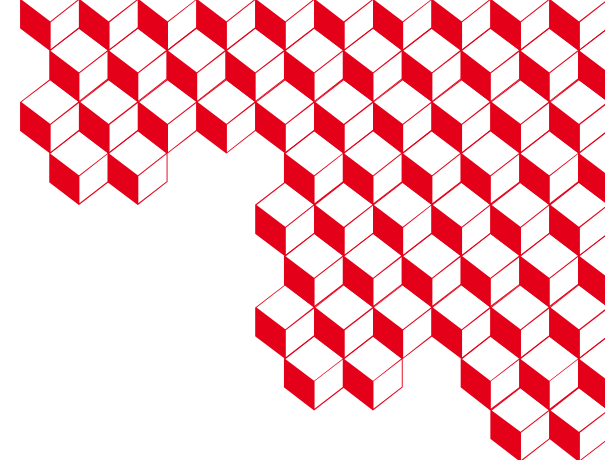




25 – 29 AOÛT 2025, STRASBOURG

Colloque GRETSI'25

XXX^e Colloque Francophone
de Traitement du Signal et des Images



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

Josua GUERID, *Jean-Baptiste DORÉ*, Rafik ZAYANI, Maxime PERALTA, Léa DI CIOCCIO

CEA Leti/List, Grenoble, France

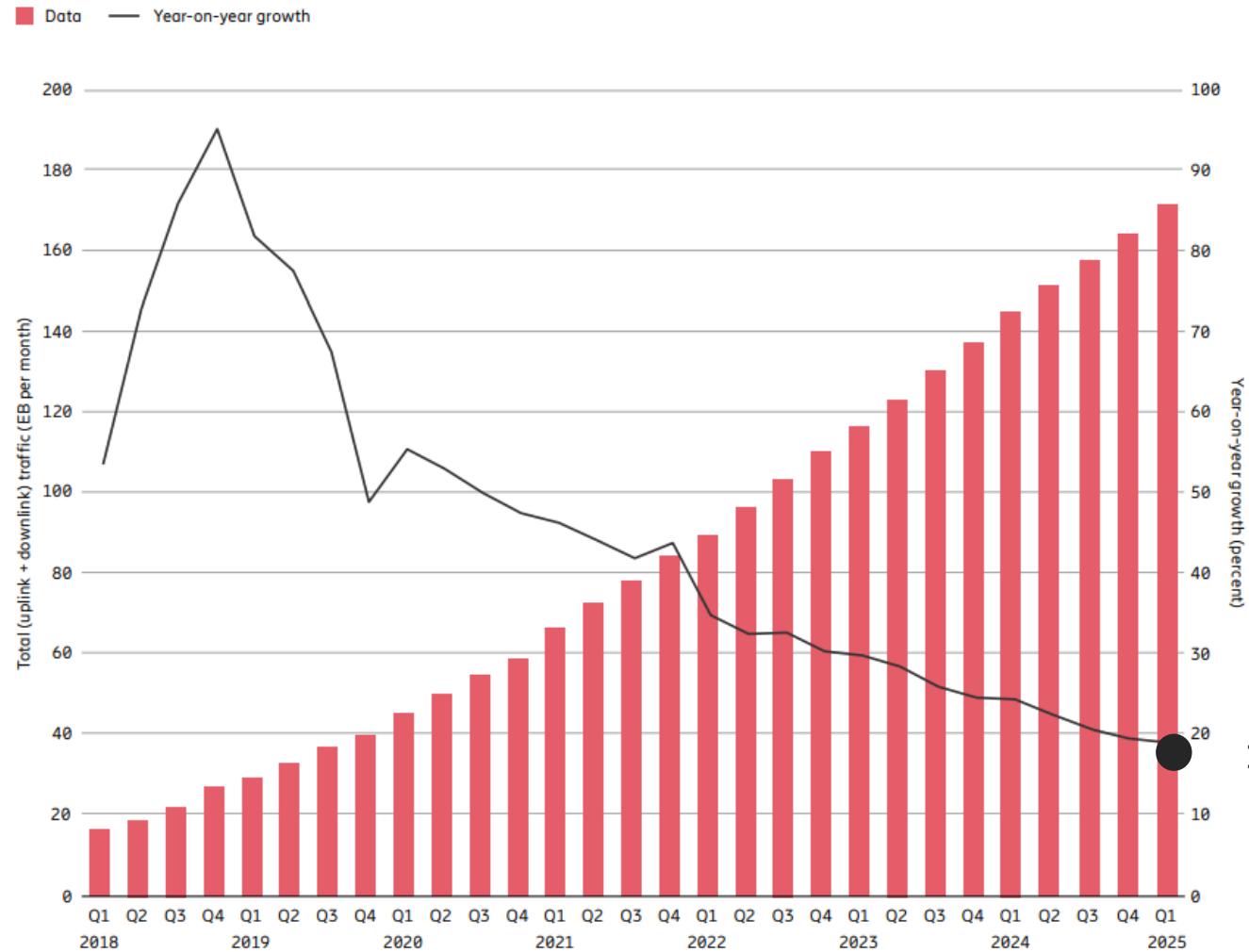


Outline



1. Past • Present • Future
2. How We Did It
3. Some results
4. So What?

Wireless mobile traffic

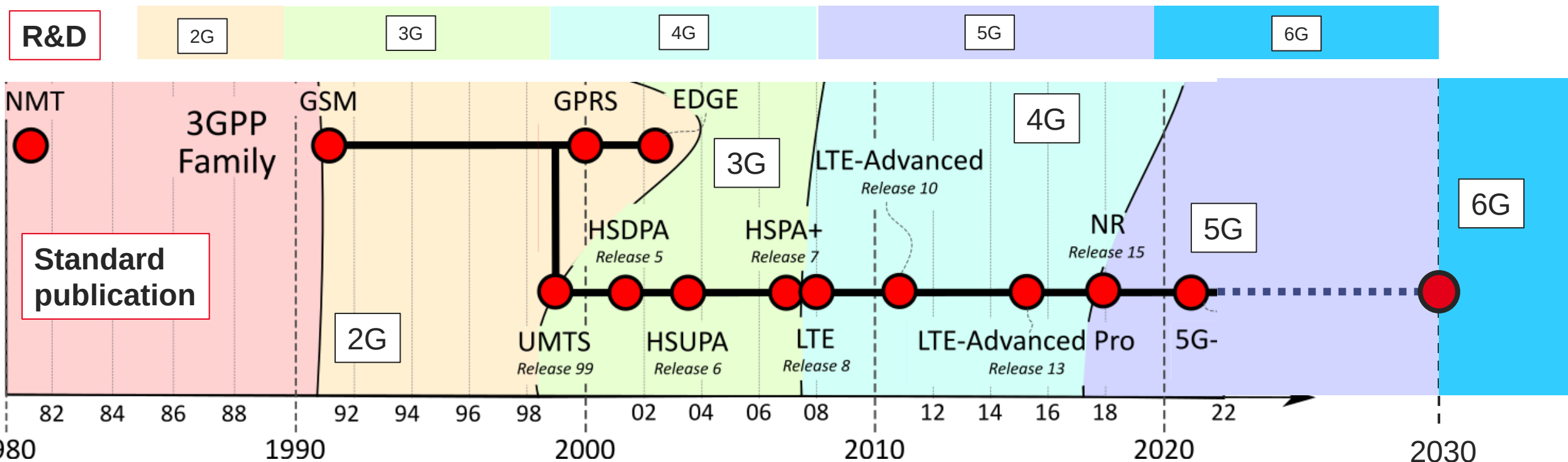


Note: Mobile network data traffic also includes traffic generated by Fixed Wireless Access services.

> 19% Q1-2024 Q1-2025



Wireless standard evolution



Inspired by Wikipedia

**Technologies
lifespan**

Spectrum (today)

600MHz

2GHz

3,5GHz

6-10GHz

26-40GHz

100-300 GHz

2G/3G/4G/5G

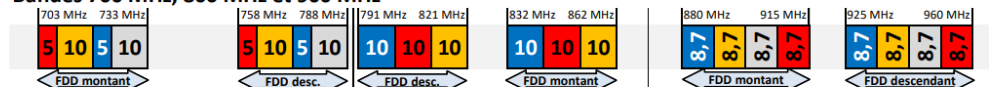
Fixed Access (P2P)

