

TSE101 - Partie 2

Impacts environnementaux du numérique

Philippe Ciblat

Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris



Qu'est-ce que recouvre le numérique ?

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

Ce que cela recouvre :

- Equipements terminaux : téléphones, ordinateurs, TV, ...
- Equipements réseaux : câbles, routeurs, stations de base
- Equipements stockage : serveurs, centre de données
- Réseaux cellulaires, Internet des Objets, Systèmes embarqués

Usages :

- communication pair-à-pair, vidéo, jeu, robotique, ...
- appliquant souvent des analyses (ex.: décision avec IA)

C'est un domaine en (très) forte croissance

1. Bilan énergétique
 - Poids actuel du numérique
 - Poids futur du numérique ?
2. Numérique et matériaux
3. Mesure de l'impact environnemental
 - Problème complexe aux multiples facettes (cycle de vie)
 - Controverse et notion de sources fiables
 - et paradoxe de Jevons (effet rebond)
 - mais externalités positives (effet de levier)
4. Quelques exemples
 - Technique : 5G
 - Application : congrès virtuel
5. Conclusion et perspectives

Section 1 : Bilan énergétique

Quelques données pour commencer...

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

En France (chiffres INSEE 2021)

- 77% possèdent un smartphone, 18% un autre type de téléphone (personnes âgées de plus de 15 ans)
- Donc 5% ne possèdent pas de téléphone portable ! En connaissez-vous ?
- 94% des 15-21 ans ont un smartphone
- 84% des foyers possèdent un ordinateur
- 56% des foyers ont une télévision connectée

Au niveau mondial: 67% (tous âges) possèdent un téléphone mobile (+2% en 1 an ; hausse population: 1.1%)

Quelques données pour commencer...

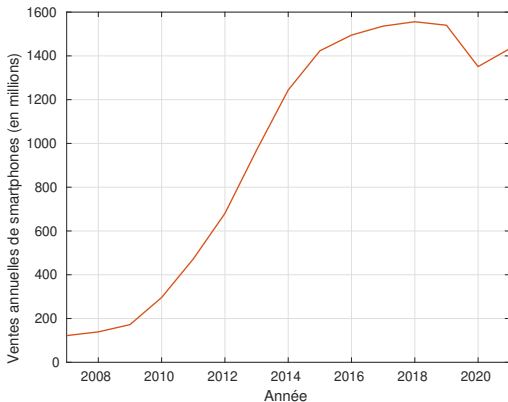
Avez-vous une idée de la part de numérique dans vos vies ?

En France (chiffres INSEE 2021)

- 77% possèdent un smartphone, 18% un autre type de téléphone (personnes âgées de plus de 15 ans)
- Donc 5% ne possèdent pas de téléphone portable ! En connaissez-vous ?
- 94% des 15-21 ans ont un smartphone
- 84% des foyers possèdent un ordinateur
- 56% des foyers ont une télévision connectée

Au niveau mondial: 67% (tous âges) possèdent un téléphone mobile (+2% en 1 an ; hausse population: 1.1%)

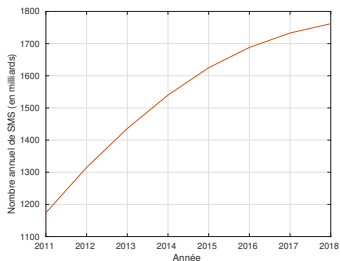
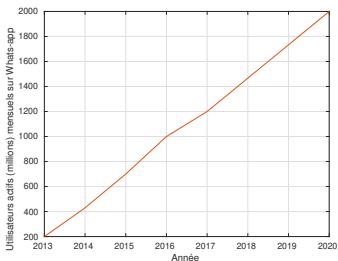
En pleine évolution sur les équipements terminaux



Ventes en millions par an de smartphones

source : Statista2022 et WeAreSocial (Ericsson)

