

Empreinte carbone des centres de données et impacts de l'utilisation de sources d'énergie renouvelable

Anne-Cécile Orgerie



18 novembre 2025
Webinaire TTI.5

Contexte général

Crise climatique

- Frontières planétaires
- Niveau de vie décent et équitable



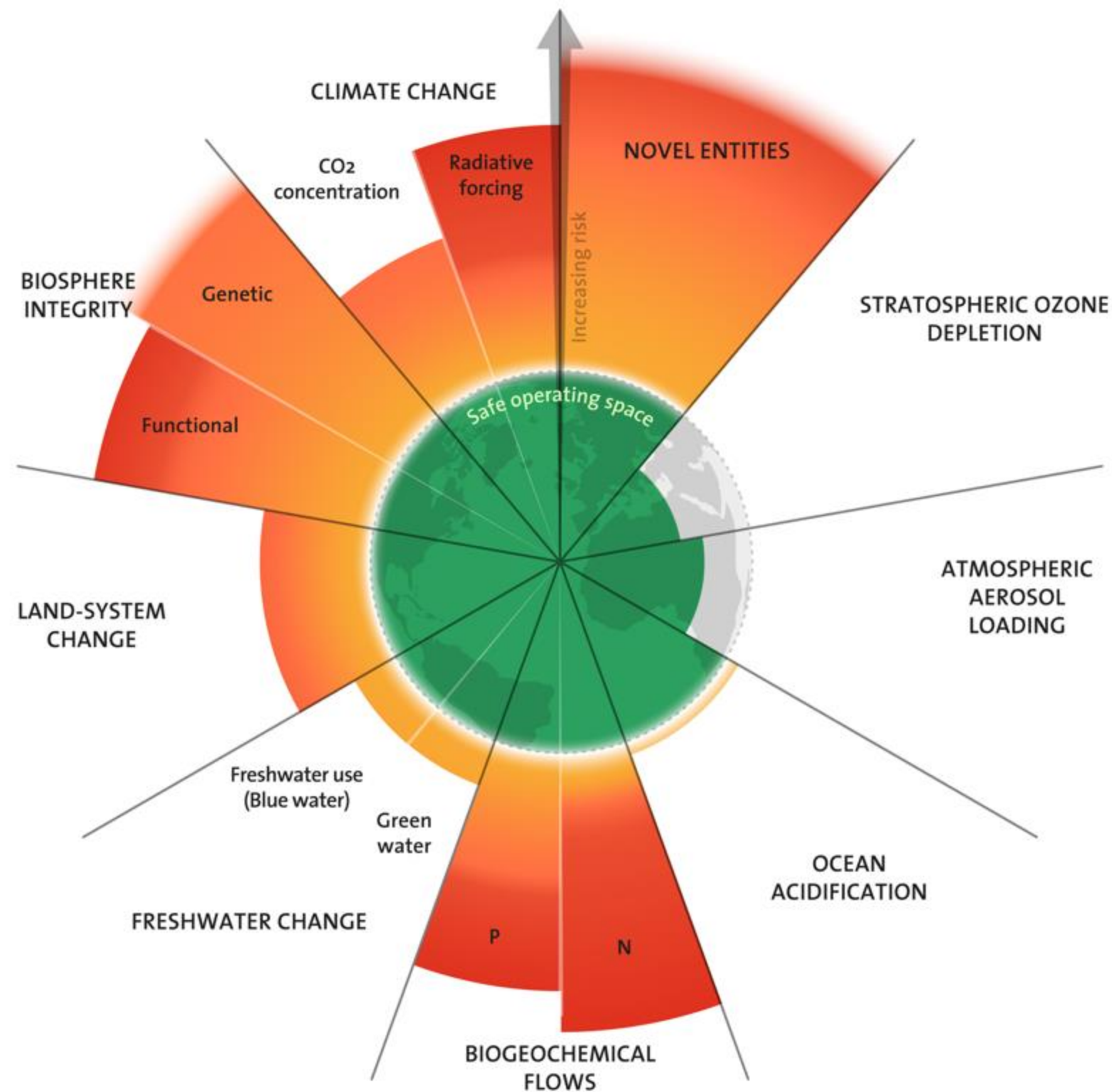
Les sciences informatiques

- Souvent présentées comme faisant partie de la **solution** aux problèmes climatiques (optimisations, systèmes smart, etc.)
- Mais font assurément partie du **problème**.

Mon contexte scientifique

- Chercheuse en informatique, systèmes distribués (Clouds, réseaux de communication)
- Consommation énergétique en phase usage, impacts environnementaux

Les frontières planétaires



En 2025 : 9 frontières évaluées,
7 frontières franchies

- Impact carbone : une des frontières
- Inter-relations entre les frontières
- Quantification compliquée mais utile
- Frontières planétaires : une des façons de quantifier les impacts environnementaux

[Source : Azote for Stockholm Resilience Centre, based on analysis in Richardson et al 2023.]

Empreinte carbone et consommation électrique

Quelle est la part du numérique dans l’empreinte carbone mondiale ?

2,1 à 3,9% en 2021 (1,2 à 2,2 Gt CO₂eq)

Prévisions : +6% à 10% par an

“The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations”, C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks, B. Knowles, G. Blair, A. Friday, *Patterns*, 2021.

Quelle est la part du numérique dans la consommation électrique française ?

11% en 2020 (52 TWh)

→ Prévisions : 93 TWh en 2050 (+79%)

“Évaluation de l’impact environnemental du numérique en France et analyse prospective”, rapport ADEME – ARCEP, 2022.

→ 65 TWh en 2020 en tenant compte des centres de calcul à l’étranger

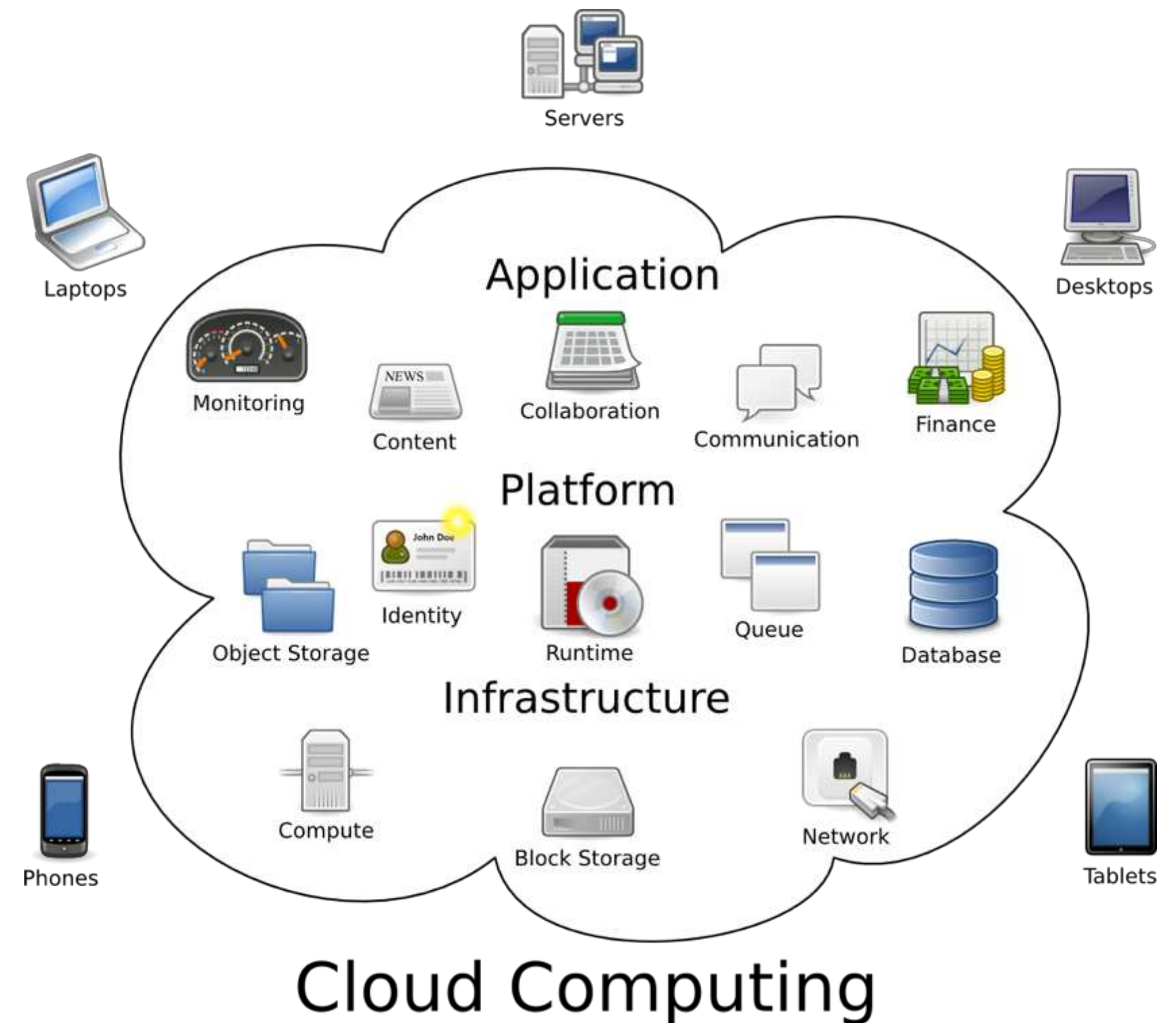
“Évaluation de l’impact environnemental du numérique en France”, rapport ADEME – ARCEP, 2025.

