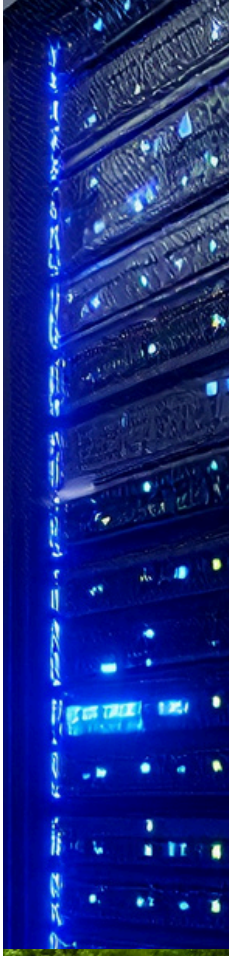
Systematic
Paris Region Deep Tech Ecosystem

PAROLES D'EXPERTS

Les Data Centers & l'environnement







SOMMAIRE

P.4

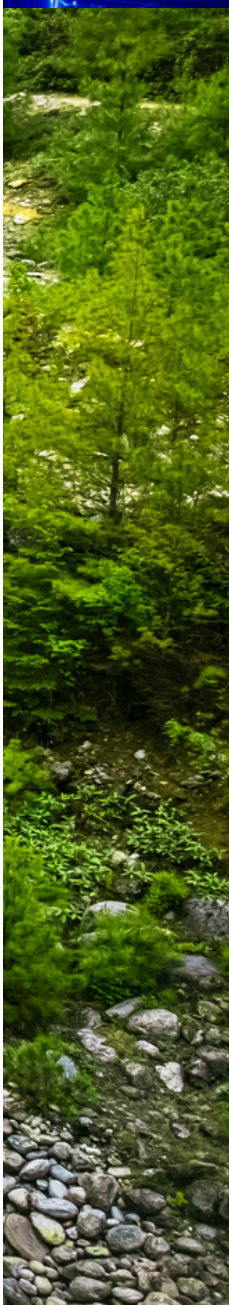
INTRODUCTION & CONSTAT

P.5

CHAPITRE 1

Les centres de données : des outils qui valent d’être appréciés.





P.16

CHAPITRE 2

Les centre de données Edge

P.22

CHAPITRE 3

Monitorer l'impact environnemental des infrastructures numériques

P.27

RÉFÉRENCES

PAROLES D’EXPERTS

Novembre 2026

INTRODUCTION & CONSTAT

Dans la continuité des précédents numéros de Parole d'Experts, consacrés aux enjeux de la décarbonation du numérique et aux leviers permettant d'accélérer la transition, notre groupe Décarbonation & Numérique Frugal de Systematic s'intéresse cette fois à un maillon essentiel de l'écosystème numérique : les datacenters.
La décarbonation des datacenters, un sujet qui fait couler beaucoup d'encre, repose sur quatre leviers : des innovations énergétiques, une efficacité énergétique sans cesse améliorée, des systèmes de refroidissement adaptés et des usages plus sobres. Un seul objectif : réduire leur empreinte environnementale.

Dans ce Parole d'Experts, nous dressons un état des lieux des centre de données [data centers] sous l'angle de leur impact sur l'environnement. Nous passons en revue les solutions numériques qui permettent de mieux maîtriser leurs consommations d'énergie, leurs émissions et les éventuels effets rebond. Nous explorons également la technologie Edge et sa capacité à alléger l'empreinte environnementale de nos données.

Aujourd'hui, l'engouement pour les centres de données dédiés à l'IA s'accélère et soulève de nombreuses questions. Nous les mettons en lumière pour réunir tous les acteurs autour de la table, afin que chacun prenne ses responsabilités.

LES CENTRE DE DONNÉES : DES OUTILS QUI VALENT D'ÊTRE APPRÉCIÉS

Nous ne l'avons pas toujours en tête, mais chaque recherche en ligne que nous effectuons, chaque vidéo regardée, chaque document conservé dans notre Cloud, ou chaque usage de l'intelligence artificielle, parfois pour produire du SLOP, font tourner sans interruption des bâtiments bien réels : les centres de données.
Les centres de données sont aujourd'hui toutefois plus performants sur le plan énergétique, mais l'augmentation rapide de leurs usages, notamment liée à l'intelligence artificielle, entraîne de nouveaux défis en matière, notamment, de consommation d'énergie.

Les centres de données : et si la demande dépassait le gain en efficacité ?

** Le rapport de l'Arcep comporte plusieurs limites qui sont importantes à mentionner. Il ne couvre pas l'ensemble des centres de données mais uniquement les opérateurs de colocation et de co-hébergement dépassant certains seuils. Les centres de données exploités directement par des industriels ou administrations ne sont pas pris en compte.*
L'Arcep ne couvre pas non plus le scope 3, c'est-à-dire les émissions liées à la fabrication des serveurs, des GPU et des bâtiments. Or, cette phase représente une part majeure de l'empreinte environnementale totale.
De même le rapport ne prend pas en compte la valorisation de chaleur fatale produite par certains centres de données.

*Selon la dernière enquête de l'Arcep**, la consommation électrique des centres de données continue de s'envoler en France. Ils ont ainsi consommé 2,7 térawatts heure (TWh) d'électricité en 2024, soit une hausse de 12% en un an, portée par l'essor de l'IA. Les besoins liés aux infrastructures continuent d'accélérer, malgré les gains d'efficacité énergétique, particulièrement en Ile-de-France, qui concentre plus de 70% de la puissance des centres analysés. Avec une limite importante : l'étude ne couvre que la moitié des centres de données de colocation.

Selon cette même étude, Les émissions des centres de données ont atteint 178 000 tonnes équivalents CO2 en 2024, soit une hausse de 23%, contre 13% en 2023. Cette accélération est principalement due aux émissions du scope 2 (soit la production en amont de l'électricité consommée), elles-mêmes amplifiées par une hausse du facteur d'émission du mix électrique français.
En revanche, la réduction des fuites de fluides frigorigènes permet d'observer une baisse continue des émissions du scope 1 (- 7%).
Une question se pose toutefois ; ces gains d'efficacité suffiront-ils à compenser l'explosion des capacités installées ? On observe en effet de nouvelles infrastructures conçues avec des puissances électriques sans commune mesure avec les générations précédentes. Alors que les centres ouverts avant 2023 affichaient une puissance moyenne de 3 mégawatts (MW), les nouveaux datacenters ouverts en 2023 atteignaient déjà 9 MW. En 2024, cette puissance moyenne des nouveaux centres est de 20 MW.

RTE considère les centres de données comme l'un des principaux moteurs de la hausse future de la demande électrique française. Hausse qui pourrait par conséquence ralentir de la sortie des énergies fossiles et l'électrification des usages notamment dans le transport et le bâtiment.