En pleine évolution sur le trafic échangé

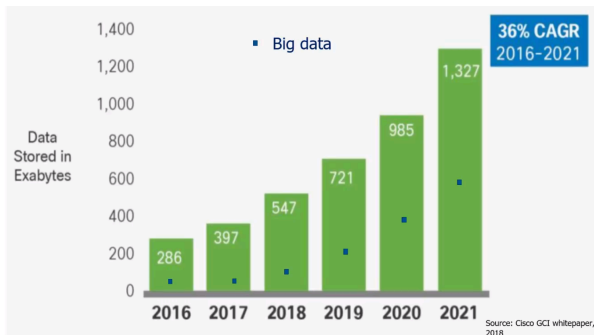


Gauche : Nombre mensuel d'utilisateurs actifs à Whatsapp (M.)
Droite : Nombre annuel de SMS (G.)

Pas de remplacement d'application mais accumulation des outils

source : Statista2022

En pleine évolution sur le stockage



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 »

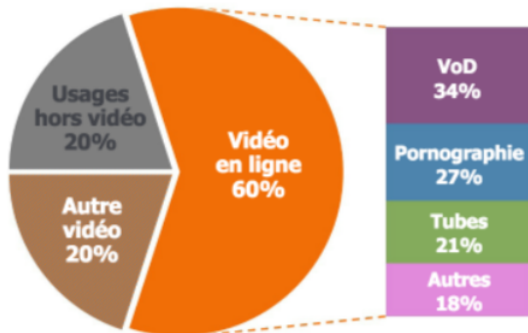
CAGR : compound annual growth rate (taux de croissance annuel)

Conclusion

Un secteur en croissance exponentielle

Quel trafic ? la vidéo en ligne

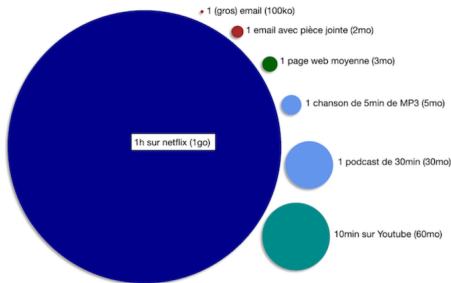
La vidéo représente 80% du trafic de données sur Internet



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

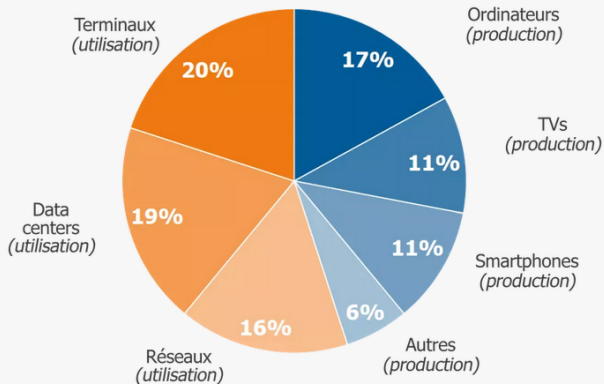


Exemple : 100 gros courriels = 2 chansons sur Deezer !

Problèmes

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

Répartition de la consommation du numérique



Distribution de la consommation énergétique du numérique par poste pour la **production (45 %) et l'**utilisation** (55 %) en 2017**

[Source : Lean ICT, *The Shift Project* 2018]

Impact du numérique sur la consommation énergétique

composants numériques et circulation des données
⇒ *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 !).

Techniques de résolution

- Du TIC vert/verdâtre : *GreenIT*
- Du TIC pour le vert : *IT for Green*
- C'est plus compliqué !

Impact du numérique sur la consommation énergétique

composants numériques et circulation des données
⇒ *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 !).

Techniques de résolution

- Du TIC vert/verdâtre : *GreenIT*
- Du TIC pour le vert : *IT for Green*
- C'est plus compliqué !

Impact du numérique sur la consommation énergétique

composants numériques et circulation des données
⇒ *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 !).

Techniques de résolution

- Du TIC vert/verdâtre : *GreenIT*
- Du TIC pour le vert : *IT for Green*
- C'est plus compliqué !

Section 2 : Numérique et matériaux

Dématérialisation ?

