

Impacts environnementaux du numérique

Philippe Ciblat^(1,2)

- (1) Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris
- (2) EcoInfo, Groupe de Service du CNRS



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, capteurs, ...
 - réseaux : câbles, routeurs, stations de base
 - stockage : serveurs, centre de données
- Usages :
 - communication pair-à-pair, vidéo, jeu, robotique, ...
 - calculs pour l'IA, calculs pour l'image

C'est un domaine en (très) forte croissance

Plan

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...

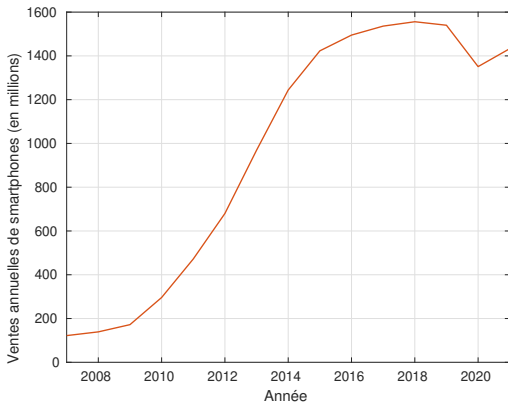
Avez-vous une idée de la part de numérique dans vos vies ?

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%)

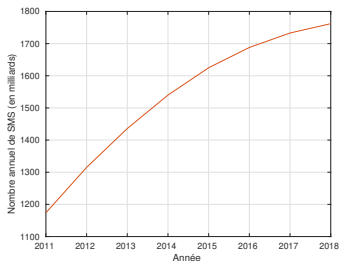
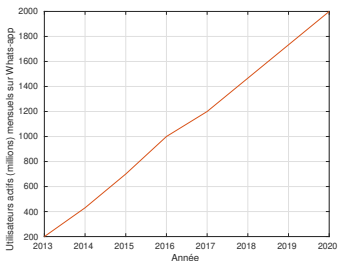
En pleine évolution sur les équipements terminaux



Ventes en millions par an de smartphones

source : Statista2022 et WeAreSocial (Ericsson)

En pleine évolution sur le trafic échangé

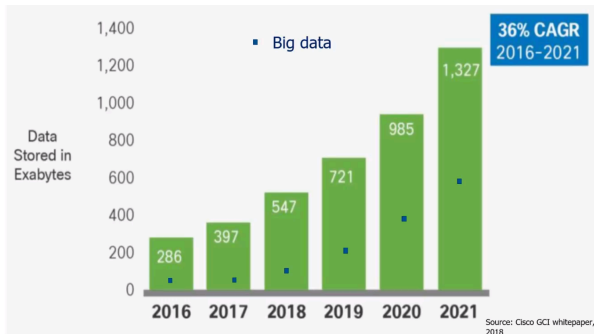


Gauche : Nombre mensuel d'utilisateurs actifs à Whatsapp (M.)
 Droite : Nombre annuel de SMS (G.)

Pas de remplacement d'application mais accumulation des outils

source : Statista2022

En pleine évolution sur le stockage

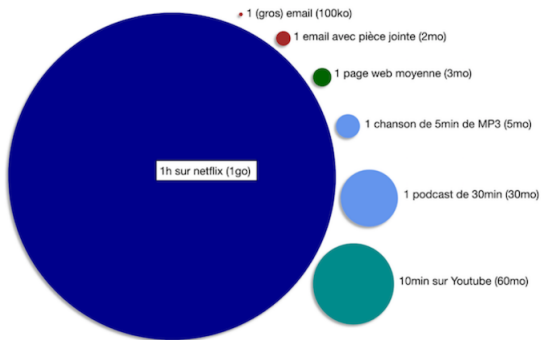


Le volume de données stockées dans les data centers double presque tous les deux ans, correspond pour 80% à des usages en entreprise, et est dopé par la diffusion des approches Big data/Intelligence Artificielle s'appuyant sur des « lacs de données »

