



L'Edge peut se traduire par « bord », mais ce mot n'est pas utilisé dans la littérature pour indiquer la partie du réseau qui se trouve à moins d'une dizaine de kilomètres des utilisateurs.

Alors que le Cloud fournit généralement les capacités d'hébergement et de calcul des applications, l'Edge fait la liaison entre l'utilisateur et les accès vers les réseaux WAN (Wide Area Network).

Jusqu'en 2020, toutes les ressources pour exécuter les programmes des utilisateurs se trouvaient dans le centre du réseau, parfois très loin de l'autre côté de l'Atlantique.

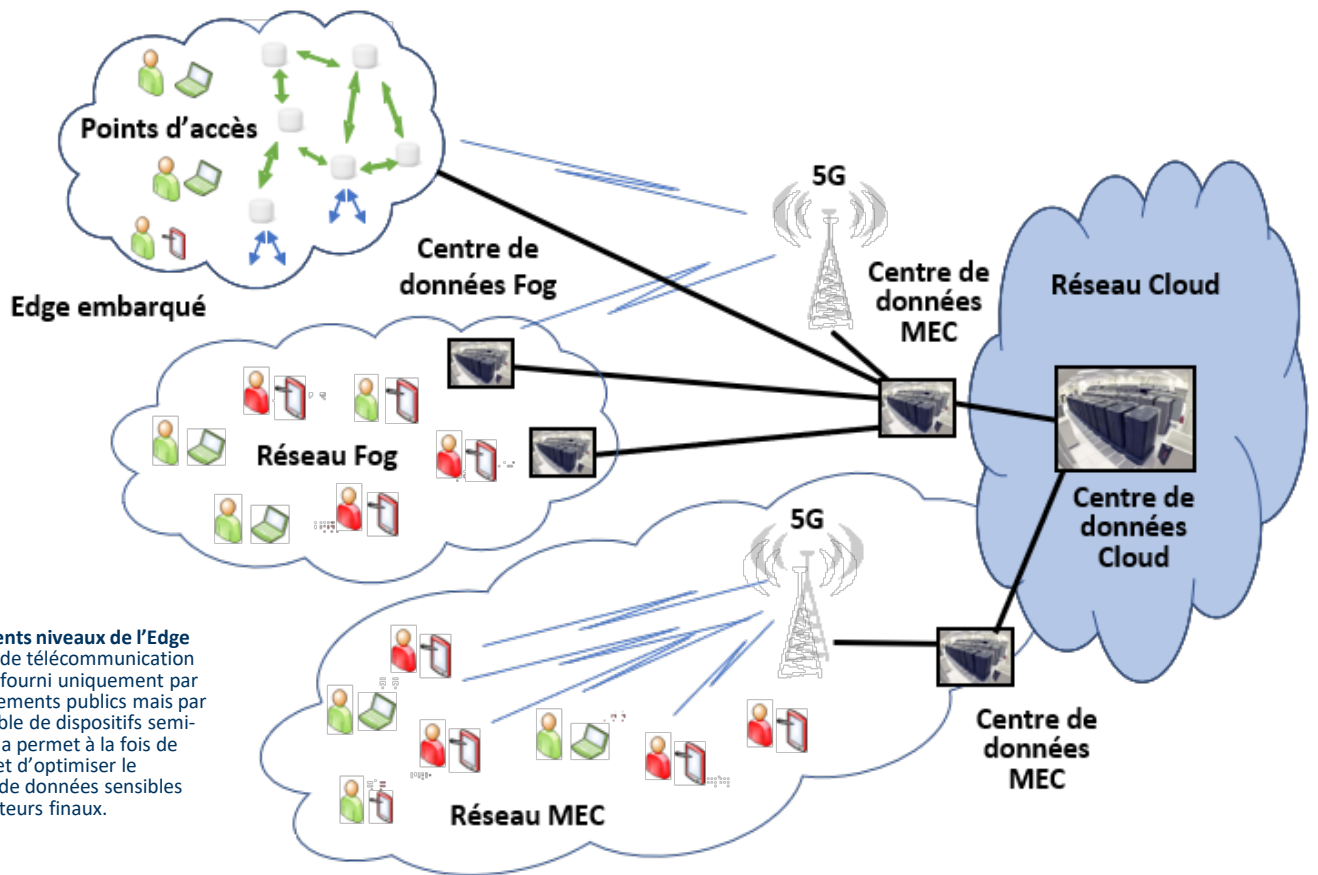
L'idée de l'Edge est de traiter les demandes des utilisateurs au plus près pour ne pas gaspiller de l'énergie à traverser de nombreuses machines intermédiaires, pour réduire drastiquement les temps de réponse et pour garder les données près de l'utilisateur pour les protéger.

