chemin de fer au XIX^{ème} siècle – développement du tourisme (J.B. Fressoz)
- *BlaBlaCar* – article sur son effet rebond dans *Le Monde* du 10 mars 2021 !

Un effet peut en cacher un autre: paradoxe de Jevons

Les progrès scientifiques et techniques permettent d'améliorer l'efficacité des composants électriques et électroniques ou des logiciels.

- Consommation plus frugale
- Longévité des batteries
- Pratiques plus vertueuses, etc.

Effet rebond

- Une technologie s'améliore
- L'utilisation s'en retrouve augmentée

Des exemples connus :

- Chemin de fer au XIXème siècle – développement du tourisme (J.B. Fressoz)
- *BlaBlaCar* – article sur son effet rebond dans *Le Monde* du 10 mars 2021 !

Schéma en images...

Imaginons une technologie dont la consommation énergétique est représentée à gauche sur la figure.

Un progrès arrive et fait chuter cette consommation (milieu).



Cette amélioration induit une utilisation plus grande qui au final dépasse la consommation initiale : c'est l'effet rebond !

Exemple du numérique

Depuis quelques années, on assiste à l'explosion du domaine du *BigData* et de l'apprentissage automatique.

L'impact de ce domaine dans la croissance des TIC est prépondérant.

Il y a des progrès importants à tous les niveaux qui induisent un double effet rebond.

- Augmentation du nombre d'utilisateurs
- Augmentation du volume de données traitées

Un autre exemple polémique est la 5G où l'on attend un gros effet rebond (nombre d'utilisateurs, mais surtout, changement des terminaux...).

Exemple du numérique

Depuis quelques années, on assiste à l'explosion du domaine du *BigData* et de l'apprentissage automatique.

L'impact de ce domaine dans la croissance des TIC est prépondérant.

Il y a des progrès importants à tous les niveaux qui induisent un double effet rebond.

- Augmentation du nombre d'utilisateurs
- Augmentation du volume de données traitées

Un autre exemple polémique est la 5G où l'on attend un gros effet rebond (nombre d'utilisateurs, mais surtout, changement des terminaux...).

Section 3 : Exemple (simple) – le courriel

Un exemple simple : Le poids CO₂ d'un courriel

Attention, toutes les données ne sont que des ordres de grandeur !

Il est compliqué d'estimer *précisément* le coût d'un courriel en terme de son impact CO₂. Exemple (sans stockage ni ACV):

- [Aslan2018] – 6gCO₂e pour un courriel de 1Go
- [Ficher2021] (Ecoinfo) – 2gCO₂e pour 1Go (sur Renater)

mais avec stockage et ACV 20kgCO₂e pour 1Go [Ademe2011]

Comment limiter l'impact ?

- 1 Supprimer les courriels lus ou trop vieux
 - 2 Utiliser un webmail "vert"
-
- 1 Oui, si cela n'induit pas un re-transfert ; mais il faut surtout **moins communiquer**
 - 2 Attention, vert-ueux veut souvent dire **compenser**

Comment limiter l'impact ?

- ① Supprimer les courriels lus ou trop vieux
- ② Utiliser un webmail "vert"

- ① Oui, si cela n'induit pas un re-transfert ; mais il faut surtout **moins communiquer**
- ② Attention, vert-ueux veut souvent dire **compenser**

Quelques bonnes pratiques

- Faire moins de courriels !!!
- Ecrire en mode "texte" simple (éviter HTML, etc.)
- Ne joindre que le strict nécessaire, remplacer les pièces jointes volumineuses par des liens de téléchargement
- Se désabonner des bulletins
- Eviter la 4G et préférer une connexion filaire

Une goutte d'eau ?

L'efficacité *pratique* de l'exemple précédent peut paraître (est ?) anecdotique.

En effet, l'impact des courriels est très faible au regard d'autres paramètres... Même si l'on en envoie beaucoup !

La stratégie du colibri de Pierre Rabhi (1938-2021)



- Cela s'ajoute aux autres actions
- On montre l'exemple et on introduit dans nos vies de bonnes pratiques (comme pour le recyclage des ordures ménagères)

Une goutte d'eau ?