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

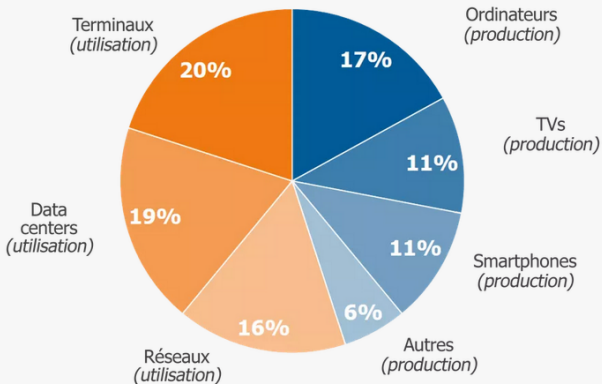
Quel trafic ? la vidéo en ligne

La vidéo représente 80% du trafic de données sur Internet



Exemple : 100 gros courriels = 2 chansons sur Deezer !

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

Réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre / CO₂

- Le numérique représente actuellement de 3,5 à 4% des émissions mondiales
- Forte croissance annuelle en trafic
- Tendance en énergie: consommation directe en hausse, matériels parfois en baisse (moins de Télé et moins d'ordinateur fixe)

C'est plus que l'aviation civile... et comme le Japon.

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

Réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre / CO₂

- Le numérique représente actuellement de 3,5 à 4% des émissions mondiales
- Forte croissance annuelle en trafic
- Tendance en énergie: consommation directe en hausse, matériels parfois en baisse (moins de Télé et moins d'ordinateur fixe)

C'est plus que l'aviation civile... et comme le Japon.

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

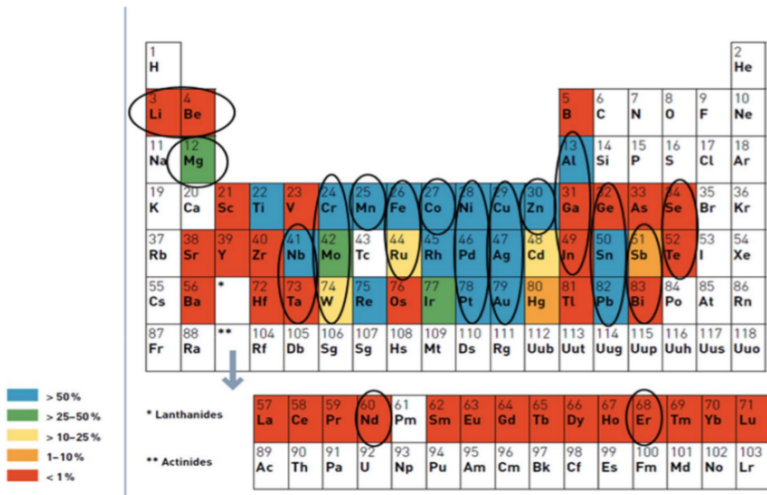


Quelques chiffres sur les centres de données (2020)

- 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



Localisation des ressources

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 pas 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
 - Eliminés (poubelle)

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

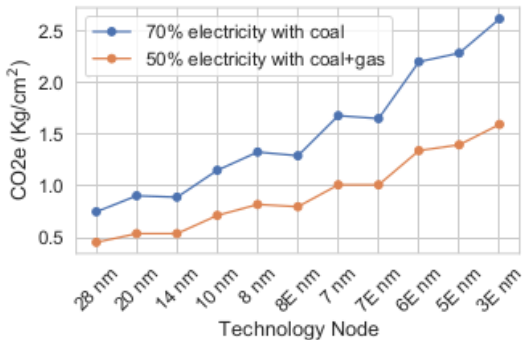
Exemple des terres rares

- 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

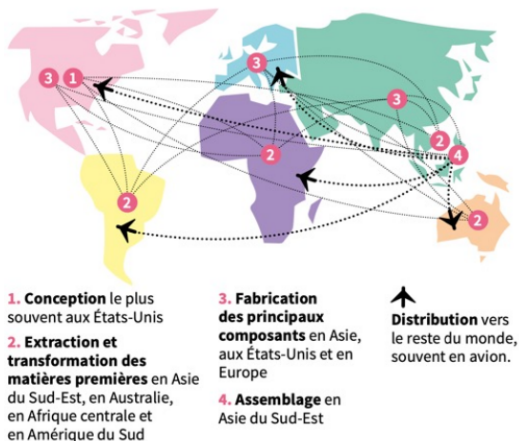
La **miniaturisation** permet de faire des circuits plus rapides et plus complexes pour la même dissipation thermique mais process industriel plus consommateur d'énergie