Le numérique, ...

- ce n'est pas virtuel
- et c'est plein de dispositifs matériels et donc de matériaux !
même l'intelligence artificielle

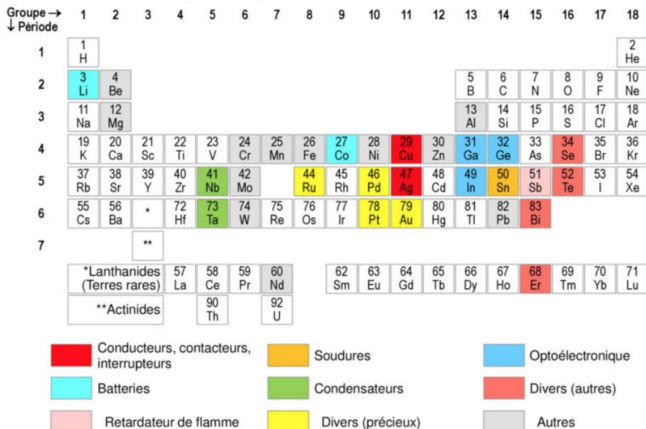


Quelques chiffres sur les centres de données (2020)

- 400TWh (nucléaire français ou 2% électricité mondiale)
- Problème : refroidissement
 - de l'eau, moins d'énergie mais biodiversité et partage d'usages
 - Power Usage Effectiveness (PUE) proche de 1.1 maintenant

Une lourde contribution minière pour la planète

Les principaux métaux utilisés dans le Numérique (source Ecoinfo)



Mine à ciel ouvert



Lithium au Canada (source: MERN) || Charbon en Allemagne

- Élément chimique peu dense : métaux mélangés à des métaux abondants (ex: 1kg de Gallium pour 50t de roches)
 - Élément chimique peu présent : 2650 fois moins de Gallium que de Fer
- mais
- petites productions annuelles car besoins limités et cruciaux : 130.000 tonnes contre 2 milliards de tonnes de Fer
 - chères : Gallium 9000 fois plus cher que le Fer
 - Propriétés exceptionnelles pour la *high tech*

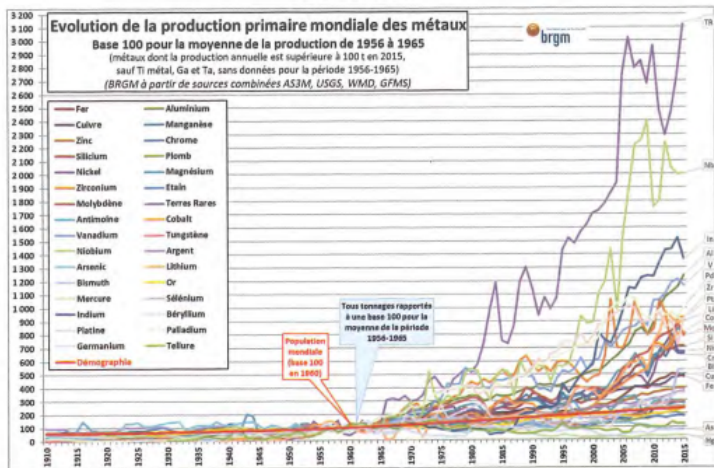
Analogie (G. Pitron - « la guerre des métaux rares »)

le sel dans le pain

- Ecrans tactiles (indium, cobalt)
- LED (gallium)
- Affichage couleur (yttrium, europium, terbium, ...)
- Amplificateur optique EDFA (erbium)
- Circuits intégrés à semi-conducteur (silicium ou germanium, gallium, films à titane ou tungstène)
- Rotor à aimants (samarium, néodyme) et non plus à bobine

Evolution de la production

ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE MONDIALE DES MÉTAUX



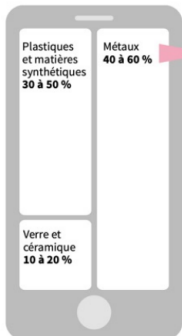
Source : BRGM.

