

Évaluation des impacts environnementaux à partir d'une ACV simplifiée pour un réseau massif MIMO distribué

Josua GUERID Jean-Baptiste DORÉ¹ Rafik ZAYANI² Maxime PERALTA¹ Léa DI CIOCCIO

¹CEA-Leti/List, Université de Grenoble Alpes, 17 Avenue des Martyrs, 38054 Grenoble, France

²Univ Rennes, CNRS, IETR, UMR 6164, F-35000 Rennes, France

Résumé – Ce travail évalue l'impact environnemental des réseaux multi-antennes distribués sans cellule (CF-mMIMO), une technologie envisagée pour les futures générations de télécommunications. Bien que largement reconnus pour leur efficacité énergétique à haut débit, aucune évaluation de leur impact environnemental n'a été réalisée afin de justifier de leur pertinence, notamment par rapport aux architectures co-localisées usuelles. Dans cette étude, l'empreinte environnementale est analysée à l'aide d'une analyse du cycle de vie (ACV) simplifiée et comparée à d'autres études afin de vérifier la cohérence du modèle. Les résultats obtenus indiquent que selon les configurations choisies et les performances visées, le déploiement des réseaux CF-mMIMO peut autant être une option à faible qu'à fort impact environnemental. Enfin, l'introduction d'un modèle tenant compte de la fabrication des équipements montre que l'efficacité énergétique seule n'est pas pertinente.

Abstract – This study evaluates the environmental impact of cell-free distributed massive MIMO (CF-mMIMO) networks, a technology considered for future generations of telecommunications. Although widely recognised for their high-speed energy efficiency, no assessment of their environmental impact has been carried out to justify their relevance, particularly in relation to the usual co-located architectures. In this study, the environmental footprint is analysed using a simplified Life Cycle Assessment (LCA) and compared with other studies to check the consistency of the model. The results show that, depending on the configurations chosen and the performance targets, the deployment of CF-mMIMO networks can be an option with both a low and a high environmental impact. Finally, the introduction of a model that takes account of equipment manufacturing shows that energy efficiency alone is not relevant.

1 Introduction

Il est inutile de rappeler à quel point notre société doit rapidement se conformer aux neuf limites planétaires qui définissent l'espace opérationnel sûr pour l'humanité. Or, nous les franchissons une à une, et aujourd'hui, seules trois restent infranchies [1]. Le réchauffement climatique, déjà bien perceptible, n'est que l'une de ces neuf limites à ne pas dépasser. Principalement causé par l'usage des combustibles fossiles, il est mesuré par la quantité de carbone émise dans l'atmosphère. L'industrie des technologies de l'information et de la communication (TIC) contribue directement et indirectement à ce phénomène, avec une empreinte carbone estimée entre 2% et 4% des émissions mondiales [2], soit une proportion souvent comparée à celle de l'aviation civile.

Les réseaux télécoms représentent entre un quart et un tiers de l'empreinte carbone des TIC à l'échelle mondiale [2], avec une grande variabilité selon le mix énergétique. En France, cette part est estimée à 5,5% [3], contre 11,9% en Europe [4]. Selon [5], la consommation d'électricité des réseaux mobiles constitue le principal facteur de l'empreinte carbone des opérateurs télécoms. Dans ces réseaux, 80% de la consommation énergétique provient du réseau d'accès radio [6]. Par ailleurs, la croissance rapide du volume de données, ainsi que les projections de son augmentation future [7], exercent une pression supplémentaire sur l'industrie des télécoms. Celle-ci doit réduire de moitié son empreinte carbone entre 2020 et 2030 [8] pour répondre aux impératifs environnementaux.