Le Cloud computing en une diapo

Cloud computing : accès à travers des réseaux à des ressources de calcul et de stockage partagées, à la demande, en self-service et configurables

- Mutualisation des services
- Elasticité des infrastructures
- Externalisation des données

→ Centres de calcul



[Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cloud_computing.svg]

Règlementation européenne

Article 12

Centres de données

DIRECTIVE (UE) 2023/1791 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 13 septembre 2023 relative à l'efficacité énergétique et modifiant le règlement (UE) 2023/955 (refonte)

1. Au plus tard le 15 mai 2024, et tous les ans par la suite, les États membres exigent des propriétaires et des exploitants de centres de données situés sur leur territoire ayant une demande de puissance des technologies de l'information installées d'au moins 500 kW qu'ils mettent à la disposition du public les informations mentionnées à l'annexe VII, à l'exception des informations soumises au droit de l'Union et au droit national protégeant les secrets commerciaux et les secrets d'affaires ainsi que la confidentialité.
2. Le paragraphe 1 ne s'applique pas aux centres de données utilisés pour la défense et la protection civile ou fournissant leurs services exclusivement pour des finalités relevant de la défense et de la protection civile.
3. La Commission met en place une base de données européenne sur les centres de données, qui regroupe les informations communiquées par les centres de données obligés conformément au paragraphe 1. La base de données européenne est mise à la disposition du public à un niveau agrégé.
4. Les États membres encouragent les propriétaires et les exploitants des centres de données situés sur leur territoire dont la demande de puissance des technologies de l'information installées est égale ou supérieure à 1 MW à tenir compte des bonnes pratiques figurant dans la version la plus récente du code de conduite européen sur l'efficacité énergétique des centres de données.
5. Au plus tard le 15 mai 2025, la Commission évalue les données disponibles relatives à l'efficacité énergétique des centres de données qui lui ont été communiquées conformément aux paragraphes 1 et 3 et présente au Parlement européen et au Conseil un rapport, élaboré en étroite concertation avec les parties prenantes concernées et accompagné, le cas échéant, de propositions législatives contenant de nouvelles mesures permettant d'améliorer l'efficacité énergétique, notamment relatives à l'établissement de normes minimales de performance, ainsi que d'une évaluation de la faisabilité de la transition vers la neutralité carbone du secteur des centres de données. Ces propositions peuvent définir un calendrier dans lequel les centres de données existants seront tenus de satisfaire à une performance minimale.

Neutralité carbone

FACEBOOK Sustainability

Net Zero

reached net zero in operational GHG emissions

In 2020, we achieved net zero emissions in our operations by reducing emissions by 94 percent* and supporting carbon removal projects.

*from a 2017 baseline



2021 Environmental Sustainability Report

Our commitments

Carbon negative

By 2030, we will be carbon negative, and by 2050, we will remove our historical emissions since we were founded in 1975.

Reduce direct emissions

We will reduce our Scope 1 and 2 emissions to near zero by 2025 through energy efficiency work and by reaching 100 percent renewable energy.

100% renewable energy

In 2020, we matched 100% of the electricity consumption of our operations with renewable energy purchases for the fourth consecutive year.

Google Environmental Report

Apple Environmental Progress Report

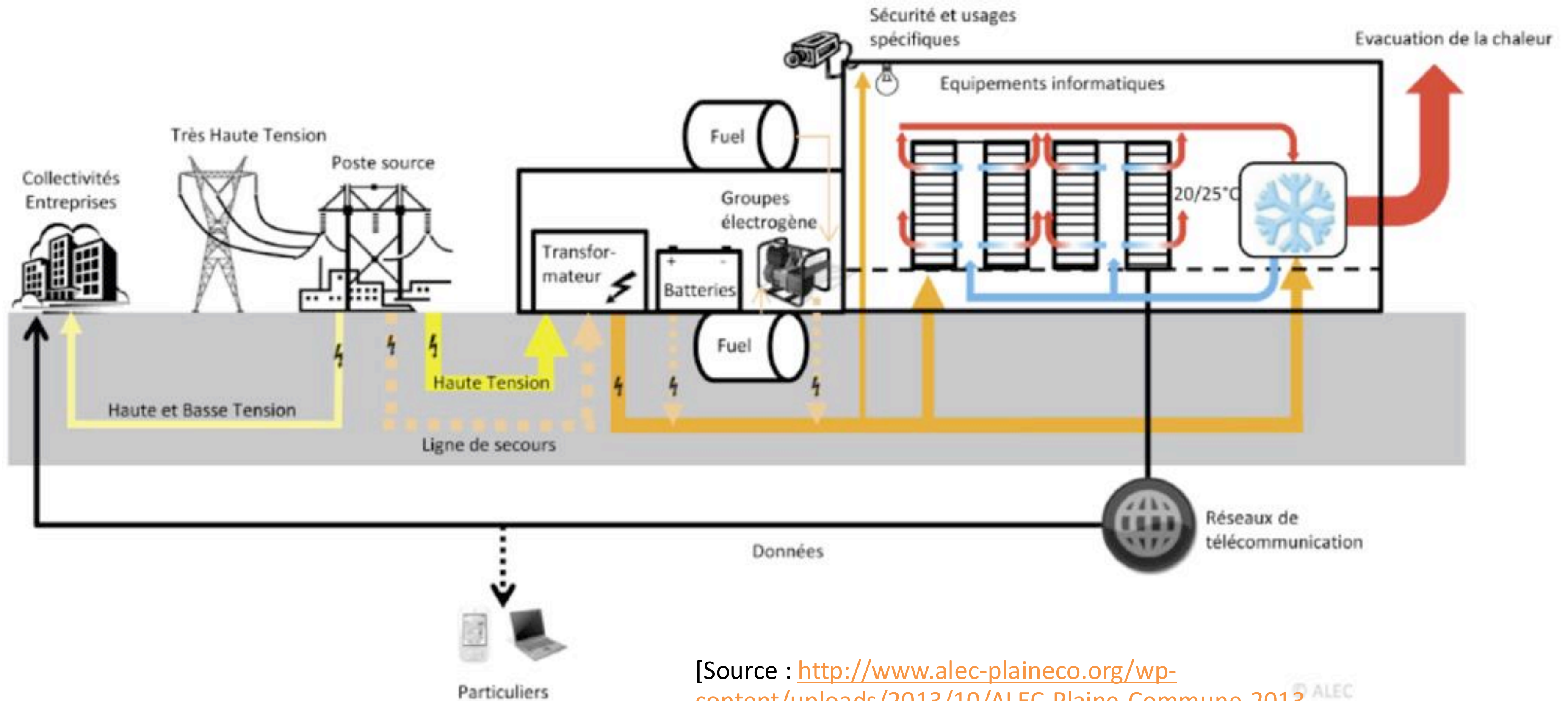
100%
renewable energy
sourced for all
Apple facilities