Selon une étude réalisée en 2020 par *GreenIT.fr* les ¾ de la pollution numérique est due à la fabrication des appareils. Les centres de données sont remplis de serveurs qui nécessitent des matières rares (les métaux ferreux et non ferreux, métaux précieux, terres rares, autres substances comme le cobalt, le lithium ou le carbone). L'extraction de ces minerais a un impact considérable sur l'environnement. La fabrication des composants se fait ensuite en Asie, dans des pays qui utilisent souvent de l'énergie provenant du charbon. A toute l'énergie dépensée et aux transports associés à la fabrication de ces appareils numériques, il faudrait ajouter l'obsolescence programmée, réduction volontaire de la durée de vie d'un produit afin d'en accélérer le renouvellement, qui permet aux fabricants d'accélérer le réachat de produits. Cet impact se poursuit lors de la fin de vie des appareils numériques puisque seuls 40% des déchets électroniques et électriques (DEEE) sont recyclés en Europe selon l'ADEME.

Enfin l'eau; les centres de données de nos jours maitrisent en circuit fermé leur consommation d'eau. Le problème réside dans le fait *que la consommation d'eau en dehors du centres de donnéess, principalement pour la production d'électricité et la fabrication de puces, peut doubler* ou *tripler l'empreinte hydrique totale d'une installation.*

En effet, aucun centre de données ne peut fonctionner sans alimentation électrique, et de nombreux types de centrales électriques sont eux-mêmes de gros consommateurs d'eau.
Les centrales thermiques à combustibles fossiles figurent parmi les plus grands consommateurs d'eau aux États-Unis par exemple, avec une consommation de 2,7 milliards de gallons par jour selon l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS), la majeure partie étant utilisée pour le refroidissement par évaporation.

Les centres de données ont pourtant évolué significativement depuis les 20 dernières années.

L'énergie :

Pour évaluer l'impact énergétique d'un centres de données il faut connaître la source d'énergie qui le fournit. La France bénéficie d'une électricité décarbonée, l'impact local est donc réduit. D'après le Bilan électrique 2025 de RTE, la production d'électricité française est à plus de 95 % décarbonée et figure parmi les moins émettrices de gaz à effet de serre en Europe (53gEqCO2/KWh).
De plus, pour la seconde année consécutive, la production française d'électricité a largement excédé nos besoins : 20 % de l'énergie produite en France a été exportée vers les pays voisins.
« L'installation de centres de données en France est donc une bonne nouvelle pour l'empreinte carbone du numérique. » *RTE Les centres de données en chiffre clés*
De plus, certains centres de données utilisent de l'électricité produite par du photovoltaïque, avec pour limite qu'elle n'est pas permanente alors que le centres de données fonctionne en continu. Il est à noter toutefois que les surfaces de PV nécessaires sont souvent antinomiques avec les disponibilités foncières ou de toiture. Des solutions géothermiques sont possibles mais elles ont aussi leur limite.

Ainsi, on voit apparaître des centres de données qui commencent à intégrer des capacités propres, ou consomment de l'énergie renouvelable ou non émissive.
On pourrait appeler cela de la « colocalisation », un modèle où l'on installe les serveurs au plus près des sources de production décarbonée. Ce couplage, souvent renforcé par du stockage sur batteries, modifie l'impact du projet sur le système :

- Un circuit plus court : L'électricité est utilisée sur place, ce qui limite les pertes d'énergie liées au transport.
- Un système national préservé : En créant des microréseaux locaux, on évite d'ajouter une sollicitation supplémentaire sur les grandes artères électriques du pays.
- Une traçabilité renforcée : Pour les entreprises, c'est l'assurance d'un lien plus direct avec la production éolienne ou solaire voisine, répondant aux exigences de la nouvelle directive européenne sur l'efficacité énergétique.

En 2010, la moyenne des centres de données en Europe avait un PUE (Power Usage Effectiveness: efficacité énergétique d'un centre de donnée) supérieur à 2,5. A cette époque quand un serveur consommait 1 KWh, le centres de données en consommait 2,5 KWh (principalement dû au refroidissement).
Aujourd'hui, cette consommation s'est largement réduite, grâce aux progrès faits sur la ventilation et le refroidissement ce qui permet d'atteindre des PUE inférieurs à 1,1.
Par exemple, Le refroidissement évaporatif diphasique gère efficacement la chaleur des composants informatiques de haute puissance en utilisant un refroidissement liquide diphasique (systèmes de réfrigérant pompés et passifs). Elle vise une très faible efficacité d'utilisation de l'énergie (PUE ≤ 1,05), élimine le gaspillage d'eau et permet la réutilisation économique de la chaleur en la capturant à des températures plus élevées.

Le rapport de la *COMMISSION D'ENQUÊTE* sur les dépendances structurelles et les vulnérabilités systémiques dans le secteur du numérique et les risques pour l'indépendance de la France alerte toutefois sur l'impact possible des groupes électrogènes de secours. Ceux-ci représentent 4,6 MWh de puissance installée, soit davantage que le parc thermique d'EDF sur l'ensemble de la France métropolitaine. Il existe donc des risques de pollution environnementale en cas d'incident sur un cluster de centres de données ou centres de données implantés en milieu urbain.

La consommation d'eau :

La revue scientifique Nature dans son article de 2021 « *Data centre water consumption* » indiquait qu'un centres de donnée d'une puissance de 1MW utilise en moyenne 25,5 millions de litres d'eau par an pour ses besoins en refroidissement. Cela équivaut à la consommation en eau d'environ 300 000 personnes.

Mondialement, la consommation totale des centres de données a atteint 560 milliards de litres d'eau en 2023, d'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE) dans son rapport *Energy and AI* (avril 2025).

Nous l'avons vu, les serveurs informatiques d'un centre de donnée nécessitent un refroidissement constant. D'après un *rapport du Shift Project*, les types de refroidissement les plus courants sont :

- Le refroidissement par air conditionné (climatisation classique) ;
- *Le free cooling* : l'air frais extérieur est insufflé directement dans les salles de serveurs, sans passer par une climatisation (fonctionne lorsque la température extérieure reste inférieure à 25°C)
- Les refroidissements liquides :

1. Le Indirect Liquid Cooling : l'air envoyé sur les serveurs passe dans un circuit secondaire où un liquide circulant permet d'accentuer le refroidissement ;
2. Le Direct Liquid Cooling : le liquide froid circule directement cette fois en contact avec les composants les plus calorifiques (processeurs, cartes graphiques…) ;
3. Le Immersion Cooling : la chaleur est étouffée en plongeant les serveurs dans un fluide diélectrique (non conducteur) qui l'évacue.

Il faut reconnaître toutefois que quel que soit la méthode de refroidissement liquide, le fluide souvent utilisé est l'eau, qui s'évapore sous l'effet de la chaleur et nécessite d'être renouvelée. Il faut donc développer des solutions de réduction de la consommation d'eau.

