

Scénarios prospectifs pour l'impact carbone des réseaux mobiles en France

Marceau Coupechoux

LTCI, Telecom Paris, Institut Polytechnique de Paris et EcolInfo
(avec le groupe de travail sur les Réseaux du Shift Project)

7 novembre 2024

Les résultats présentés ici ont été publiés dans un rapport technique [Buquicchio et al., 2024b] :

Ingrid Buquicchio, Marceau Coupechoux, Marlène De Bank, Maxime Efoui-Hess, Hugues Ferreboeuf, Gaël Guennebaud, Julia Meyer, Florian Millet et François Richard (groupe de travail sur les Réseaux)

“Energie, climat : Des réseaux sobres pour des usages connectés résilients”
The Shift Project, 2024

Table des matières

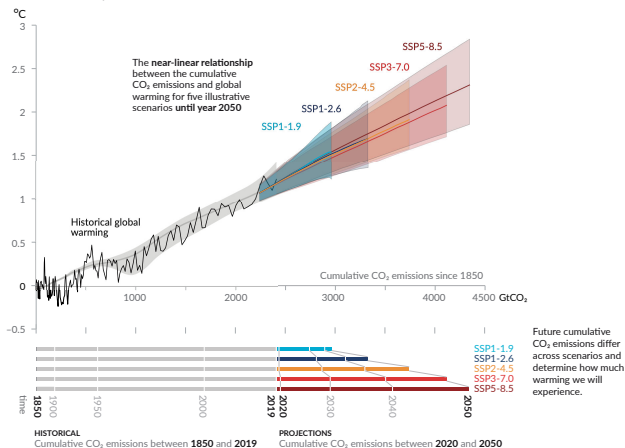
- 1 Contexte
- 2 Approche, modèle et données
- 3 Scénarios prospectifs
- 4 Conclusion et recommandations

Table des matières

- 1 Contexte
- 2 Approche, modèle et données
 - Approche
 - Modèle de réseau
 - Modèle de couverture
 - Modèle de capacité
 - Modèle environnemental
 - Données
- 3 Scénarios prospectifs
- 4 Conclusion et recommandations

Contexte : le réchauffement climatique

Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



- Notre budget carbone est fini si nous voulons respecter les objectifs de l'accord de Paris [IPCC, 2023]

Contexte : autres empreintes environnementales

Exemples d'autres catégories d'impacts [ITU-T, 2019] L.1410 :

- Toxicité humaine
- Substances inorganiques, particules fines
- Rayonnements ionisants (radioactivité)
- Acidification des océans et des sols
- Utilisation/affectation des terres (qualité des sols)
- **Consommation d'eau**
- **Épuisement des ressources abiotiques (minéraux et fossils)**
- Destruction de l'ozone stratosphérique

“Aujourd'hui, plus d'espèces de plantes et d'animaux sont menacées d'extinction qu'à tout autre moment de l'histoire de l'humanité.” [IPBES, 2020]

Contexte : l'empreinte du numérique

TIC = Technologies de l'Information et de la Communication

- Composantes principales :
 - Terminaux : smartphones, écrans, PCs, tablettes, capteurs, IoT, etc.
 - Réseaux : routeurs, stations de base, switches, points d'accès, etc.
 - Centres de données : serveurs
- Les TIC représentent 1.8-3.9% des émissions de GES en 2020 (autour de 1.2-2.2 GtCO₂eq dont 200-300 MtCO₂eq pour les réseaux mobiles).
Autres impacts : 4.2% de la consommation primaire d'énergie, 0.2% de l'utilisation de l'eau, 5.5% de la consommation électrique [Bordage, 2019].
- Refs : [Freitag et al., 2021, Malmodin and Lundén, 2018, Andrae and Edler, 2015, SG Andrae, 2020, Belkhir and Elmeligi, 2018, Bordage, 2019]
- Dernière ref : 1.4% des émissions (764 MtCO₂eq) pour les TIC, 118 MtCO₂eq pour les réseaux mobiles en 2020 avec une tendance croissante depuis 2015 (+5%) [Malmodin et al., 2024]

Contexte : l'empreinte du numérique

Répartition de l'empreinte du numérique

%	 Energy	 GHG	 Water	 Elec.	 ADP
User equipment	60%	63%	83%	44%	75%
Network	23%	22%	9%	32%	16%
Data centres	17%	15%	7%	24%	8%

Breakdown of impact of the digital world in 2019

[GreenIT.fr]

