

# Impacts environnementaux du numérique

Philippe Ciblat<sup>(1,2)</sup>

- (1) Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris
- (2) Ecoinfo, CNRS



# 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, ...
- réseaux : câbles, routeurs, stations de base
- stockage : serveurs, centre de données

### → Réseaux cellulaires, Internet des Objets, Systèmes embarqués

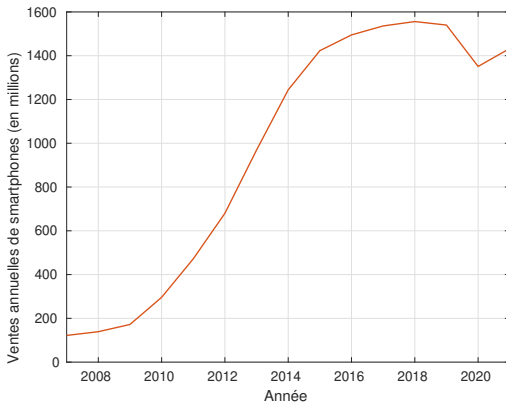
### → Usages :

- communication pair-à-pair, vidéo, jeu, robotique, traduction, traitement automatique, ...
- impliquant souvent des algorithmes (ex.: décision avec IA)

C'est un domaine en (très) forte croissance

## Section 1 : Consommation énergétique

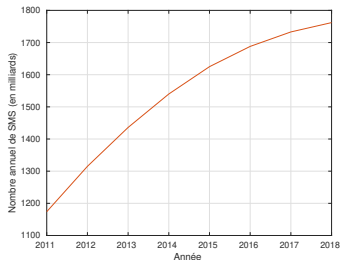
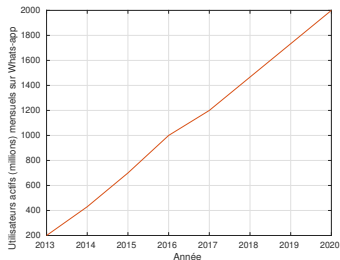
# En pleine évolution sur les équipements terminaux



Ventes en millions par an de smartphones

source : Statista2022 et WeAreSocial (Ericsson)

# En pleine évolution sur le trafic échangé

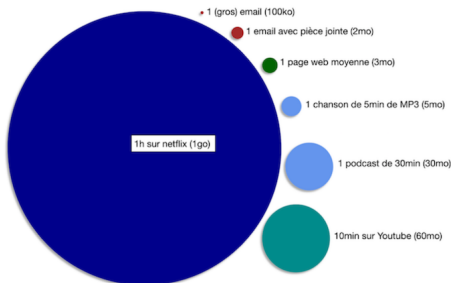


Gauche : Nombre mensuel d'utilisateurs actifs à Whatsapp (M.)  
Droite : Nombre annuel de SMS (G.)

Pas de remplacement d'application mais accumulation des outils

source : Statista2022

# Taille des fichiers

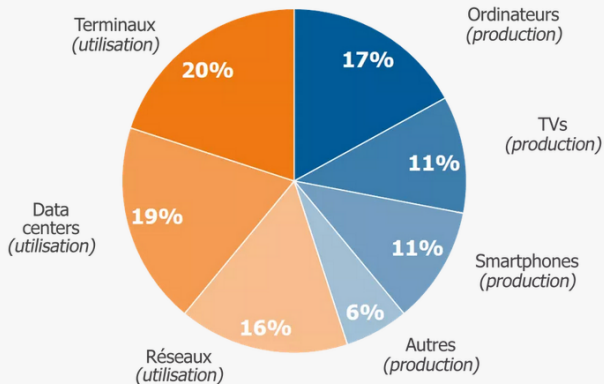


Exemple : 100 gros courriels = 2 chansons sur Deezer !

## Problèmes

- Utilisation transparente et semble être gratuite...
- Croissance forte du trafic (dans le futur : 5G/6G, IoT)
- Renouvellement rapide des équipements par obsolescence
- Au niveau mondial: 67% possèdent un téléphone mobile

# 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 / CO<sub>2</sub>

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

<sup>a</sup>Source: 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

## Notion de terres/métaux rares

- 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* (Gallium sert au LED et circuits intégrés)

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

le sel dans le pain

# Un exemple: téléphone mobile

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



Source: Oeko-Institut, EcoInfo et Sénat

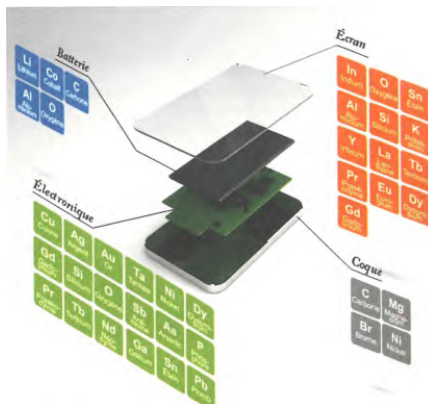
### PROPORTION DES MÉTAUX

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

## 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.

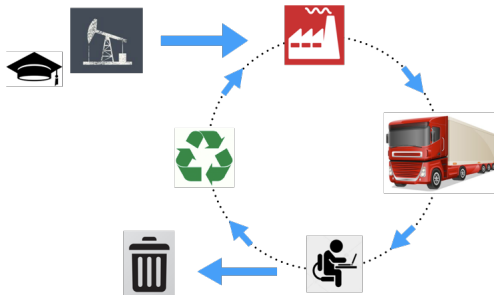
## Exemple : requête sur Internet

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 521 Go, fréquence 2,6 GHz.