Satcom

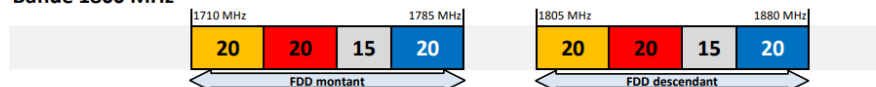
A partir du 8 février 2025

5G

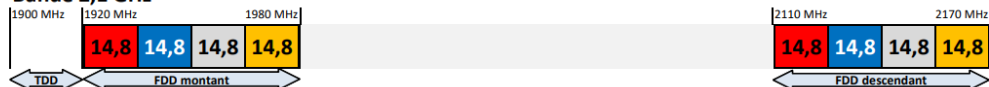
Bandes 700 MHz, 800 MHz et 900 MHz



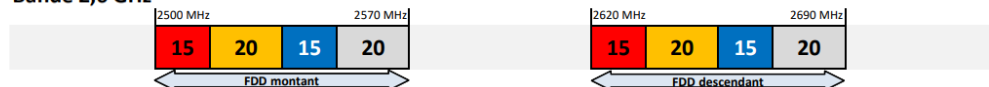
Bande 1800 MHz



Bande 2,1 GHz



Bande 2,6 GHz



Bande 3490 - 3800 MHz



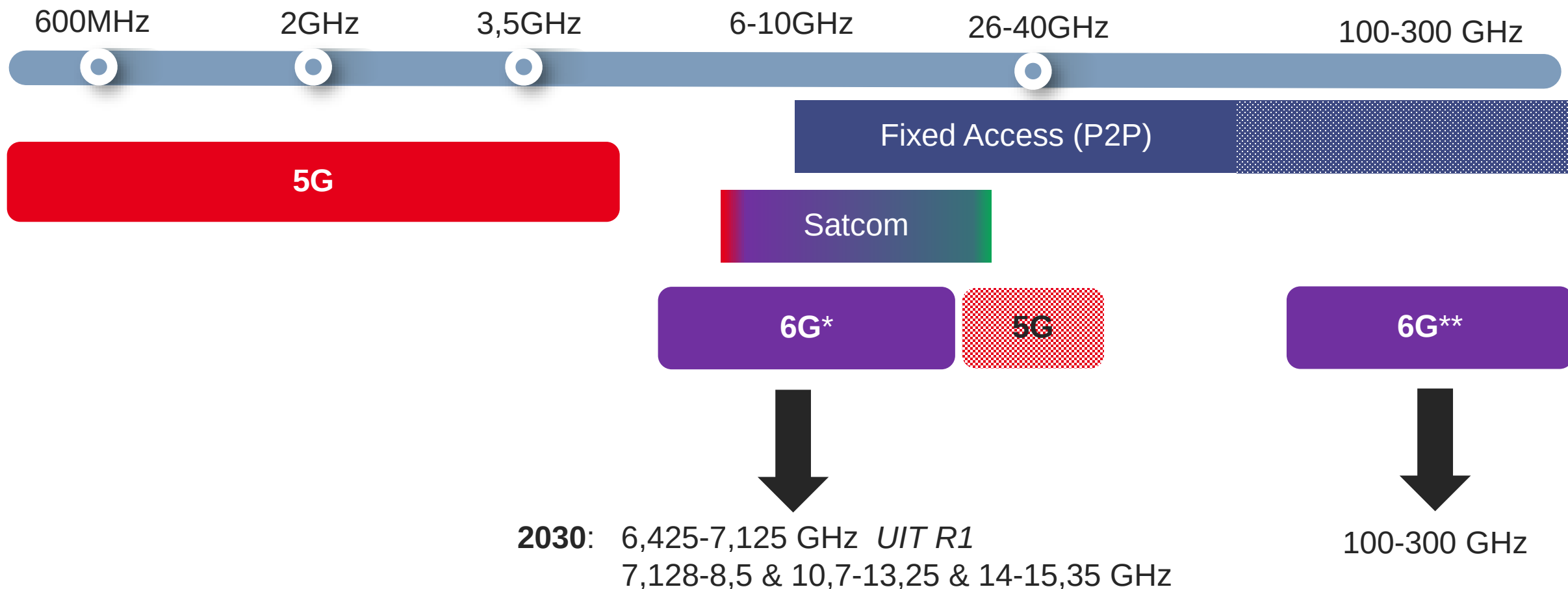
Bouygues Telecom

Free Mobile

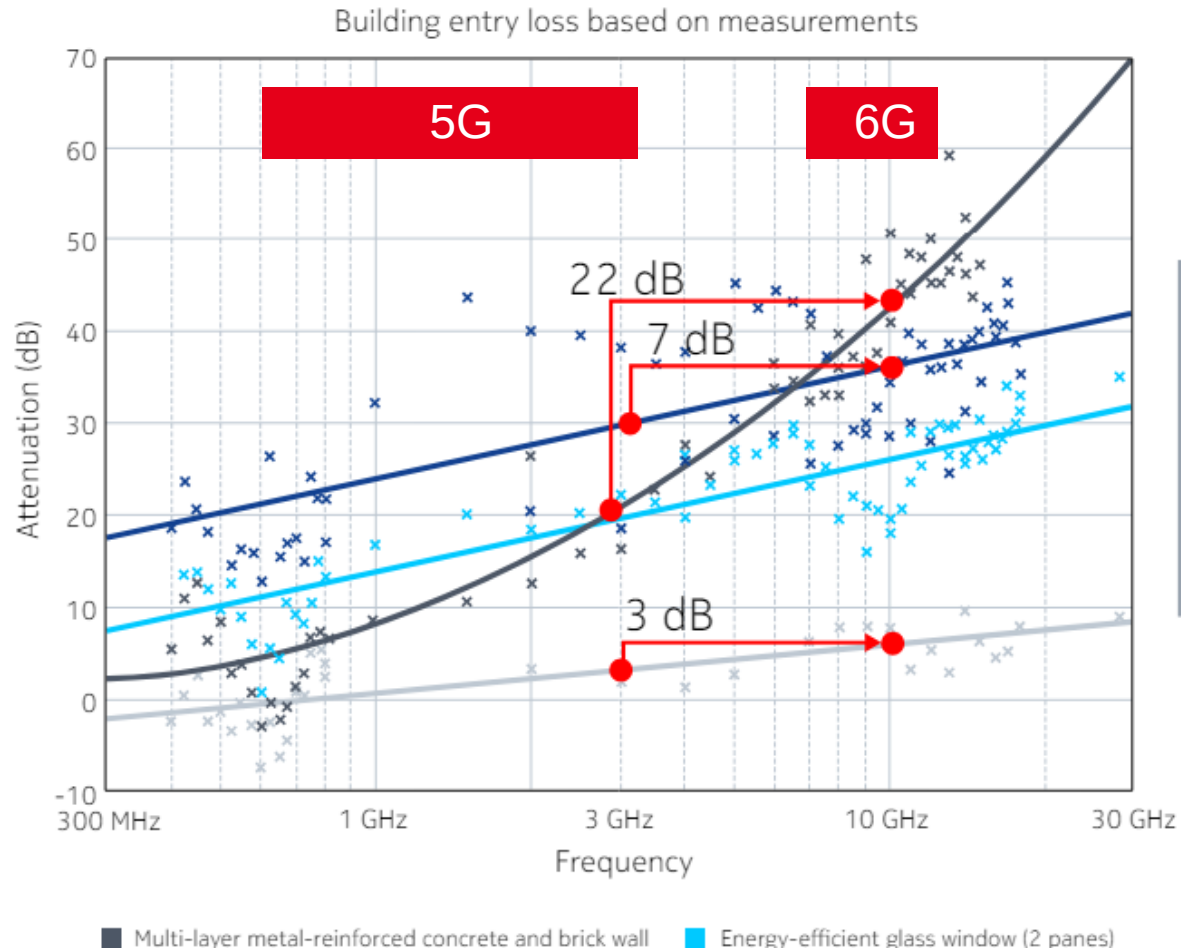
Orange

SFR

Spectrum (tomorrow)



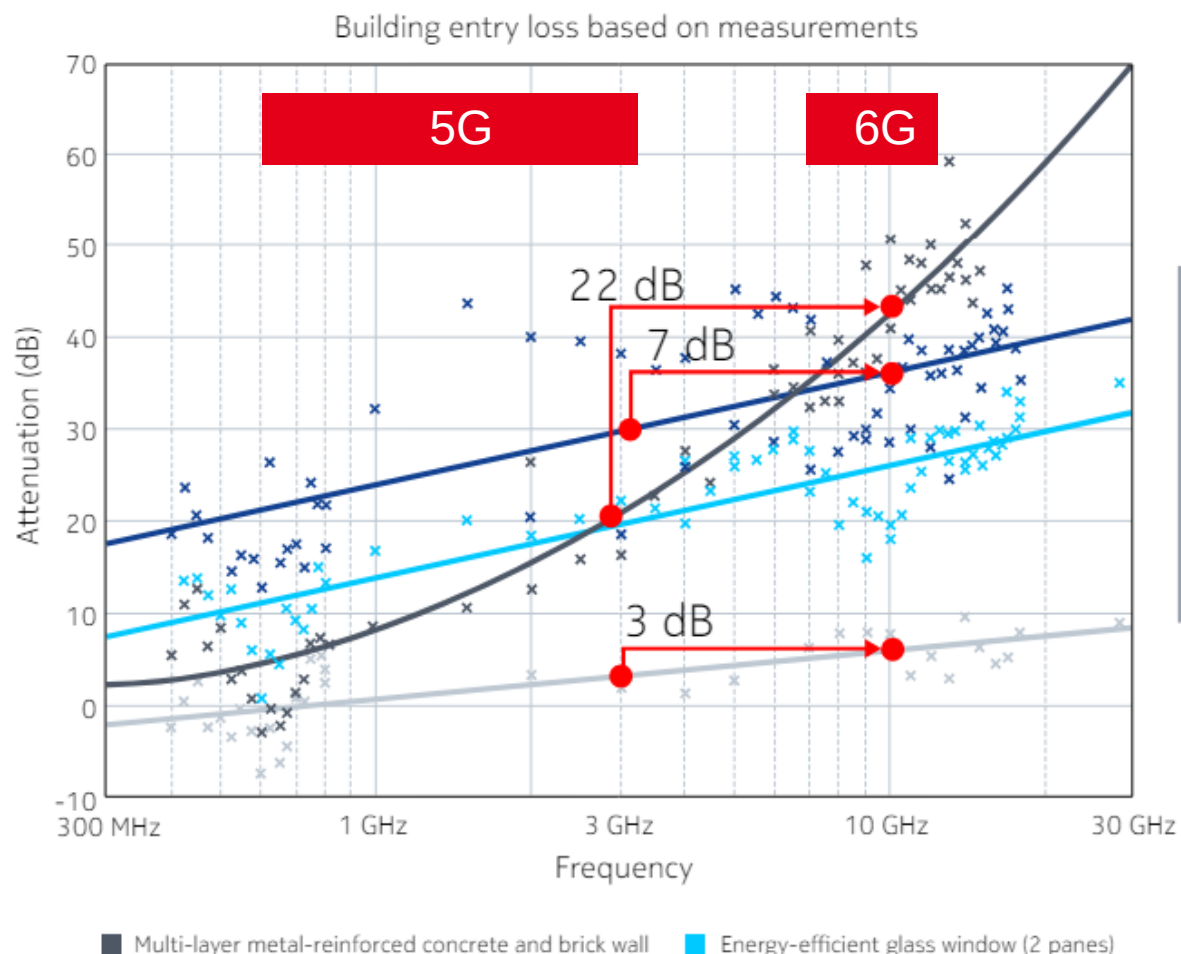
6G Band



Source NOKIA

- Indoor penetration loss increases from 3 to 10 GHz
- Standard clear glass: 3 dB → x 2
- Energy efficient glass: 7 dB → x 5
- Reinforced concrete: 22 dB → x 159

6G Band



Source NOKIA

- Indoor penetration loss increases from 3 to 10 GHz
- Standard clear glass: 3 dB → x 2
- Energy efficient glass: 7 dB → x 5
- Reinforced concrete: 22 dB → x 159

➡ Increasing EIRP is not an option

➡ Increasing density

Increasing density



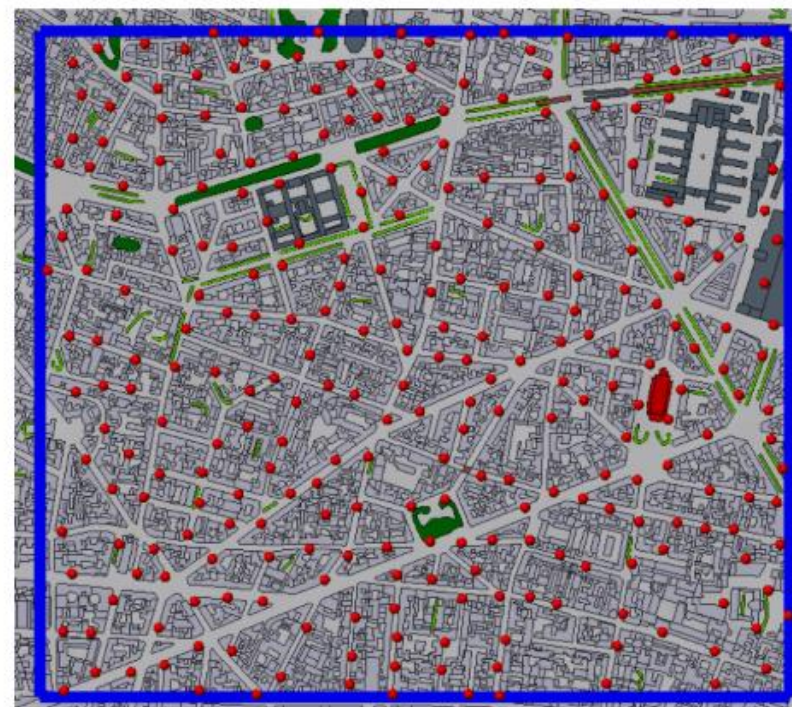
SIRADEL
ENGIE

Cellular mMIMO



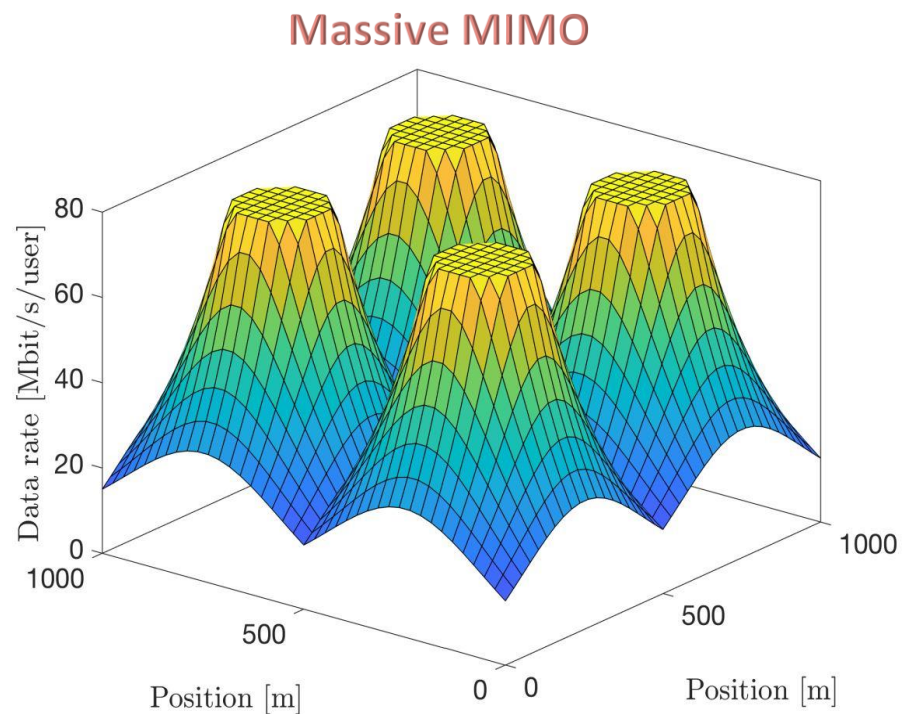
49 Base stations (BS)

cell free mMIMO (deployed on
lampposts every 50 m)