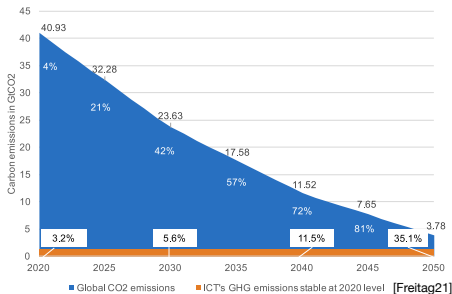
 GHG balance	Manufacturing	Use	Total
User equipment	40%	26%	66%
Networks	3%	17%	19%
Data centres	1%	14%	15%
	44%	56%	

Greenhouse gas emissions balance 2019

[GreenIT.fr]

- Les proportions varient selon les sources
- Les impacts les plus importants : 1) la fabrication des terminaux, 2) la consommation électrique des terminaux, 3) la consommation électrique des réseaux, 4) la consommation électrique des centres de données, 5) la fabrication des équipements de réseaux, 6) la fabrication des équipements de centres de données

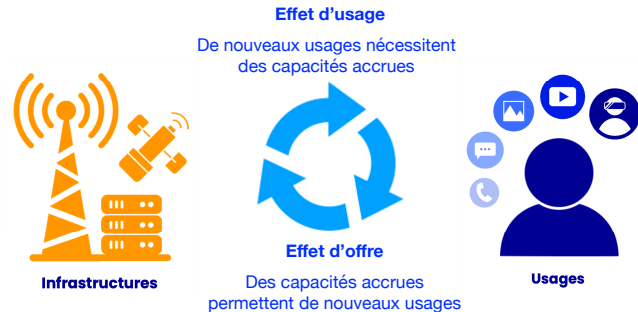
Contexte : l'empreinte du numérique



- Émissions des TIC en supposant que le niveau de 2020 reste stable et que les émissions globales sont réduites en ligne avec l'objectif de 1.5°C selon le scénario SSP2-19 (les proportions sont par rapport à 2010).
- Pour être en ligne avec les autres secteurs, les TIC doivent réduire leurs émissions de 42% en 2030, 72% en 2040 et être net zéro en 2050 [Freitag et al., 2021].
- L'ITU a proposé une cible de -45% en 2030 par rapport à 2020 [SBTI, 2020].

Contexte : infrastructures numériques

Les usages et les infrastructures se renforcent mutuellement :



⇒ Les décisions que nous prenons aujourd'hui auront un impact pendant de nombreuses années.

Contexte : les réseaux mobiles

- Globalement, les gains en efficacité énergétique ont été au moins compensés par la croissance du trafic de données [Lange et al., 2020, Bol et al., 2021].
 - Forte augmentation du volume de données mobiles : +62% chaque année en France depuis 2012.
 - +6%/an de consommation électrique entre 2017 et 2021 (4 opérateurs français)
 - Une croissance constante du nombre de stations de bases [Ahmed and Coupechoux, 2023]
- ⇒ Une trajectoire insoutenable qu'il faut inverser

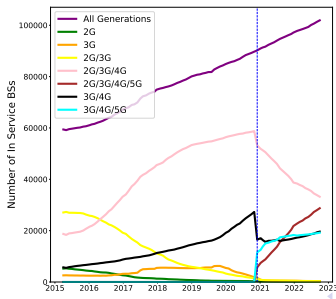


Table des matières

- 1 Contexte
- 2 Approche, modèle et données**
 - Approche
 - Modèle de réseau
 - Modèle de couverture
 - Modèle de capacité
 - Modèle environnemental
 - Données
- 3 Scénarios prospectifs
- 4 Conclusion et recommandations

Approche : tendancielle vs *conséquentielle*

Approche tendancielle :

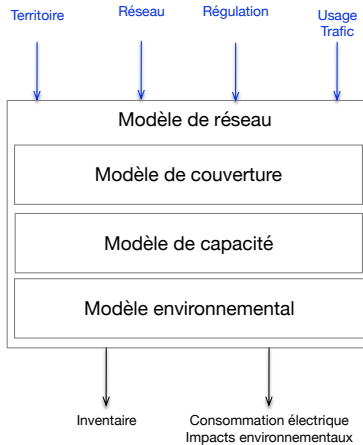
- On part de valeurs globales de trafic (GB) et de consommation électrique (kWh)
- On construit des ratios en utilisant une méthodologie *attributionnelle*, p.ex. kWh/GB
- On utilise les projections de trafic pour extrapoler
- Adoptée p.ex. dans [Ferreboeuf et al., 2021]