L'efficacité *pratique* de l'exemple précédent peut paraître (est ?) anecdotique.

En effet, l'impact des courriels est très faible au regard d'autres paramètres... Même si l'on en envoie beaucoup !

La stratégie du colibri de Pierre Rabhi (1938-2021)



- Cela s'ajoute aux autres actions
- On montre l'exemple et on introduit dans nos vies de bonnes pratiques (comme pour le recyclage des ordures ménagères)

Section 4 : Exemple (compliqué) – la 5G

C'est quoi ?

Environ une nouvelle génération tous les 10 ans

- 1G: analogique
- 2G : première numérique mais voix
- 3G: données (de l'Internet mobile dans la rue : quelle idée !!!)
- 4G: données à haut débit (du sens avec écran grand et tactile)
- 5G: très haut débit, faible latence, forte connectivité

5G : trois modes

- Très grand débit (eMMB) : réseau cellulaire
- Faible latence et grande fiabilité (URLLC) : automatisation
- Grande connectivité (mMTC) : Internet des objets (IoT)

C'est comment ?

- Très haut débit : MIMO massif, plus de bandes de fréquences.
 - Latence : paquets courts (en contradiction avec fiabilité)
 - Connectivité : meilleure gestion des collisions

 - Et nouveauté protocolaire : mode veille (pourquoi pas en 4G++?)
- Consensus sur la plus grande efficacité énergétique par Hz
 - mais plus de Hz et matériel plus nombreux et plus complexe
 - **Résultat:** hausse de la consommation (sur terminaux et stations de base) + renouvellement accéléré du parc
 - Stations de base (typiquement 2 à 3 fois plus – source *Huawei*)
 - Et donc problème d'alimentation (batterie consomme le double selon *Qualcomm*)

C'est utile ? [Bieser2020]

4 études de cas

- Télétravail (eMMB) : qq % mais oublie de dire que pas besoin de 5G (passe mal les murs) et marche via Wifi/Box
- Agriculture connectée (mMTC) : très hypothétique car gain en rendement difficilement évaluable et vision industrielle de l'agriculture (Ex: ferme-école *Hectar*), d'où, deux visions du monde
 - Retour à la ferme via du travail manuel et de l'observation mais sans faire du polpotisme
 - Ferme aseptisée « ultra efficace »: viande artificielle
- Voiture autonome (mMTC): effet rebond très fort alors que transport en commun plus efficace mais moins libertaire
- Réseaux électriques intelligents (IoT) : ...

Et alors ...

- Effet rebond
 - attendu mais difficilement encore quantifiable
 - mais les annonces publicitaires n'incitent pas à diminuer la consommation
 - les opérateurs n'investissent pas pour transmettre moins de bits !
- Bataille entre réseaux gérés par des opérateurs et réseaux distribués (Wifi)
 - Solution clef en main par les opérateurs pour toutes les situations de communication (cellulaire, réseaux personnels, D2D).

Section 5 : Exemple (ultra-simple) – le congrès virtuel

Hypothèses : congrès de 300 personnes

- présentiel : 10.000km d'avion par personne (en Europe: 150 à 0km et 150 viennent à 20.000km AR)
- distanciel : visionnage de 80 vidéos par personne (1 vidéo dure 20mn donc 20 vidéos pour une journée et 4 jours de congrès)
- Présentiel: AR Paris-NY par passager = 1tCO₂e pour 12.000km ce qui donne 1km/passager= 83gCO₂e (comme une voiture). Donc $300 \times 10000 \times 83$ (gCO₂e)=249 tCO₂e
- Distanciel: 24.000 fichiers de 45Mo, d'où 1 To et donc 6kgCO₂e (sans compter le stockage ni ACV)
- Facteur 40.000 en faveur du distanciel (mais 4 avec ACV mais alors faire ACV de l'aviation: attention aux chiffres!!!)
- mais est-ce encore un congrès (réseautage inexistant)
- finalement retour aux congrès continentaux pour le présentiel !