Dans cette quête de performance énergétique, les architectures distribuées massive multi-input multi-output (mMIMO), en particulier la variante Cell-Free (CF-mMIMO), sont perçues comme des solutions prometteuses grâce à leur efficacité spectrale et énergétique optimisée [9]. Par exemple, [9] estime qu'une architecture CF-mMIMO pourrait multiplier l'efficacité énergétique par un facteur 1,7 par rapport à une architecture à petites cellules. Toutefois, cette recherche d'ef-

ficacité énergétique néglige souvent l'empreinte carbone des réseaux. Celle-ci est estimée à environ 10% de l'empreinte totale des réseaux [5], bien que cette valeur soit associée à une forte incertitude. En général, l'empreinte carbone est souvent reléguée au second plan au profit de la seule consommation énergétique en phase d'utilisation. Or, la promesse des réseaux CF-mMIMO repose sur un déploiement massif de points d'accès (AP) et requiert une capacité de traitement élevée, ce qui implique probablement une empreinte carbone non négligeable liée à leur fabrication et leur exploitation. Il est donc essentiel d'intégrer cette dimension dans l'évaluation de leur impact environnemental.

Depuis, bien que l'efficacité des technologies TIC s'améliore à un rythme exponentiel, leur empreinte carbone absolue continue d'augmenter [2], en contradiction avec la trajectoire de décarbonation du secteur [8]. Un débat persiste au sein de la communauté scientifique quant au rôle des TIC dans la construction d'une société durable, certains auteurs s'interrogeant sur le fait qu'elles constituent une partie de la solution ou du problème [10]. Ainsi, alors que de nombreux chercheurs s'efforcent de concilier performance technique et efficacité énergétique, des nouvelles approches d'évaluation intégrant l'ensemble des impacts environnementaux des TIC doivent être étudiées afin de garantir une réduction absolue de ces impacts. Pour y parvenir, il est essentiel d'évaluer d'abord l'empreinte environnementale de chaque technologie concernée avant un déploiement massif. La méthode la plus couramment utilisée à cette fin est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Dans cet article, nous proposons un modèle générique permettant d'explorer à la fois les impacts environnementaux et les performances du système radio des architectures de réseaux CF-mMIMO sub-6 GHz en milieu urbain. Notre approche prend en compte les phases de fabrication et d'utilisation, ainsi qu'une gamme d'impacts environnementaux couramment analysés dans le cadre de l'ACV des TIC. L'objectif est d'évaluer ces impacts et d'analyser le comportement de cette architecture à travers plusieurs cas d'étude.

⁰ Ce travail a été financé par l'Institut Carnot du CEA-Leti, et par l'ANR dans le cadre de France 2030 et des projets NF-PERSEUS (ANR-22-PEFT-0004) et NF-JEN (ANR-22-PEFT-0008) du PEPR Réseaux du futur.

2 Méthodologie

Dans cette section, nous présentons notre modèle d'évaluation des impacts environnementaux pour différentes configurations de réseaux CF-mMIMO, en intégrant les phases de fabrication et de consommation d'énergie. La méthodologie utilisée pour évaluer les impacts est basée sur la méthode d'ACV normalisée par les normes ISO 14040-44 [11] et [12]. Notre modèle peut être considéré comme une ACV simplifiée.

2.1 Modèle du réseau d'accès radio

Nous considérons un réseau CF-mMIMO fonctionnant à 3.5 GHz, avec une bande passante de 20 MHz. Le réseau est composé de K équipements utilisateurs (UE) équipés d'une antenne, et de L points d'accès (APs), chacun pourvu de M antennes, répartis de manière arbitraire sur la zone de couverture. Le réseau est ainsi composé de $L \times M$ antennes et nous supposons que $K \ll L \times M$. Le canal de communication entre les APs et les UEs est caractérisé par un environnement complexe et dynamique. Le modèle de canal est basé sur la distribution de Rayleigh, un modèle statistique idéal pour représenter l'affaiblissement par multi-trajet couramment observé dans les scénarios urbains. Des simulations numériques permettent d'extraire une métrique statistique de débit qui sera utilisée pour qualifier la performance du réseau. Pour plus d'informations, veuillez consulter [13] qui décrit en détail le modèle utilisé.