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

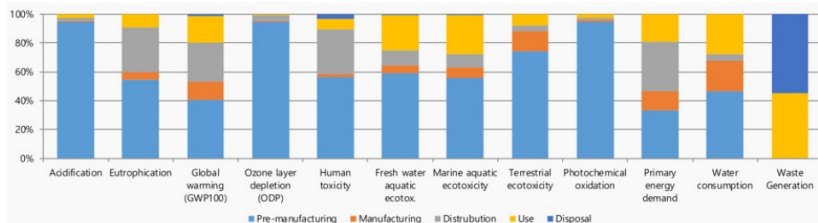
Coût énergétique de la fabrication

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



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 et de ce qu'on veut mesurer (application/action, appareil, algorithme).

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 et de ce qu'on veut mesurer (application/action, appareil, algorithme).

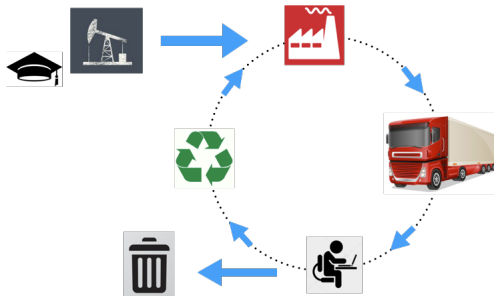
Exemple : requête sur Internet

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)

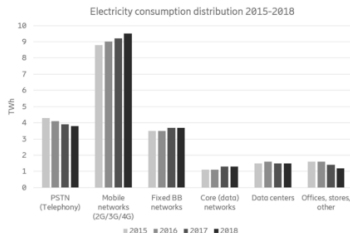
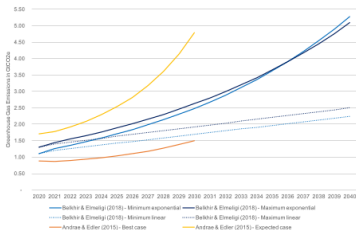
Il est compliqué d'estimer *précisément* le coût d'un courriel en terme de son impact CO₂.

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]

Quelques chiffres



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

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

Méthodologie

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)

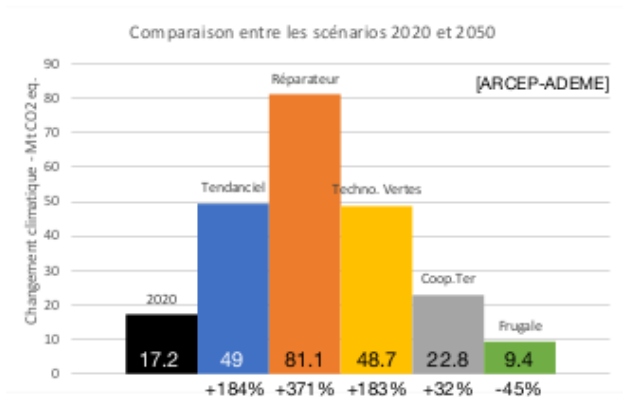
Thématique sujette à controverse car éminemment sensible :

- 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

Scénarios ARCEP



Effet rebond ou paradoxe de Jevons

Effet rebond

- Une technologie s'améliore
- L'utilisation s'en retrouve augmentée et/ou modifiée

et finalement la consommation initiale est dépassée

Classification de l'effet rebond [Combaz-Coupechoux 2022]