Section 6 : Conclusion

Lutter face à l'urgence climatique

On s'empare partout du sujet :

- Institutions : Union européenne, Gouvernements
- Monde académique : universités, CNRS, sociétés savantes, etc.
- Industriels : grands groupes et start-ups
- ONG, associations, ThinkTanks, collectifs

mais on s'empare peu encore du sujet portant sur le numérique sauf

- CNRS via Ecoinfo, Labo1point5
- ESR via des conférences
- Associations ou agences indépendantes: Ademe, INR, ShiftProject, etc.

Percolation du sujet mais la technique ne sauvera pas tout car les usages (individuel et collectif) sont primordiaux

Apport de la technique

En transmissions et réseaux sans fil

- Amélioration de l'efficacité énergétique (prenant en compte les coûts fixes) mais pas nécessairement de baisse de consommation.
- Essai avec de la récupération d'énergie (et donc énergie intermittente)
- Plus de stockage distribué et en bout de ligne pour limiter les retransmissions dans le cœur du réseau

Les usages

Quelques usages consensuels et positifs

- Préserver et améliorer la santé de tous (aide au diagnostic)
- Lutter pour les grands enjeux planétaires (numérique de remplacement et analyse de données)
- Améliorer l'organisation, maîtriser les tâches complexes et réduire les tâches répétitives
- Pouvoir construire un monde plus égalitaire (accès à l'éducation pour tous)

Mais attention,

- tout ceci a un prix qu'il faut prendre en compte !
- et savoir dire non si le coût est trop élevé
- et donc qui décide des usages ?

Les usages

Quelques usages consensuels et positifs

- Préserver et améliorer la santé de tous (aide au diagnostic)
- Lutter pour les grands enjeux planétaires (numérique de remplacement et analyse de données)
- Améliorer l'organisation, maîtriser les tâches complexes et réduire les tâches répétitives
- Pouvoir construire un monde plus égalitaire (accès à l'éducation pour tous)

Mais attention,

- tout ceci a un prix qu'il faut prendre en compte !
- et savoir dire non si le coût est trop élevé
- et donc qui décide des usages ?

Une conclusion personnelle

- Numérique : domaine à fort impact sur l'environnement.
- Il y a un courant vertueux :
une certaine prise de conscience de la gravité du problème d'un développement mal/non maîtrisé du numérique.
- Malgré tout, la situation reste très inquiétante (cf. recherche en boucle ouverte sur la 6G) !

On doit interroger la tension **utilité versus futilité**.

Est-ce que la croissance du numérique (et de l'IA en particulier) est plus forte que ce qu'il apporte ?

L'intérêt général est d'aller vers un ralentissement de cette course effrénée (frénésie), avec un nécessaire **contrôle des usages** et des changements dans nos pratiques.

Une conclusion personnelle

- Numérique : domaine à fort impact sur l'environnement.
- Il y a un courant vertueux :
une certaine prise de conscience de la gravité du problème d'un développement mal/non maîtrisé du numérique.
- Malgré tout, la situation reste très inquiétante (cf. recherche en boucle ouverte sur la 6G) !

On doit interroger la tension **utilité versus futilité**.

Est-ce que la croissance du numérique (et de l'IA en particulier) est plus forte que ce qu'il apporte ?

L'intérêt général est d'aller vers un ralentissement de cette course effrénée (frénésie), avec un nécessaire **contrôle des usages** et des changements dans nos pratiques.

Bibliographie (pour aller plus loin)

- Ademe, <https://www.ademe.fr/> Guide des bonnes pratiques
- Bilans climatiques annuels du GIEC
- Pour La Science 2020, Laurent Lefèvre et Anne-Cécile Orgerie
- Rapport du Sénat sur l'impact environnemental du numérique, 2020
- Shift Project, déployer la sobriété numérique, 2019 : <https://theshiftproject.org/>
- Fabrice Flipo, l'impératif de la sobriété numérique, 2020
Fabrice Flipo et al., la face cachée du numérique, 2013
- Le Monde, Atlas de la terre, 2021
- <https://ecoinfo.cnrs.fr/>

Bonne lecture !