2.2 Modèle énergétique et modèle de fabrication

Notre modèle CF-mMIMO est structuré en deux parties : un modèle énergétique et un modèle de fabrication. Ce dernier est basé sur une architecture simplifiée composée de trois entités principales. Les APs, responsables du traitement radio, de la transmission et de l'acquisition des signaux I/Q. Les unités distribuées (DU), chargées du traitement numérique du signal pour le décodage et l'orchestration. Elles jouent un rôle clé dans l'optimisation des performances du réseau en gérant la synchronisation et l'allocation des ressources entre les AP. Les liens de fronthaul (FH), qui assurent l'interconnexion entre les AP et les DU, garantissant ainsi la cohérence et la performance du système. Le modèle énergétique et son architecture de réseau sont issus de [9]. Ce modèle repose sur l'estimation de la puissance consommée par les différents composants du réseau radio, y compris les APs, les DUs et les liaisons optiques.

Le scénario est défini par un ensemble de paramètres (K, L, M, P_{RF}) , où P_{RF} représente la puissance émise par les AP, variant dans une certaine plage. Chaque configuration de paramètres donne lieu à des simulations système permettant d'extraire des indicateurs de performance. Un profil de trafic évolutif sur une journée est également défini afin de représenter les variations d'utilisation du réseau [14]. Les résultats obtenus sont ensuite analysés pour évaluer l'impact environnemental et formuler des recommandations.

2.3 Implantation

Le modèle d'impact a été élaboré en détail, bien que, pour des raisons de concision, il ne soit pas entièrement présenté dans cette communication. Il repose sur une approche hybride, combinant des données issues de publications scientifiques [9] (incluant un code source) et des informations extraites des fiches techniques d'équipements. De plus, la base de données NegaOctet [15] a été utilisée pour l'analyse.

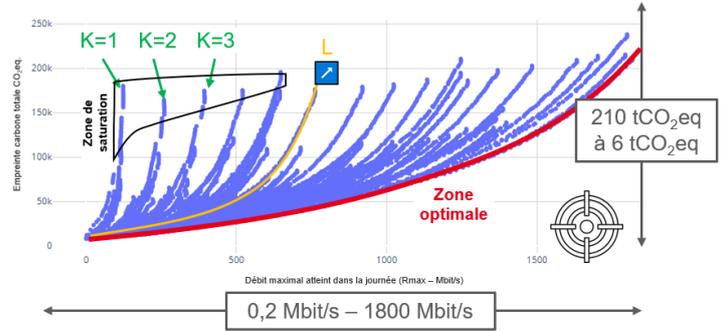


FIGURE 1 : Empreinte carbone totale du réseau en fonction du débit maximum atteint au cours d'une journée (Mbps). Les résultats incluent les phases de fabrication, de distribution et d'utilisation. Chaque point représente l'empreinte carbone totale d'un réseau (K, L, M, P) .

L'implantation a été réalisée à l'aide de l'application AppalCA¹ [16], qui offre un cadre adapté à la modélisation et à l'évaluation des impacts environnementaux, en s'appuyant sur la bibliothèque Python Brightway.

3 Résultats et interprétations

Nous avons appliqué notre modèle à un environnement urbain sur une durée de vie de 10 ans, en considérant un mix énergétique européen. Tous les résultats présentés concernent la fabrication, la distribution et l'utilisation du réseau étudié. Étant donné que notre modèle est statique, il ne prend pas en compte (i) l'augmentation de l'utilisation du réseau (c'est-à-dire la croissance de la demande en données), (ii) l'évolution technologique et les changements dans le mix énergétique au fil des années. Les résultats sont exprimés pour la catégorie d'impact "changement climatique", en utilisant l'indicateur équivalent carbone (kgCO₂eq ou tCO₂eq).

3.1 Une large gamme d'empreintes carbone

La Fig. 1 illustre l'empreinte carbone totale du réseau en fonction du débit maximal atteint pendant la journée (R_{max}). K utilisateurs sont multiplexés spatialement dans une zone de 0,13 km²².

