

Introduction

L'Edge

Internet des Edges, le sous-titre de cet ouvrage, est la formulation en termes simples d'une nouvelle génération de réseaux : la réalisation d'une infrastructure de communications et de services qui se réalise sur le bord du réseau. L'Internet des Edges est une interconnexion de réseaux Edges. Dans les réseaux Edges, il y a trois niveaux de réseaux : les réseaux Skin, les réseaux Fog et les réseaux MEC. Les réseaux Skin relient les clients entre eux sur l'extrême périphérie et les nœuds du réseau qui prennent en charge les services sont à quelques mètres des utilisateurs. Les réseaux 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 situé dans l'entreprise. Les réseaux MEC (Mobile/Multi-access Edge Computing) proviennent des réseaux Edge des opérateurs de télécommunications. Ce sont les réseaux utilisant la 5G qui permettent de relier les clients à un centre de données des opérateurs situé très près d'une antenne 5G. Nous avons représenté un Internet des Edges à la figure 1.

Les réseaux Skin, Fog et MEC peuvent eux-mêmes être des réseaux participatifs ou non. Un réseau participatif se construit en interconnectant des machines électroniques de ses participants qui peuvent être le terminal d'un utilisateur, un boîtier qui se trouve à proximité, un drone, un robot ou un véhicule, etc. Les réseaux participatifs se distinguent des autres types de réseaux par leur aspect totalement distribué. Un réseau non participatif est un réseau où les services sont centralisés dans un Cloud, en général lointain, auquel les clients doivent se connecter pour obtenir un service. Dans les réseaux participatifs, tous les services sont distribués que ce soient des services d'infrastructure ou des services applicatifs. La distance entre l'utilisateur et le centre de données qui héberge le service est comparable à la portée d'une communication Wi-Fi. Les machines qui participent au réseau apportent leurs ressources et hébergent des services qui seront disponibles pour l'ensemble des utilisateurs de ce réseau.