Approche conséquentielle :

- On étudie les impacts des décisions de déploiements.
- Similaire à une ACV conséquentielle [Schaubroeck et al., 2021] : Quel est l'impact d'une unité consommée ou produite additionnelle ? Quelle est la conséquence d'une décision ?
- Adoptée dans [Stobbe et al., 2023] pour l'Allemagne

⇒ On considère un opérateur générique et on simule sa stratégie de déploiement année après année en utilisant l'approche conséquentielle

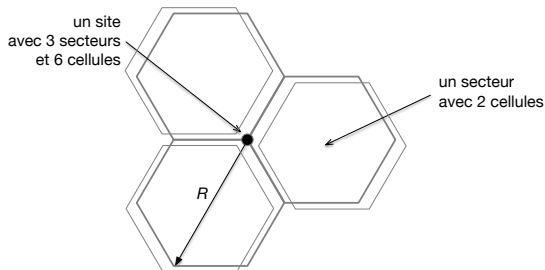
Approche



Modèle de réseau : opérateurs, technologies, spectre

- 4 opérateurs mobiles identiques
- 3 technologies : 4G, 5G, 6G
Note : 2G, 3G seront bientôt éteints et la 4G est présente sur la quasi-totalité des sites depuis 2023
- 4 bandes de fréquence :
 - LOW : 700-800-900 MHz
 - LOWER_MID : 1800-2100-2600 MHz
 - UPPER_MID : 3.5-6 GHz
 - HIGH : ondes millimétriques (mmW)
- Les largeurs de bande sont moyennées sur les allocations en vigueur en 2024.
- Le *refarming* est possible en LOW et LOWER_MID

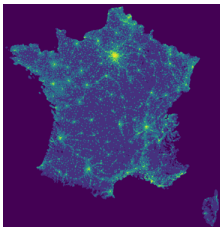
Modèle de réseau : sites et cellules



- un site = une position géographique (peut être partagée par plusieurs opérateurs)
- une station de base = un équipement de transmission/réception pour un unique opérateur, caractérisée par un nombre moyen de secteurs
- une cellule = un couple (techno, bande) déployée sur un secteur, caractérisée par un rayon de cellule dans la bande LOW et une capacité cellulaire
- cellules spécifiques : petites cellules mmW, cellules déployées le long des routes principales

Modèle de couverture

Caractéristiques du territoire :

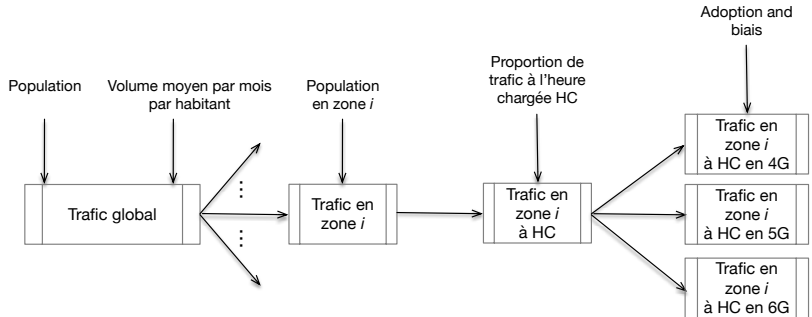


- La France métropolitaine est divisée en 8 zones géographiques :
EMPTY, RURAL_1, RURAL_2, RURAL_3, PERI_URBAN_1, PERI_URBAN_2, URBAN_1, URBAN_2
- Les zones sont supposées homogènes
- La population croît de manière linéaire

Contraintes de couvertures :

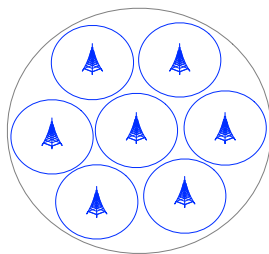
- proportion de population et territoire couverte $\Rightarrow$ utilisation de la bande LOW
- régulation : nombre de sites 5G UPPER_MID
- régulation : déploiement équilibrée des sites 5G UPPER_MID en zones urbaines et rurales
- régulation : proportion de sites avec LOWER_MID
- régulation : couverture des routes principales et autoroutes

Modèle de capacité : trafic

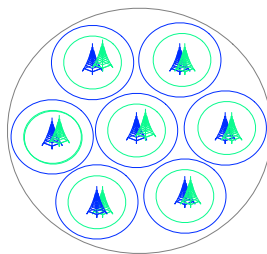


- L'adoption est estimée grâce au nombre de cartes SIM uniques s'étant connectées à une technologie (publiquement disponible)
- On suppose un biais de trafic pour les utilisateurs 5G et 6G [Rizzato, 2020].