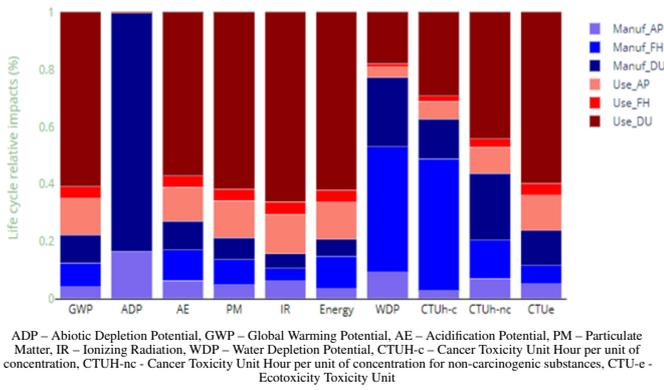
Chaque point du graphique représente une architecture réseau définie par un ensemble de paramètres : $(K \in [1, 15], L \in [1, 87], M \in [2, 32], P_{RF} \in [20, 26]$ dBm). En allant de gauche à droite, la densité du réseau augmente avec des valeurs plus élevées de K , L et M .

Les résultats montrent une large plage d'architectures possibles, avec des impacts environnementaux variant de 6,6 à 210 tCO₂eq et des débits allant de 0,2 à 1800 Mbps. La zone en bas à droite du graphique représente la meilleure situation, caractérisée par une faible empreinte carbone et un débit élevé. Nous observons que l'augmentation de la densité du réseau améliore les performances, mais entraîne également une hausse des impacts environnementaux. De plus, une zone de saturation apparaît, où l'empreinte carbone continue d'augmenter rapidement sans gain significatif en performance. Enfin, une zone optimale se dessine, correspondant à la minimisation de l'empreinte carbone pour chaque R_{max} .

De nombreuses options existent en fonction de l'objectif, qu'il s'agisse d'un réseau à faible empreinte carbone ou à haute performance. Ici, nous n'avons montré que l'empreinte

¹<https://appalca.github.io/>

²Le nombre total d'utilisateurs du réseau n'est pas spécifié; à chaque instant, K utilisateurs peuvent être servis, mais ceux-ci peuvent varier d'un instant à l'autre.



ADP – Abiotic Depletion Potential, GWP – Global Warming Potential, AE – Acidification Potential, PM – Particulate Matter, IR – Ionizing Radiation, WDP – Water Depletion Potential, CTUh-c – Cancer Toxicity Unit Hour per unit of concentration, CTUh-nc – Cancer Toxicity Unit Hour per unit of concentration for non-carcinogenic substances, CTU-e – Ecotoxicity Toxicity Unit

FIGURE 2 : Impacts du cycle de vie répartis par équipement pour les différentes catégories d’impact considérées, exprimés en valeur relative. $K = 10, L = 8, M = 16, P_{RF} = 26$ dBm.

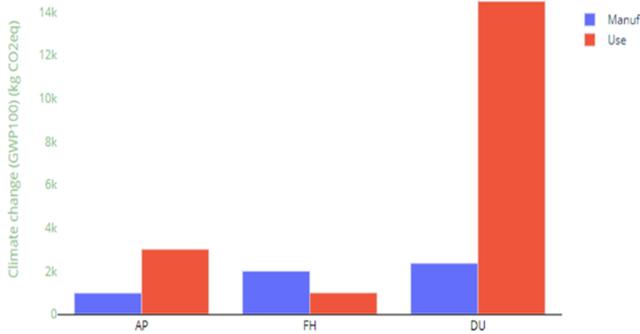


FIGURE 3 : Répartition du cycle de vie par équipements en valeur absolue. $K = 10, L = 8, M = 16, P_{RF} = 26$ dBm.

carbone, mais un compromis doit bien sûr être trouvé entre les nombreux paramètres existants, tels que le carbone, l’énergie, les matériaux, l’écotoxicité, le coût, etc.