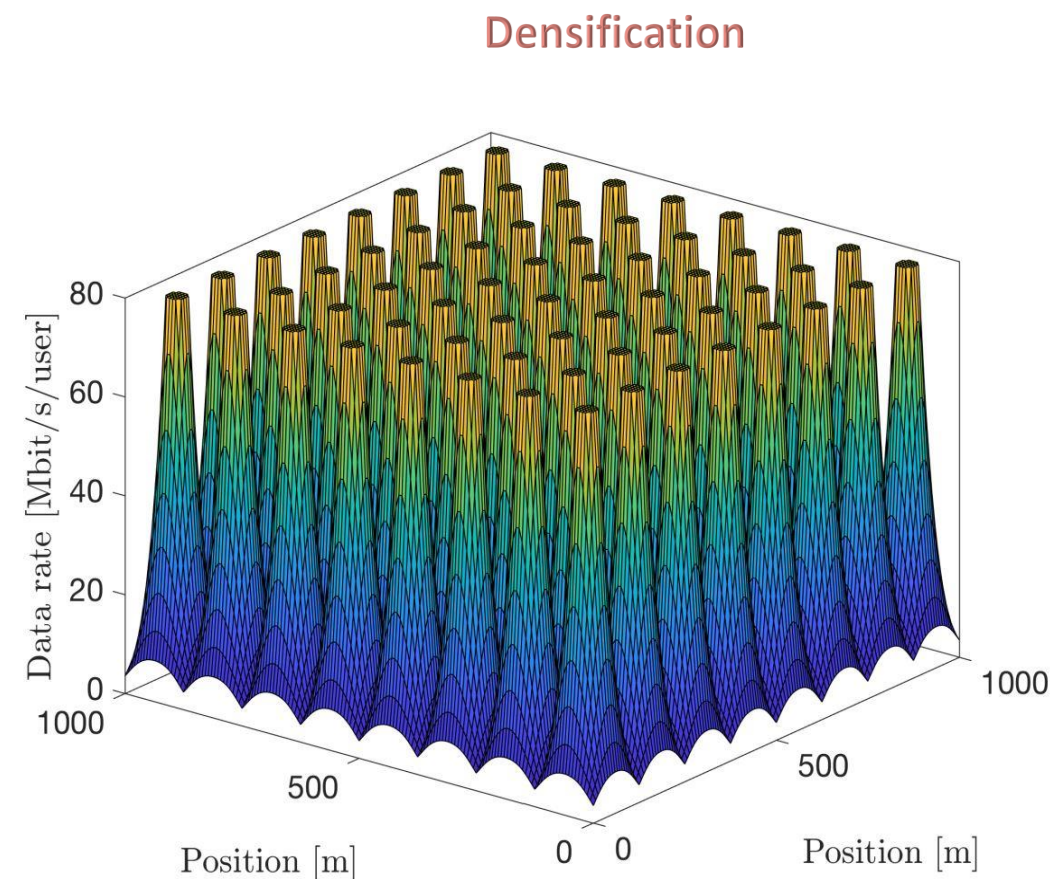


291 sites trisectorial or omni

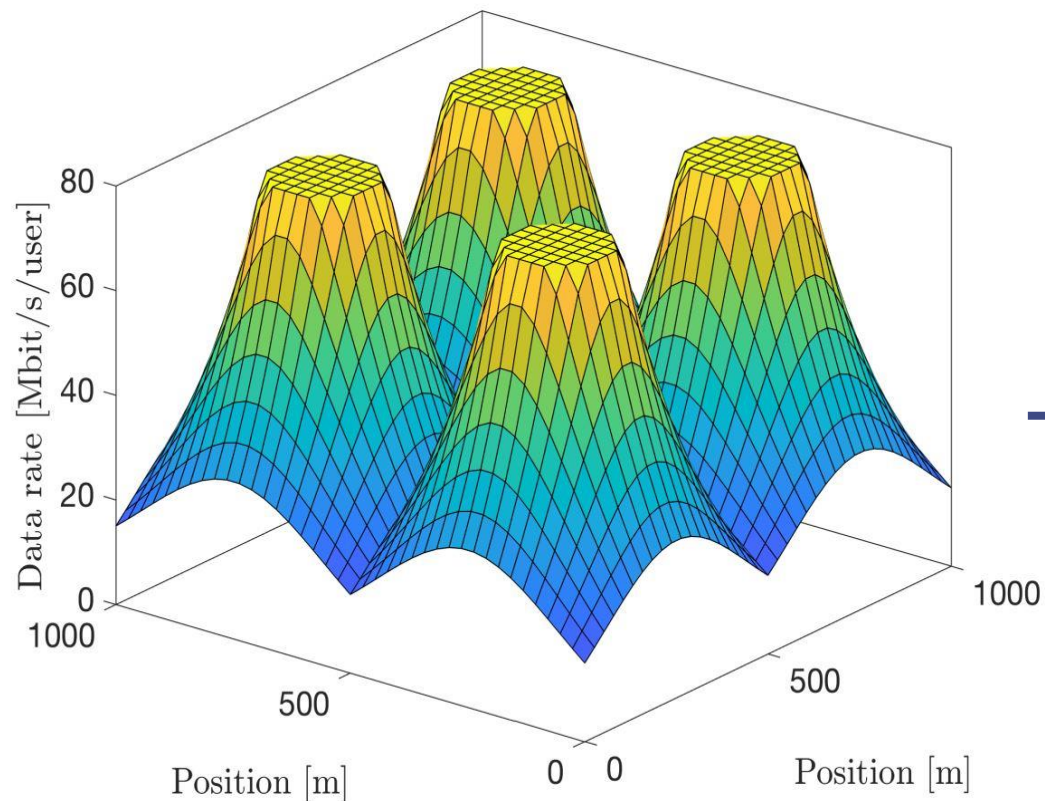
Increasing density



4 cells, 1 antenna
“Cellular system”



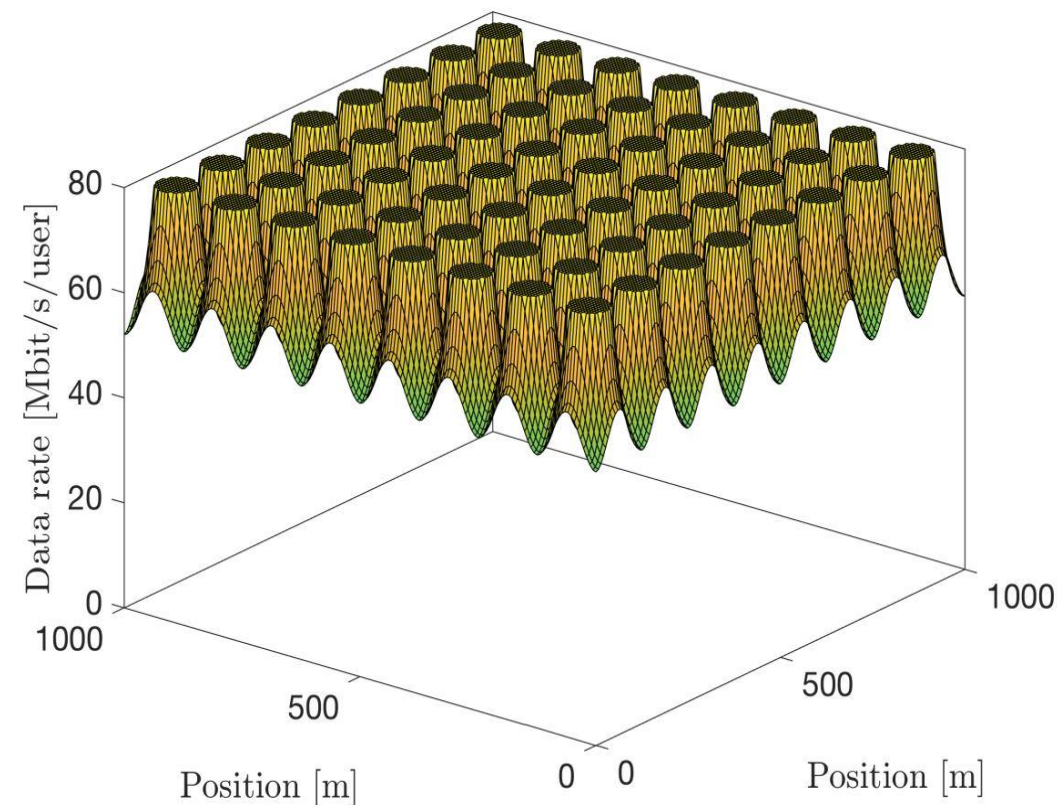
Wireless ambition: Performance Everywhere



4 cells, 64 antennas
“Cellular Massive MIMO”