Carbon neutral
for corporate operations
since April 2020

[Source : rapports environnementaux de Facebook, Google, Microsoft et Apple, 2021]

Aperçu d'un centre de calcul



[Source : <http://www.alec-plaineco.org/wp-content/uploads/2013/10/ALEC-Plaine-Commune-2013-Les-data-centers-sur-Plaine-Commune.pdf>]

GHG Protocol

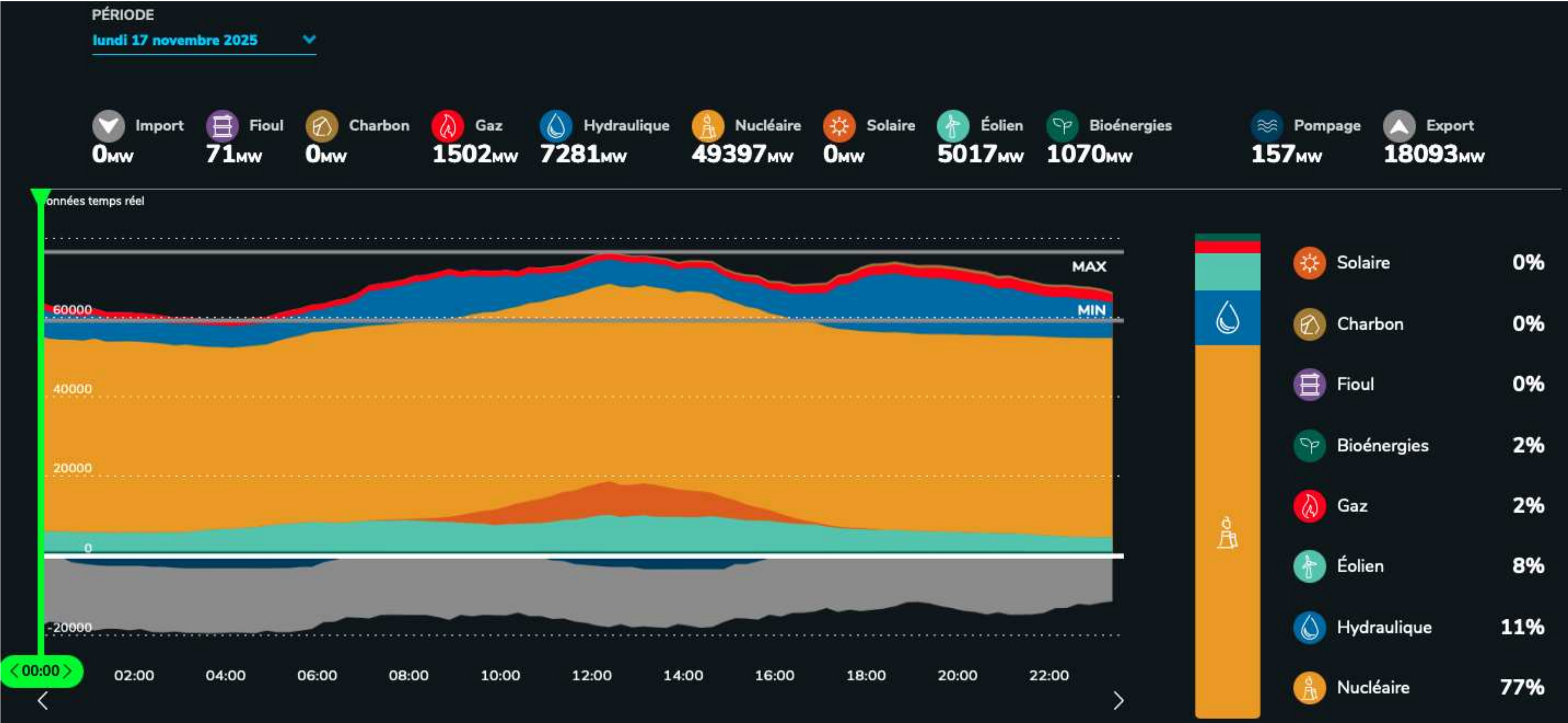
Empreinte carbone : 3 catégories

- **Scope 1** : émissions qui résultent directement des activités de l'entreprise, comme la génération d'électricité en interne, les émissions de gaz réfrigérants des climatisations, etc.
- **Scope 2** : émissions qui résultent de la consommation d'énergie de l'entreprise, typiquement l'électricité et le chauffage achetés.
- **Scope 3** : tout le reste ! c'est-à-dire les achats, les déplacements professionnels et domicile-travail des employés, la gestion des déchets...

[Source : <https://ghgprotocol.org/standards-guidance>]