La directive européenne sur l'efficacité énergétique (EED) impose à tous les centres de données ayant une puissance IT installée d'au moins 500 kilowatt (KW) de déclarer leurs consommations annuellement (énergie, eau, etc.) dans une base de données européenne.
Des moyens ont été développés afin de réduire cette consommation :

- La boucle fermée : à l'inverse du circuit ouvert qui prélève, fait circuler puis rejette l'eau, le circuit fermé recycle l'eau de refroidissement non-évaporée en la renvoyant constamment dans le système. Il limite donc les nouveaux prélèvements ;
- Les "eaux alternatives" : captation d'eau de pluie, les eaux grises ou les condensats (eau récupérée depuis les systèmes d'air) ;
- Le freecooling, vu plus tôt ;
- Les flux d'air chaud et froid : le refroidissement est d'autant plus efficace quand les allées "chaudes" (serveurs) et "froides" (air d'admission) sont bien cloisonnées ;
- Le stockage thermique, quand les températures le permettent il consiste à utiliser des réservoirs d'eau glacée produits la nuit.

Il est là encore à noter que plus de 500 tonnes de fluide frigorigène de la catégorie des PFAS sont utilisés pour le fonctionnement des 680 groupes froids en France. Cela crée un risque sanitaire lié aux fuites du fluide R-1234ze utilisé. On les estime à 3% par an, soit 15t émises annuellement dans l'atmosphère.

Les emplois :
Dans un rapport publié le 11 avril 2025, intitulé « *A new era of load growth: How datacenters are becoming part of our communities and energy system* », PwC met en évidence l'ampleur de l'effet multiplicateur des centres de données sur l'emploi aux États-Unis : chaque poste créé directement dans ce secteur en génère plus de six autres dans le reste de l'économie étatsunienne, en tenant compte à la fois des dépenses opérationnelles et des investissements.

Ces emplois « soutenus » recouvrent deux types d'effets. D'une part, l'effet indirect, lié aux postes nécessaires pour produire les biens et services qui alimentent la chaîne d'approvisionnement de l'industrie des centres de données. D'autre part, l'effet induit, qui correspond aux emplois créés par les dépenses supplémentaires des ménages dont les revenus proviennent de cette activité.
Entre 2017 et 2021, l'emploi direct dans l'industrie étatsunienne des centres de données et sa chaîne d'approvisionnement a progressé de plus de 17 %, soit un rythme dix fois supérieur à celui de l'emploi US global sur la même période. En prenant en compte l'ensemble des effets directs, indirects et induits liés à la construction et à l'exploitation des centres de données, l'emploi national concerné est passé de 2,9 millions à 3,5 millions de postes, soit une progression de 20 %.
PwC souligne par ailleurs que l'année 2022 a, à elle seule, généré davantage d'emplois que toute la période 2017-2021 réunie : 560 000 emplois directs et 4,2 millions d'emplois soutenus au total à l'échelle du pays. Ces chiffres devraient encore s'accélérer avec la multiplication des centres de données destinés à accueillir les infrastructures d'intelligence artificielle.
En combinant impacts opérationnels et dépenses en capital, chaque emploi direct du secteur des centres de données étatsuniens soutiendrait ainsi en moyenne 7,4 emplois dans l'ensemble de l'économie du pays - un ratio qui continue de croître.
Il convient de préciser que cette étude de PwC porte uniquement sur les centres de données eux-mêmes, sans inclure les emplois liés à l'infogérance des infrastructures ni ceux relevant des activités hébergées par les clients de ces centres de données.

De son côté M. Fabrice Coquio, président-directeur général de Digital Realty explique que si la construction de centres de données est intensive en emploi au moment de la construction, elle l'est peu lors des phases d'opération. « Quant à l'impact direct de ces infrastructures pour le territoire concerné, il s'observe d'abord pendant la phase de construction : le chantier en cours à Marseille emploiera 400 à 450 compagnons pendant deux ans, sans parler des machines que nous sommes susceptibles d'acheter à des fabricants français ou européens (…). Contrairement à ce qu'on pense parfois, on pourrait presque dire qu'un centres de données fourmille : en moyenne, dans chacun de nos quatre centres marseillais, 120 à 170 personnes entrent et sortent par tranche de vingt-quatre heures. ». *ref*

Le Foncier :

Un centre de données bien conçu n'a aucune raison d'être un sur-consommateur de foncier. De nos jours de plus, l'augmentation de la densité des racks implique que, pour 1 MW IT, nous avons de moins en moins de surface construite. Ainsi un centres de données occupe 3m² de baies pour sa partie Cloud et stockage. 100 baies vont donc prendre 300m² pour la salle informatique. Les locaux techniques occupent environ la même surface. Soit 600m² de surface développée. Si les baies ont une capacité moyenne IT de 5 KW nous obtenons un datacenter de 600m² pour 1,5 MW IT ou 2,2 MW d'installé au poste de livraison. Cela étant dit on observe aujourd'hui avec l'IA des centres de données dont les baies occupent plutôt 4m² avec des puissances de 40 à 150 KW. La tendance semble donc s'orienter vers moins de surface pour une même puissance.

De plus pour respecter les objectifs de *zéro artificialisation nette (ZAN)*, les nouvelles implantations devraient, par exemple, privilégier les friches urbaines. En tous cas, il semble important d'éviter de détruire des terres agricoles.

Dans un article sur LinkedIn, Mme Valérie Masson Delmotte ajoute qu'une première étude réalisée à partir de données satellitaires souligne un effet d'îlot de chaleur des centres de données atteignant en moyenne +2°C, avec un effet discernable sur un rayon de 10 kilomètres.

Les nuisances sonores :

Un centres de données est un environnement industriel bâti autour de systèmes mécaniques et thermiques qui fonctionnent en continu. Contrairement à d'autres installations, *le bruit produit n'est ni ponctuel ni aléatoire. Il est constant, stable, difficile à ignorer.*

La principale source de bruit provient des systèmes de refroidissement. Les serveurs génèrent une chaleur importante qui doit être évacuée en permanence pour garantir leur bon fonctionnement. L'utilisation de ventilateurs, de groupes de climatisation, de refroidisseurs et de réseaux de ventilation est donc nécessaire à cet objectif. Le résultat est un bruit de fond continu liés aux flux d'air.

Sans oublier les installations extérieures, groupes froids ou tours de refroidissement, souvent placés à proximité du bâtiment ou en toiture, qui participent aussi au volume sonore global du site.

La structure du bâtiment peut elle-même parfois amplifier le son ; les vibrations mécaniques, quand elles ne sont pas bien isolées, peuvent se propager et être retransmises sous forme de bruit. Les nuisances sonores d'un centre de données sont donc la combinaison de plusieurs facteurs.