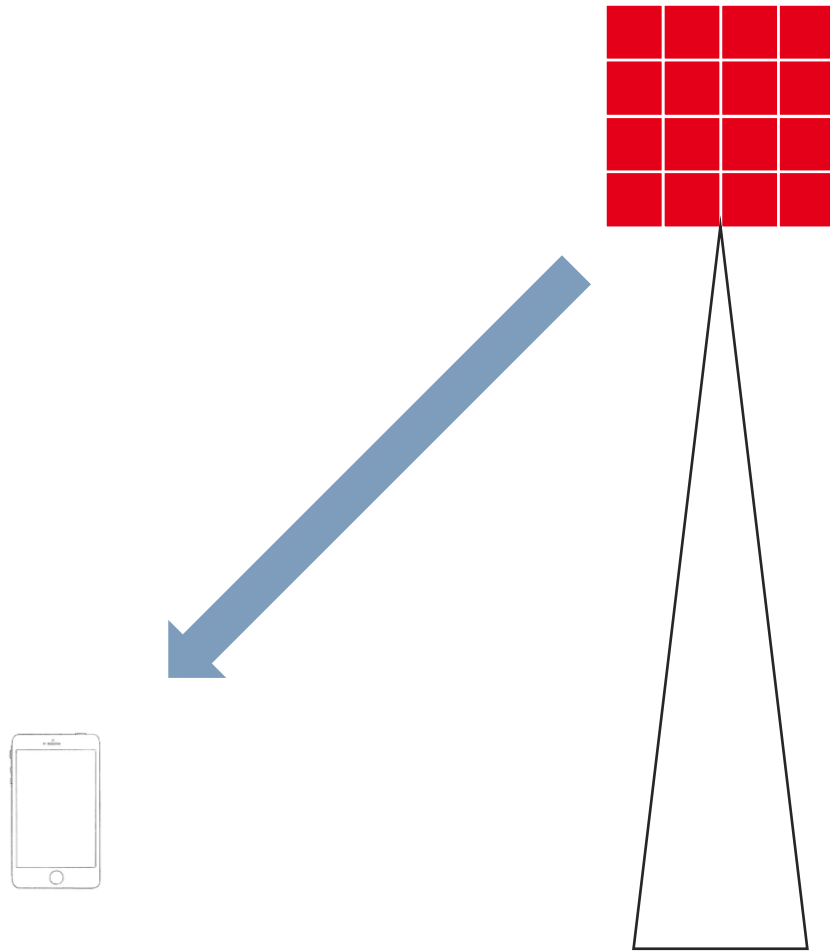
Next Step

Beyond Massive
MIMO

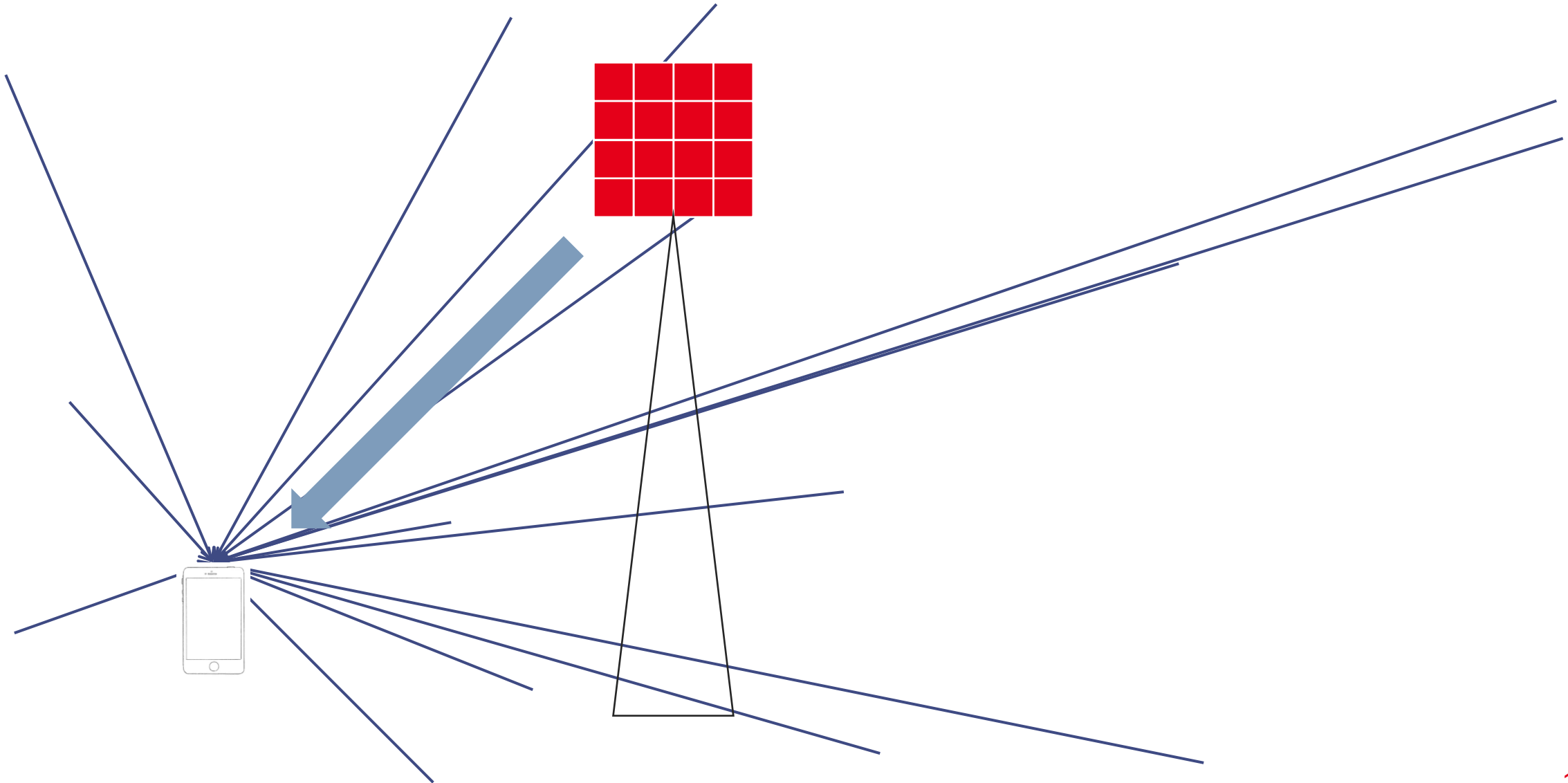


Distributed MIMO

(co-localized) MIMO to Distributed MIMO



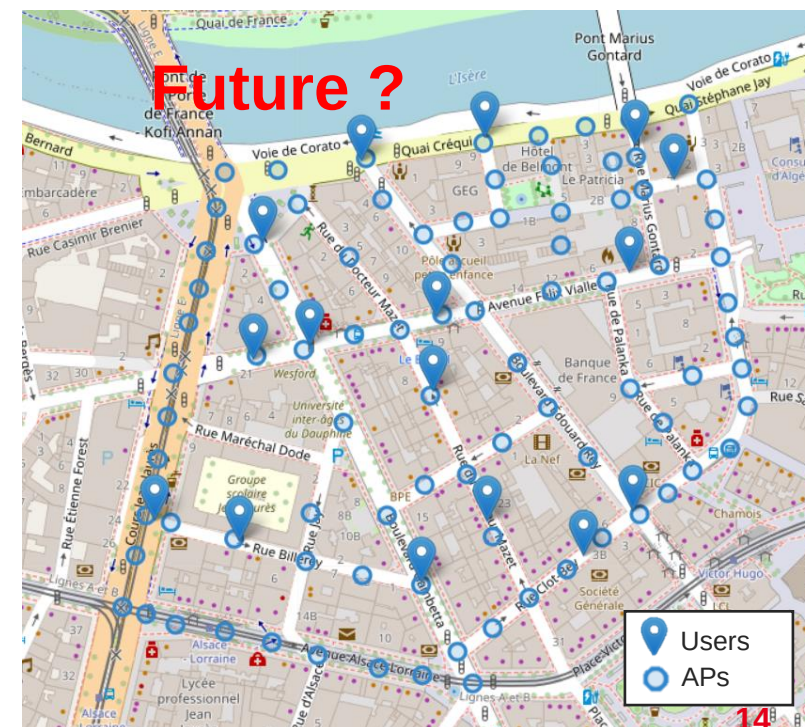
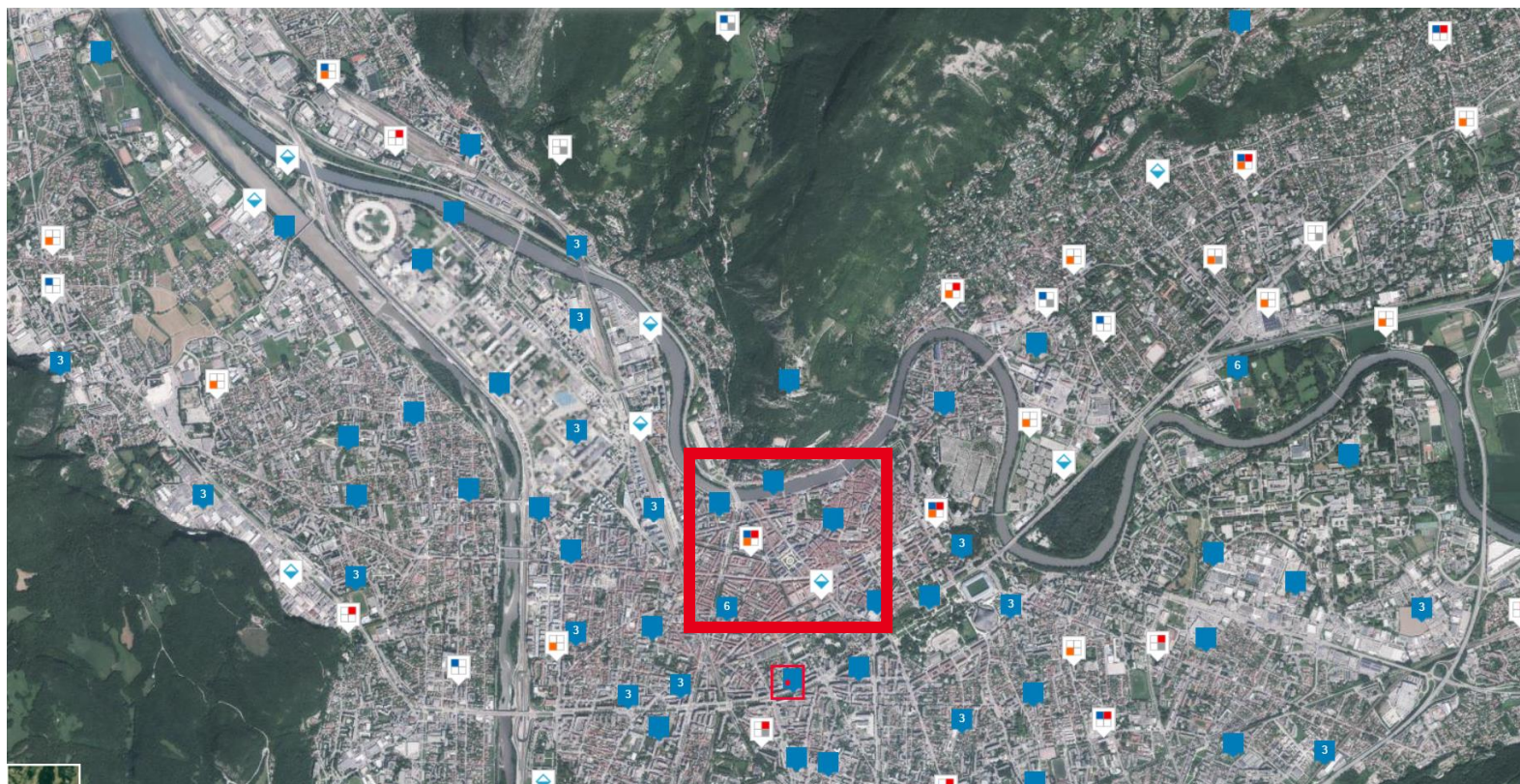
(co-localized) MIMO to Distributed MIMO



Increasing density



<https://www.cartoradio.fr/>



Can densification be sustainable ?

Life Cycle Assessment (LCA)

- ❑ **Definition:** Life Cycle Assessment (LCA) is a standardized evaluation method (ISO 14040 and 14044) that enables a **multi-criteria** and **multi-stage environmental assessment** of a system (product, service, company, or process) across its entire life cycle,

- ❑ **Objectives:**
 - ❑ assess the environmental contributions of different life cycle stages or subsystems (components, materials, processes) to **guide eco-design** and improve performance;
 - ❑ compare the environmental performance of two systems with the same function, based on an equivalent functional unit.

Methodology - overview

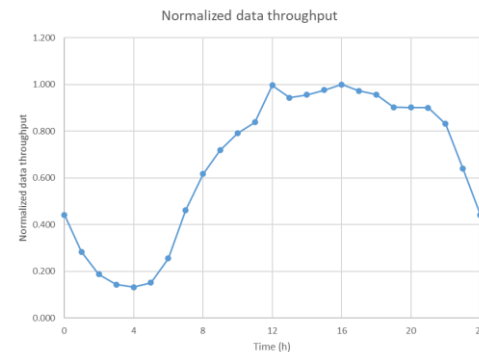
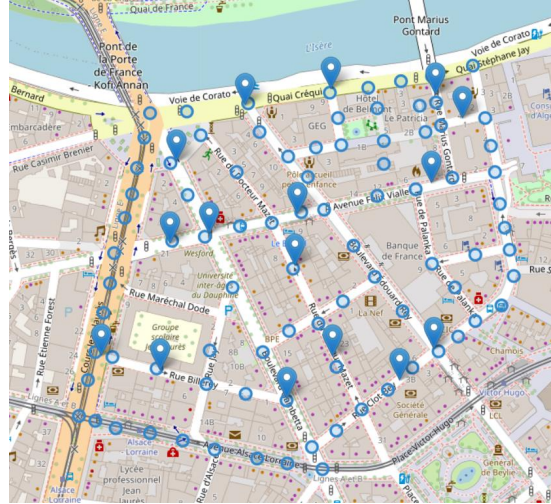
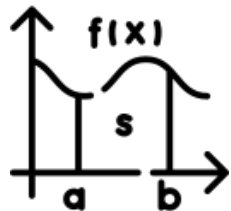
Use-case scenario



Parameters

RF Power, densification

Daily demand



Based on L. Gollard, J. L. Loeux, and D. Bol, 'Evaluation and projection of 4G and 5G RAN energy footprints: the case of Belgium for 2020-2025', Ann. Telecommun., Nov. 2022.

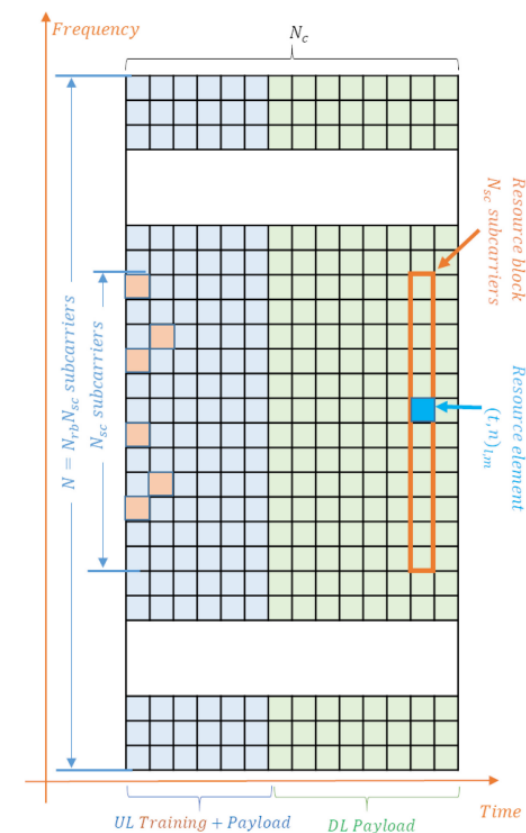
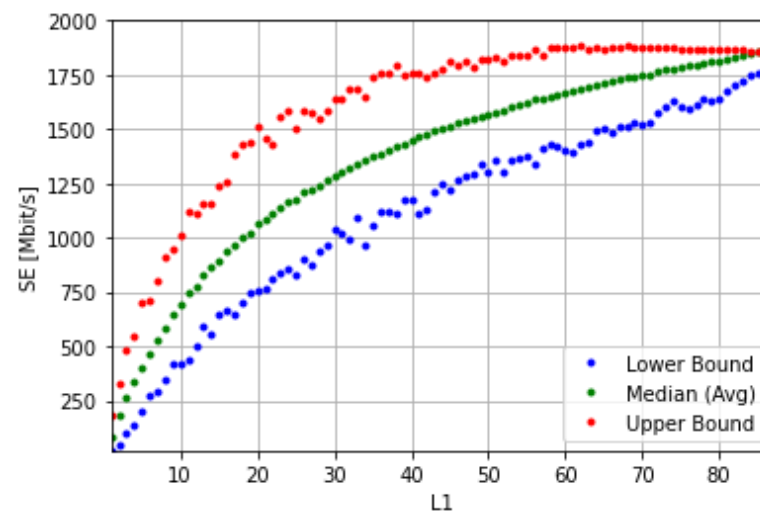
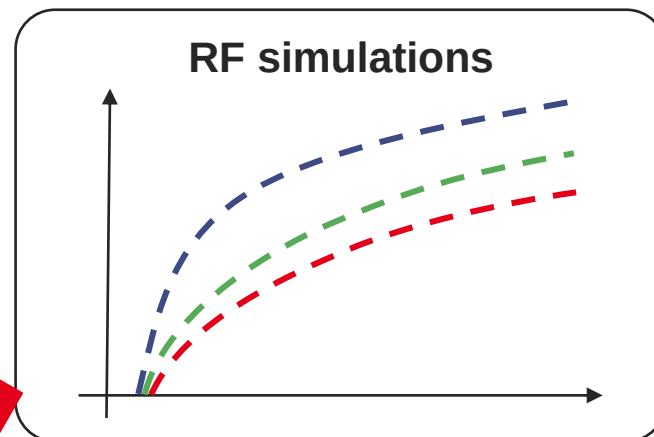
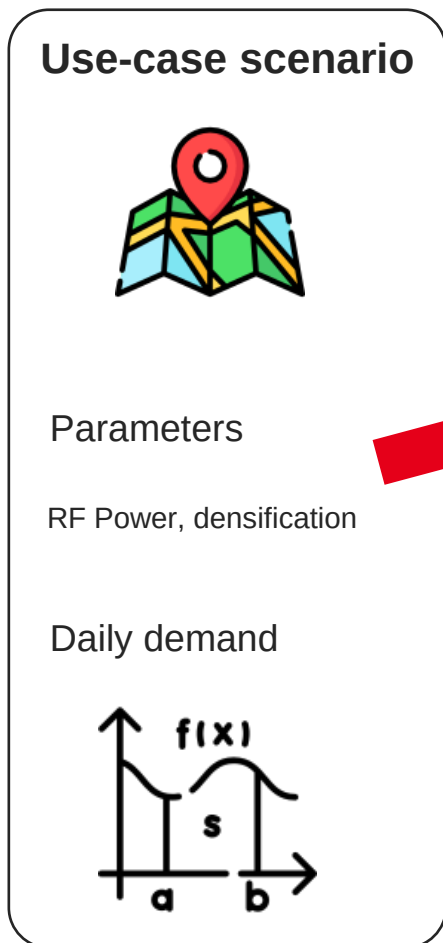
			Run #1	Run #2
K	# users	unit	[1;2;3...;15]	[5;10;15]
L	# APs	unit	[1;2;3;...;85;86;87]	[1;2;3;...;13;14;15]
M	# antennas	unit	[2;4;8;16;32]	[4;8;16;32]
P_{RF}	AP RF power	dBm	[23]	[20;26]

Simplified architecture based on Demir



Source : Ö. T. Demir, M. Masoudi, E. Björnson, and C. Cavdar, 'Cell-Free Massive MIMO in Virtualized CRAN: How to Minimize the Total Network Power?' arXiv, Feb. 18, 2022.