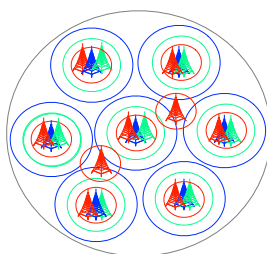
Modèle de capacité : stratégie de déploiement



1- Utiliser la bande la plus basse pour satisfaire les contraintes de couverture



2- Ajouter successivement sur les mêmes sites des bandes intermédiaires pour satisfaire les demandes de trafic



3- Ajouter les bandes les plus hautes jusqu'à satisfaire les demandes de trafic si nécessaire ne densifiant

Dans chaque zone géographique, en considérant les technos de manière croissante :

- 1) Retirer le trafic servi par les cellules déjà déployées
- 2) Ajouter des cellules avec des bandes et technos croissantes sur les sites existants
- 3) Densifier avec la plus haute bande

Refarming = l'allocation de bande aux technologies est optimisée

Modèle de capacité : petites cellules mmW

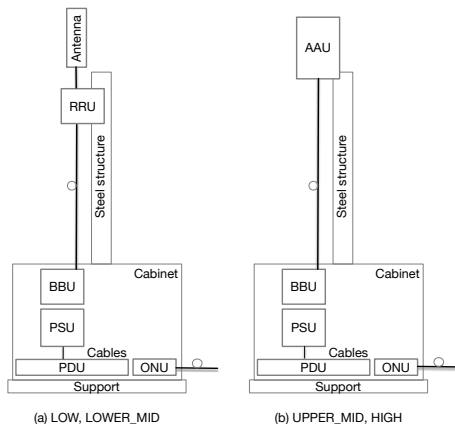
- Les petites cellules mmW sont supposées fournir de très hauts débits à certains points chauds [Global5G.org, 2019] $\Rightarrow$ focalisation sur l'expérience utilisateur
 - Il ne s'agit ni d'une solution de couverture, ni de capacité
- $\Rightarrow$ On considère a ratio des cellules macro 5G UPPER_MID en URBAN_1 et URBAN_2
- La même approche a été adoptée par [Haut Conseil pour le Climat, 2020], alors que [Stobbe et al., 2023] suppose une couverture cible

Modèle environnemental

Principales étapes de l'algorithme :

- 1) Effectuer un inventaire des équipements en se fondant sur les configuration de stations de base
- 2) Calculer le stock et le flux de chaque équipement
- 3) Calculer la consommation énergétique pendant la phase d'usage en utilisant des modèles, convertir en empreinte carbone en utilisant le mix électrique
- 4) Calculer l'empreinte en termes de carbone embarqué (fabrication) en utilisant la durée de vie des équipements

Modèle environnemental : inventaire



- À partir des architectures de stations de base et des configurations déployées, on effectue un inventaire des équipements.

Modèle environnemental : consommation énergétique

- On adopte un modèle affine similaire au modèle EARTH [Auer et al., 2011] :

$$P_r^{(e)}(t) = P_{base}^{(e)} \eta^{(e)}(t) + N_{tx}^{(e)} P_{tx}^{(e)} \eta^{(e)}(t) + \ell_{e(b)}^{(i)}(t) \frac{P_{out}^{(e)}}{\eta_{PA}(t)(1 - \sigma_{feed})}$$

- La charge des cellules est dérivée du modèle de capacité
- L'efficacité énergétique est prise en compte par équipement dans le facteur $\eta^{(e)}(t)$

Modèle environnemental : stock et flux

Il y a deux approches pour prendre en compte la durée de vie des équipements :

- L'approche par stock : les émissions embarquées sont amorties pendant toute la durée de vie $\Rightarrow$ **montre une tendance en lissant l'impact sur le temps**
- L'approche par flux : les émissions embarquées d'un nouvel équipement (renouvellement ou nouveau déploiement) sont complètement prises en compte l'année de déploiement $\Rightarrow$ **montre la dynamique des investissements**

Modèle dynamique stock-flux :

$$I_e(t) = \Delta I_e(t) \cup \left(\bigcup_{t'=t_w}^t I_e(t') \theta_e(t - t') \right) \quad (1)$$

où $I_e(t)$ est l'inventaire à t , $\Delta I_e(t)$ représente les nouveaux équipements et θ_e est la distribution de la durée de vie (probabilité que la durée de vie est plus grande que $t - t'$)

Données

D'où viennent les données ?