- La phase d'utilisation en première main est considérée à 4 ans.
- l'empreinte carbone est de 394 kgCO<sub>2</sub>e
  - 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)

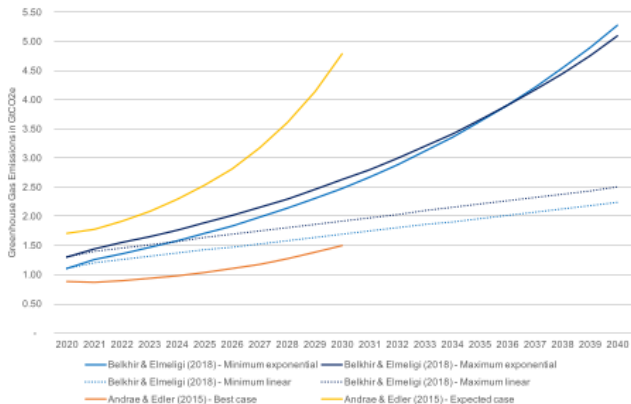
Il est compliqué d'estimer *précisément* le coût d'un courriel en terme de son impact CO<sub>2</sub>.

Exemple (sans stockage ni ACV):

- [Aslan2018] – 6mgCO<sub>2</sub>e pour un courriel de 1Mo
- [Ficher2021] (Ecoinfo) – 2mgCO<sub>2</sub>e pour 1Mo (sur Renater)

mais avec stockage et ACV 20gCO<sub>2</sub>e pour 1Mo [Ademe2011]

## Et évolution



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

# Gain en efficacité énergétique en 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

# Effet rebond ou paradoxe de Jevons

## 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<sup>ème</sup> 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 4G : un cas d'école

# Effet de levier ou externalités positives

## 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 : 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
- congrès virtuel

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

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



## 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**

# 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 ?**

## 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

## Annexes

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.

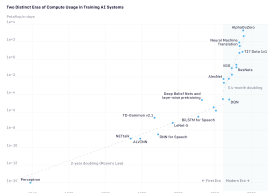
*sources :*

*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 algorithme 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

# 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)

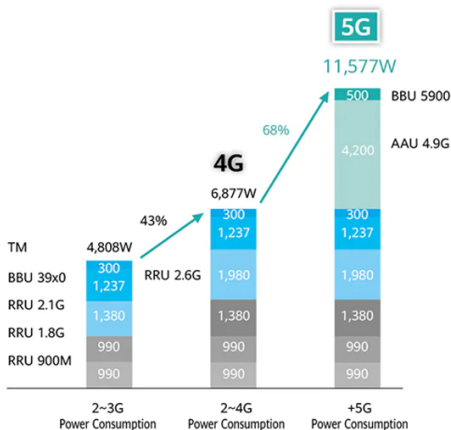


# C'est comment ?

- 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*)

# Quelques études (1)

## Consommation d'une station de base

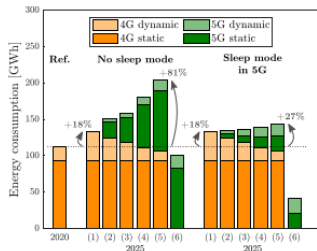


Principe de décommissionnement mais toutes fréquences ré-utilisées

source : Huawei

## Quelques études (2)

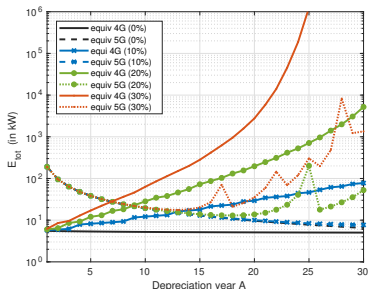
- Modèle 4G disponible :  $P = P_0 + \alpha R$
- Modèle 5G :  $P_{5g} = \beta P(B_{5g}/B)^{0.95} (S_{5g}/S)^{0.1}$  avec  $S$  le nombre de flots.
- Trafic (mode veille) et fabrication prise en compte (12 ans)



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

# 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*

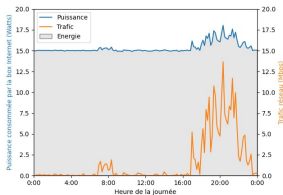
# Et alors ...

- 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).

# Mode veille

## Élément central

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



- en serveur de calculs



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

# 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  $12.000\text{km}$  ce qui donne  $1\text{km}/\text{passager} = 83\text{gCO}_2\text{e}$  (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  $45\text{Mo}$ , d'où  $1 \text{ To}$  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 ?