3.2 La fabrication ne doit pas être négligée

En examinant toutes les catégories d’impact considérées, illustrées sur la Fig. 2, nous constatons que la phase d’utilisation est la plus contributive dans de nombreux cas. Cela témoigne de l’accent mis sur la consommation d’énergie dans la plupart des études. Cependant, la phase de fabrication n’est pas négligeable, avec des impacts variant de 10% à 40% avec un mix énergétique européen (et pouvant atteindre 70% avec un mix français). Les exceptions concernent les catégories ADP, WDP et CTUh-c, où la fabrication est la phase la plus contributive. Pour l’ADP, la fabrication des APs et des DUs représente une part bien plus importante que celle des FH, dont la contribution semble insignifiante. En revanche, pour le WDP et le CTUh-c, la fabrication des FH constitue le facteur le plus contributif.

La répartition du cycle de vie par équipements est illustrée Fig. 3. Le DU est le plus contributif, principalement en raison de sa phase d’utilisation. Ce résultat dépend fortement du scénario envisagé. Nous rappelons que nous nous inscrivons dans un contexte de type Open RAN virtualisé, où de nombreuses fonctions sont déployées sur des équipements génériques. La consommation du processeur provient d’une moyenne représentative issue de la gamme de processeurs Intel Xeon installés dans des racks de serveurs. L’impact du DU peut être réduit si le matériel est optimisé et si l’on accepte de sacrifier une partie de la flexibilité offerte par des implémentations logicielles.

4 Discussions

4.1 Limites

Comme tout modèle, celui que nous présentons comporte des limites et exclusions qui doivent être clairement exposées, car elles influencent directement les résultats et les conclusions. Plusieurs exclusions ont été faites, conduisant à une sous-estimation des impacts environnementaux.

Tout d’abord, certains éléments du modèle de fabrication ont été omis réduisant ainsi la prise en compte de cette phase. De plus, des infrastructures essentielles, telles que les poteaux, les armoires électriques et les salles de serveurs, ne sont pas incluses, contribuant encore à cette sous-estimation. Par ailleurs, la consommation en veille des DU et des AP a été exclue, ce qui minimise les impacts liés à la phase d’utilisation. Enfin, les phases d’installation, de maintenance et de fin de vie ne sont pas prises en compte, entraînant une sous-évaluation des impacts environnementaux sur l’ensemble du cycle de vie.

Le modèle présente également plusieurs limites susceptibles d’affecter la précision des résultats. L’utilisation de la base de données NegaOctet [15], en tant que boîte noire, restreint la modélisation précise des AP, FH et DU. De plus, l’absence d’accès aux fiches techniques des équipements réseau, ainsi que l’indisponibilité de technologies représentatives pour les AP en réseaux CF-mMIMO, réduit la fiabilité des estimations d’impact. Bien que les valeurs du modèle énergétique aient été adaptées, les hypothèses formulées ne peuvent être entièrement validées, ce qui affecte la précision des résultats de la phase d’utilisation.

Enfin, le modèle étant statique, il ne prend pas en compte l’évolution des besoins en données ou du mix énergétique au fil du temps. Cette simplification réduit la pertinence des résultats sur le long terme. Sur cette base, nous pouvons conclure que les impacts environnementaux ont probablement été sous-estimés, et que les résultats présentent une forte incertitude.

4.2 Comparaison avec l’état de l’art publié

À notre connaissance, aucun réseau CF-mMIMO opérationnel ne permet actuellement d’obtenir des mesures expérimentales pour valider notre modèle. Par conséquent, nous proposons une vérification de la cohérence en le comparant à l’état de l’art. Il n’existe pas de métriques harmonisées spécifiquement dédiées à l’évaluation environnementale des réseaux mobiles. Ainsi, une synthèse comparative est présentée dans la Table 1. Nous confrontons nos résultats à ceux des modèles de [9] et [15], dont est issu notre modèle énergétique. L’intensité énergétique par Gbit (IEpG) obtenue est très similaire à celle des références. Cela s’explique par la grande proximité des modèles énergétiques, qui influencent fortement les résultats. Toutefois, la puissance d’émission utilisée dans [9] est nettement plus élevée, ce qui conduit à une meilleure efficacité spectrale.

Les auteurs de [14] proposent un modèle pour l’empreinte énergétique et l’impact carbone d’une architecture RAN en Belgique. Il convient de noter que pour le modèle 4G de [14], les résultats obtenus sont très similaires à ceux de [5], bien que les périmètres étudiés diffèrent. Cette similarité s’explique par le fait que le réseau radio est censé concentrer la majorité des impacts énergétiques et environnementaux des réseaux mobiles.