## A/ Les 3 déclinaisons différentes d'Edges :

En pratique l'Edge est plus compliqué qu'il n'y paraît puisqu'il existe dans au moins trois déclinaisons différentes : l'Edge embarqué, l'Edge de type Fog et l'Edge des opérateurs de télécommunications.

1. **Les Edges embarqués** relient les clients sur l'extrême périphérie par des nœuds intégrés dans les équipements terminaux ou situés à quelques mètres. Ces nœuds prennent en charge l'ensemble des services nécessaires pour traiter les flux locaux.
2. **Les Edges de type Fog** sont plutôt destinés aux entreprises. Ils remplacent dans un certain sens les réseaux locaux d'entreprise. Leur structure est cependant un peu différente puisque l'objectif est de connecter les personnels de l'entreprise sur un petit centre de données, ou micro-datacenter, situé dans les locaux de la société.
3. **La dernière déclinaison du Edge correspond aux centres de données MEC** (Multi-access Edge Computing). Les Edges de type MEC (Multi-access Edge Computing) proviennent des opérateurs de télécommunications. Ils sont là pour prendre en charge à la fois les équipements 5G et les applications associées.

En fait, les centres de données MEC représentent ce qui aurait dû être révolutionnaire dans la 5G, à savoir prendre en charge la virtualisation des équipements 5G et introduire de nouvelles applications caractérisées par des temps de latence très courts, de l'ordre de la milliseconde. Nous avons illustré l'Edge avec ses différents niveaux à la figure 1.



**Figure 1 :**  
**Les différents niveaux de l'Edge**  
 Le réseau de télécommunication n'est plus fourni uniquement par des équipements publics mais par un ensemble de dispositifs semi-privés. Cela permet à la fois de sécuriser et d'optimiser le transport de données sensibles aux utilisateurs finaux.

Le continuum créé entre le Cloud et les infrastructures de bordure, aussi connu sous les termes de *Cloud-Edge continuum* ou plus récemment de *compute continuum*, se réfère à l'ensemble des centres de données allant de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Le continuum d'Edges se situe de l'infiniment petit jusqu'aux centres de données MEC. Ces centres de données forment des infrastructures numériques, elles embarquent ainsi l'ensemble des composants technologiques constituant la base du service informatique, incluant les services réseaux, IA, cybersécurité, contrôle, applicatifs, etc. En d'autres termes, les Edges deviennent des structures complètes embarquant l'ensemble des services critiques. Avec cette particularité par rapport au Cloud de pouvoir être fixes ou mobiles.

## 1- Les Edges Embarqués :

La structure d'un réseau Edge embarqué provient des réseaux participatifs qui désignent la coopération des utilisateurs à la réalisation de réseaux TCP/IP qui peuvent fonctionner de façon totalement autonome, et capables de continuer à travailler même sans connexion avec le réseau Internet et ses serveurs. De plus, les nœuds peuvent disparaître et d'autres apparaître. Il n'y a donc aucun nœud central dans le réseau puisque celui-ci peut disparaître à tout moment. Les réseaux participatifs sont des réseaux qui utilisent les machines terminales des utilisateurs ou bien des machines dédiées au réseau. L'ensemble des processus et des protocoles sont totalement distribués. Si on y ajoute le terme Internet, cela indique que le réseau participatif utilise les protocoles TCP/IP.

Les Edges embarqués présentent l'avantage d'être fortement protégés des menaces en provenance de l'Internet puisqu'une entreprise peut débrancher son réseau et continuer à travailler en mode fermé sans aucun besoin de connexion. Seuls les services demandant des serveurs externes, comme Twitter ou Facebook, ne peuvent plus s'exécuter, sauf s'il y a un accord pour qu'un serveur interne puisse exécuter localement l'application. De plus, tous les protocoles classiques de l'Internet et les applications doivent s'exécuter d'une façon distribuée. La téléphonie ou la vidéo interne, les applications, le stockage, le calcul, etc. s'exécutent sans aucune connexion externe. En général, les sociétés disposant d'un Edge de type participatif peuvent se connecter à certains moments sur l'extérieur *via* une passerelle et se déconnecter à d'autres moments.

Un autre avantage de ce type de réseau est sa consommation énergétique extrêmement faible. En effet, tout se passant en direct entre clients, nul besoin d'aller chercher une antenne ou un DSLAM et de se connecter sur un serveur qui peut être situé de l'autre côté de la planète pour réaliser la connexion.