Une petite liste d'éléments utiles

Élément	Utilisations	Réserves (ans)
Etain	Batteries	17
Lithium	Batteries	400
Or	Composants	18
Cobalt	portables, ordinateurs, aimants	57
Gallium	semi-conducteurs	1000
Germanium	fibres optiques	-
Indium	puces électroniques, écrans LCD	17
Silicium	circuits intégrés	∞
Tungstène	électronique	36
Lanthane	lentilles	-
Néodyme	laser	-
Samarium	aimants	-
Erbium	réseaux optiques	-
Thulium	radiographie	-

Un exemple: téléphone mobile

RÉPARTITION DU POIDS DES MATÉRIAUX DANS LA COMPOSITION D'UN SMARTPHONE



Source: Oeko-Institut, EcoInfo et Sénat

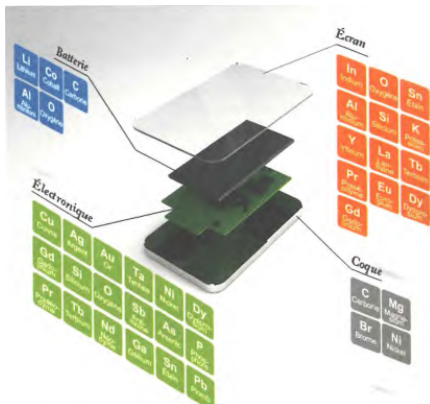
PROPORTION DES MÉTAUX

80 à 85 % de métaux ferreux et non ferreux : cuivre, aluminium, zinc, étain, chrome, nickel...

0,5 % de métaux précieux : or, argent, platine, palladium...

0,1 % de terres rares et métaux spéciaux : europium, yttrium, terbium, gallium, tungstène, indium, tantale...

15 à 20 % d'autres substances : magnésium, carbone, cobalt, lithium...



source : G. Pitron (image de droite)

Chiffres : 10g de Cobalt par téléphone portable

Problème géopolitique potentiellement majeur car production actuelle

- Terres rares: Chine (60%), Etats-Unis (15%), Birmanie (12%)
- Tungstène : Chine (85%)
- Gallium : Chine (50%)
- Cobalt : RD Congo (65%)

Ville emblématique : Baotou (Chine) et pollutions induites (hors CO₂) très importantes

- Abandon des cultures
- Air vicié
- Cours d'eau hyper pollué (arsenic, uranium, plomb, ...)

d'où taux de décès par cancer de 70% !

La problématique des déchets

Le problème n'est les émissions GES mais 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 !

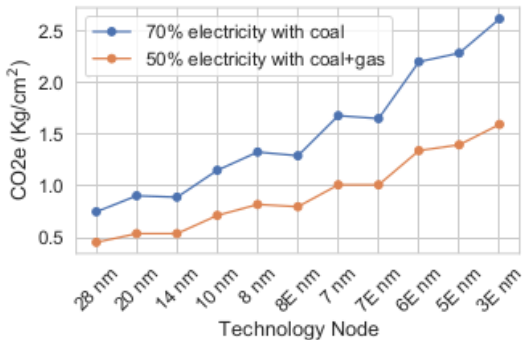
Exemple des terres rares

- Au Japon, collecte très efficace et stock de 30 ans
- mais recyclage trop cher (c'est comme rechercher le sel dans du pain rassis !)

source : F. Fizaine, "Recycler 100% des métaux, un objectif atteignable?," *The conversation*, Nov 2022

Coût énergétique de la fabrication

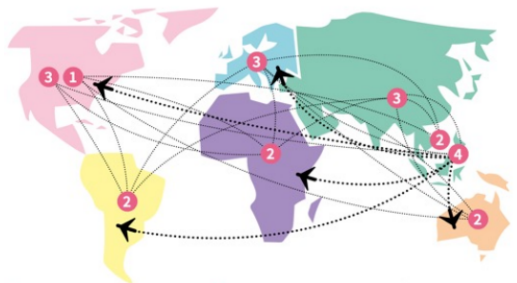
La **miniaturisation** permet de faire des circuits plus rapides et plus complexes pour la même dissipation thermique mais process industriel plus consommateur d'énergie



source : S. Tamu and P. Nair, "The dirty secret of SSD: embodied carbon", preprint Arxiv, Jul. 2022