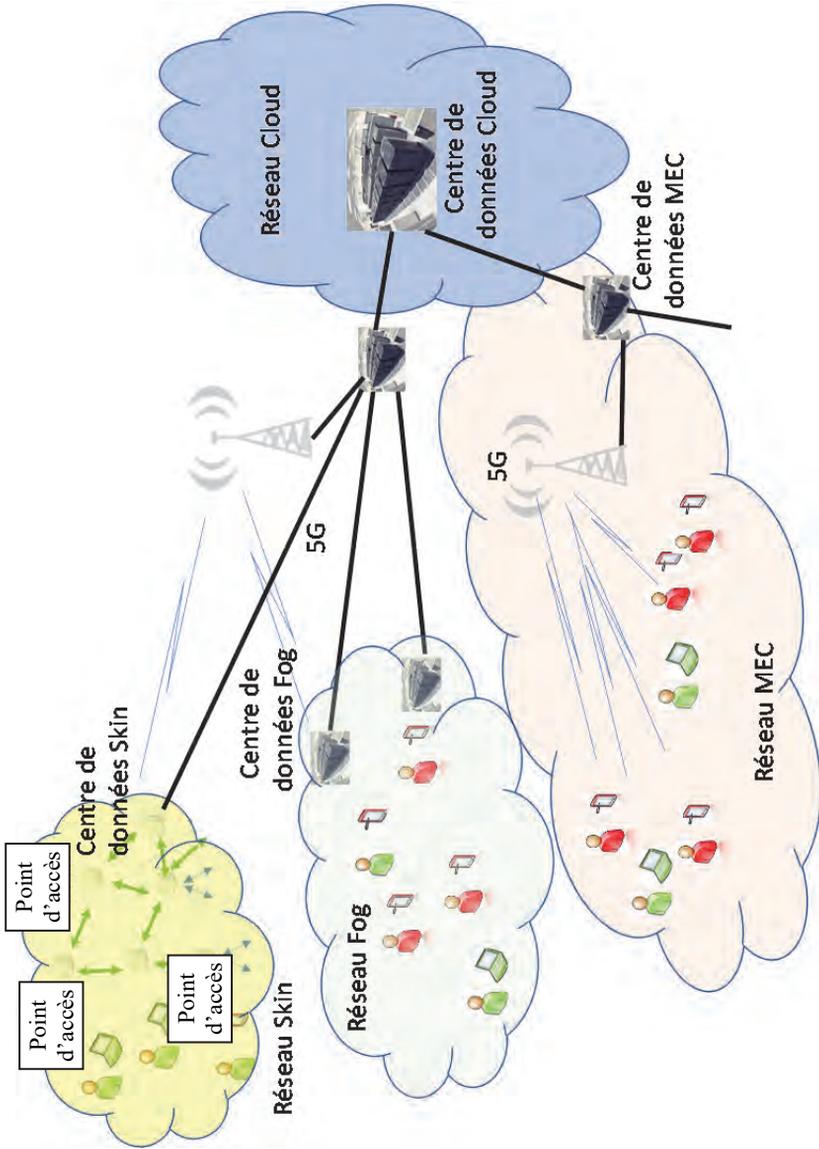


Figure 1. Un Internet des Edges

L'Internet participatif est un réseau participatif utilisant un environnement TCP/IP totalement distribué. C'est un nouveau paradigme regroupant les communications directes autonomes entre nœuds mobiles et l'informatique provenant du concept de l'Edge Computing. L'utilisateur de l'Internet participatif n'est plus un consommateur des ressources de l'environnement mais, au contraire, il participe à la réalisation et à la vie de l'infrastructure numérique de ce nouveau concept de l'Internet. Le réseau est vivant, il se forme et se déforme en fonction de ses participants. Il remplace l'Internet classique tout en utilisant les mêmes protocoles d'une façon distribuée et des centres de données Edge plus ou moins puissants. La compatibilité IP lui permet de se connecter ou se déconnecter de l'Internet sans que son fonctionnement en soit altéré. Bien sûr, la déconnexion peut arrêter certains services qui demandent des serveurs centralisés de l'Internet. En revanche, l'Internet participatif permet la mobilité, l'indépendance, l'autonomie, un déploiement instantané et une forte sécurité. L'Internet participatif s'applique parfaitement aux entreprises pour gérer leur système d'information et leurs applications tout en apportant une sécurité accrue de leur environnement informatique. L'Internet participatif convient très bien aux opérateurs de télécommunications en permettant des extensions immédiates de leur réseau. Ce nouveau concept est également très intéressant pour les intégrateurs en facilitant l'introduction d'une infrastructure numérique mobile chez les clients qui en ont besoin. L'architecture liée à l'Internet participatif est conçue pour réaliser un nouveau monde de mobilité. Elle s'adapte aux réseaux véhiculaires et elle devrait devenir le standard de l'Internet mobile qui ne va pas manquer d'apparaître avec les véhicules connectés. De nombreuses prévisions montrent que les conducteurs vont passer de la conduite à la connexion Internet dès que le véhicule se pilotera de façon autonome. De ce fait, le volume de données transitant par l'Internet provenant des mobiles pourrait atteindre quasiment la même valeur que celui provenant des clients fixes. L'Internet participatif s'adapte également aux réseaux de robots, aux réseaux de drones et à tous les réseaux dans lesquels les humains, les machines ou les objets sont en mouvement. Il convient particulièrement bien aux bulles tactiques et aux espaces intelligents. Ce nouveau paradigme de l'Internet participatif est associé aux technologies *ad hoc* et *mesh* en mode hybride et au traitement des données et des applications dans l'Edge. Il fait intégralement partie de la numérisation des entreprises et il s'intégrera dans les environnements Edge qui comportent deux autres composantes : le MEC (Mobile/Multi-access Edge Computing) et le Fog. Ces deux autres composants sont caractérisés par des centres de données plus puissants et totalement fixes.