La structure du bâtiment peut elle-même parfois amplifier le son ; les vibrations mécaniques, quand elles ne sont pas bien isolées, peuvent se propager et être retransmises sous forme de bruit. Les nuisances sonores d'un centre de données sont donc la combinaison de plusieurs facteurs. Le premier est le déplacement de l'air. Il est en effet aspiré, filtré, refroidi puis redistribué en continu générant des turbulences à l'origine d'une grande partie du bruit. Plus l'air est remué rapidement, plus les turbulences sont importantes, et le bruit augmente d'autant.
Les ventilateurs reposent sur une rotation rapide, nécessaire pour maintenir un débit d'air suffisant. Cette rotation produit un bruit, qui est amplifié par la multiplication des unités.
Les équipements frigorifiques, comme les compresseurs, participent eux aussi aux nuisances sonores. Des vibrations inhérentes à leur fonctionnement mécanique peuvent être transmises à la structure du bâtiment.

En période de forte activité les nuisances peuvent être amplifiées. Les systèmes de refroidissement sont en effet davantage sollicités, ce qui peut entraîner une augmentation du niveau sonore.
Plusieurs pistes peuvent donc être envisagées afin de palier à ce bruit environnent :

- L'isolation acoustique en premier lieu,
- Les silencieux, ou atténuateurs acoustiques, particulièrement utilisés dans les réseaux de ventilation,
- Isolation des équipements mécaniques du reste de la structure, limitant la transmission des vibrations et donc la génération de bruit secondaire,
- Solutions de contrôle actif du bruit. Systèmes émettant des signaux acoustiques destinés à annuler le bruit existant. Solution qui semble toutefois complexe et énergivore à mettre en place, notamment dans des environnements industriels.

Les centres de données : des vecteurs de développement décarboné territorial.

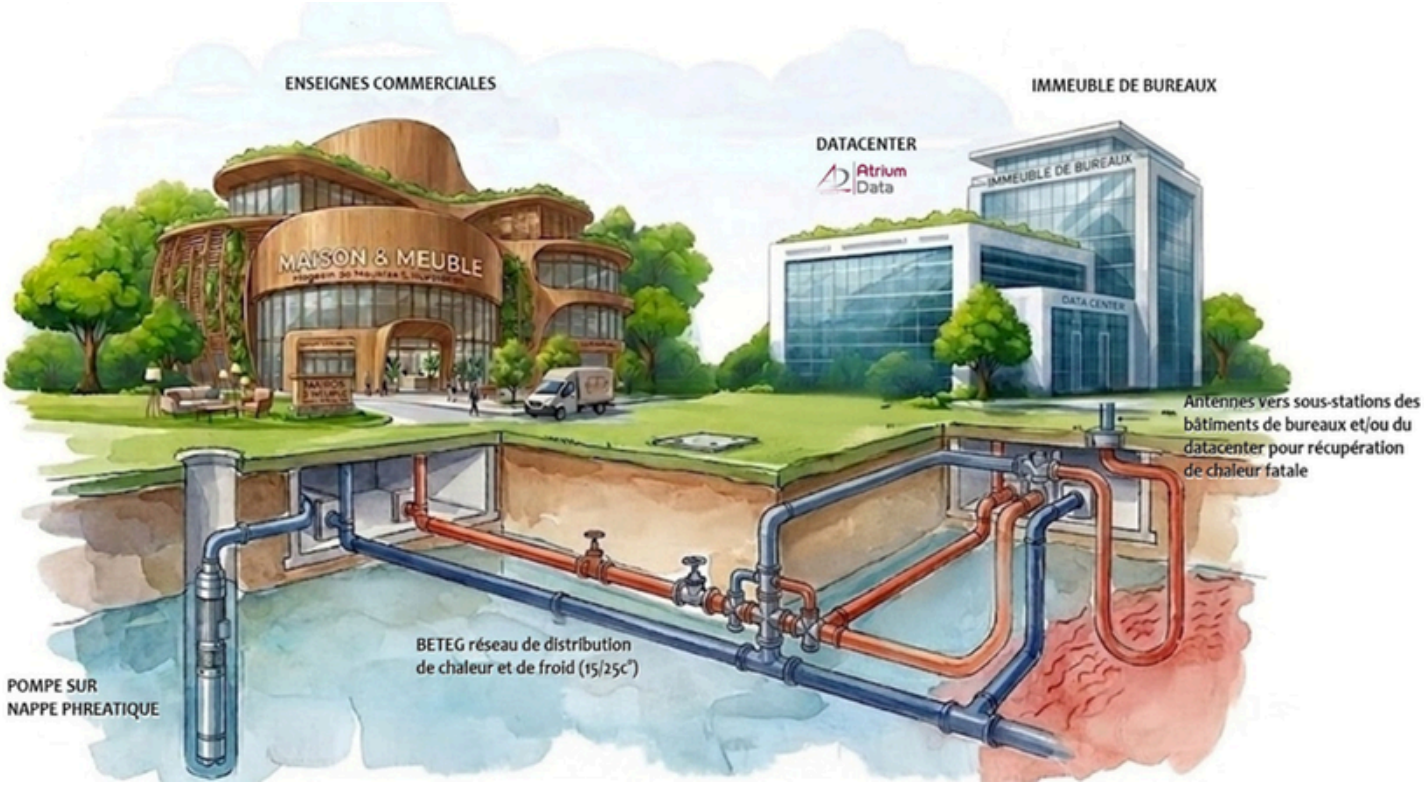
Tout d'abord et comme vu précédemment, l'énergie produite en France est décarbonée. De plus, nous savons utiliser des ENR pour en approvisionner une partie : soit du photovoltaïque pour de l'électricité, soit de la géothermie pour la production de frigories.

Enfin, de vrais programmes de valorisation des énergies renouvelables que sont les calories fatales produites par les serveurs hébergés dans le centre de données, ont été développés. Atrium Data travaille ainsi sur des solutions de stockage de longue durée de la chaleur, afin d'avoir la capacité d'ici 2 ans maximum de stocker la chaleur produite l'été par le centre de données et servir de nouveaux utilisateurs.
Ainsi on est capable, soit de chauffer des locaux environnants, soit d'abonder un réseau de chaleur. La chaleur produite par les serveurs n'est plus vue comme une contrainte à évacuer mais bel et bien comme une ressource que l'on sait valoriser. (Ex : Mérignac, voir plus bas).
Voici d'autres exemples en Ile-de-France :

- À Paris, *la piscine de la Butte-aux-Cailles récupère les calories émises par des serveurs informatiques pour réguler sa température*.
- A Saint Denis, *la récupération de chaleur fatale du centre de données Equinix et extension du réseau de chaleur Plaine Commune Energie*.
- En Essonne, *Data4 crée le premier centre de données bio-circulaire qui utilise la chaleur fatale pour produire des micro-algues.*

L'avancée ne s'arrête pas là. Il est également possible d'organiser une péréquation énergétique et économique à partir du centre de données, en y associant un mix de solutions d'énergies renouvelables, telles que la géothermie et l'énergie solaire, ainsi que des dispositifs de stockage de l'énergie et des réseaux privés de chaud et de froid, entre autres.
Ainsi, le projet de centre de données à Mérignac permettra de fournir le chaud et le froid aux utilisateurs d'un programme immobilier neuf. La brasserie, la salle de sport et les bureaux ne nécessiteront donc aucun investissement énergétique de leur part.