Coût énergétique de la fabrication

Le **transport** dans le processus de fabrication d'un téléphone portable car 4 fois le tour du monde



1. Conception le plus souvent aux États-Unis

2. Extraction et transformation des matières premières en Asie du Sud-Est, en Australie, en Afrique centrale et en Amérique du Sud

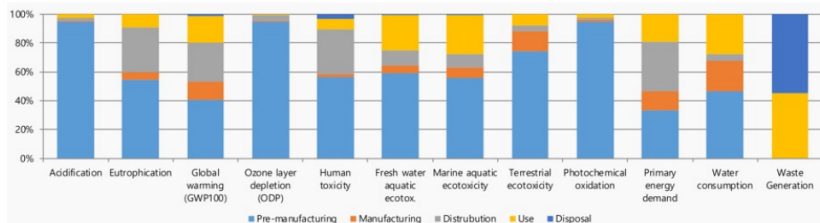
3. Fabrication des principaux composants en Asie, aux États-Unis et en Europe

4. Assemblage en Asie du Sud-Est

Distribution vers le reste du monde, souvent en avion.

Coût environnemental de la fabrication

La **pollution** dans le processus de fabrication d'un téléphone portable



source : *Life Cycle Assessment for Mobile Products, Samsung, 2018*

Section 3 : 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,

Des difficultés structurelles

- Peu de données accessibles (concurrentiel)
- Si données, souvent trop agglomérées
- Si données, souvent trop optimistes (car constructeurs)
- 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.

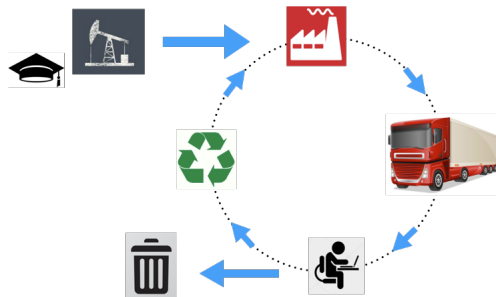
Exemple : requête sur Internet

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

Des difficultés structurelles

- Peu de données accessibles (concurrentiel)
- Si données, souvent trop agglomérées
- Si données, souvent trop optimistes (car constructeurs)
- Fortes disparités des composants et évolutions trop rapides
- Complexité des modèles (multi-factoriel)

Analyse du cycle de vie



Conception

→ matières premières → fabrication → transport-distribution

→ utilisation

→ valorisation et/ou fin de vie

L'utilisation n'est pas forcément la plus grande part !
Cela dépend de l'objet étudié

Exemple 1 : un équipement (ordinateur portable)

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 mêmes conclusions

Exemple 2 : une application (courriel)

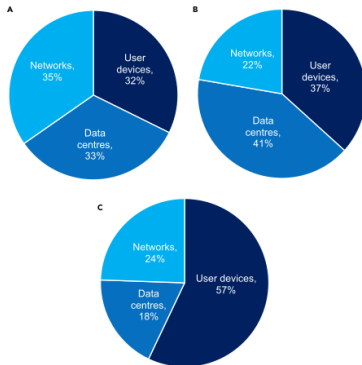
Il est compliqué d'estimer *précisément* le coût d'un courriel en terme de son impact CO₂.