La nouvelle génération d'Internet des Edges avec des réseaux participatifs peut être évoquée sous le terme d'ubérisation des télécommunications puisqu'elle permet de réaliser un réseau en n'utilisant que des machines appartenant aux utilisateurs qu'ils soient grand public ou entreprises. Cependant, cette architecture à base de réseaux participatifs peut également être mise en place par les opérateurs de télécommunications par le biais de leurs utilisateurs munis de leur smartphone ou de leur box Internet. Un réseau Internet

des Edges à base de réseaux participatifs peut se créer en composant avec des machines qui intègrent la pile protocolaire TCP/IP et en hébergeant des serveurs pour rendre des services aux clients connectés à ce réseau. Les machines peuvent être des gros serveurs, des petits ordinateurs ou même des smartphones. Toute électronique avec un processeur, de la mémoire et des interfaces réseau est adéquate pour participer à la création d'un réseau participatif. Ce réseau peut s'interconnecter à d'autres réseaux avec des passerelles pour le globaliser. L'interconnexion peut s'effectuer avec d'autres réseaux participatifs, mais également avec des réseaux Internet plus classiques. Dans ce dernier cas, un utilisateur peut aller rechercher sur l'Internet des services centralisés.

Actuellement, l'Internet global fonctionne correctement et satisfait beaucoup de besoins, mais il consomme également de nombreuses ressources par l'éloignement des utilisateurs des centres de données qui possèdent les fonctions et les données nécessaires pour rendre les services demandés. Pour envoyer un message à son voisin, le message doit cheminer sur de longues distances pour atteindre le serveur et revenir dans le voisinage de l'émetteur. Cela engendre aussi la création d'énormes centres de données très énergivores et difficiles à contrôler et à sécuriser. L'idée de déglobaliser Internet permet d'utiliser des ressources à proximité pour rendre un service, à l'instar d'Airbnb ou d'Uber, où n'importe qui possédant une ressource (maison, voiture, etc.) peut l'offrir pour enrichir l'offre d'hébergement ou de transport.

Dans la suite de cet ouvrage, nous allons examiner en profondeur l'Internet des Edges mais également les raisons de son introduction pour atteindre facilement la numérisation des entreprises et du monde industriel. Nous examinerons également les deux autres composantes de l'Edge Computing, le MEC et le Fog, et leur coopération avec le niveau le plus près de l'utilisateur, le niveau Skin, avec un intérêt particulier pour les réseaux participatifs.

La numérisation des entreprises

La numérisation des entreprises et de l'industrie forme la raison principale de l'extension des infrastructures numériques, en particulier au niveau de l'Edge que ce soit grâce aux centres de données MEC, aux centres de données Fog ou à l'Internet participatif qui se situe au niveau le plus près de l'utilisateur.

Nous avons représenté à la figure 2 les différents éléments de cette numérisation allant des réseaux aux applications.

Au niveau réseaux numériques, nous retrouvons les trois grandes composantes que sont la virtualisation apportant les technologies SDN/NFV, la 5G et le Cloud Native. L'Internet participatif fait également partie des réseaux numériques et il peut utiliser les

techniques de virtualisation et s'associer à la 5G. Il peut encore utiliser les solutions proposées par le Cloud Native.