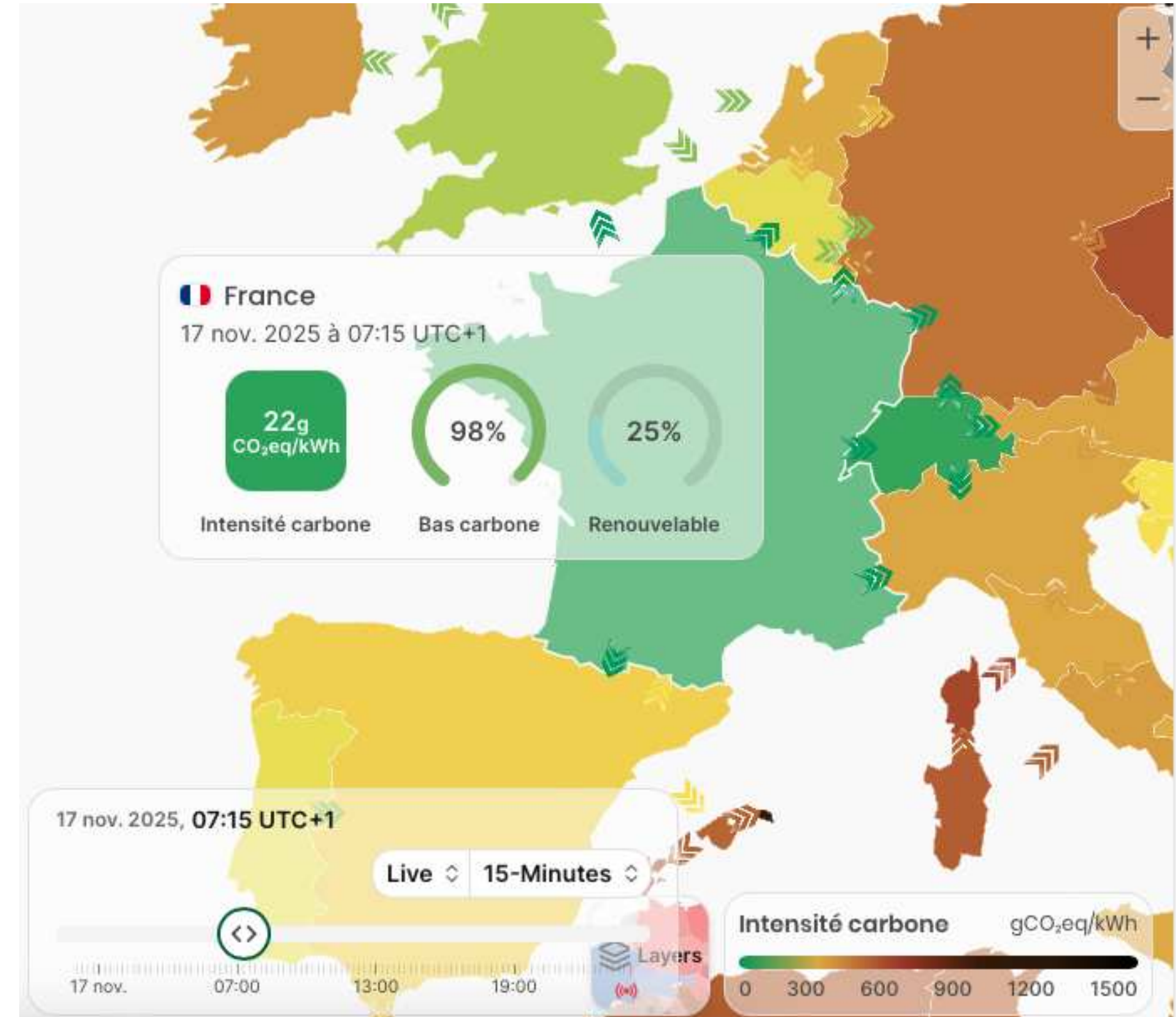
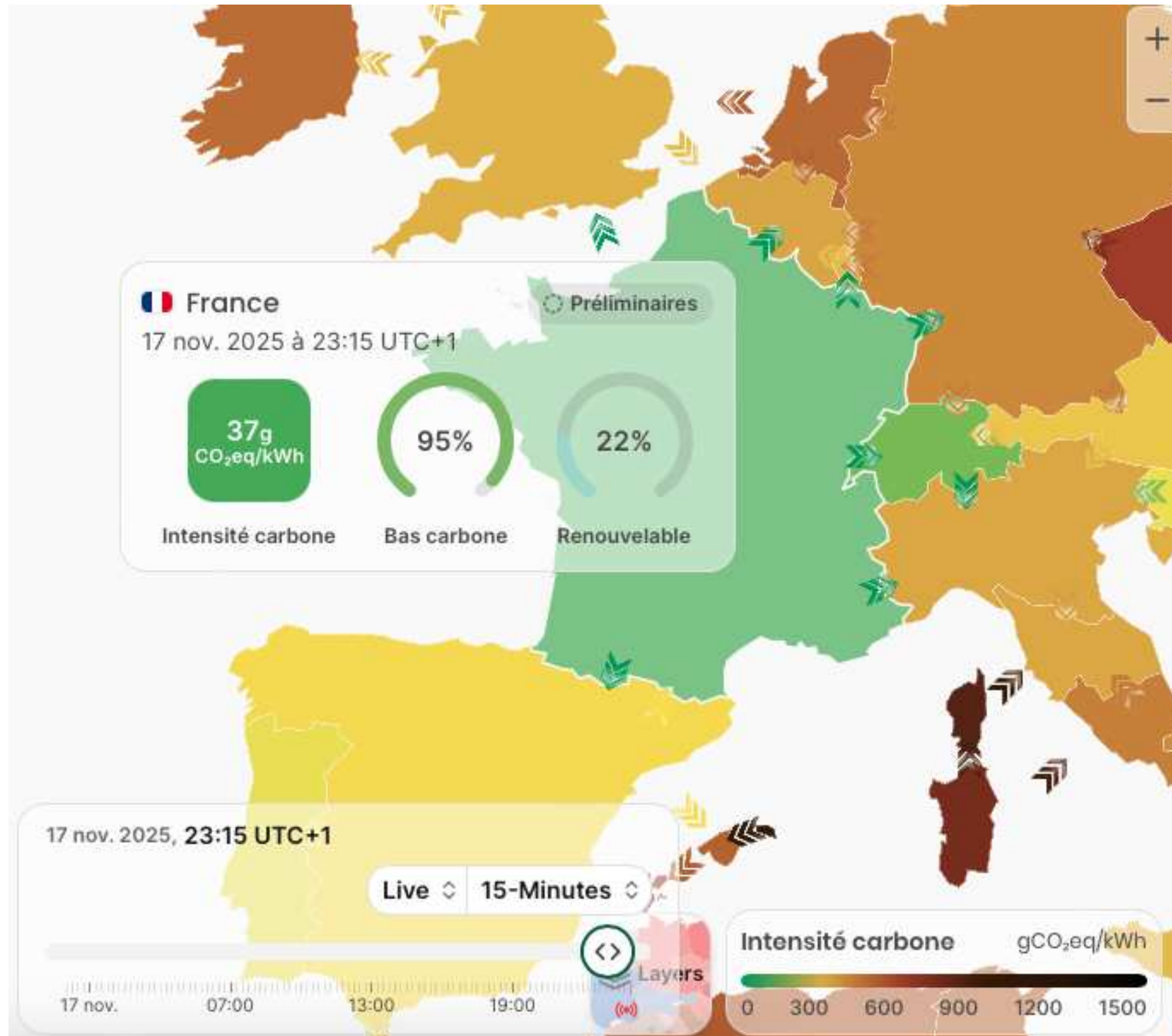


Exemple de mix électrique en France



[Source : Eco2mix, RTE, 2025]

Variabilité temporelle et imports/exports d'électricité

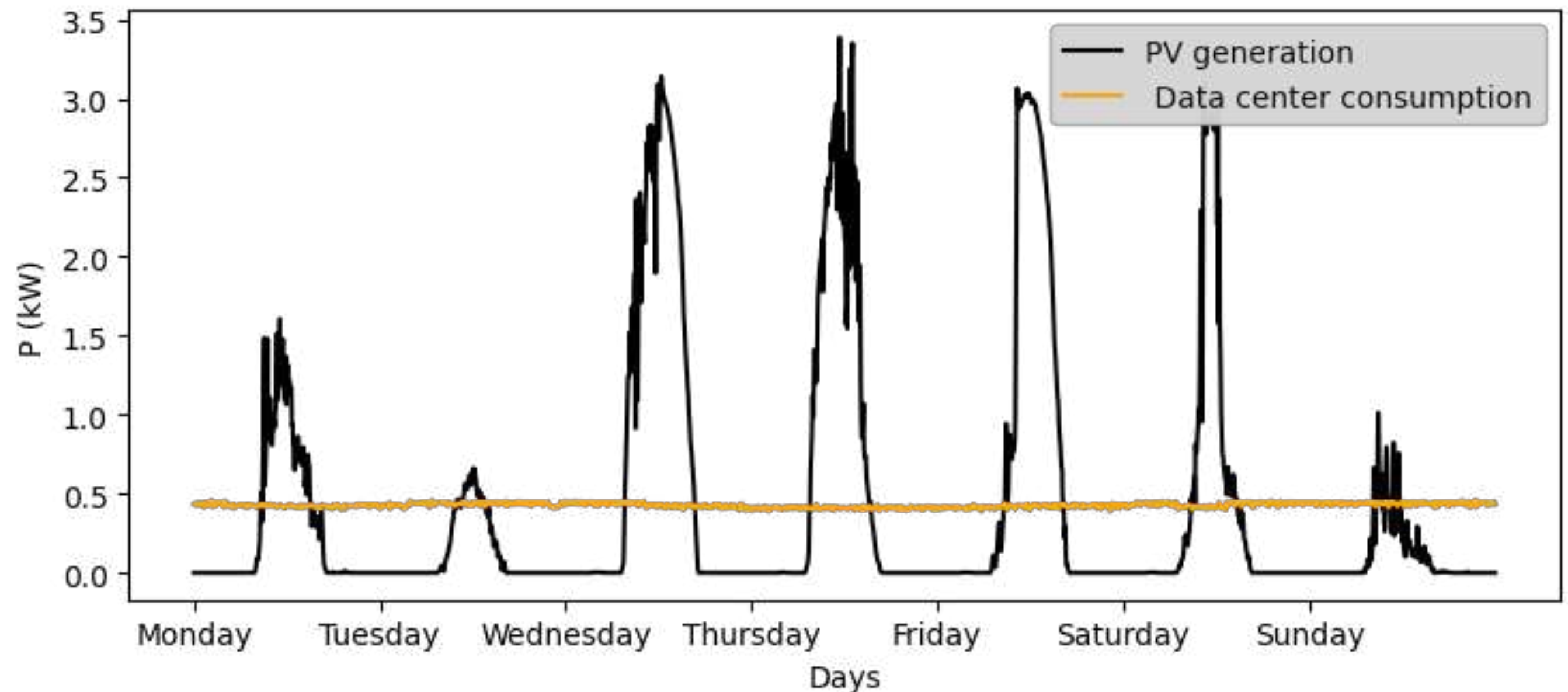


[Source : ElectricityMaps, 2025]