Methodology - overview

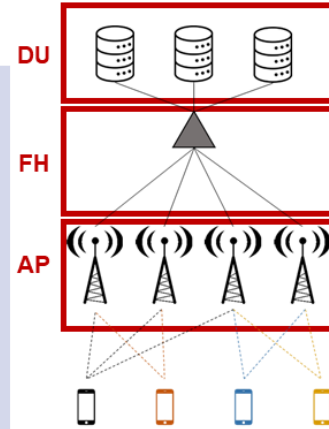


Methodology - overview

Manufacturing

Define a model depending on:

- Quantity and nature of the elements of the network
- Performance of the network
- Available LCA data



Use

Simplified & adapted energy model from Demir

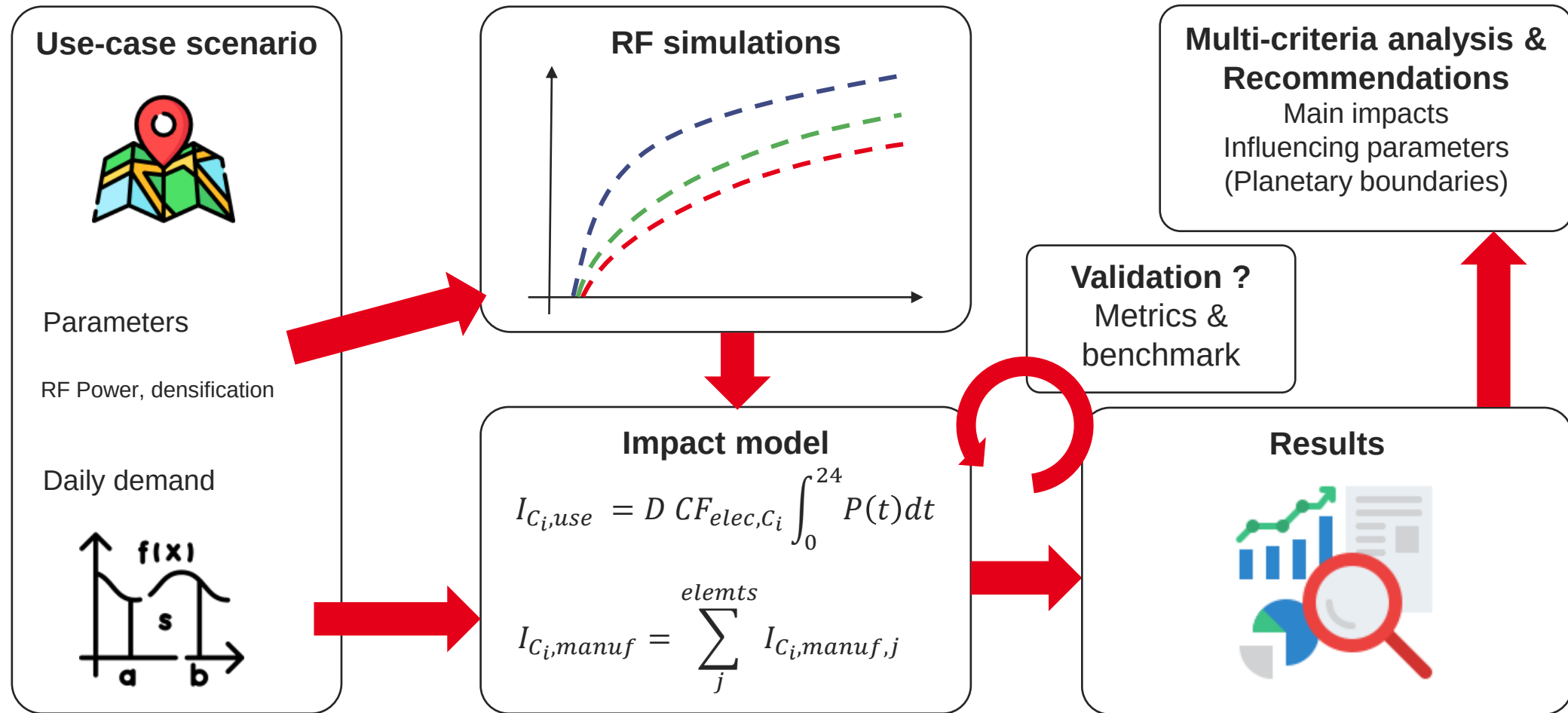
Source : Ö. T. Demir, M. Masoudi, E. Björnson, and C. Cavdar, 'Cell-Free Massive MIMO in Virtualized CRAN: How to Minimize the Total Network Power?' arXiv, Feb. 18, 2022.

Impact model

$$I_{C_i,use} = D CF_{elec,C_i} \int_0^{24} P(t)dt$$

$$I_{C_i,manuf} = \sum_j^{elems} I_{C_i,manuf,j}$$

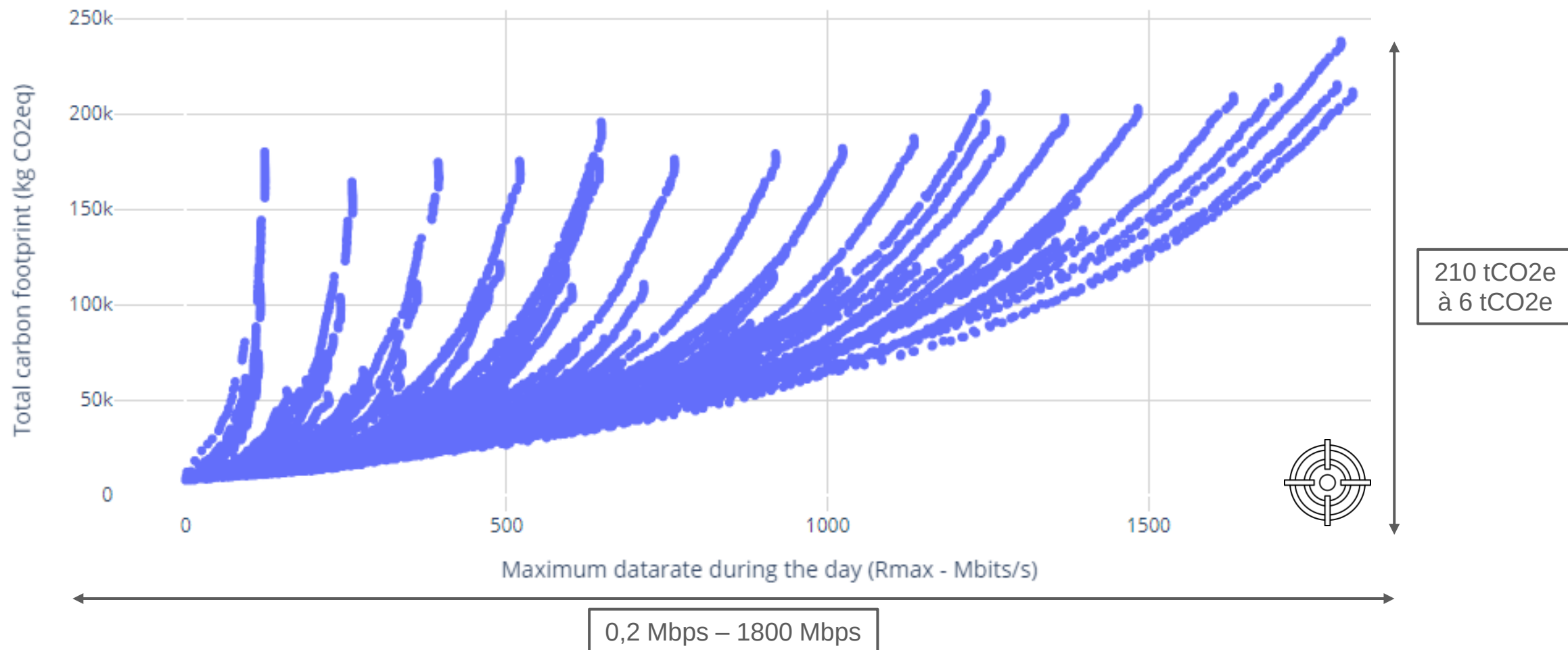
Methodology - overview



Tendencies on total global warming



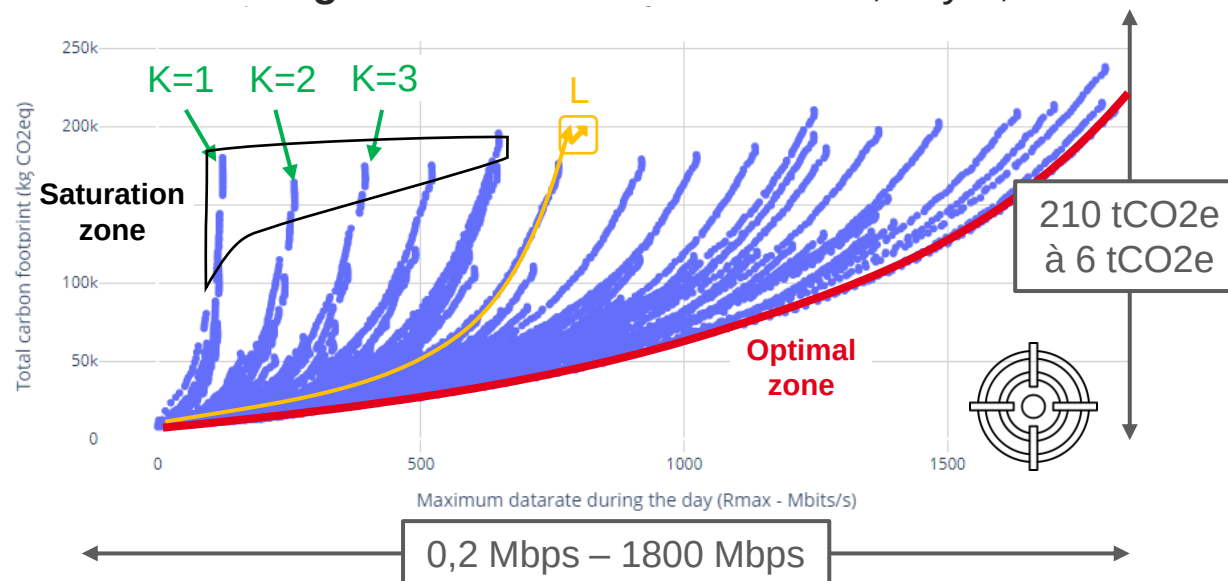
Environmental impact of the CF-mMIMO network for 10 years : zoom on Total_CF_mMIMO



Tendencies on total global warming

K	#users / time slot
L	#APs (Access Points)
M	#Antennas / AP
P	Transmitted power / AP

Global warming of the CF-mMIMO network, 10yrs, EU mix



Empirical optimal combinations in case of optimal zone for carbon indicator

L	1-22	6-16	12-31	13-87
K	4-15	10-13	13	15
M	4	16	16	32
P_{RF} (dBm)	20-23	23	23	20
Rmax network (Mbps)	25-460	460-750	750-980	980-1800
Rmax/user (Mbps)	6,2-31	46-57	58-75	65-120
W	1-3	3-16	6-16	13-87
tCO ₂ eq	8-27	27-42	27-62	62-210

- Going toward right side = densifying the network
- A wide range of possibilities
- **Saturation zone** : while K, L, M, P => impact ++ & perf ++
- **Optimal zone** : limited number of environmentally relevant parameters



Compromise to find between impacts and performance

Others indicators

Global warming of the CF-mMIMO network per node and phase, 10yrs, EU mix, K=10, L=8, M=16, P_RF=26 dBm