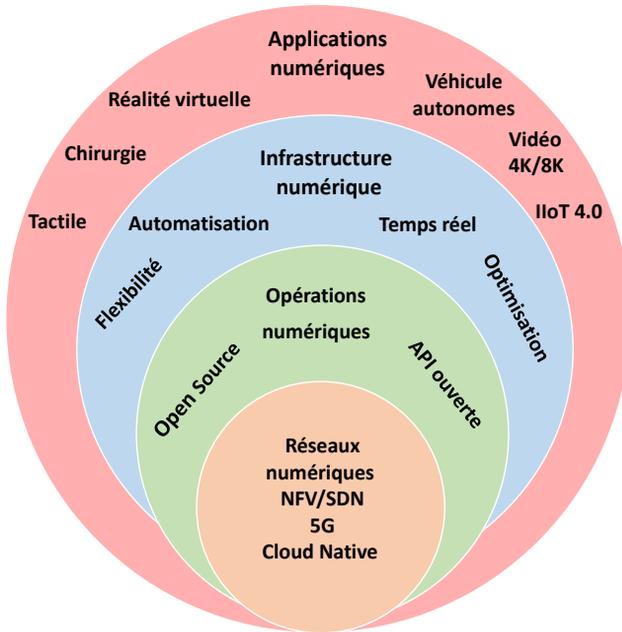


Figure 2. La numérisation des entreprises

Les opérations numériques de plus en plus demandées concernent l'automatisation pour permettre une chute des coûts en ayant des réseaux autonomes capables de prendre en charge automatiquement la configuration, le contrôle et la gestion de l'infrastructure numérique. L'Open Source représente la deuxième voie pour abaisser les coûts de l'infrastructure. Il faut aller vers des interfaces applicatives ouvertes pour que l'interconnexion des modules réseau ou applicatifs puissent s'effectuer facilement avec la possibilité d'une commercialisation de modules propriétaires plus efficaces qui pourraient se substituer aux modules Open Source. On trouve encore au niveau au-dessus de l'expérience numérique les applications temps réel, les applications génériques qui permettent de mettre en place des services de façon simple, les optimisations et la fiabilité. Enfin, au niveau le plus haut, les services numériques que l'on peut attendre de toute l'infrastructure comme la vidéo haute définition, les applications apportant du virtuel comme la réalité augmentée, les applications intelligentes de la ville, du bâtiment ou du domicile, les véhicules autonomes, les services tactiles comme la chirurgie à distance et enfin l'Internet des objets industriels pour réaliser des applications de l'industrie 4.0.

Globalement, on définit trois niveaux dans les nouveaux environnements informatiques : l'infrastructure numérique, les plates-formes et enfin, au niveau le plus haut, les services. La figure 3 décrit l'environnement informatique des entreprises et du monde industriel.

Au niveau de l'infrastructure numérique, il existe deux sous-niveaux : l'infrastructure technique composée de matériels, principalement des centres de données de différentes tailles, des antennes et des câbles que ce soient de la fibre optique ou des câbles métalliques. La deuxième sous-couche correspond à l'infrastructure numérique logicielle qui rassemble toutes les fonctions de l'infrastructure comme les fonctions de routage, de commutation, de *firewall*, de traitement du signal, etc.

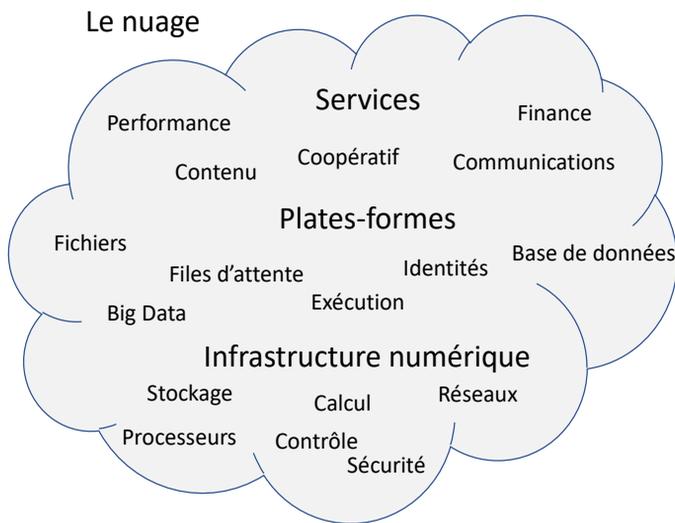


Figure 3. L'environnement informatique d'une entreprise

La couche au-dessus forme la plate-forme sur laquelle tournent les applications. Cette plate-forme est composée de logiciels permettant un développement simple des services. Enfin, l'étage le plus haut, celui des services, contient toutes les machines virtuelles qui vont rendre des services aux utilisateurs de l'infrastructure numérique.