Exemple (sans stockage ni ACV):

- [Aslan2018] – 6mgCO₂e pour un courriel de 1Mo
- [Ficher2021] (Ecoinfo) – 2mgCO₂e pour 1Mo (sur Renater)

mais avec stockage et ACV 20gCO₂e pour 1Mo [Ademe2011]

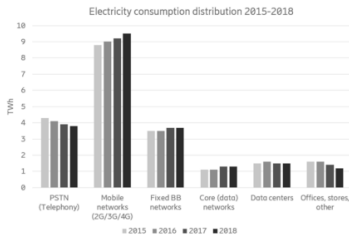
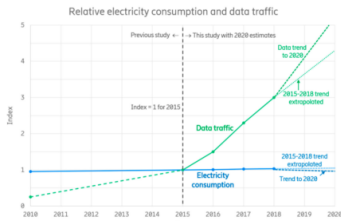
Répartition à l'intérieur d'un réseau



De plus fabrication est de 10% pour centre de données, 20% pour réseau et 50% pour terminaux

source : C. Freitag et al., "The real climate and transformative impact of ICT: a critique of estimates, trends, and regulations," *Patterns*, Sep. 2021

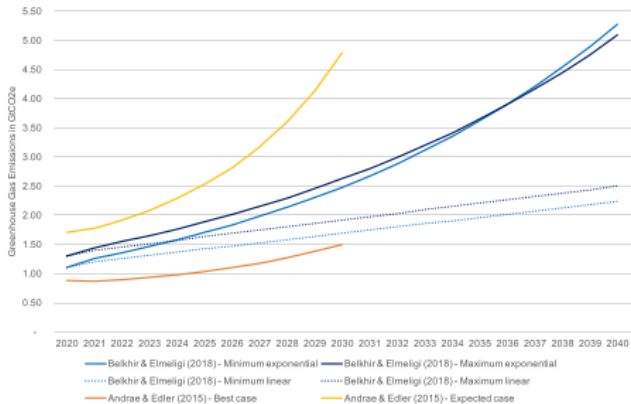
Et évolution 1



- Etude restreinte : uniquement réseaux des opérateurs et usages
- Pas de fabrication, ni terminaux, ni centre de données privé
- Les mêmes auteurs affirment (TechUKtalk 2022) que baisse de 50% d'ici 2030 car on le peut

source : D. Lunden, J. Malmodin, "Electricity consumption and operational carbon emissions of european telecom network operators," Sustainability, Fév. 2022

Et évolution 2



source : A. Andrae et T. Elder, "On the global electricity usage of communication technology: trends to 2030 ," Challenges, Juin 2015

Et donc quelle évolution ?

Deux approches :

- Mesure directe de l'électricité (seulement usage et boîte noire)
- Décomposition de chaque élément et identification de leur consommation et fabrication individuelle

Exemple : mesure Wifi (analyse de la norme ou wattmètre)

Thématique sujette à controverse car éminemment sensible :

- Qui parle : universitaires, salariés d'entreprise ?
- Qui relit : livre blanc ou papier dans des revues scientifiques ?
- Quel périmètre ? Chiffres vérifiables ? Modèles fournis pour les prévisions ?

Et pour compliquer la tâche :

- effet rebond
- effet de levier

Effet rebond

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

et finalement la consommation initiale est dépassée

Des exemples connus :

- La machine à vapeur de Watt
- Chemin de fer au XIX^{ème} siècle – développement du tourisme
- Voitures plus fiables : on roule plus et on façonne l'urbanisme
- Recyclage efficace : emballages accrus
- Chauffage : meilleure isolation et température plus élevée car plus confortable (cf. Allemagne)
- *BlaBlaCar* – article dans *Le Monde* du 10 mars 2021 !

Exemples provenant du numérique

- Amélioration des algorithmes d'apprentissage automatique
 - Augmentation du nombre d'applications les utilisant
 - Augmentation du volume de données traitées
- Amélioration de l'électronique et des batteries
 - Augmentation de l'usage du téléphone portable
 - Non-augmentation de l'autonomie des portables
- Amélioration des outils de géolocalisation
 - Plus personne ne sait où il ou elle est !
- Amélioration des générations de normes de communication
 - la consommation énergétique augmente
 - cf. la 5G : un cas d'école

Idée

Grâce au numérique, d'autres secteurs vont diminuer (drastiquement) leur consommation énergétique