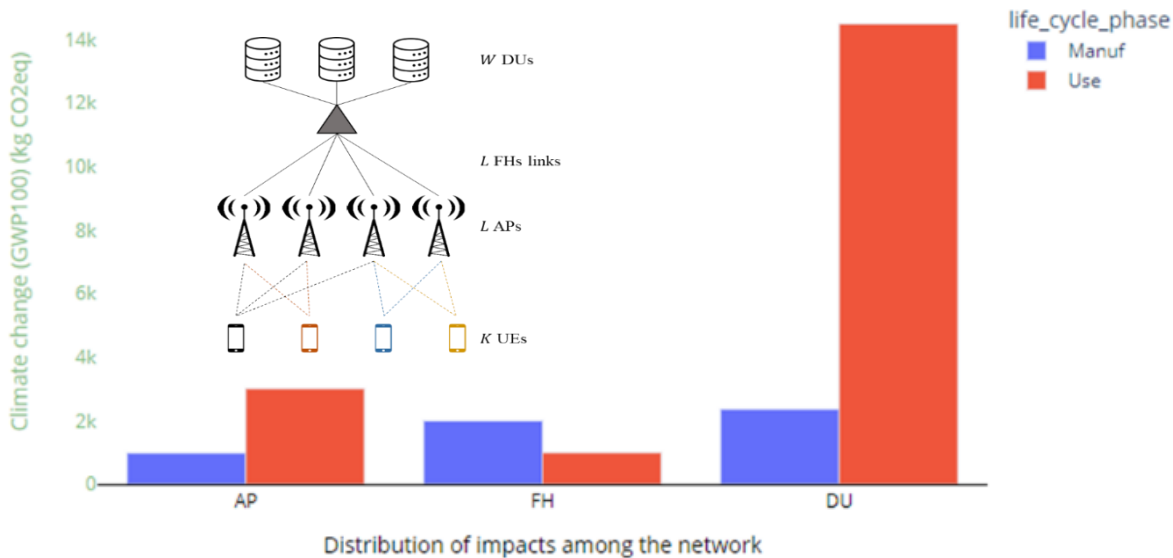
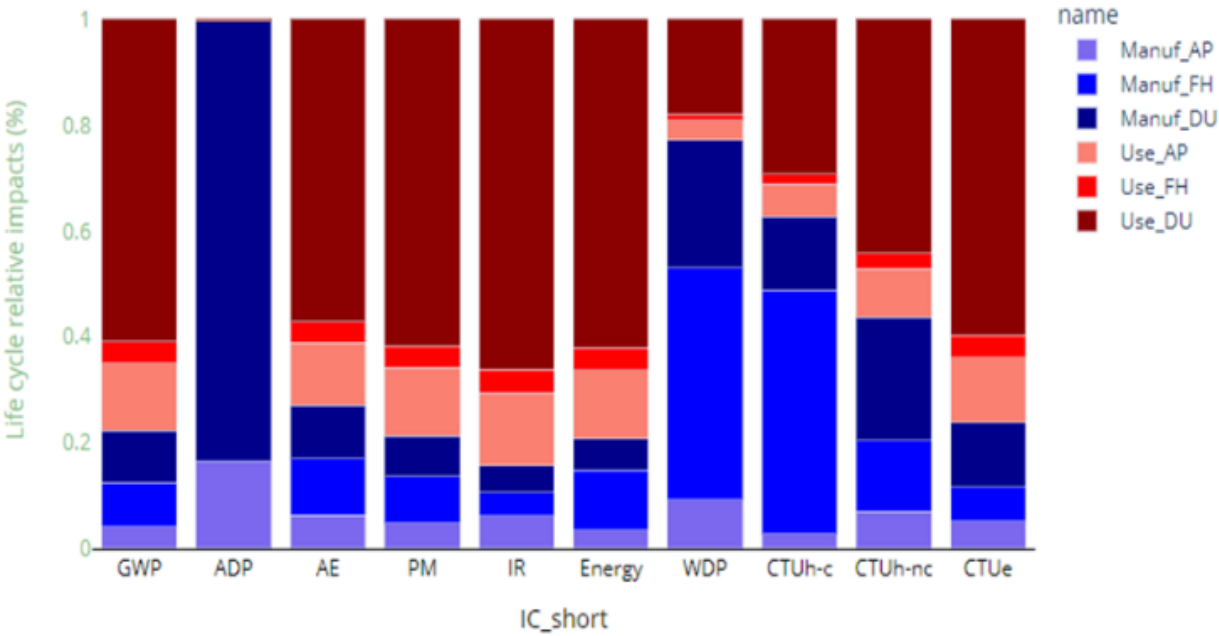


TABLE 1 : Comparaison des études sur l'intensité énergétique et carbone des réseaux mobiles. IEpU - Intensité énergétique par utilisateur (kWh/utilisateur/an). IEpG - Intensité énergétique par Gbit (kWh/Gbit). ICpU - Intensité carbone par utilisateur(a) (kgCO2e/utilisateur/an). ICpG - Intensité carbone par Gbit (kgCO2e/Gbit). SE - Efficacité spectrale.

	Cette étude	[9]	[14]	[14]	[5]
Scénario	CF-mMIMO 3.5 GHz	CF-mMIMO 3.5 GHz	Belgique, 3.5 GHz	Belgique, 0.8–2.6 GHz	Europe, 2018
K;L;M;P	8;16;4;0.2W	8;16;4;1W	5G	4G	Réseau actuel
Périmètre	Utilisation et fabrication du RAN	Utilisation du RAN	Utilisation et fabrication du RAN	Idem	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)	12 (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 kgCO2e/kWh provenant de [5].

Life cycle impacts of the CF-mMIMO network per category, 10yrs, EU mix, K=10, L=8, M=16, P_RF=26 dBm



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

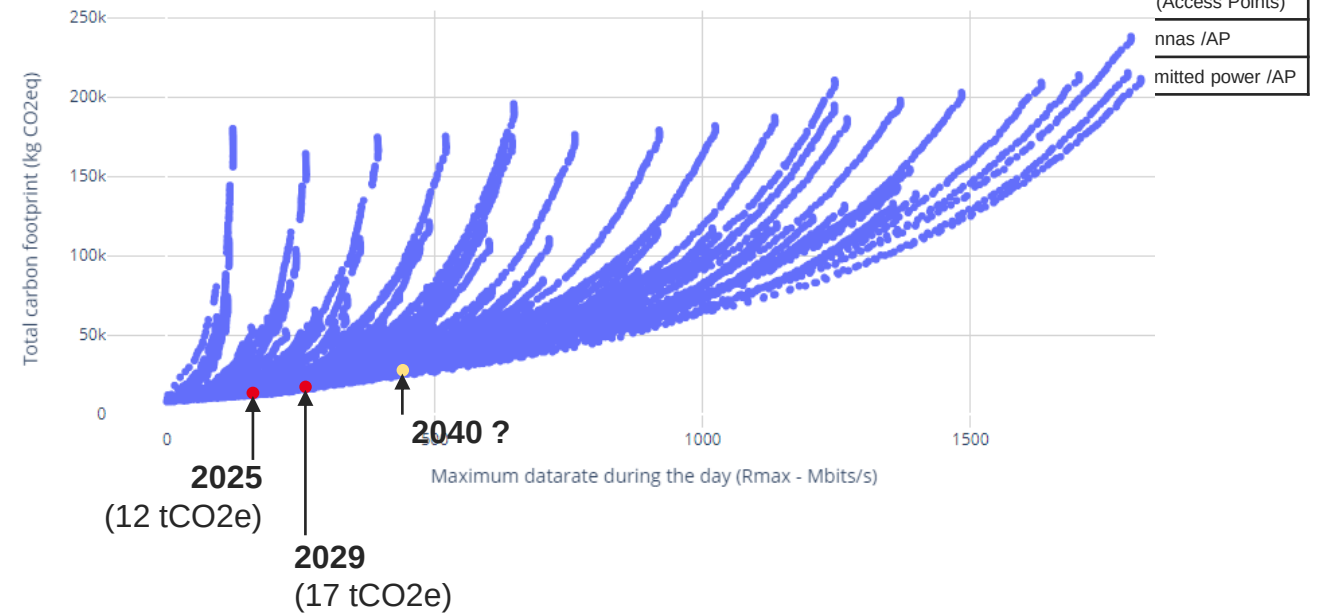
Grenoble use-case

- Grenoble dense urban area 0,13 km²
- 9000 pers/km² => 1200 pers
- Data plan 2025 : 29,3 GB/month/pers
- Data plan 2029 : 48,9 GB/month/pers

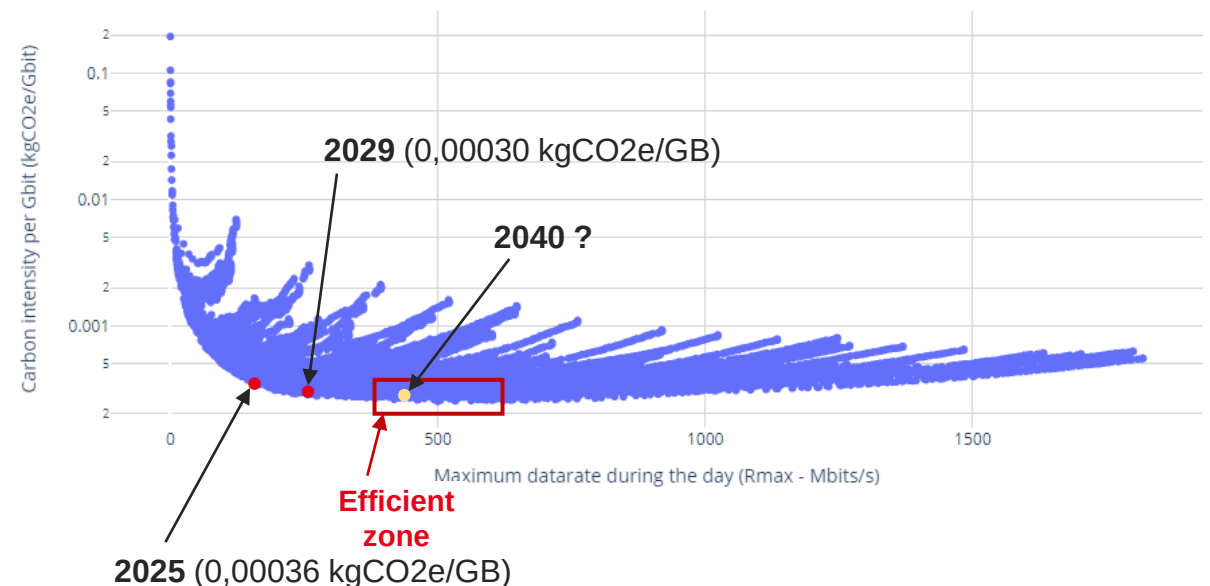


In 2030, the estimated needs will **not** reach the efficient zone. Deployment would just be **starting** with many **other** bands available.

Environmental impact of the CF-mMIMO network for 10 years : zoom on Total_CF_mMIMO



Intensity metrics of the whole CF-mMIMO network for 10 years



Grenoble use-case

- Historical infrastructure → will 6G **come on top** or be **replacing** previous technology ?
 - If « on top », this will only increase the impacts
 - If replacing partially the current network → what are the impacts ? On what conditions this is sustainable ?



- New architecture could be a candidate to **fit with the demand evolution**
- But there is a **high risk of rebound impact**
- Choice of **deployment** is of prior importance

Limits and Disclaimer

- Results only valid for the **presented model** and associated **scenario** and **perimeter**.
 - Figures represent **10 years of use** and consider the **daily mobile demand profile**
 - Electricity mix : **EU**
 - Model **precision is limited** (cf exclusions and limits)
 - The model is **static**. This simplification reduces the relevance of the results in the long term.

On this basis, we can conclude that the environmental impacts have likely been underestimated, and that the results are subject to significant uncertainty.

- We **do not know yet if densification is feasible** from a technological point of view, and **no deployment are existing** so far.
- Those results **cannot be extrapolated to other situations**

Conclusion



K	#users
L	# APs
M	#Antennas /AP
P	Transmitted power /AP

- **First LCA on CF-mMIMO network**
 - Taking into account both **manufacturing** and **usage** on **energy** and other environmental **impacts** (not limited to carbon)
 - **DU use** impact is **predominant**
 - **Manufacturing should not be ignored**, it can represent up to 50% of the impacts depending on elec mix
- **It is important to consider multiple life cycle phases ...**
 - Ignoring manufacturing probably **leads to optimistic results**
- **... and multiple environmental impacts**
 - **Focusing only on energy cannot lead to the best sustainable solution** (other indicators existing)
 - **Optimization is different** for every use-case and indicator. **Compromise** need to be found.
- **The higher the performance, the higher the costs**
 - **Densifying** the network too much leads to a **poorer efficiency**
 - **Peaks are costly** - look for mechanisms that could flatten them (time-dependent subscription ...)

October 2024

New consumption peak record in France



Christian Gacon · 2e

Vice President, Broadband Networks at ...

4 j · 🌐

Le réseau d'Orange a donc battu ce soir-là un nouveau trafic internet. Selon un article publié dans [Light Reading](#) de même pour [Comcast](#) (voir commentaire).

A noter que le précédent record datait du 1er mai 2024

October 2024

New consumption peak record in France

Pre-launch Call of Duty



11:30 B. 26%

pour que cette quantité de trafic puisse être absorbée. Ça a comme un hic !

Christian Gacon · 2e
Vice President, Broadband Networks at ...
4 j ·

[Se connecter](#)

Call of Duty envoie le trafic internet dans la stratosphère.

Le 21 octobre 2024 a vu le pré-lancement de "Call of Duty: Black Ops 6". Concrètement, tous les joueurs de Call of Duty ont téléchargé automatiquement une mise à jour qui pèse entre 80 Go et 300 Go selon les configurations. Il ne restait plus ensuite qu'à télécharger un petit complément le 25 octobre, jour de la sortie commerciale, pour les joueurs qui ont acheté la licence

En France, ces téléchargement ont commencé à partir 18H et se sont réalisés pendant la soirée. Ils ont donc eu lieu pendant la période où les réseaux sont les plus sollicités. En effet, "l'heure de pointe" des réseaux télécoms est en début de soirée lorsque les clients se connectent sur les plateformes de streaming pour regarder une série, un replay ou un film.

Le réseau d'Orange a donc battu ce soir-là un nouveau record de trafic internet. Selon un article publié dans [Light Reading](#), il en a été de même pour [Comcast](#) (voir commentaire).

A noter que le précédent record datait du 1er mai 2024 et correspondait à une autre mise à jour de Call of Duty qui coïncidait avec un match de football de ligue des champions (demi-finale aller PSG-Dortmund).

Cette fois-ci, l'énormité de la mise à jour et l'horaire choisi pour sa mise à disposition auront permis à Call of Duty de battre le record sans avoir besoin de l'aide d'un match de football à forte audience.

Heureusement, le réseau d'Orange est suffisamment solide pour absorber un tel événement.