Production d'électricité renouvelable sur site (scope 1)

Simulation pour un centre de calcul en utilisant des traces d'utilisation de Google

Exemple
d'illustration sur
un petit nombre
de serveurs

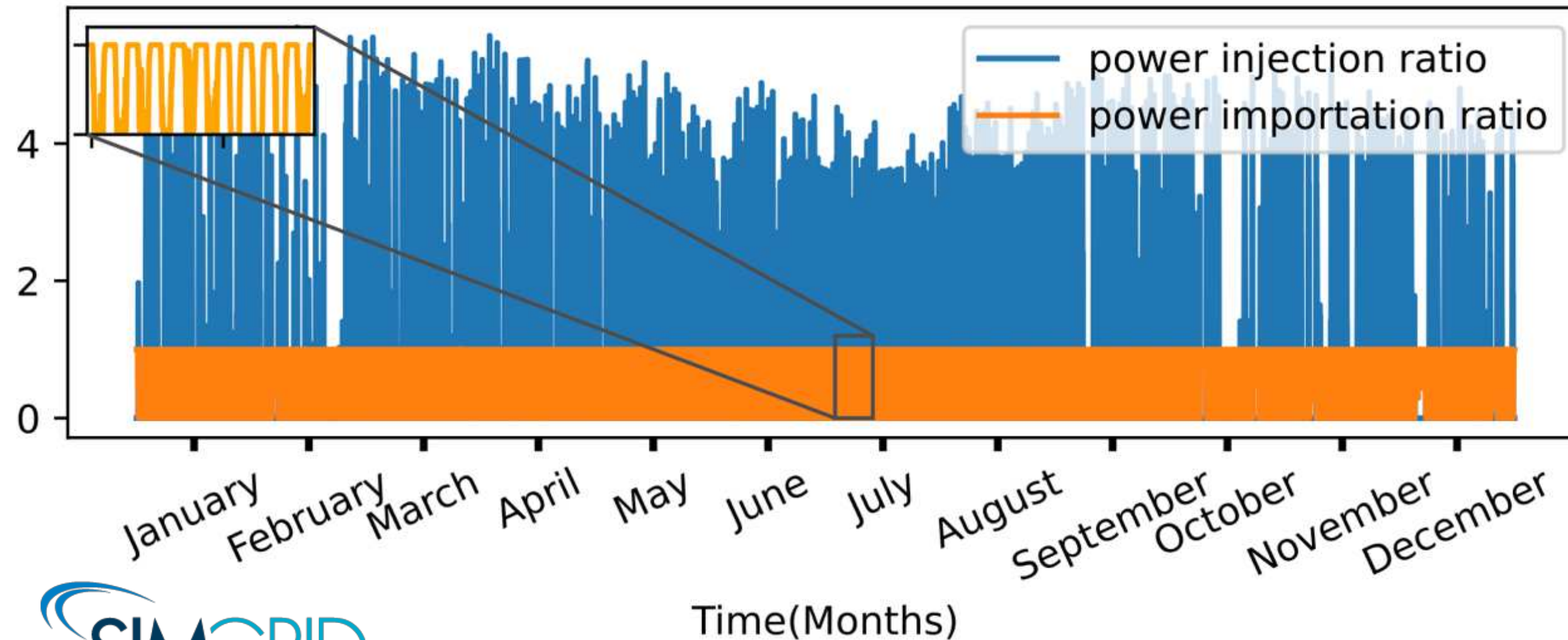


Google Cluster Workload Traces, 2019 : 1 mois d'utilisation de 9993 serveurs,
<https://github.com/google/cluster-data/blob/master/ClusterData2019.md>

“Renewable Energy in Data Centers: the Dilemma of Electrical Grid Dependency and Autonomy Costs”, Wedan Emmanuel Gnibga, Anne Blavette, Anne-Cécile Orgerie, *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2024, 9 (3), pp.315-328.

Production d'électricité renouvelable sur site (scope 1)

Simulation pour un centre de calcul de 4000 serveurs sur une année



- Sur 1 an : taux d'auto-consommation de 36%
- Pic d'export d'électricité 5,6 fois plus élevé que le pic d'import
- Prix associé au stockage local d'électricité prohibitif



“Renewable Energy in Data Centers: the Dilemma of Electrical Grid Dependency and Autonomy Costs”, Wedan Emmanuel Gnibga, Anne Blavette, Anne-Cécile Orgerie, *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2024, 9 (3), pp.315-328.

Le cas de l'Irlande



x 121

Ireland has around 121 data centres operated by 24 providers

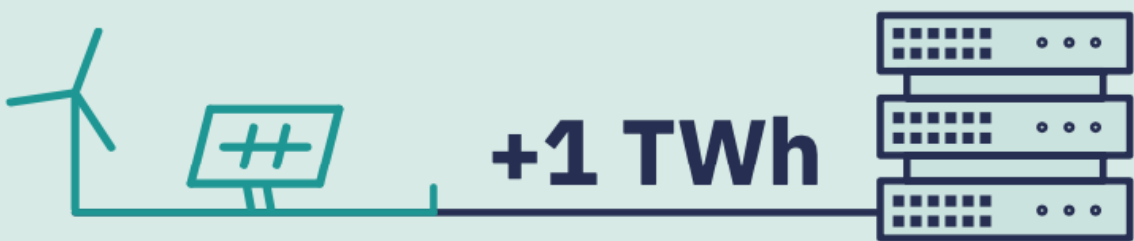
Data centres are termed **'large energy users'**



Around one-fifth of Ireland's corporation taxes income is linked to companies in the ICT sector including data centres – in 2023 that's around €4billion

[Source : “The future of data centres in Ireland”, Kate Walsh, Senior Parliamentary Researcher (Environmental Science), 2025]

| 2015 | 2023 |
|--|---|
| Data centres used 5% (1.2 TWh) of Ireland's electricity | Data centres used 21% (6.3 TWh) of Ireland's electricity |
| A five-fold increase in power demand in just 8 years | |



The rise in electricity use by data centres is around **1 TWh** per year – outpacing new renewable electricity sources

PPA et EAC

Power Purchase Agreement

- Contrat d'achat d'électricité, long terme (10 à 25 ans)
- Entreprise s'engage à acheter de l'électricité renouvelable directement au producteur d'énergie
- Prix fixe sur la période (contractuellement), comptabilisation dans le bilan GES
- Moteur pour les investissements dans de nouvelles installations de renouvelables

Energy Attribute Certificates (aka RECs, SRECs, TRCs)

- Titre négociable ('certificat') émis par un producteur d'électricité lorsqu'il produit 1 MWh d'électricité renouvelable
- Dissocié de l'électricité physique, vendu séparément
- Prix variable, comptabilisation dans le bilan GES
- Problèmes de double comptabilité des gains environnementaux

Achat d’électricité renouvelable (scope 2)

| Location | Renewable energy technology | Size (MW) |
|---------------------------|-----------------------------|-----------|
| Australia | PV | 0.5 |
| Brazil | Wind | 0.5 |
| China mainland | PV | 195 |
| China mainland | Wind | 130 |
| Denmark | PV | 42 |
| Denmark | Wind | 17 |
| India | PV | 16 |
| Israel | PV | 5 |
| Japan | PV | 12 |
| Mexico | Wind | 0.8 |
| Rooftop solar projects | PV | 5.0 |
| Power for Impact projects | PV | 7 |
| Singapore | PV | 54 |
| Taiwan | PV | 1 |
| Turkey | PV | 4 |
| Arizona, U.S. | PV | 62 |
| California, U.S. | Biogas fuel cell | 4 |
| California, U.S. | PV | 144 |
| Illinois, U.S. | Wind | 112 |
| Nevada, U.S. | PV | 320 |
| North Carolina, U.S. | PV | 164 |
| Oregon, U.S. | Microhydro | 3 |
| Oregon, U.S. | PV | 125 |
| Oregon, U.S. | Wind | 200 |
| Texas, U.S. | Wind | 25 |
| Virginia, U.S. | PV | 134 |
| Total | | 1,782 |

Maiden, North Carolina: Grid mix versus Apple-sourced renewable energy

Electricity use in 2024: 466 million kWh

Emissions avoided in 2024: 117,800 million MT CO₂e⁴

| Default grid mix | % | Apple actual renewable energy allocation | % |
|------------------|----|--|----|
| Gas | 41 | Apple’s solar projects | 68 |
| Nuclear | 38 | Apple’s wind projects | 32 |
| Coal | 9 | Source: 2024 energy data. | |
| Renewable | 9 | | |
| Hydro | 3 | | |

Source: eGRID 2022.