- ARCEP pour les données de trafic (historique) et quelques caractéristiques de cellules
- ANFR pour la base de données de tous les équipements au dessus de 5W
- Littérature “grise” pour les prévisions de trafic
- Modèles et spécifications d'équipements en libre accès pour les données environnementales, en particulier [Stobbe et al., 2023, Madon, 2021] pour le carbone embarqué
- Mix électrique : de 60 gCO₂e/kWh en 2020 à 34 gCO₂e/kWh en 2035 [Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles, 2022].
- Efficacité énergétique : +3 % tous les 3 ans [Stobbe et al., 2023].
- Les données qui manquent : choisies en fonction de l'expérience des membres du groupe de travail

⇒ On a besoin de données ouvertes !

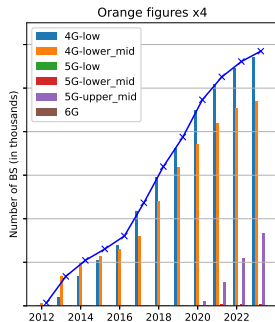
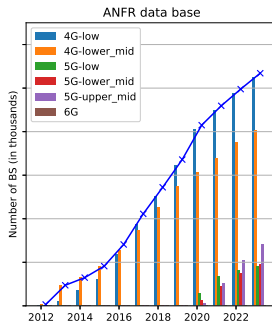
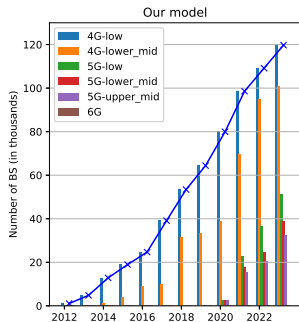
Table des matières

- 1 Contexte
- 2 Approche, modèle et données
 - Approche
 - Modèle de réseau
 - Modèle de couverture
 - Modèle de capacité
 - Modèle environnemental
 - Données
- 3 Scénarios prospectifs
- 4 Conclusion et recommandations

Scénario de référence

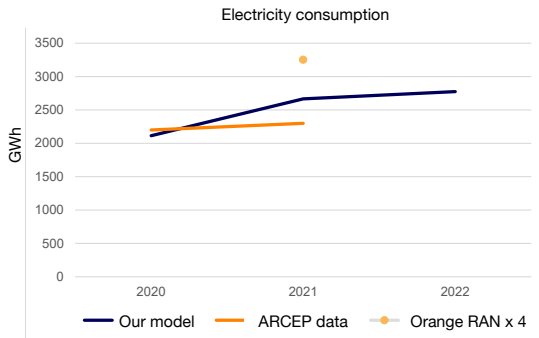
- Couvertures cibles assurées par la bande LOW
- Contraintes réglementaires :
 - Nombre de sites 5G UPPER_MID
 - Déploiement homogène de la UPPER_MID
 - Couvertures des principales routes et autoroutes
 - Débit maximal de 240 Mbit/s dans 100% des sites en 2030
- Déploiement 6G en 2030
- Partage de réseau stable au niveau de 2024
- Hypothèses de trafic : données historiques (ARCEP) jusqu'en 2023 [ARCEP, 2024b], projections Arthur D Little (ADL) jusqu'en 2030 [Jakopin et al., 2023], extrapolation linéaire jusqu'en 2035.

Validation



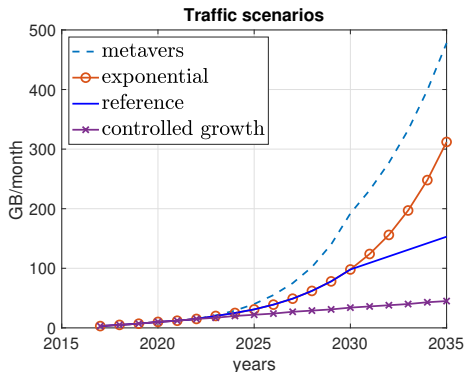
- Même ordre de grandeur, similaire à Orange (un peu au dessus à la fin de la période)
- 2012-2017 : notre modèle déploie moins de 4G LOWER_MID parce qu'on favorise la bande LOW et on n'introduit la LOWER_MID que pour des raisons de capacité
- Les distributions de BS dépendent des stratégies des opérateurs