## 2- Les Edges de type Fog :

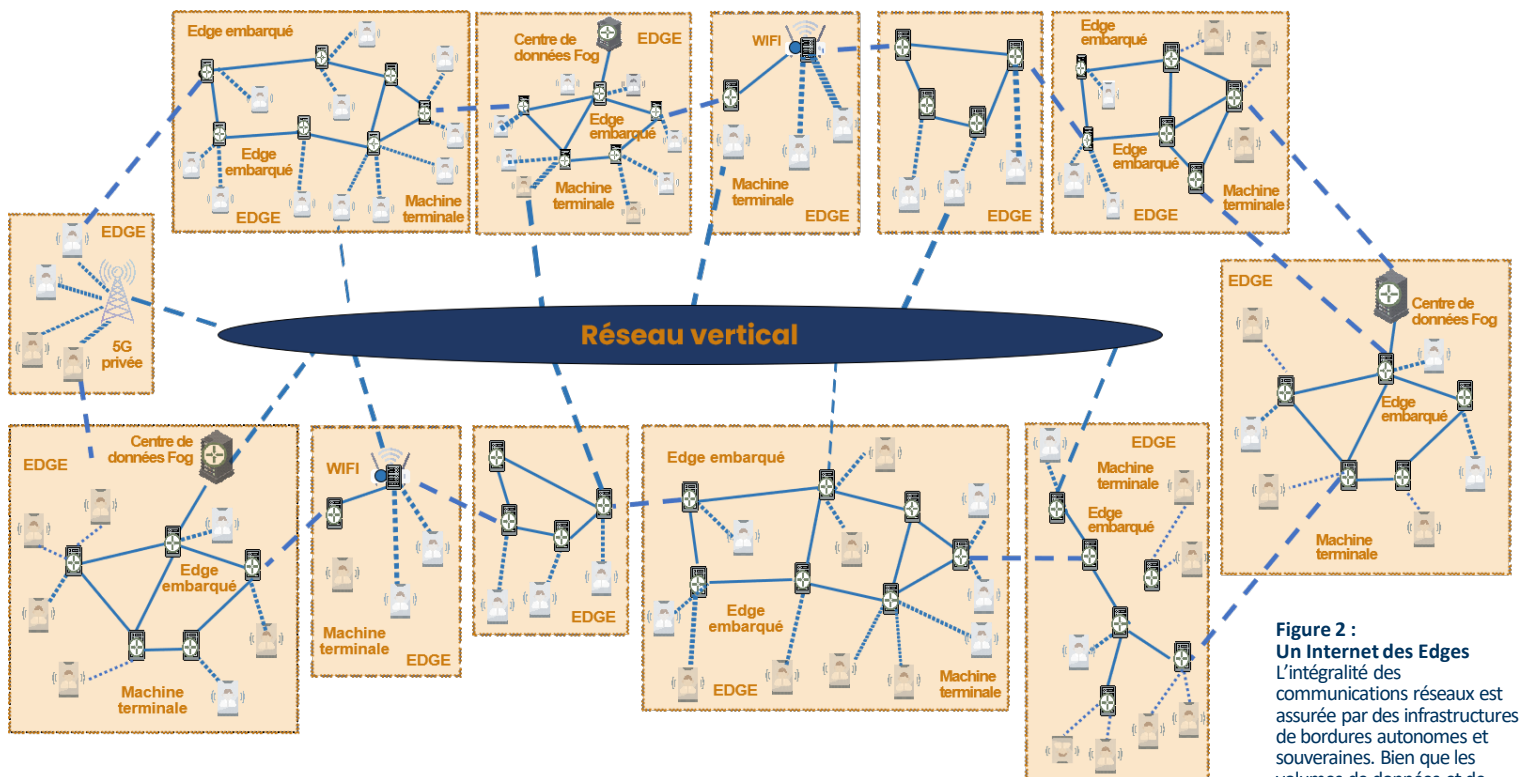
Le mot Fog a été associé à de nombreuses architectures de centres de données sur la périphérie du réseau. Aujourd'hui, le mot Fog est souvent synonyme de centre de données lié à l'entreprise. On emploie le mot de *white box* lorsque ce centre de données est construit avec du matériel open source, c'est-à-dire du matériel dont les spécifications sont publiques et disponibles sur l'Internet. L'Open Compute Project (OCP) est un exemple de projet définissant du matériel open source. Dans le cas de composants électroniques publiés sous licences open source, on parle d'Open hardware.