Par ailleurs, le centre de données est relié, comme indiqué sur le schéma, à la BETEG, elle-même associée à une installation de géothermie. L'ensemble permettra ainsi d'assurer la fourniture de chaud et de froid à plusieurs enseignes commerciales déjà présentes sur les terrains voisins.



Autre cas de figure : lorsqu'un réseau public de chauffage existe à proximité, il est possible, en installant un réhausseur de température, d'apporter des calories entièrement renouvelables au réseau concerné. Les réseaux publics ont en effet besoin d'augmenter la part d'énergies renouvelables dans leur processus de production

D'autant plus que le centre de données peut être installé dans des bâtiments existants, permettant ainsi de redonner vie à certains quartiers sans mobiliser de nouveau foncier, voire de renforcer leur attractivité en accueillant des activités ayant besoin de chaud et/ou de froid. Cette approche peut s'appliquer aussi bien au secteur privé qu'au secteur public.

D’autant plus que le centre de données peut être installé dans des bâtiments existants, permettant ainsi de redonner vie à certains quartiers sans mobiliser de nouveau foncier, voire de renforcer leur attractivité en accueillant des activités ayant besoin de chaud et/ou de froid. Cette approche peut s’appliquer aussi bien au secteur privé qu’au secteur public.

Les centres de données : le véritable accompagnement de la performance souveraine.

L’explosion des besoins en matière de traitement des données, combinée à la nécessité d’assurer leur protection, rend indispensable la maîtrise de leur localisation ainsi que la sélection des opérateurs, afin de limiter les risques de prédation ou de captation.
Le développement, en France, d’acteurs français capables d’opérer des Edge Data Centers (<20 MW), ainsi que d’acteurs spécialisés dans les prestations informatiques et les capacités de calcul, constitue une réponse adéquate à ces enjeux, à condition de savoir développer et mettre en œuvre les projets dans des délais compatibles avec le Time to Market de ces besoins.

Les DataCenters Edge

Le Edge computing s'est imposé comme un pilier de l'Internet des objets (IoT) en rapprochant le traitement et l'analyse des données du lieu où elles sont produites. Porté par les avancées récentes en intelligence artificielle, en jumeaux numériques ou encore dans le domaine de la santé, il dote désormais les dispositifs situés au plus près de l'utilisateur (véhicules, smartphones, dispositifs médicaux, etc.) de capacités de calcul toujours plus importantes. Ces systèmes peuvent ainsi réaliser localement des traitements autrefois déportés vers des infrastructures cloud centralisées, tout en améliorant l'autonomie, la latence et la résilience des services. Pourtant, dans le débat environnemental, l'edge computing ne bénéficie pas d'une bonne presse. La multiplication diffuse de capacités de calcul de proximité est souvent perçue comme une source supplémentaire de consommation énergétique et de complexité, voire comme un facteur aggravant de l'empreinte carbone du numérique. Mais cette perception est-elle fondée ? Que recouvre réellement le terme d'Edge computing, et dans quelle mesure cette distribution du calcul constitue-t-elle une opportunité - ou au contraire une contrainte - pour la décarbonation du numérique ? C'est à ces questions que nous allons tenter de répondre dans cette section.

Edge Computing : de quoi parle-t-on exactement ?

Le Edge Computing consiste à rapprocher le stockage et le traitement des données de leur source (voir Figure 1) : directement sur les appareils, appelé Embedded ou Micro-Edge, dans les antennes, les box internet ou les passerelles, appelé Far-Edge, ou encore dans des datacenters régionaux, le Near-Edge.

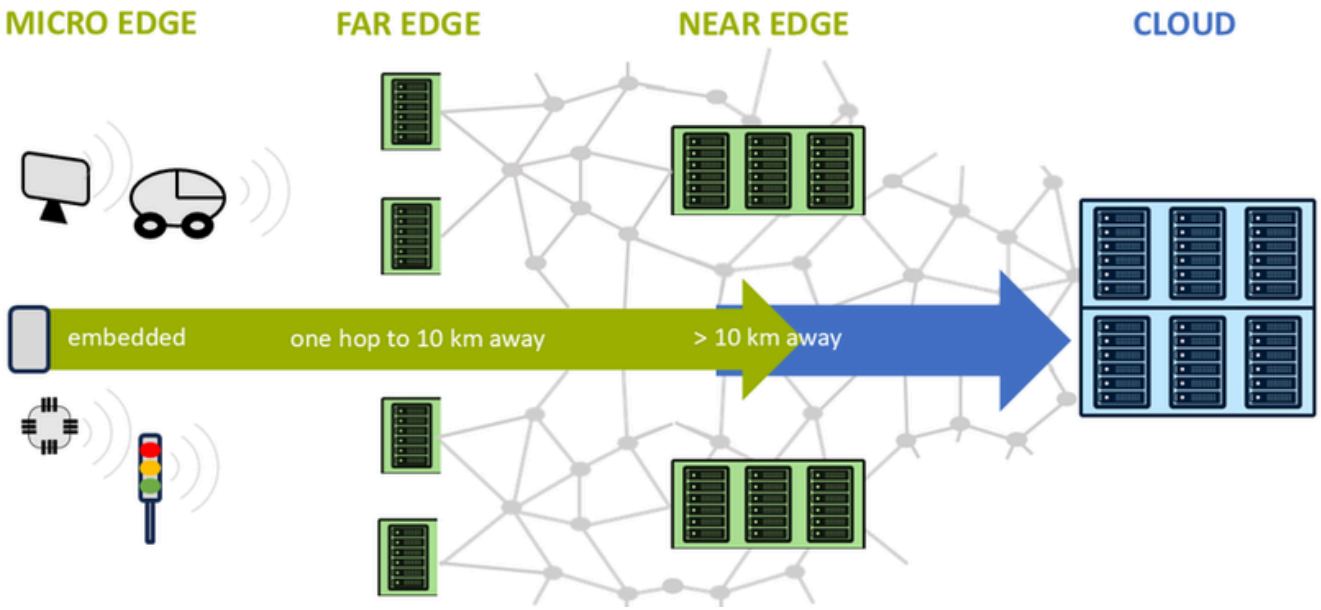


Figure 1: Classification du Edge selon la proximité de la source de données (Green Communication,2025)

Cette « migration » vers l'Edge s'explique notamment par le concept de « data gravity » (Dave McCrory, 2010) : à mesure que les volumes de données augmentent, il devient plus pertinent d'amener le calcul vers les données plutôt que de déplacer les données vers des capacités de traitement centralisées. Les exigences de latence des applications modernes - de l'ordre de quelques millisecondes parfois - renforcent également ce besoin de traitement local. Plus récemment, les besoins accrus de disponibilité de services critiques - qu'il s'agisse d'opérations métiers, de communications ou d'applications vitales - constituent un nouveau levier pour la « relocalisation » de capacités de calcul au plus près de leur lieu d'exécution.