China: Grid mix versus Apple-sourced renewable energy

Electricity use in 2024: 214 million kWh

Emissions avoided in 2024: 126,800 million MT CO₂e¹⁰

| Default grid mix | % | Apple actual renewable energy allocation | % |
|------------------|----|--|----|
| Coal | 63 | Apple’s solar projects | 50 |
| Hydro | 17 | Apple’s wind projects | 50 |
| Renewable | 11 | Source: 2024 energy data. | |
| Nuclear | 5 | | |
| Gas | 3 | | |

Source: IEA Electricity Information 2022, www.iea.org/data-and-statistics/data-product/electricity-information.

[Source : Apple Environmental Progress Report, 2025]

Achat d'électricité renouvelable (scope 2)

| Electricity Consumption | | | | | | | | | | |
|--|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| Electricity Consumption by Facility (in MWh) | | | | | | | | | | |
| | 2020 | | 2021 | | 2022 | | 2023 | | 2024 | |
| Total electricity consumption | 7,170,000 | | 9,420,839 | | 11,508,131 | | 15,325,314 | | 18,423,634 | |
| Electricity from grid (%) | 100% | | >99% | | >99% | | >99% | | >99% | |
| Data centers total | 6,966,000 | | 9,117,122 | | 11,167,416 | | 14,975,435 | | 18,061,781 | |
| | | | | | | | | | | |
| Market-Based vs. Location-Based | | | | | | | | | | |
| Scope 2 Emissions (in metric tons CO ₂ e) | | | | | | | | | | |
| | 2020 | | 2021 | | 2022 | | 2023 | | 2024 | |
| | Market-based | Location-based | Market-based | Location-based | Market-based | Location-based | Market-based | Location-based | Market-based | Location-based |
| Total facilities GHG emissions | 9,000 | 2,718,000 | 2,487 | 3,080,194 | 273 | 3,921,611 | 1,658 | 5,141,350 | 1,358 | 5,967,348 |
| Data centers total | 2,000 | 2,650,000 | 2,487 | 2,987,964 | 273 | 3,821,450 | 733 | 5,036,131 | 135 | 5,862,614 |

[Source : Sustainability Report – Environmental Data Index, Meta, 2025]

Autres énergies (scope 2)

| Fuel Consumption | | | | | |
|--|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Non-Renewable Fuels | | | | | |
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Natural gas (therms) | - | 6,153,856 | 7,539,592 | 4,818,116 | 4,719,581 |
| Diesel — distillate fuel oil No. 2 (gal) | - | 363,082 | 1,376,871 | 1,025,707 | 703,907 |
| Diesel — distillate fuel oil No. 4 (gal) | - | 842,460 | 724,151 | 699,427 | 672,925 |
| Gasoline (gal) | - | 52,375 | 119,955 | 22,309 | 47,198 |
| Renewable Fuels | | | | | |
| Hydrotreated vegetable oil (gal) | - | 0 | 0 | 1,144 | 10,415 |
| R99 Renewable diesel | - | 0 | 0 | 0 | 288,083 |

[Source : Sustainability Report – Environmental Data Index, Meta, 2025]

Scope 2

2. What is the emission factor for renewable energy?

Renewable energy, such solar, wind, geothermal, and hydropower, have no direct emissions at the point of electricity generation, and therefore use an emission factor of zero in scope 2. Nuclear-generated electricity is also carbon-free at the point of generation. While electricity generated from biogenic resources such as biomass, biofuels and biogas can be considered renewable, these electricity generation resources are not zero emissions at point of combustion. Based on the Corporate Standard, any CH₄ or N₂O emissions from biogenic energy sources use shall be reported in scope 2, while the CO₂ portion of the biofuel combustion shall be reported outside the scopes.

[Source : Scope 2 Frequently Asked Questions, GHG Protocol, 2025]

Carbon-Free Energy Highlights

- 100% of electricity consumed by Amazon was matched with renewable energy sources in 2024, for the second consecutive year
- Since 2020, Amazon has been the world's largest corporate purchaser of renewable energy annually
- World's largest corporate buyer of offshore wind energy in 2024, according to BloombergNEF
- 100% of energy used by active Echo, Fire TV, and Ring devices worldwide was matched with operational wind and solar capacity in 2024
- 621 total renewable energy projects announced globally as of January 2025—including 124 new projects in 2024—representing 34 GW of carbon-free energy capacity, which can produce 91,000 GW hours of carbon-free electricity annually
- 219 solar projects and 83 wind farms, totaling 302 utility-scale wind and solar projects as of January 2025
- 319 on-site rooftop solar systems at our fulfillment centers and stores as of January 2025

[Source : Amazon Sustainability Report, 2024]

Exemple de scope 3

Carbon Table 2

Breaking down our FY24 Scope 3 emissions by source

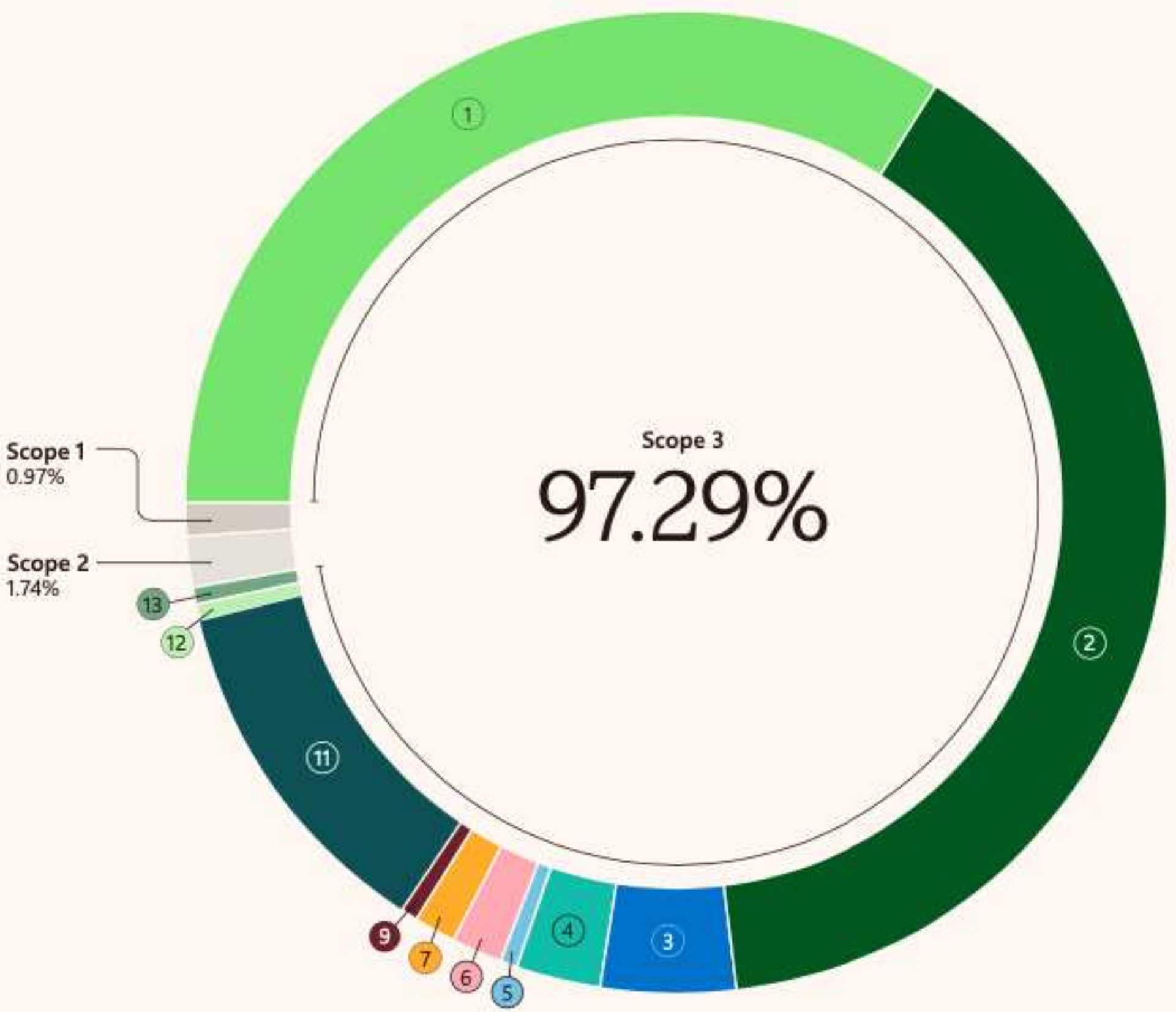
Microsoft's Scope 3 emissions continue to account for more than 97% of our total emissions. Tackling Scope 3 means decarbonizing industrial processes such as steel, concrete, and other building material production for use in our campus and datacenter construction, as well as jet fuel for business travel and logistics, with the vast majority of these emissions coming from two categories upstream, Purchased Goods and Services (Category 1) and Capital Goods (Category 2), and one downstream, Use of Sold Products (Category 11).