Validation



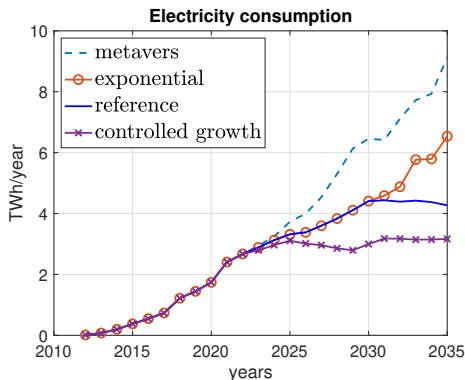
- On compare aux données ARCEP agrégées [ARCEP, 2024a] et au réseau Orange [Rouphael et al., 2023]
- Même ordre de grandeur : entre la moyenne et Orange
- Différences dues aux approximations et discrétisations du modèle

Hypothèses de trafic



- reference : ARCEP (hist) + ADL (2024-2030) + linear (2031-2035)
- metavers : The Shift Project, Gartner, Ericsson [Buquicchio et al., 2024a]
- exponential : ARCEP + ADL + exp
- controlled growth : ARCEP + linear

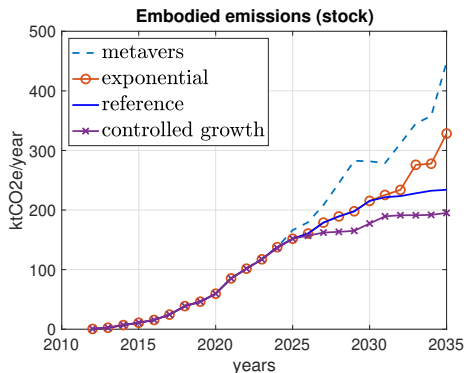
Consommation électrique



- Les gains d'efficacité énergétique et l'amélioration du mix stabilisent les courbes seulement pour le scénario reference (after 2030) et le scénario controlled growth (after 2025)

⇒ L'évolution du trafic joue un rôle crucial.

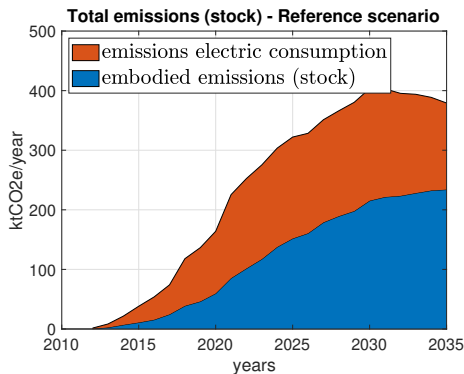
Émissions embarquées (stock)



- La croissance du trafic requière le déploiement de nouveaux sites, les anciens sites doivent être renouvelés

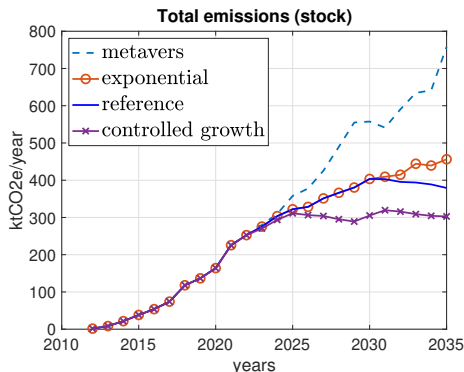
⇒ Les décisions prises aujourd'hui auront un impact pendant dix ans.

Émissions totales (stock)



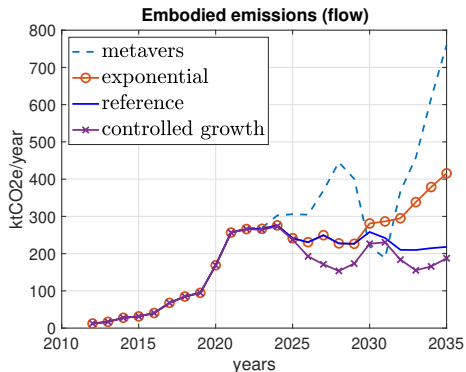
- La proportion due à l'usage est plus élevée sauf dans la dernière période où la fabrication domine (grâce aux gains en efficacité et en mix).
- ⇒ Nous sommes au dessus de la littérature en termes de part des émissions embarquées [Malmodin et al., 2024]

Émissions totales (stock)



- Les émissions totales ne peuvent être stabilisées que si la croissance du trafic est maîtrisée
 - La généralisation du métavers n'est pas soutenable
- ⇒ Il sera sans doute nécessaire de contrôler la croissance du trafic

Émissions embarquées (flux)