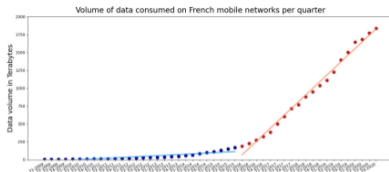
Scope	Effect	5G Examples
First order	Embodied footprint	Production of 5G equipments and devices
	Operational footprint	Operation of networks, devices, data centers
	Disposal footprint	Equipments and devices end-of-life
Second order	● Induction	5G motivates the sale of VR headsets
	● Optimization	More efficient data transfer
	● Substitution	Visio-conferencing replaces meetings
	● Direct rebound	More mobile data are consumed
Third order	● Indirect rebound	Footprint during time saved in data transfer
	● Economy-wide rebound	Structural changes in production patterns and consumption habits
	● Systemic transformation	5G modifies the way people are working and living

Des exemples historiques connus

- La machine à vapeur de Watt
- Chemin de fer au XIXème 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 générations de normes de communication
 - la consommation énergétique augmente
 - cf. la 4G ou 5G : un cas d'école [Ciblat 2022]



Effet de levier ou externalités positives

Idée

Grâce au numérique, d'autres secteurs diminuent (drastiquement) leur consommation énergétique (*enablement effect*)

Certains annoncent: 1gCO₂e consommé en TIC évite 10gCO₂e ailleurs [GSMA 2019] ; chiffre fantaisiste [Roussilhe 2021]

- 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 au résultat 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)

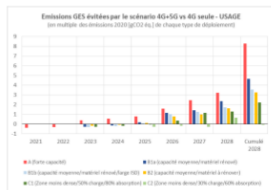
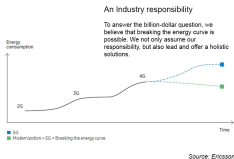
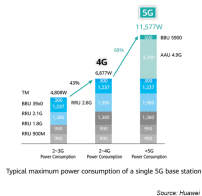
C'est comment ?

- 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++?)
- car première recommandation UIT pour la norme [ITU-R M.2410, 2017]

- 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*)

Quelques études (1)

Consommation d'une station de base ou d'un réseau (mais à l'usage)

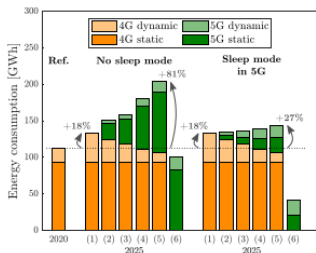


Principe de décommissionnement mais toutes fréquences ré-utilisées

source : [Huawei, Arcep]

Quelques études (2)

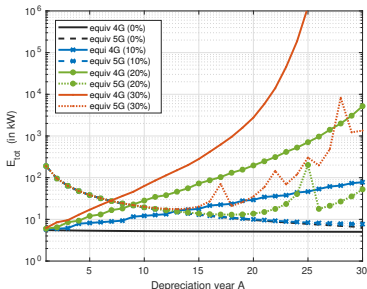
- Modèle 4G disponible : $P = P_0 + \alpha R$
- Modèle 5G : $P_{5g} = \beta P(B_{5g}/B)^{0.95} (S_{5g}/S)^{0.1}$ avec S le nombre de flots.
- Trafic (mode veille) et fabrication prise en compte (12 ans)



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*, 2023

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

C'est utile ?

- 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

Exemple d'usage : le congrès virtuel

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

Calcul

- 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

Numérique et réchauffement climatique

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

Apport de la technique: exemple sur les télécoms sans fil

- 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

La 6G

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.

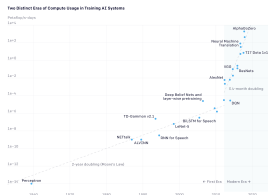
sources :

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

Apport de la technique: exemple sur l'IA

- Base de données gigantesque et problèmes complexes induisent un modèle à beaucoup de paramètres. Donc convergence lente et parfois algorithmes plus simple a une meilleure phase transitoire !



- IA frugale : mettre des contraintes de complexité dans l'optimisation des algorithmes

sources : D. Amodei et D. Hernandez, "AI and compute," OpenAI, Mai 2018
 R. Couillet, D. Trystram, T. Ménissier, "The submerged part of the AI-berg,"
 Signal Processing Mag, Sep 2022

Questionnement des usages

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 ?**

Remarque plus personnelle

- 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) !

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