Scope 3 Categories

| | | |
|---|--|--------|
| ① | Purchased Goods and Services | 34.04% |
| ② | Capital Goods | 40.83% |
| ③ | Fuel- and Energy-Related Activities (Market-Based) | 4.40% |
| ④ | Upstream Transportation and Distribution | 2.69% |
| ⑤ | Waste Generated in Operations | 0.05% |
| ⑥ | Business Travel | 1.70% |
| ⑦ | Employee Commuting | 1.40% |
| ⑨ | Downstream Transportation and Distribution | 0.29% |
| ⑪ | Use of Sold Products | 11.83% |
| ⑫ | End-of-Life Treatment of Sold Products | 0.02% |
| ⑬ | Downstream Leased Assets | 0.04% |

Find out more in our [Data Fact Sheet](#)

Scope 2 and 3 emissions included in this chart are market-based.
Scope 3 emissions are management's criteria values.



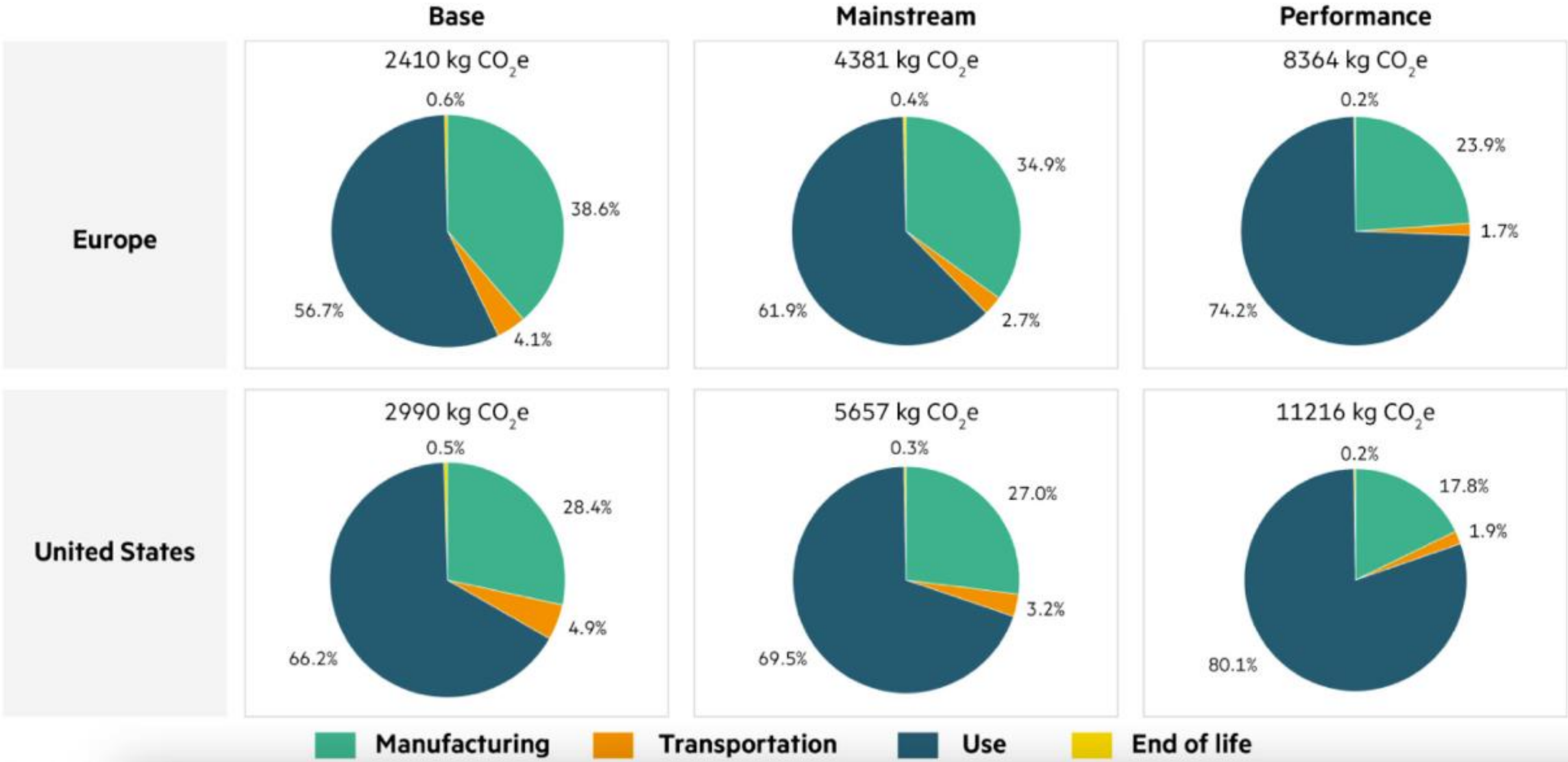
[Source: 2025 Environmental Sustainability report, Microsoft.]

Exemple d'un serveur

HPE ProLiant DL380 Gen10 Server



| Lifecycle stage | Component | Base | Mainstream | Performance |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Manufacturing | CPU | 1x Intel® Xeon® Silver 12-core | 2x Intel Xeon Silver 16-core | 2x Intel® Xeon® Gold 24-core |
| | DRAM | 64 GB | 256 GB | 768 GB |
| | Network adapter | 1 | 2 | 3 |
| | Storage controller | 1x P408i-a | 1x P408i-a | 2x P816i-a/P408i-p |
| | SSD | 2x 480 GB SATA RI | 6x 800 GB SAS MU | 24x 1.6 TB SAS MU |
| | Power supply | 2x 800W Platinum | 2x 800W Platinum | 2x 800W Platinum |
| | Product weight | 15 kg | 17 kg | 20 kg |
| Use | Product lifetime | 4 years | 4 years | 4 years |
| | PUE | 1.55 | 1.55 | 1.55 |
| | Yearly energy (TEC) | 801 kWh | 1605 kWh | 3633 kWh |



[Source : HPE product carbon footprint, 2024]

Analyses de cycle de vie

ACV attributionnelle

Impacts a posteriori et en régime permanent (capacités de production installées, etc.)

→ Exemple : consommation énergétique d'une chaîne de montage de serveurs divisée par le nombre de serveurs produits à inclure dans la phase de fabrication.

⚠ ACV-A = somme de chiffres avec des incertitudes souvent élevées.

⚠ Si l'ACV-A indique n kgCO₂e par serveur, cela ne signifie pas que n kgCO₂e sont économisés si un des serveurs n'est pas produit (ni même $n \times k$ pour k serveurs).