- L'approche par flux est moins lisse et on peut voir les investissements dans la 5G puis al 6G

Scénario d'éco-design et de sobriété

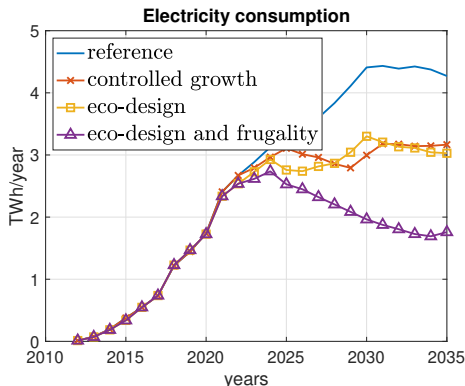
eco-design :

- Couverture assurée seulement avec la bande LOW
- Gel des contraintes réglementaires 5G en 2024
- Suspension du déploiement 6G
- Extension de la durée de vie des équipements (+2 ans)
- Amélioration de l'efficacité énergétique
- Réduction des volumes de trafic p.ex. en utilisant des codecs vidéo appropriés (ref – 20%)

eco-design and frugality :

- Eco-design +
- La consommation moyenne de données continue de croître mais de manière seulement linéaire pour atteindre 45 GB/mois/habitant en 2035 (vs 20 GB en 2024).

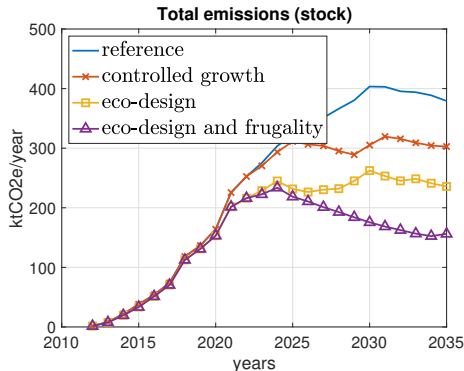
Eco-design et sobriété - Électricité



- Les scénarios controlled growth et eco-design ont un effet similaire sur la phase d'usage. La consommation électrique est stabilisée.

⇒ Seul eco-design and frugality permettent de revenir au niveau de 2020.

Eco-design et sobriété - Émissions



- En suspendant la 6G, en gelant les contraintes réglementaires et en étendant les durées de vie, eco-design fait mieux que controlled growth.
- Seul eco-design and frugality permet de revenir au niveau de 2020.

Table des matières

- 1 Contexte
- 2 Approche, modèle et données
 - Approche
 - Modèle de réseau
 - Modèle de couverture
 - Modèle de capacité
 - Modèle environnemental
 - Données
- 3 Scénarios prospectifs
- 4 Conclusion et recommandations

Conclusion and recommandations

Une observation :

- Les TIC, ce n'est pas seulement virtuel, c'est très concret : des antennes, des câbles, de l'acier, des routers, des déchets, etc.
- L'IUT recommande -45% en termes d'empreinte carbone en 2030 par rapport 2020.
- Clairement, nous ne sommes pas sur la bonne voie.

Recommandations possibles :

- **Eco-conception** : accroître la durée de vie des équipements, focaliser les nouvelles technos sur l'efficacité énergétique, utiliser le critère carbone, rendre les données publiques, utiliser des codecs à faible débit par défaut, juguler l'économie de l'attention, etc.
- **Partage** : encourager les opérateur à partager leurs infrastructures
- **Sobriété** : conditionner toute hausse du trafic ou accroissement de la performance au respect d'une trajectoire carbone-énergie, déploiement focalisé de la 5G, faire de la réduction *absolue* de l'impact environnemental une condition pour le déploiement de la 6G, etc.

Merci pour votre attention !

References I



Ahmed, A. and Coupechoux, M. (2023).

The long road to sobriety : Estimating the operational power consumption of cellular base stations in france.

In *2023 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)*. IEEE.



Andrae, A. S. G. and Edler, T. (2015).

On global electricity usage of communication technology : Trends to 2030.

Challenges 2015, Vol. 6, Pages 117-157, 6 :117–157.



ARCEP (2024a).

Enquête annuelle pour un numérique soutenable.



ARCEP (2024b).

Les services de communications électroniques en France 4e trimestre 2023.

Technical report, ARCEP.

References II



Auer, G., Giannini, V., Desset, C., Godor, I., Skillermark, P., Olsson, M., Imran, M., Sabella, D., Gonzalez, M., Blume, O., and Fehske, A. (2011).

How much energy is needed to run a wireless network ?