Le fait que les chiffres de [14] soient proches de ceux de [5] suggère que leur modèle est robuste, ce qui rend les résultats concernant la 5G dans [14] particulièrement fiables. En théorie, l’architecture CF-mMIMO devrait offrir de meilleures performances en termes d’efficacité énergétique par rapport aux techniques utilisées dans les réseaux 4G et 5G. En effet, les résultats de notre étude montrent que, pour les deux

TABLE 1 : Comparaison des études sur l'intensité énergétique et carbone des réseaux mobiles. IEpU - Intensité énergétique par utilisateur (kWh/utilisateur/an). IEpG - Intensité énergétique par Gbit (kWh/Gbit). ICpU - Intensité carbone par utilisateur(a) (kgCO_{2e}/utilisateur/an). ICpG - Intensité carbone par Gbit (kgCO_{2e}/Gbit). SE - Efficacité spectrale.

scenario	Cette étude		[9]	[14]	[14]	[5]
	CF-mMIMO 3.5 GHz	CF-mMIMO 3.5 GHz	Belgique, 3.5 GHz	Belgique, 0.8-2.6 GHz	4G	Europe, 2018
K.L.M:P	8:16-4:0.2W	8:16-4:1W	3G	4G		Réseau actuel
Périmètre	Utilisation et fabrication du RAN	Utilisation du RAN	Utilisation et fabrication du RAN	Utilisation et fabrication du RAN		Réseau mobile complet
IEpU (a)	1.5	/	4-10	11-30		17
IEpG	0,000536 (d)	0,000528	0,003-0,004	0,019-0,05		0,033 (g)
ICpU (a)	0.90	/	3-4	5-10		5.1 (h)
ICpG	0,00032	/	0,0019-0,0025	0,05-0,019		0,008 (g)
SE bps/Hz	15 (b)(c)	24 (e)(c)	T2 (f)	2.1-3.9		/

(a) Le nombre d'utilisateurs est basé sur les données de trafic par smartphone de 2025 provenant de [7]. (b) SE ne prend pas en compte la marge de l'infrastructure. (c) La bande passante est de 20 MHz. (d) La métrique a été convertie de J/bit en kWh/Gbit. (e) SE est exprimé par antenne dans l'étude originale. (f) La bande passante est de 50 MHz. (g) Extrapolation de l'intensité énergétique par utilisateur basée sur le trafic de données par utilisateur en 2018 [7]. (h) L'intensité énergétique par utilisateur a été convertie grâce au mix énergétique CF de 0.3 kgCO_{2e}/kWh provenant de [5].

indicateurs IEpG (Intensité Énergétique par Gbit) et ICpG (Intensité Carbone par Gbit), le CF-mMIMO est environ 6 à 8 fois plus efficace que la technologie MIMO des réseaux 4G/5G (cf Table 1).

En conclusion, la vérification de la cohérence montre que les performances du CF-mMIMO sont alignées avec les résultats d'autres études et se situent dans la plage des attentes pour cette technologie. Cela nous amène à penser que notre modèle est cohérent et fiable.