Cependant, on peut se demander si l'éditeur de Call of Duty se permettrait d'envoyer des mises à jour de 300 Go, à des joueurs qui n'achèteront peut-être jamais le jeu, à une heure de "grande écoute", alors que cela pourrait être fait à des horaires beaucoup moins problématiques, s'il payait au juste prix le trafic qu'il envoie aux opérateurs

Pour mémoire, Call of Duty est un jeu produit par [Activision Blizzard](#), société achetée par [Microsoft](#) en 2023.

[#gafam](#) [#internet](#) [#telecom](#)

Towards reduction of environmental impacts of ICT

Will the 6G be ...

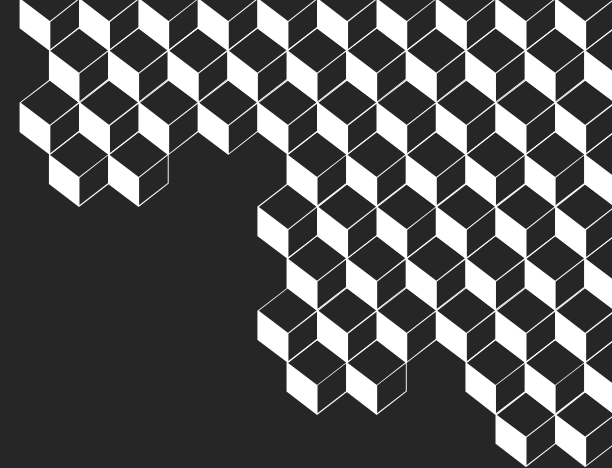
Part of the problem ?

- Accumulation of networks
- Rebound effects



Part of the solution ?

- *More energy efficient per GB w.r.t 3G, 4G, 5G*



Acknowledgments

Jean-Baptiste Doré – CEA-Leti

jean-baptiste.dore@cea.fr

Peralta Maxime – CEA-List

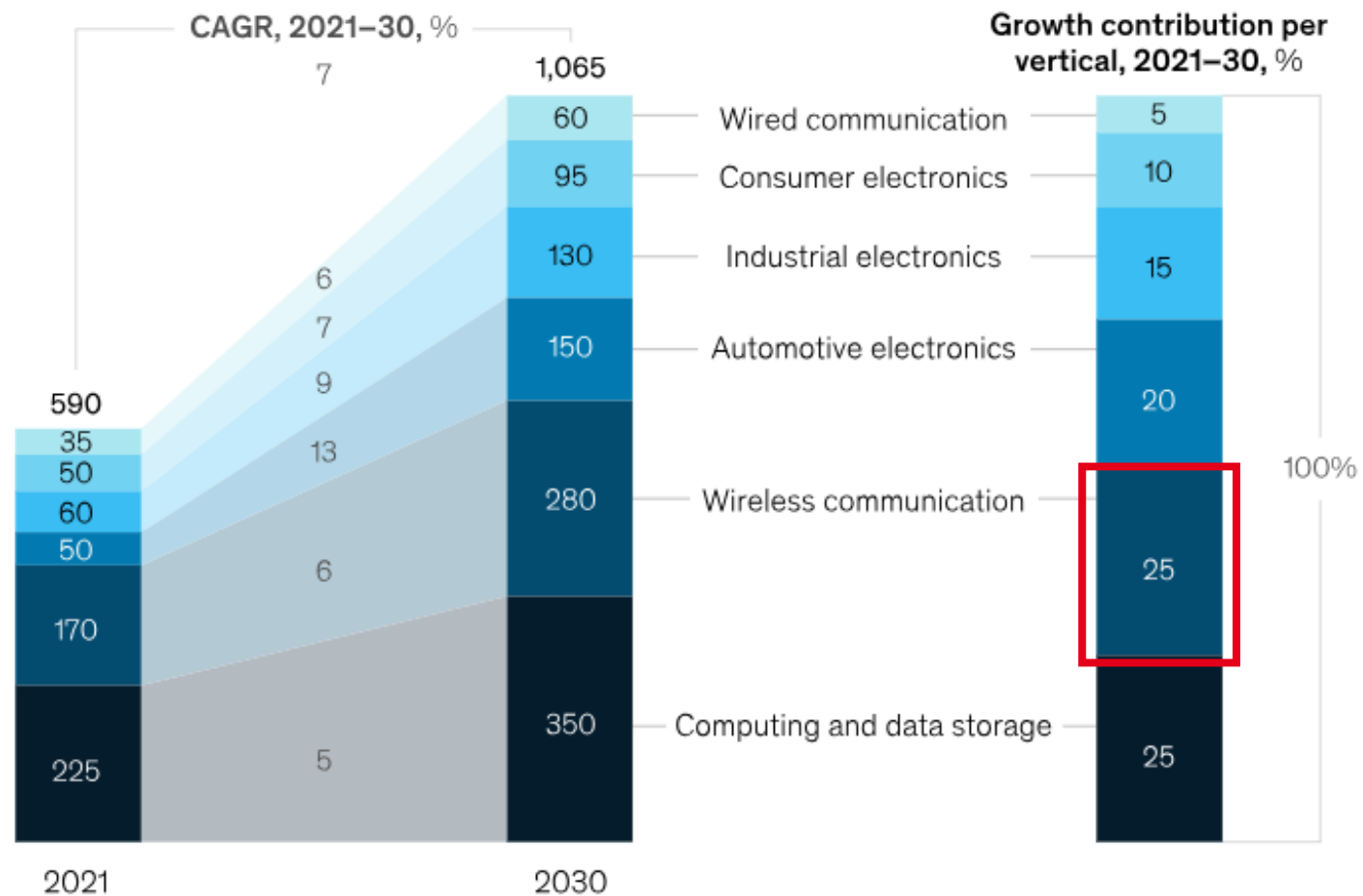
maxime.peralta@cea.fr



pepr-futurenetworks.fr

Wireless mobile market

Global semiconductor market value by vertical, indicative, \$ billion



GenAI's impact on network data traffic today

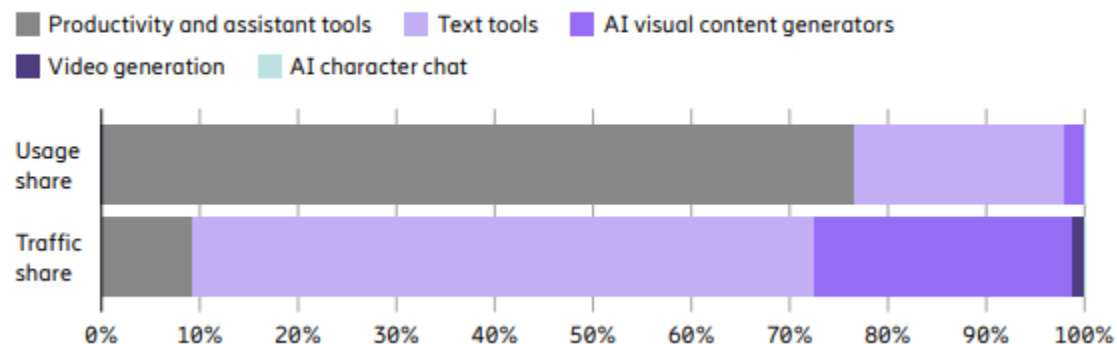
GenAI traffic represents only 0.06% of the total network data traffic.

In most mobile networks, the typical traffic distribution is heavily skewed, with a 90-to-10 percent downlink-to-uplink ratio. However, AI traffic exhibits a higher uplink distribution, with 74% downlink and 26% uplink traffic

In the measured network, ChatGPT accounts for 60% of total AI traffic and 70% of all AI traffic in the uplink.

ChatGPT, 71% DL – 29%UL. DeepSeek and Microsoft Copilot exhibit a roughly equal 50/50 uplink/downlink ratio

Figure 14: Share of AI app usage and traffic volume per AI app category



16

Ericsson Mobility Report | June 2025

GenAI's impact on network data traffic today

Environnemental impacts



EVALUATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU NUMERIQUE EN FRANCE ET ANALYSE PROSPECTIVE

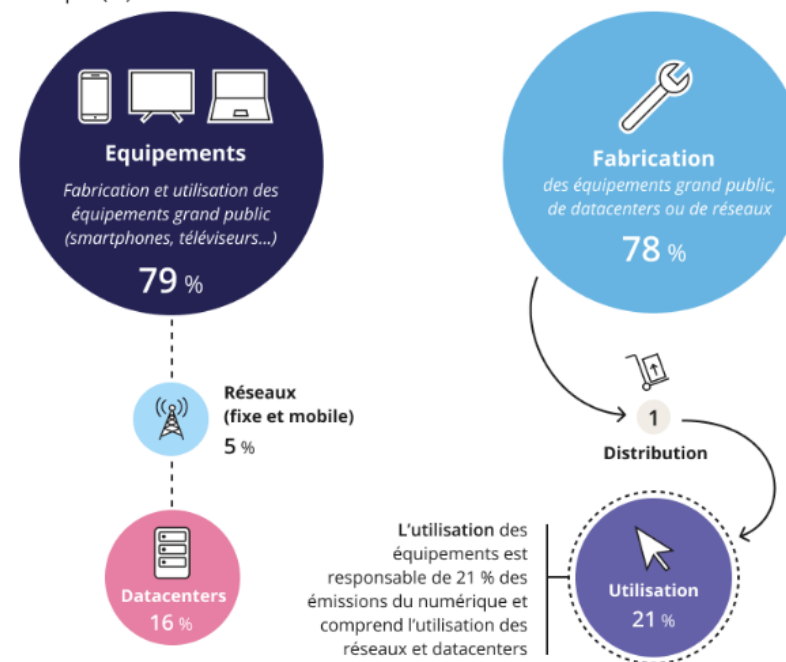
Analyse prospective à 2030 et 2050

[FRANCE]

L'empreinte carbone du numérique dépend essentiellement des équipements et de leur fabrication

Répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par composantes du numérique (%)

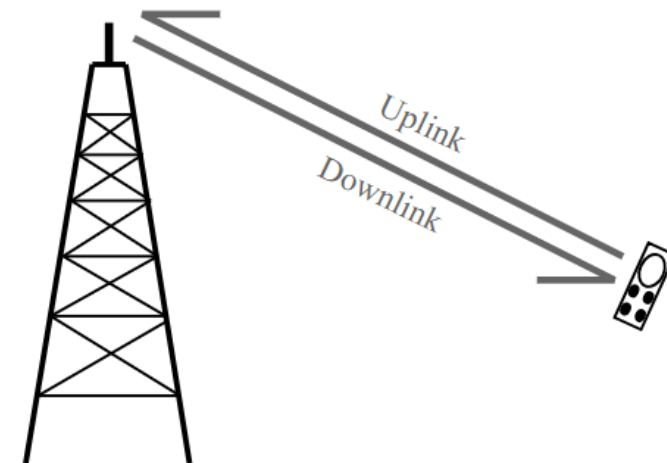
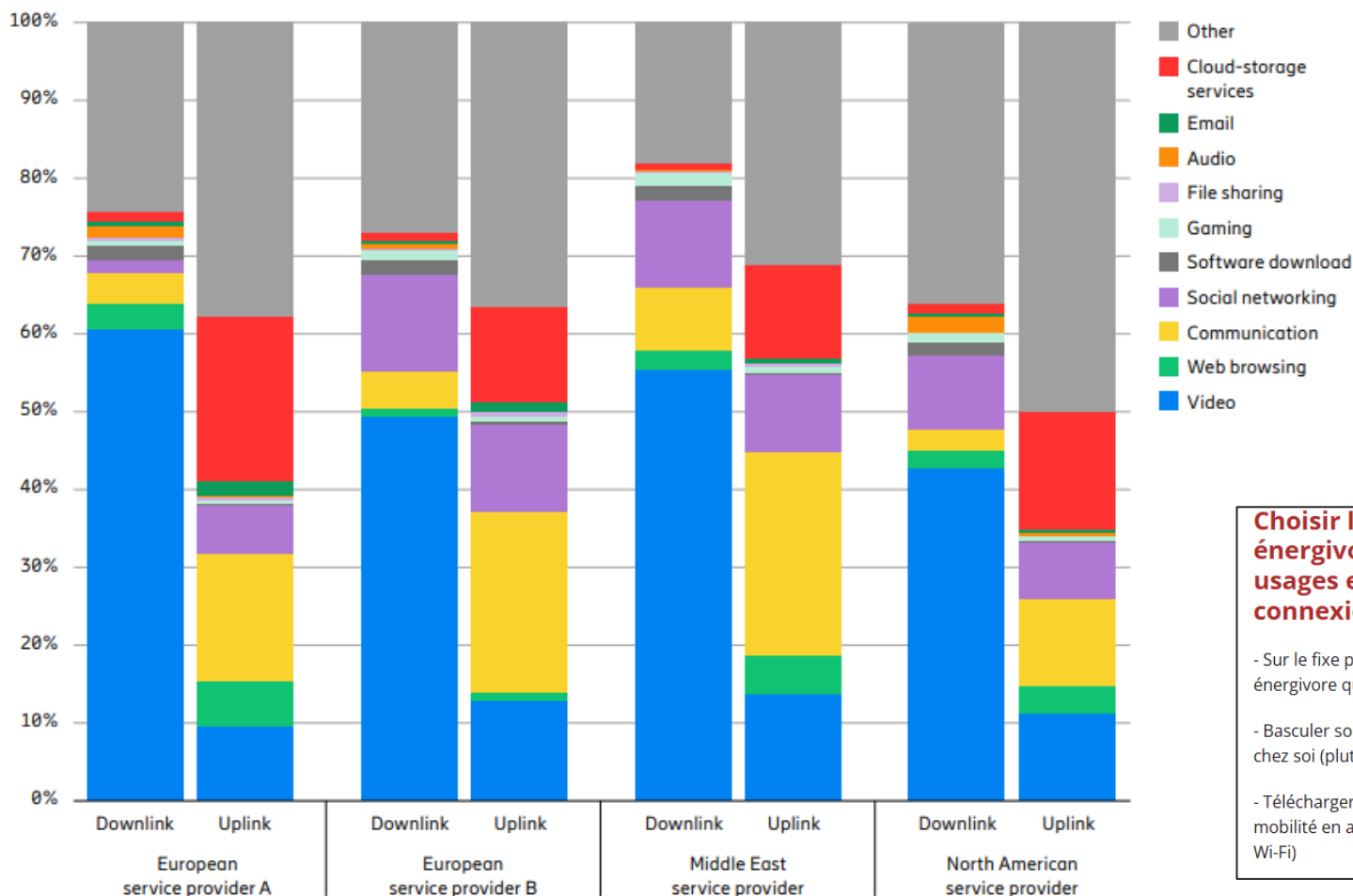
Répartition de l'empreinte carbone du numérique en 2020 par phase du cycle de vie (%)



[1] Etienne Lees Perasso, Caroline Vateau, et Firmin Domon, « Etude Numérique et Environnement - Analyse prospective 2030 et 2050 », Étude réalisée pour le compte de l'ADEME et l'Arcep par : LCIE Bureau Veritas, IDATE, janv. 2023.