IEEE Wireless Communications, 18 :40–49.



Belkhir, L. and Elmeligi, A. (2018).

Assessing ict global emissions footprint : Trends to 2040 & recommendations.

Journal of Cleaner Production, 177 :448–463.



Bol, D., Pirson, T., and Dekimpe, R. (2021).

Moore's Law and ICT Innovation in the Anthropocene.

In *2021 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, pages 19–24. IEEE.



Bordage, F. (2019).

The environmental footprint of the digital world.

Technical report.

References III



Buquicchio, I., Coudreau, J., Bank, M. D., Durand, B., Efoui-Hess, M., Egal, L., Ferreboeuf, H., Gueguen, A., Jeanningros, H., Kissi, A., Burthe, A. L., Ninassi, B., Souchet, A., and Theve, A. (2024a).

Quels mondes virtuels pour quel monde réel ?

Technical report, The Shift Project.



Buquicchio, I., Coupechoux, M., Bank, M. D., Efoui-Hess, M., Ferreboeuf, H., Guennebaud, G., Meyer, J., Millet, F., and Richard, F. (2024b).

Lean Networks for Resilient Connected Uses.

Technical report, The Shift Project.



Comité d'experts techniques sur les réseaux mobiles (2022).

Evaluation de la consommation énergétique d'un déploiement 4G vs 5G.

Technical report, ARCEP.



Ferreboeuf, H., Efoui-Hess, M., and Verne, X. (2021).

Impact environnemental du numérique : tendance à 5 ans et gouvernance de la 5G.

Technical report.

References IV



Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S., and Friday, A. (2021).

The real climate and transformative impact of ICT : A critique of estimates, trends, and regulations.

Patterns, 2(9).



Global5G.org (2019).

White Paper on Small cells.

Technical report, Global5G.org.



Haut Conseil pour le Climat (2020).

Maîtriser l'impact carbone de la 5G.



IPBES (2020).

Ipbes global assessment report on biodiversity and ecosystem services.

Technical report.

References V



IPCC (2023).

Ar6 synthesis report : Climate change 2023.

Technical report.



ITU-T (2019).

Recommendation L.1410 : Environment and ICTS, Climate Change, e-Waste, Energy Efficiency ; Construction, Installation and Protection of Cables and Other Elements of Outside Plant.

Technical report.



Jakopin, N., Mohr, G., Cafforio, E., Peres, G., Weber, M., and Burkhanov, K. (2023).

The Evolution of Data Growth in Europe.

Technical report, Arthur D Little.



Lange, S., Pohl, J., and Santarius, T. (2020).

Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand ?

Ecological Economics, 176.

References VI



Madon, M. (2021).

Developing a Parameterized Embodied Emissions Calculator for telecommunication networks equipment (PEEC).

Master's thesis, KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS).



Malmodin, J. and Lundén, D. (2018).

The energy and carbon footprint of the global ict and e & m sectors 2010-2015.

Sustainability (Switzerland), 10.



Malmodin, J., Lövehagen, N., Bergmark, P., and Lundén, D. (2024).

ICT Sector Electricity Consumption and Greenhouse Gas Emissions – 2020 Outcome.

Telecommunications Policy, 48 :102701.



Rizzato, F. (2020).

5G users on average consume up to 2.7x more mobile data compared to 4G users.

Technical report, Opensignal.

References VII



Rouphael, R. B., Selva, E., Huang, Y., Mouawad, N., Boudry, G., Parmantier, X., and Gati, A. (2023).

The Impact of Networks in the Greenhouse Gas Emissions of a Major European CSP.

In *2023 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, pages 1–6. IEEE.



SBTI (2020).

Guidance for ICT Companies setting Science Based Targets.

Technical report.



Schaubroeck, T., Schaubroeck, S., Heijungs, R., Zamagni, A., Brandão, M., and Benetto, E. (2021).

Attributional & consequential life cycle assessment : Definitions, conceptual characteristics and modelling restrictions.

Sustainability, 13(13) :7386.

References VIII



SG Andrae, A. (2020).

New perspectives on internet electricity use in 2030.

Engineering and Applied Science Letter, 3(2) :19–31.



Stobbe, L., Richter, N., Quaeck, M., Knüfermann, K., Druschke, J., Fahland, M., Höller, V. W., Wahry, N., Zedel, H., Kaiser, M., Hoffmann, S., Töpper, M., and Nissen, N. F. (2023).

Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland Projekt : UTAMO.

Technical report, Umweltbundesamt.