L'Edge peut se présenter comme une extension locale du cloud intégrée au « cloud continuum », concept qui reflète l'idée que le cloud n'est plus un lieu unique, mais un ensemble cohérent de ressources interconnectées (S. Moreschini, 2022). Il peut aussi se matérialiser par une multitude d'unités de calcul indépendantes ou fédérées, formant alors l'équivalent d'un centre de données autonome et distribué à proximité des utilisateurs (K. Al Agha, 2022). Ces approches de l'Edge Computing rapprochent la puissance de traitement des capteurs, des machines et des usagers pour répondre aux enjeux contemporains du numérique. Quelles sont cependant les conséquences de cette évolution pour la décarbonation du secteur ? Nous l'examinerons dans la section suivante.

Edge Computing : opportunité ou contrainte pour la décarbonation du numérique ?

Dans la littérature scientifique, le edge computing occupe une place ambivalente lorsqu'il s'agit d'évaluer son empreinte environnementale. Certains travaux le considèrent comme un poids, en soulignant les risques liés à la multiplication de micro-infrastructures énergivores en périphérie du réseau (ADEME, 2022) (The Shift Project, 2025)

D'autres y voient au contraire une opportunité, capable de réduire les impacts environnementaux en limitant les transferts de données, en améliorant l'efficacité énergétique locale et en soutenant les objectifs de durabilité (P.Arroba, 2024). D'autres encore qualifient l'impact du edge comme relativement neutre, les coûts étant compensés par les bénéfices (European Commission, 2022). Dans ce qui suit, nous allons éclairer ces deux positions en nous appuyant sur les principaux travaux scientifiques qui les soutiennent.

Edge computing comme poids pour l'environnement

Plusieurs travaux soulignent que rapprocher les capacités de calcul des sources de données peut entraîner une hausse de la consommation énergétique, en raison de la multiplication des micro-infrastructures edge, qui n'atteignent pas toujours les niveaux d'efficacité énergétique (PUE) des hyperscalers. Comme le montrent (P.Arroba, 2024), les centres de donnéess de proximité affichent fréquemment des PUE sensiblement plus élevés que ceux des grandes plateformes cloud, en raison de contraintes économiques, techniques ou géographiques limitant l'adoption d'optimisations avancées. Cet argument s'étend également aux unités de calcul embarquées dans les équipements finaux (smartphones, véhicules connectés, objets IoT). L'essor du calcul embarqué favorise en effet un renouvellement accru du matériel et une complexification des terminaux, deux facteurs qui amplifient l'impact environnemental déjà dominant des phases de fabrication, d'extraction de ressources et de fin de vie des équipements électroniques. Les travaux de (Marie-Anne LACROIX, 2025) montrent que l'ajout de capacités edge dans les terminaux contribue mécaniquement à renforcer ce poids environnemental.

Bien que ces arguments soient pertinents et méritent toute notre attention, ils manquent d'une véritable vision systémique du problème. En effet, la question ne se limite pas à comparer le PUE d'un centre de données edge à celui d'un centres de données cloud, ni à déterminer si un terminal edge consomme davantage qu'un terminal classique. Cette approche en silos reste réductrice et ne permet pas de mettre en lumière l'enjeu principal. La véritable question est plutôt la suivante : dans un contexte de croissance exponentielle de la demande en capacité de calcul, vaut-il mieux tout centraliser ou bien distribuer une partie de cette capacité au plus près des usages ?
Autrement dit, réaliser un calcul donné dans un cloud éloigné est-il plus ou moins consommateur de ressources que de l'exécuter localement ? Ce choix architectural doit être évalué en tenant compte de son impact global sur le dimensionnement et la consommation des trois couches du système : les terminaux, le réseau et les centres de donnéess. Dans cette perspective élargie, les conclusions apparaissent beaucoup plus nuancées.

Edge computing comme *opportunité* environnementale

Relocaliser la capacité de calcul ou de stockage des données est aussi un moyen de réduire l'impact environnemental du numérique grâce à plusieurs mécanismes.

Traiter près de la source pour transporter moins : L'un des bénéfices majeurs du edge computing réside dans la réduction des flux de données à longue distance. En traitant localement les informations, on limite le recours aux réseaux de transport et aux centres de données distants, qui constituent une part importante de l'empreinte énergétique du numérique. Quand un flux vidéo, des données de capteurs, des contenus immersifs ou des traitements d'intelligence artificielle sont préfiltrés, compressés, agrégés ou analysés localement, seule l'information utile remonte vers le cloud ou le centre de données central. Le gain ne vient pas seulement des ressources en fibre optique elle-même, mais de l'ensemble de la chaîne de transport : équipements optiques, routeurs, commutateurs, agrégation, redondance et refroidissement. Pour de nombreux usages, traiter au plus près revient donc à mieux consommer à l'échelle globale du système. Les analyses menées autour de l'architecture edge–cloud (P. Loygue, 2024) montrent que le traitement en périphérie permet de diminuer significativement la consommation liée à la transmission, en particulier pour les applications intensives en données (vidéo, objets IoT, véhicules, capteurs industriels).

Faire plus avec moins, une culture fondatrice de l'Edge : Alors que le cloud donne une impression d'abondance quasi illimitée, l'Edge se caractérise au contraire par des contraintes fortes qui exigent une optimisation matérielle et logicielle poussée. Dans l'écosystème edge, l'abondance n'a jamais existé : les développeurs y travaillent depuis toujours sous contrainte, ce qui les pousse à optimiser l'ensemble de la chaîne (matériel, logiciel, énergie, cycles de calcul, mémoire).
Ils s'appuient pour cela sur des micro-architectures spécialisées, des unités de calcul dédiées (DSP, NPU, ASIC), des optimisations fines de la gestion de l'énergie et un dimensionnement strict pour des tâches spécifiques, sans sur-provisionnement. Les travaux récents sur l'edge embarqué montrent ainsi que ces dispositifs atteignent une efficacité énergétique par opération nettement supérieure à celle des infrastructures traditionnelles, notamment lorsque les charges sont prévisibles et localisées (Xuesi Chen, 2025).
L'edge est donc un environnement capable de faire beaucoup avec très peu de ressources. Par exemple des modèles d'IA spécialisés, plus légers, plus efficaces énergétiquement peuvent être déployés à l'edge.
L'apprentissage fédéré réduit le transfert de données en gardant les données brutes en local, ce qui permet de réduire la consommation énergétique. Cette culture d'optimisation, héritée du monde de l'embarqué, constitue une richesse qui doit être cultivée et enrichie afin d'allonger la durée de vie des systèmes et d'améliorer la réparabilité et la recyclabilité des équipements edge.