ACV conséquentielle

Impacts d'une situation par rapport à une autre, utilisée pour les analyses de type *what-if*, rare dans la littérature

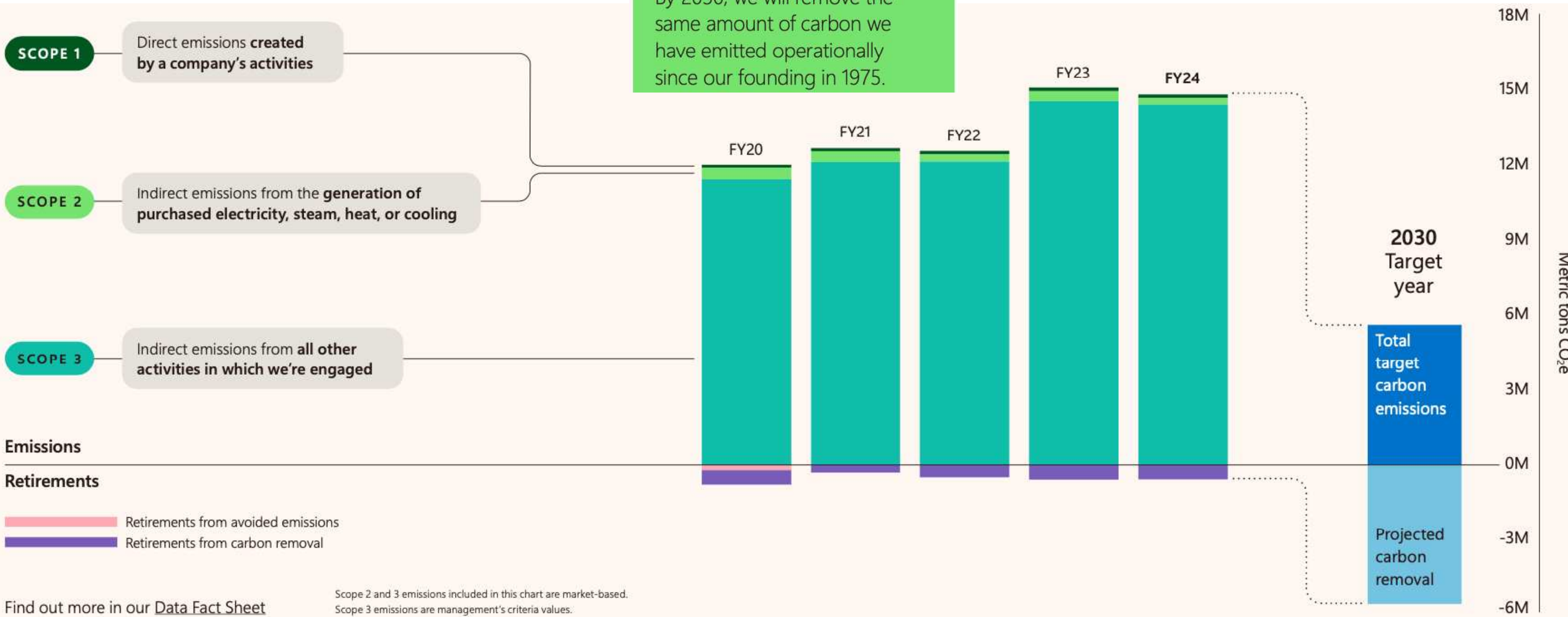
→ Exemple : impact de l'ajout d'un GPU dans les serveurs.

⚠ Pour cet exemple : disposer d'une ACV-A du serveur initial et d'une ACV-A du GPU ajouté ne permet pas d'avoir cette ACV-C, c'est-à-dire prenant en compte une modification de la chaîne d'assemblage ou son remplacement complet.

Exemple de Microsoft

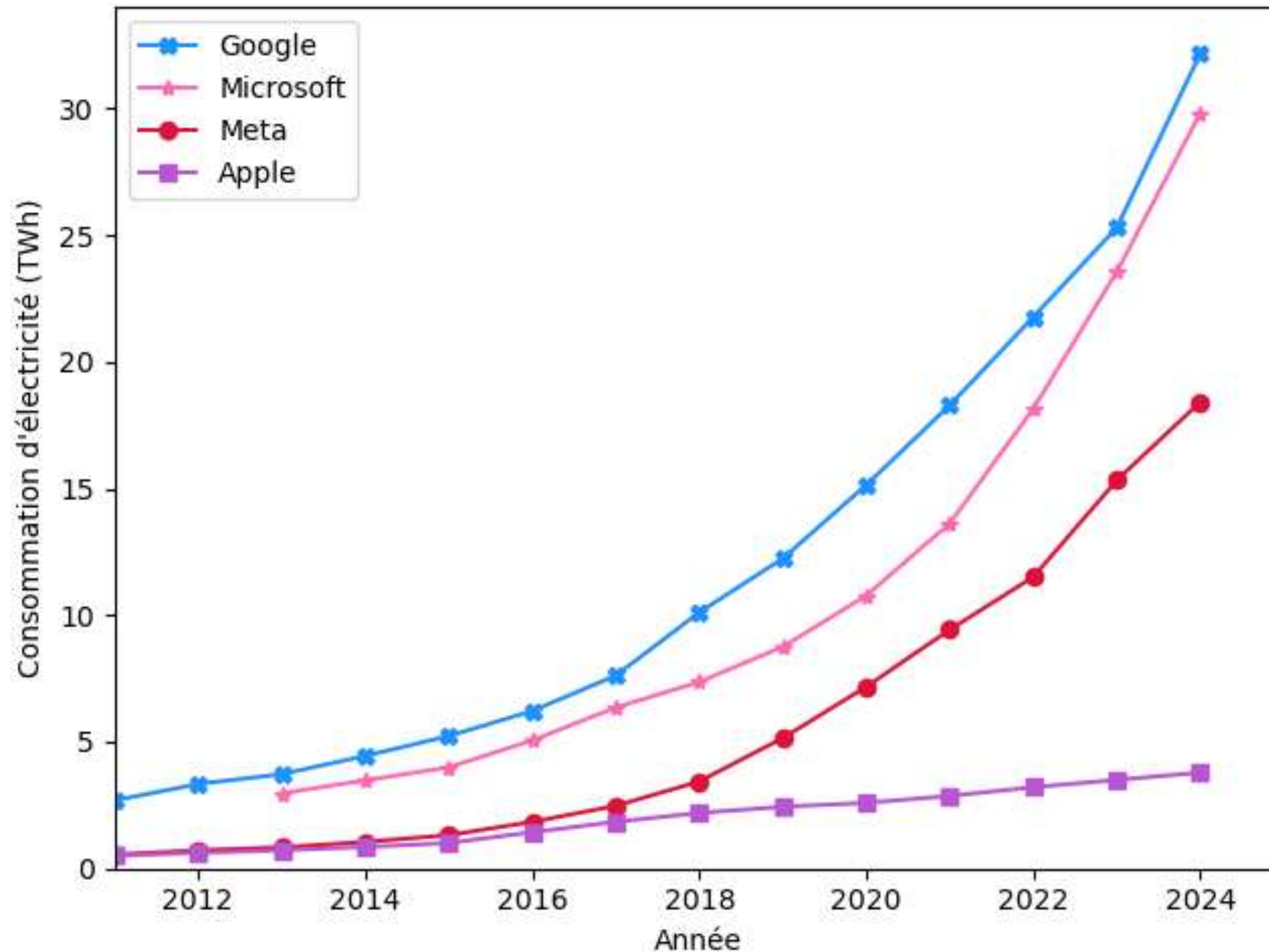
Carbon negative

By 2030, Microsoft will cut its emissions by more than half compared to 2020 and remove more carbon than it emits. By 2050, we will remove the same amount of carbon we have emitted operationally since our founding in 1975.



[Source: 2025 Environmental Sustainability report, Microsoft.]

Consommation électrique des Clouds



X 2 en 4 ans

“Power limits in data centers: what can we expect from improving energy efficiency and refreshing servers?”, Pablo Leboulanger, Anne-Cécile Orgerie, *IEEE International Conference on Cloud Engineering*, 2025, pp.1-12.

Sources : rapports environnementaux annuels de Google, Microsoft, Meta et Apple.