Wireless mobile market

Figure 11: Share of traffic volume in downlink and uplink per application category



Average monthly mobile data usage per smartphone is expected to reach **56 GB** in 2030, rising from **21GB** at the end of 2023.

Choisir le réseau le moins énergivore en fonction de ses usages et privilégier une connexion internet fixe

- Sur le fixe par exemple, la fibre est moins énergivore que le cuivre
- Basculer son téléphone en mode Wi-Fi une fois chez soi (plutôt que de rester en 3G ou 4G)
- Télécharger ses contenus consommés en mobilité en avance chez soi sur un réseau fixe (via Wi-Fi)

Utiliser le Wi-Fi à la maison pour ses usages sur téléphone mobile, c'est un geste de sobriété énergétique !



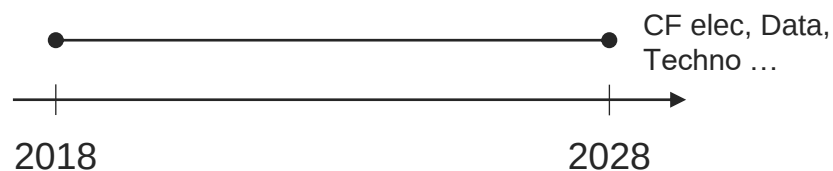
Prolonger au maximum la durée de vie des équipements / terminaux

- Ne changer de smartphone que lorsqu'il n'est plus fonctionnel (même chose pour les autres terminaux : ordinateurs, écrans, tablettes, etc...)
- Privilégier les terminaux recyclés et recycler son téléphone en fin de vie

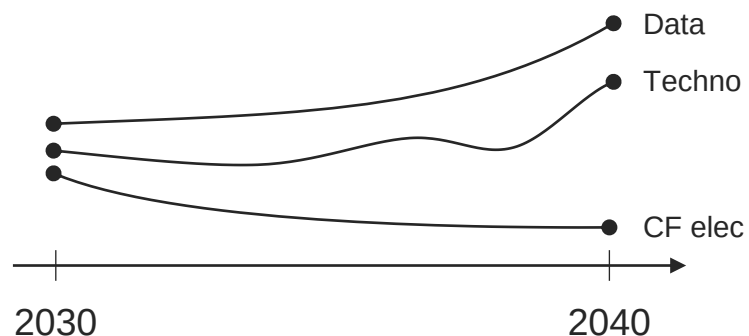
¹ Ericsson Mobility Report, "Exploring how traffic patterns drive network evolution" (June 2023).

[1] Etienne Lees Perasso, Caroline Vateau, et Firmin Domon, « Etude Numérique et Environnement - Analyse prospective 2030 et 2050 », Étude réalisée pour le compte de l'ADEME et l'Arcep par : LCIE Bureau Veritas, IDATE, janv. 2023.

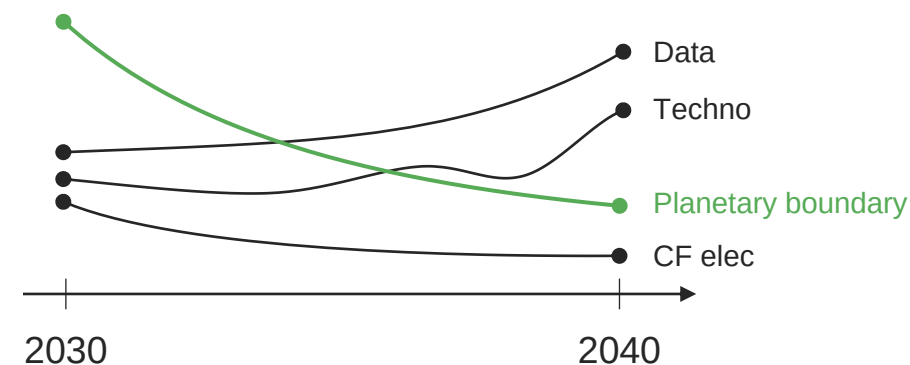
Backcasting approach



Static model



Dynamic & prospective model



Backcasting : taking planetary boundaries into account

- A novel approach where sustainability is mandatory and not optional
- Ongoing work with a lot to do and a lot to improve

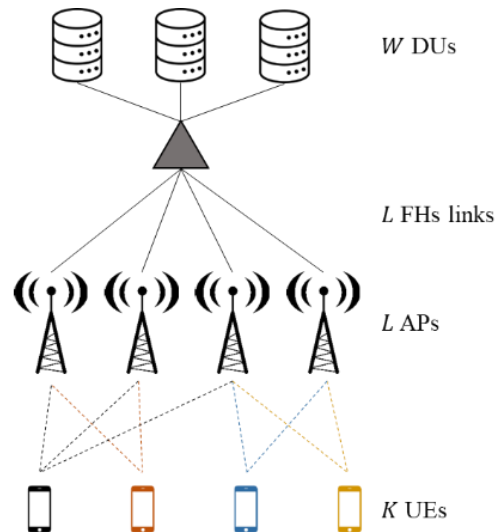
Impacts per category

- For most categories, use >> manuf
- Except for ADP, WDP, CTUh-c where manuf >> use
- Regarding ADP, manuf AP and DU >> manuf FH = 0
- Opposite for WDP and CTUh, manuf FH >> manuf AP and DU
- Manuf carbon impacts $\approx$ 10-50% (20% for the optimized config)



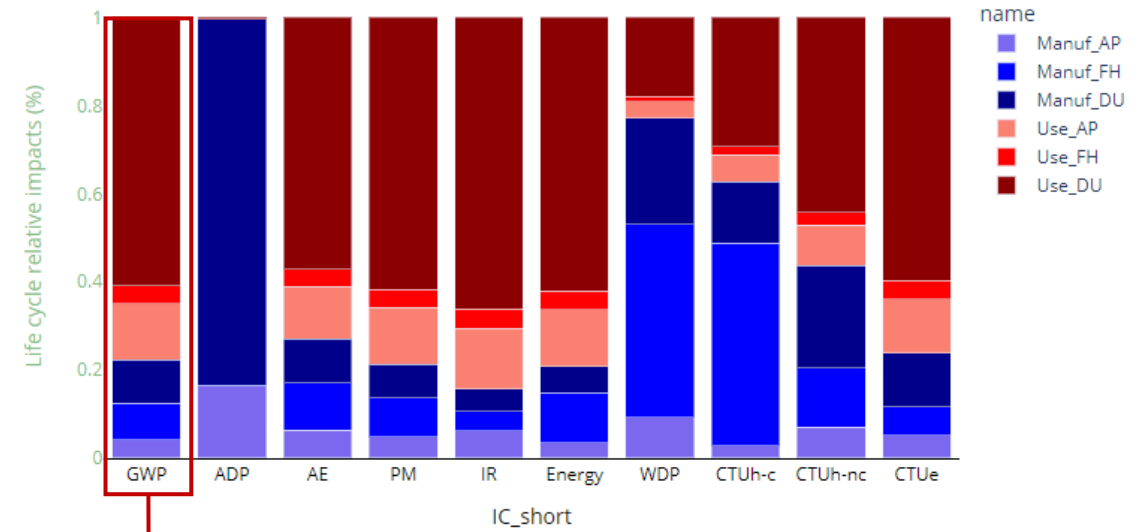
Approximately for carbon footprint,

$$Elec\ mix\ FR = \frac{Elec\ mix\ EU}{4}$$



K	#users / time slot
L	#APs (Access Points)
M	#Antennas / AP
P	Transmitted power / AP

Life cycle impacts of the CF-mMIMO network per **category**, 10yrs, EU mix, K=10, L=8, M=16, P_{RF}=26 dBm

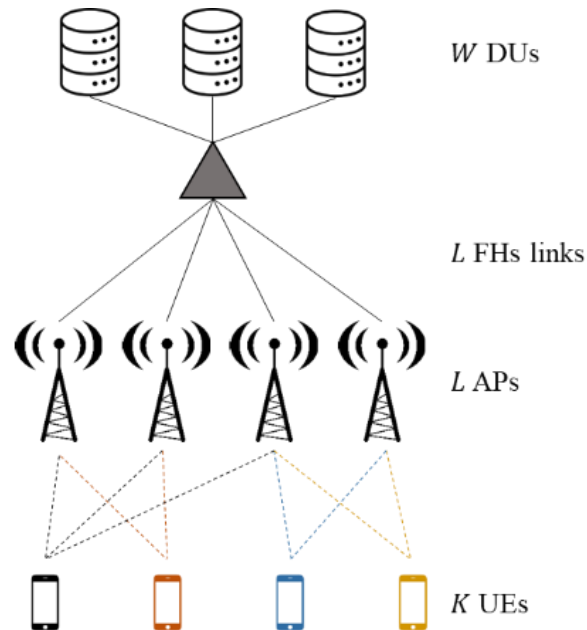


- With a EU electricity mix, the use phase represents the major impacts (80/20).
- With a FR electricity mix, conclusion would probably be 50/50.

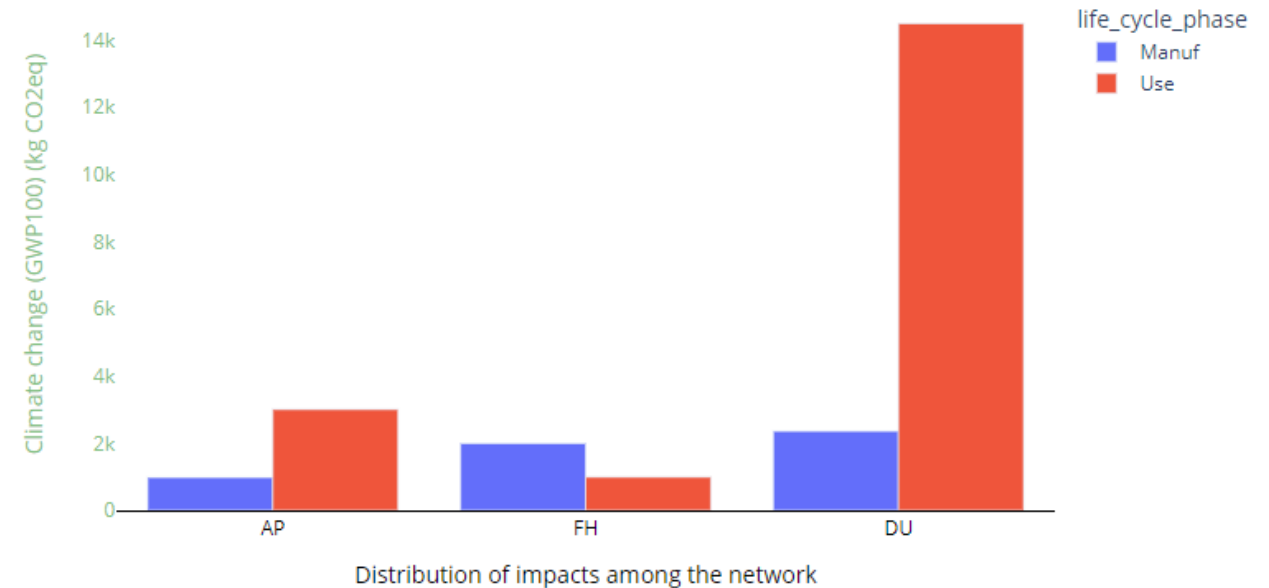
Carbon impact per node and phase

K	#users / time slot
L	#APs (Access Points)
M	#Antennas / AP
P	Transmitted power / AP

- DU carbon impacts >> AP & FH
- DU impacts are mainly due to use phase
- AP & FH : the Use/Manuf ratios for other nodes are fluctuating



Global warming of the CF-mMIMO network **per node and phase**,
10yrs, EU mix, K=10, L=8, M=16, P_{RF}=26 dBm



While the energy use of DU concentrate the major impacts, manufacturing should not be overlooked