Adapter l'infrastructure au besoin réel, localement : La sobriété permise par l'edge repose en grande partie sur sa modularité et sa capacité à valoriser les ressources locales. Là où le déploiement de quelques grands centres centralisés impose souvent un surdimensionnement des accès et des réseaux de transport pour absorber des pics de trafic, une infrastructure edge distribuée permet d'absorber les besoins par incréments, au plus près des lieux où la demande apparaît réellement. Cette approche favorise des investissements plus fins, limite certaines extensions massives du réseau et permet de tirer parti d'infrastructures déjà existantes (bâtiments, sites techniques ou équipements alimentés en continu).

Le format réduit des micro-centres de données edge ouvre en outre des perspectives d'intégration environnementale plus adaptées : le calcul peut être installé là où l'énergie est disponible, là où la dissipation thermique est plus facilement maîtrisable, et là où les usages justifient effectivement sa présence. On ne raisonne plus en termes de blocs centralisés à alimenter et à refroidir à distance, mais comme un maillage de ressources mieux ajustées, déployables progressivement, modernisables plus facilement et pilotables au plus juste. Cette proximité améliore l'adéquation entre besoin réel, puissance installée et qualité de service, tout en permettant une montée en charge plus progressive et plus soutenable pour des secteurs tels que les villes, l'industrie, les transports, la santé ou les campus.

L'Edge, un maillon indispensable de l'adaptation au changement climatique : Le edge computing ne se limite pas à une optimisation énergétique ponctuelle. Il favorise aussi une résilience accrue face aux perturbations climatiques, ce qui constitue une forme d'adaptation à long terme. En réduisant la dépendance à un nombre limité de centres de données centralisés, les architectures edge distribuées renforcent la résilience globale des systèmes numériques. Les infrastructures centralisées sont en effet particulièrement vulnérables aux vagues de chaleur, aux coupures réseau, aux inondations ou aux tensions sur les réseaux électriques. À l'inverse, une architecture distribuée permet à chaque localité de continuer à fonctionner de manière autonome lorsque le réseau central est perturbé. Un incident localisé n'entraîne pas d'effet domino.

Une défaillance affectant un territoire n'impacte pas nécessairement les autres. Dans une architecture edge de type fédérée, cette résilience peut même être renforcée. Une localité non affectée peut venir en soutien numérique d'une autre ayant subi un dommage, en partageant des capacités de calcul, de stockage ou de coordination.

Enfin, cette approche facilite l'exploitation d'énergies locales et décentralisées (solaire, batteries, micro-grids) en cohérence avec les contraintes et les ressources propres à chaque territoire. Cette robustesse systémique est de plus en plus discutée comme un co-bénéfice environnemental. Une infrastructure distribuée absorbe mieux les aléas liés au changement climatique, réduisant ainsi les risques et les coûts associés (S. B. Chougule, 2024)(P.Arroba, 2024).

Il y a une vingtaine d'années en France, la majorité des denrées alimentaires transitaient par le marché de Rungis avant d'être redistribuées vers les territoires, y compris lorsque ces produits étaient cultivés localement. Depuis, le développement de filières de proximité et de circuits courts a permis de réduire les impacts liés au transport, d'améliorer la résilience des territoires et de mieux valoriser les producteurs. Le numérique d'aujourd'hui présente de nombreuses similitudes avec cette organisation passée de l'industrie agroalimentaire : fortement centralisé, concentré dans quelques grandes infrastructures éloignées des usages, et reposant sur des flux massifs et parfois inutiles.

Faut-il pour autant relocaliser le calcul ? Et cette relocalisation est-elle bénéfique à la fois pour l'environnement et pour les territoires ? Si ce livre blanc montre que la littérature scientifique et institutionnelle ne converge pas encore pleinement sur ces questions, un constat s'impose néanmoins : dans de nombreux cas d'usage, le recours à l'edge computing permet de réduire le transport inutile de données, de soulager les réseaux vers les sites lointains, d'améliorer la réactivité des services et de construire une infrastructure numérique plus distribuée, plus robuste et plus efficiente. Il ne s'agit toutefois pas d'opposer l'edge au cloud. Les grands centres de données demeurent indispensables pour l'archivage massif, l'entraînement de très grands modèles ou certaines mutualisations à grande échelle. En revanche, pour une large part des usages quotidiens, la combinaison de petits serveurs edge interconnectés constitue une réponse particulièrement pertinente. Elle permet de rapprocher la capacité de calcul des besoins réels, tout en réservant les infrastructures centrales aux traitements qui nécessitent effectivement d'être centralisés. Ainsi, l'edge computing ne doit pas être envisagé comme une dispersion coûteuse des moyens, mais comme une manière plus intelligente et plus sobre d'organiser la capacité de calcul autour de nous. Un outil pour réaliser des économies en ressources (énergie, eau et métaux) et devenir plus résilients aux aléas causés par le changement climatique. À l'image des circuits courts dans l'alimentation, il invite à repenser l'architecture du numérique en conciliant efficacité, résilience et ancrage territorial.

Monitorer l'impact environnemental des infrastructures numériques

Mesurer l'impact environnemental de la sphère numérique nécessite des outils de monitoring spécialisés, ciblant les slices utilisateurs et étages d'architecture, afin de présenter une donnée métrique à la fois globale, pour les opérateurs, et segmentée, pour leurs clients.
Ce chapitre propose de découvrir la mise en pratique d'indicateurs environnementaux, issus de modèles d'équivalence électrique et carbone, avec des outils modernes et open source, à destination des plateformes numériques centralisées ou distribuées.

Modèles d'équivalence électrique et facteurs d'émission CO2

Les fabricants de serveurs partagent publiquement des modèles d'équivalence électrique corrélant la consommation des ressources matérielles à des KwH. À chaque ressource (stockage, calcul et mémoire) est attribuée une équivalence électrique, et à l'ensemble du serveur un indice d'efficacité énergétique. Ce modèle se présente sous la forme d'une opération à réaliser sur les métriques systèmes, et permet d'obtenir en temps réel un indice de la consommation électrique pour un fabricant et un type de serveur donné.

D'autres modèles simulent les émissions carbone des centres de données en s'appuyant sur le mix énergétique. Ils permettent de mesurer la qualité de l'environnement de calcul au regard du facteur d'émission CO2 de la zone d'exécution.

Il existe ainsi des facteurs d'émissions CO2 nationaux et continentaux, qui facilitent la construction d'une information carbone hiérarchique et géolocalisée, intrinsèque aux lieux de déploiement des services.
En mutualisant ces modèles statiques (consommation électrique des serveurs et facteurs d'émission carbone), il est possible de construire manuellement un premier niveau d'observation de l'impact environnemental d'une infrastructure numérique. Techniquement, ces modèles statiques libèrent les environnements de l'ajout de sondes spécialisées ou de dépendances vers des services web, tout en sollicitant peu les bases de données de monitoring (TSDB).