- ville intelligente : exemple de Lusail
- agriculture intelligente : exemple de ferme d'aquaculture en Norvège souhaitant la 5G voire 6G
- voitures autonomes (et convois de camions) : mais transports publics plus efficace
- logistique : coordination des mouvements de véhicules (port de Livourne avec gain annuel de 250km de porte-conteneur)
- télétravail : cf. les travaux ante-covid de B. Motte-Baumvol

→ Problème à multiples entrées et souvent c'est du conditionnel sauf si secteur limité

→ Domaine à l'imagination débordante : éloge de la promesse

Section 4 : Quelques exemples

Exemple d'une technique : la 5G

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)

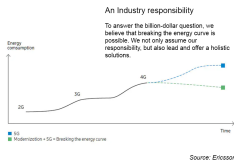
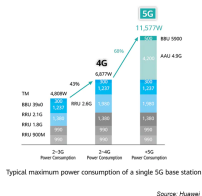
C'est comment ?

- 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 attendue de la consommation (sur terminaux et stations de base) + renouvellement accéléré du parc
 - Stations de base (typiquement 2 fois plus – *Huawei*)
 - Problème d'alimentation (batterie 2 fois plus – *Qualcomm*)

Consommation d'une station de base

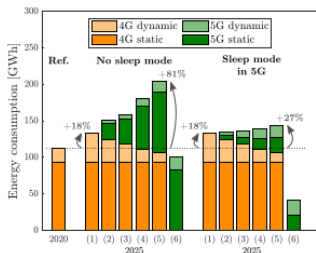


Principe de décomissionnement mais toutes fréquences ré-utilisées

source : Huawei

Quelques études (2)

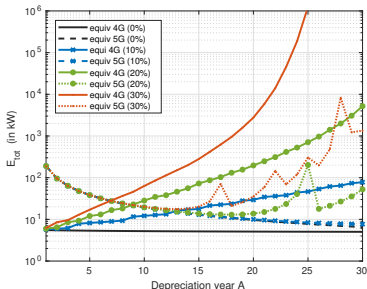
- Modèle 4G disponible : $P = P_0 + \alpha R$
- Modèle 5G : $P_{5g} = \beta P(B_{5g}/B)^{0.95} (S_{5g}/S)^{0.1}$ avec S le nombre de flots.
- Trafic (mode veille) et fabrication prise en compte (12 ans)



source : L. Golard, J. Louveaux, D. Bol, "Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints : the case of Belgium for 2022-2025," *Annals of Telecoms*, under publication

Quelques études (3)

- Modèle 4G : 4 antennes, amortissement de 10 ans déjà
- Modèle 5G : 100 antennes
- Fabrication prise en compte (dont l'écart entre antennes)



source : P. Ciblat, "A propos du MIMO massif dans un contexte de sobriété numérique," colloque Grets, Sep 2022

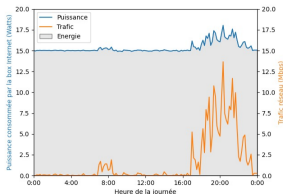
- Télétravail (eMMB) : qq % mais oublie de dire que pas besoin de 5G (passe mal les murs) et marche via Wifi/Box
- Agriculture connectée (mMTC) : très hypothétique car gain en rendement difficilement évaluable et vision industrielle de l'agriculture
- Voiture autonome (mMTC): effet rebond très fort alors que transport en commun plus efficace mais moins libertaire

source : J. Bieser et al., "Next Generation mobile networks," White paper, Oct 2020

- 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).

Élément central

- en 5G (difficile car latence faible)
- en box internet



- en serveur de calculs



source : A.-C. Orgerie (INRIA Rennes)

Hypothèses : congrès de 300 personnes

- présentiel : 10.000km d'avion par personne
 - en Europe: 150 personnes à 0 km
 - hors Europe, 150 viennent de 20.000km AR
- distanciel : visionnage de 80 vidéos par personne
 - 1 vidéo dure 20mn
 - 20 vidéos pour une journée
 - 4 jours de congrès

- Présentiel: AR Paris-NY par passager = $1\text{tCO}_2\text{e}$ pour 12.000km ce qui donne $1\text{km/passager} = 83\text{gCO}_2\text{e}$ (comme une voiture). Donc $150 \times 20000 \times 83 \text{ (gCO}_2\text{e)} = 249 \text{ tCO}_2\text{e}$
- Distanciel: 24.000 fichiers de 45Mo , d'où 1 To et donc $6\text{kgCO}_2\text{e}$ (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 serait plus pertinent ?