L'Open hardware est vu comme un pivot important vers des infrastructures customisables, les utilisateurs industriels de solutions Cloud Edge ou Fog, peuvent à travers l'Open hardware définir leurs besoins à des niveaux de conception électroniques très fins comme ceux d'asics, dédiés à des tâches de calcul précises, ou bien à des processeurs généralistes mais adaptés en taille et en jeux d'instructions aux besoins de l'entreprise. Un exemple fort dans la communauté de l'Open hardware est la spécification du Risc-V, processeur basse consommation dont les *blueprints* sont disponibles publiquement, et permettent virtuellement (virtuellement car en pratique complexe à mettre en oeuvre au niveau de la chaîne de compilation et de fonderie) à tout un chacun de concevoir un processeur maison.

## 3- Les Centres de données MEC :

Les centres de données MEC doivent être situés en général à moins d'une dizaine de kilomètres de l'utilisateur pour permettre des temps de latence de l'ordre de la milliseconde. Les clients sont connectés de plus en plus souvent par une antenne 5G mais peuvent également être raccordés sur le MEC par fibre optique. L'avantage de cette solution est de multiplexer un grand nombre de clients sur un centre de données partagé qui par sa puissance de calcul peut assurer une grande sûreté d'exécution.

L'Internet des Edges correspond à une nouvelle vision de l'Internet qui pourrait être adoptée par la 6G. Il s'agit d'interconnecter tous les Edges de confiance pour former un réseau Internet inaccessible de l'extérieur. Il reste encore beaucoup à faire pour gérer les passages d'un Edge de confiance à un autre Edge de confiance par une technique ZTNA (Zero Trust Network Access) accompagnée d'une solution IAM (Identity and Access Management). Une illustration de ce que pourrait être un Internet des Edges est décrit à la figure 2.



**Figure 2 : Un Internet des Edges**  
L'intégralité des communications réseaux est assurée par des infrastructures de bordures autonomes et souveraines. Bien que les volumes de données et de calcul soient plus limités que dans le cadre d'une infrastructure publique, cet Internet offre des propriétés supplémentaires en termes de faible latence et d'isolation de la circulation des données.

## B/ Abordons quelques exemples d'Edges...

On peut citer les réseaux de véhicules intelligents, permis par l'approche V2X pour *vehicle to anything*, qui formeront pour de nombreuses applications à relativement court terme une source de partage simple des ressources (bien que fortement encadrée par les régulateurs). Cette solution permettra aux passagers de mettre en place des jeux temps réel, de se retrouver comme à la maison ou bien au bureau et aux conducteurs de bénéficier d'assistance temps réel lors de la conduite.

Les espaces intelligents forment également un domaine dans lequel le réseau Edge est nécessaire pour réaliser une infrastructure numérique avec des services intelligents et donner la puissance de calcul et de stockage nécessaire pour y implanter des algorithmes d'analyse et d'intelligence artificielle. On commence à voir apparaître des LLM (Large Language Model) spécialisés pour par exemple configurer automatiquement l'Edge en fonction d'évènements internes ou externes. Cette pratique est connue sous le terme d'*Intent based configuration*.

Un autre mouvement qui prend de l'ampleur provient de l'augmentation rapide de la puissance des équipements terminaux par l'intermédiaire de **processeurs reconfigurables ou de NPU (Neural Processing Unit)** dépensant peu d'énergie et embarquables dans les équipements terminaux.

Les plateformes IoT (Internet of Things) forment également un exemple très répandu d'Edge où les capteurs sont connectés directement sur des nœuds embarquant la puissance et l'intelligence nécessaire pour exécuter les applications associées. Il est également possible de faire remonter les requêtes vers les centres de données Fog ou Mec pour un traitement plus complexe demandant plus de puissance ou plus de place pour traiter de grands ensembles de données.

Il faut encore citer **la 5G privée** qui autour des centres de données Fog des entreprises propose une solution pour remplacer le réseau local d'entreprise.

En conclusion, l'utilisation de l'Edge devient primordiale et beaucoup prédisent qu'en 2030 la moitié des traitements des utilisateurs seront effectués sur l'Edge et l'autre moitié sur les gros centres de données qui se trouvent dans les cœurs de réseau. Au centre de cette révolution, l'IA, l'intelligence artificielle, prendra une part conséquente; alors que les solutions vont se perfectionner pour offrir une expérience de plus en plus personnalisée, les données échangées entre les utilisateurs et les différents modèles ou assistants vont devenir de plus en plus sensibles à protéger. Aujourd'hui, cette montée en puissance semble inéluctable et les traitements associés s'effectueront toujours plus près de l'utilisateur et certainement en grande partie dans sa poche en 2030 (ou plus tôt).



**Guy Pujolle**

LIP6 – Sorbonne Université  
Green Communications



**Jonathan Rivalan**

Smile