Transformer les métriques énergétiques en indicateurs environnementaux

Pour atteindre des cas d'usages plus complexes, où les métriques vont être associées ou confondues avec des indicateurs (aussi dits KPIs pour Key Performance Indicators), des outils spécialisés sont nécessaires pour fusionner différentes sources de données en une seule donnée synthétique. Cette action est connue sous le nom de rating (ou valorisation).
Le principe du rating est de transformer un grand nombre d'informations, le plus généralement métriques, en un unique indicateur. Le bénéfice opérationnel est multiple:

1. diminuer le volume de données à traiter entre les différents niveaux d'architecture (les métriques étant à la fois sélectionnées et échantillonnées),
2. augmenter la capacité de stockage en proposant des moteurs de base de données alternatifs, optimisés pour la rétention de séries temporelles,
3. fournir aux opérateurs des indicateurs intuitifs facilitant les prises de décisions (par exemple dans le cadre de la supervision DevOps et FinOps).

Smile édite la solution Open Source, *Rating Operator*, qui réunit ces fonctionnalités sous la forme d'une extension Kubernetes ou bien dans une simple image Docker (appelée alors Rating Container).

Parmi les avantages de la solution, prône un système de règles, dites rating rules, facilitant la coopération entre différents profils métiers. Ces règles sont divisées en trois parties :

- le template,
- les valeurs,
- l'instance

Le template (1) comporte un schéma de requête BDD, dont les variables vont être renseignées par les valeurs (2). Enfin, les instances (3) représentent les règles en cours d'exécution avec leur fréquence de rafraîchissement.

L'avantage de ce découpage est de pouvoir partager la responsabilité entre différents profils métier : les experts DevOps renseigneront les rating rules templates (1), avec les requêtes inhérentes à leur système de base de données TSDB (Prometheus, InfluxDB…), les product owners ou data scientists renseigneront les rating rules values (2), avec les valeurs inhérentes à leur cas d'usage ou contexte d'analyse, et les opérateurs d'infrastructures déploieront les rating rules instances (3) afin de collecter en temps réel les métriques issues du rating.

Monitorer en temps réel l'impact environnemental avec le Rating Operator

Le système de règles du Rating Operator facilite la factorisation de requêtes complexes, qui peuvent alors être découplées à travers leur template en autant de contextes d'observation différents.

Pour reprendre les exemples précédents, avec les modèles d'équivalence énergétique, ces règles permettent de multiplier le nombre et le type de serveurs supportés (pouvant inclure des périphériques customisés), tout comme le nombre de zones géographiques considérées (à titre comparatif ou hiérarchique). Les données résultantes, les indicateurs ou KPIs, peuvent être combinées entre elles, pour produire d'autres règles ou supporter de nouveaux cas d'usages.

Dans le cadre du monitoring de l'impact environnemental, ces règles permettent de construire des requêtes informant les opérateurs sur la conformité des infrastructures de services face à des engagements contractuels, business ou éthiques, et ce aussi bien pour l'intégralité de leurs équipements, que pour une application, un service seul ou bien un tenant client.

Si de nombreux services web fournissent des solutions clé-en-main facilitant la compréhension de l'impact environnemental, les approches synthétiques, maîtrisées par les différents échelons organisationnels, garantissent au long cours la souveraineté et la qualité des informations utilisées à la fois en supervision et en orchestration.

Bien que riche en solutions open source, l'écosystème du monitoring souffre parfois par sa complexité de son manque d'expressivité. Le Rating Operator, édité par Smile, complète ce panorama avec une solution facilitant la transformation des métriques en indicateurs (disponible pour *Kubernetes* et Docker).

Au-delà de l'amélioration des opérations, ajouter au monitoring un aspect énergétique, ouvre au développement de nouveaux axes stratégiques, basés sur l'éthique et la qualité environnementale des infrastructures d'hébergement.

Les points essentiels à retenir

Comprendre l'impact environnemental des infrastructures numériques, c'est se donner les moyens de mieux le réduire. Les outils de monitoring y contribuent : en suivant plus finement les consommations, ils accompagnent les efforts pour un numérique plus efficace et plus sobre. L'Edge, de son côté, optimise les dépenses énergétiques.

En 2026, les centres de données représentent un défi environnemental majeur. Leur conception est de plus en plus maîtrisée, mais leur consommation d'énergie ne cesse de croître, avec des impacts écologiques multiples. Pour y répondre, il faut des solutions durables, à commencer par une transition rapide vers les énergies renouvelables, partout dans le monde.

Chaque donnée créée, chaque usage numérique a un coût : c'est une réalité à garder à l'esprit dans nos actions du quotidien. Nous sommes en effet tous à la fois citoyens de l'environnement et consommateurs de numérique.

Pour aller plus loin, l'Ademe publie l'étude *« Consommation électrique des centres de données : 5 scénarios pour demain »*, qui rappelle que « les décisions prises aujourd'hui influeront durablement sur l'avenir ».

Références

01 - RAPPORTS INSTITUTIONNELS

ADEME I 2022 I *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective.*

European Commission, D. E. I 2022 I *Study on the economic potential of far edge computing in the future smart Internet of Things.*

The Shift Project I 2025 I *IA, données, calcul : quelles infrastructures dans un monde décarboné ?*

02 - ARTICLES SCIENTIFIQUES

P. Loygue, K. A. I 2024 I *Carbon footprint of cloud, edge, and Internet of Edges. Annals of Telecommunications, Volume 80, pages 153–169, (2025).*

P.Arroba, R. B.-M. I 2024 I *Sustainable edge computing: Challenges and future directions. WILEY, DOI: 10.1002/spe.3340.*

S. B. Chougule, B. S. I 2024 I *Exploring Computing Paradigms for Electric Vehicles: From Cloud to Edge Intelligence, Challenges and Future Directions. World Electric Vehicul Journal.*

S. Moreschini, F. P. I 2022 I *Cloud Continuum: The Definition. IEEE Access, vol. 10, pp. 131876-131886.*

Xuesi Chen, e. a. I 2025 I *From Component to System: Rethinking Edge Computing Design Through a Carbon-Aware Lens. ACM SIGEnergy.*

03 - OUVRAGES ET TRAVAUX UNIVERSITAIRES

K. Al Agha, P. L. I 2022 I *Edge Networking - Internet des Edges. ISTE Group*.

Marie-Anne LACROIX, R. G. I 2025 I *PhD Thesis: Study of the environmental impact of edge IoT. Univ Rennes, IRISA, GRANIT Team.*

04 - PAGES WEB

Dave McCrory I 2010 I Récupéré sur https://www.dremio.com/wiki/data-gravity/

Green Communications I 2025 I What is Edge Computing ? Récupéré sur Green Communications: https://www.green-communications.fr/what-is-edge-computing/

Nos contributeurs



VIANNEY D'ABOVILLE
EDF/Atrium Data



MICHEL DERNIS
Atrium Data



PAULINE LOYGUE
Green Communications



JONATHAN RIVALAN
Smile



BASTIEN VILLEBRUN
Systematic Paris-Region

Nos membres & partenaires



Systematic

Paris Region Deep Tech Ecosystem



Novembre 2026