Section 5 : Conclusion et perspectives

On s'empare partout du sujet du réchauffement climatique et le lien avec le numérique prend de l'ampleur

- CNRS : Ecoinfo, Labo1point5
- Congrès : International Conference on ICT for Sustainability, ...
- Associations ou agences indépendantes: Ademe, INR, ShiftProject, ...
- Gouvernement: Haut comité du numérique responsable (14 nov. 2022), DINUM, Loi REEN du 15 nov 2021
- Entreprise : au minimum de la communication dessus, au mieux des études

Percolation du sujet mais la technique ne sauvera pas tout (même si elle (s') améliorera (sur) certains points) car les usages (individuel et collectif) sont aussi primordiaux

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

Honnêtement, aucune leçon n'a été tirée des controverses 5G pour élaborer la 6G. On continue comme avant.

Deux exemples :

- Zeppelin avec panneaux solaires pour remplacer les stations de base à terre. Coût énergétique dans l'étude : 0.
- Surface intelligente réfléchissante (RIS), bref des miroirs électro-magnétiques adaptables. Les disposer sur les murs pour créer des recombinaisons cohérentes de signaux. Coût énergétique dans l'étude : 0.

sources :

D. Renga et M. Meo, "Can High Altitude Platforms make 6G sustainable," IEEE Com Mag, Sep 2022

M. Di Renzo, "Smart Radio Environment empowered by RISs: state of the art and the road ahead, Jnl of Sel. Areas in Coms, Nov. 2020

- Registre distribué
- contrairement à une banque

Coût énergétique à la distribution : algorithme de consensus

- Epreuve par le travail (2008) :
 - totalement distribué,
 - mais très énergivore (consommation électrique de la Suède)
- Epreuve par l'enjeu (2011) :
 - moins distribué (avantage aux grands possesseurs de jeton)
 - et donc moins énergivore

mais peut-on encore vivre sans chaînes de blocs (comme il y a 15 ans) ?

source : J.A. Schlumberger, P. Noro, L. Zaehringer, "Blockchain et développement durable," livre blanc, Sep 2022

Et le métavers (M.) dans tout ça ?

Meta

Dans le métavers,
les étudiants pourront
apprendre en immersion.



Le métavers sera bénéfique pour l'enseignement, c'est pourquoi nous contribuons à son développement. Les étudiants en sciences vont observer des cellules virtuelles de très près et apprendre en immersion.

Même si le métavers est virtuel, son impact sera réel.

Pour en savoir plus : meta.com/MetaverseImpact/FR

IEEE International Conference on
Metaverse Computing,
Networking and Applications,
Juin 2023

- Green coms for M.
- B5G/6G for M. applications

Impact écologique réel aussi car implique 6G, IA voire CB sauf si c'est du remplacement mais ne semble pas être le cas sur la pub

Quelques usages consensuels et positifs

- Analyser le système Terre (calcul intensif pour le climat)
- Préserver et améliorer la santé de tous (aide au diagnostic)
- Permettre une communication éloignée (bref les télé-communications)

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 ? **utilité versus futilité ?**

Bibliographie (pour aller plus loin)

- Ademe, <https://www.ademe.fr>
- Ecoinfo, <https://ecoinfo.cnrs.fr/>
- Pour La Science 2020, Laurent Lefèvre et Anne-Cécile Orgerie
- Rapport sur l'impact environnemental du numérique du Sénat, 2020
- Rapport sur la 5G du Haut Conseil pour le Climat, 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
- P. Ciblat, J. Combaz, M. Coupechoux, K. Marquet, et A.-C. Orgerie, "Impacts environnementaux de la 5G (partie 1)," papier blanc, Oct. 2022