4.3 Conclusion

Cette étude nous permet de mieux comprendre comment se comporte l'impact environnemental des réseaux CF-mMIMO en fonction de ses performances en débit. Nous retrouvons la prévalence de la consommation d'énergie dans de nombreux impacts environnementaux, cependant la contribution de la fabrication des équipements est significative et même majoritaire sur certaines catégories d'impacts. Il convient donc de ne pas négliger cette phase du cycle de vie. Le fait de la considérer dans le modèle permet de faire apparaître des phénomènes de saturation où la densification du réseau n'apporte que très peu de performances à un coût environnemental très élevé. Ce phénomène contribue au comportement observé : à partir d'un certain seuil, le fait d'augmenter les performances aura pour effet d'augmenter encore plus les impacts environnementaux. Selon les performances visées, une large gamme d'impacts sont possibles. Habituellement c'est la performance qui dicte le déploiement, entraînant souvent des effets rebonds par gain d'efficacité. Même lorsqu'un nouveau réseau est conçu de manière optimale, l'expérience passée montre que l'introduction de nouvelles technologies entraîne toujours l'ajout de nouveaux réseaux en parallèle des réseaux existants. Par conséquent, l'impact environnemental ne fait que croître au fil du temps. En outre, il existe un fort risque d'effet rebond du fait des très fortes capacités de débit et d'efficacité permises par le CF-mMIMO. Ainsi, bien qu'il soit essentiel de poursuivre l'optimisation énergétique des réseaux, il est également crucial de prendre en compte la gestion des infrastructures existantes et d'intégrer une approche globale afin de limiter l'empreinte environnementale globale et éviter de nouveaux effets rebonds. Il est tout à fait possible d'avoir un raisonnement inverse à nos habitudes : déployer un réseau CF-mMIMO avec un impact environnemental minimal, tout en respectant les limites planétaires, puis, à nous consommateurs, de s'adapter aux performances offertes par ce réseau.

Références

[1] K. Richardson et AL. : Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37):eadh2458, Sep.

2023.

- [2] Charlotte FREITAG, Mike BERNERS-LEE, Kelly WIDICKS, Bran KNOWLES, Gordon S. BLAIR et Adrian FRIDAY : The real climate and transformative impact of ICT : A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9):100340, 2021.
- [3] E. Lees PERASSO, C. VATEAU et D. FIRMIN : Evaluation de l'impact environnemental du numérique en france et analyse prospective - evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en france. Rapport technique, ADEME et ARCEP, 2022.
- [4] S. Benqassem et AL. : Digital technologies in Europe : an environmental life cycle approach. Rapport technique, GREENS/EFA, Dec. 2021.
- [5] Dag LUNDÉN, Jens MALMODIN, Pernilla BERGMARK et Nina LÖVEHAGEN : Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators. *Sustainability*, 14(5), 2022.
- [6] GSMA : Mobile net zero - state of the industry on climate action. Rapport technique, GSMA, 2023. Accessed : Mar. 26, 2025.
- [7] ERICSSON : Ericsson mobility report q4 2024. Rapport technique, Jun. 2024. Accessed : Mar. 26, 2025.
- [8] SBTi : Guidance for ICT companies setting Science Based Targets - mobile networks operators, fixed networks operators and data centres operators. Rapport technique, Feb. 2020. Accessed : Mar. 26, 2025.
- [9] Özlem Tuğfe DEMIR, Meysam MASOUDI, Emil BJÖRNSSON et Cicek CAVDAR : Cell-Free Massive MIMO in Virtualized CRAN : How to Minimize the Total Network Power? *In ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*, pages 159–164, 2022.
- [10] S. LANGE, J. POHL et T. SANTARIUS : Digitalization and energy consumption. does ict reduce energy demand? *Ecological Economics*, 176:106760, oct 2020.
- [11] ISO : (ISO 14040 :2006) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, jul 2006.
- [12] ISO : (ISO 14044 :2006) Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, jul 2006.
- [13] Rafik ZAYANI, Jean-Baptiste DORÉ, Benoit MISCOPEIN et David DEMMER : Local PAPR-Aware Precoding for Energy-Efficient Cell-Free Massive MIMO-OFDM Systems. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 7(3):1267–1284, 2023.
- [14] Golard LOUIS, Louveaux JÉRÔME et David BOL : Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints : the case of Belgium for 2020–2025. *Ann. Telecommun.*, nov 2022.
- [15] Négaoctet - mesure de l'impact environnemental du numérique, 2024. [Online]. Available : <https://codde.fr/nos-marques/negaocet>, Accessed : Mar. 26, 2025.
- [16] Maxime PERALTA : Integrating Screening Life Cycle Assessment in Digital System design flow to enable Eco-design. *In Date 2024 - W01 Eco-ES : Eco-design and circular economy of Electronic Systems*, Valencia, Spain, mars 2024.