Les différents niveaux de l'Edge

L'Edge Networking est un sous-ensemble de l'Edge Computing qui contient les centres de données situés sur la bordure du réseau. L'Edge Networking s'occupe de l'infrastructure numérique composée des services d'infrastructure et des services applicatifs.

Ces services sont intégrés dans les centres de données qui forment un multi-Cloud distribué. Trois catégories de centres de données composent ce multi-Cloud distribué : le MEC, le Fog et le Skin comme cela est montré à la figure 4.

Le MEC est la version des opérateurs de télécommunications pour virtualiser tous les équipements entre le client et le centre de données : les processus liés à l'antenne, mais aussi les équipements intermédiaires comme les box Internet. Le Cloud-RAN (*Cloud-Radio Access Network*), et son évolution dans le SD-RAN (*Software-Defined-RAN*) pour une gestion dynamique du partage des fonctions de la couche physique, fait partie de cet environnement MEC de l'Edge Networking.

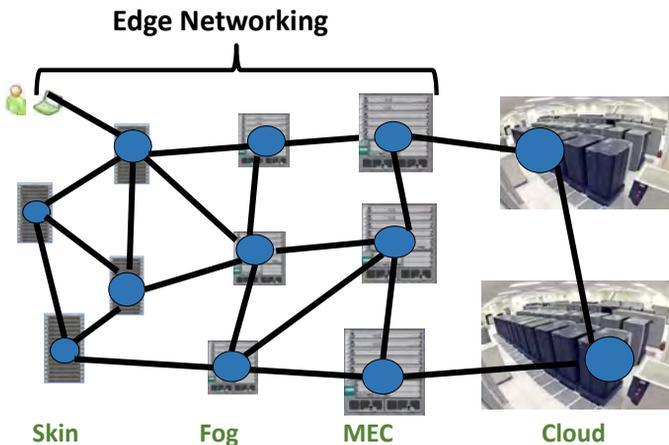


Figure 4. Les différents niveaux de l'Edge Computing et le Cloud Computing

Le Fog représente les centres de données des entreprises qui se positionnent dans leurs locaux et qui permettent de virtualiser les équipements du LAN et de l'accès au WAN et, bien sûr, tous les processus métier de l'entreprise. Il peut être virtualisé sur un centre de données MEC si l'entreprise sous-traite son informatique et ses réseaux à un opérateur. Le Fog permet de réaliser les vCPE (*virtual Customer Premises Equipment*) et de prendre en charge le SD-WAN.

Le Skin est une nouvelle vision regardée de très près par certains grands du Web comme Google qui y voit une opportunité de ne pas laisser la place aux opérateurs et aux entreprises de se développer par eux-mêmes sur l'Edge. En effet, cette solution permettrait l'introduction du marketing de proximité qui est l'avenir de la publicité. Le Skin permet de suivre le client où qu'il soit et avec une très bonne connaissance de son environnement instantané il est facile de lui envoyer une publicité sur mesure. Chaque client

reçoit une publicité différente des autres utilisateurs. Le marketing de proximité représente une solution complètement personnalisée de la publicité.

Ces trois niveaux de réseau Edge vont co-exister dans un multi-Cloud distribué. De plus, certaines entreprises et organisations feront confiance à leur opérateur pour gérer les réseaux et les applications à partir du MEC, d'autres voudront absolument garder la mainmise sur leur informatique et leur réseau et enfin d'autres souhaiteront pouvoir mettre en place des espaces intelligents mobiles comme on en trouve dans la sécurité civile, l'évènementiel ou les chantiers mobiles.

Conclusion

Les deux concepts de centralisation et de distribution alternent au cours du temps, en passant de l'un à l'autre tous les dix ans approximativement. La centralisation est arrivée au début des années 2010 avec le Cloud Networking et le SDN (*Software-Defined Networking*) pour permettre une simplification des contrôles et une intelligence que l'on ne savait faire que centralisée. Les années 2020 devraient voir un retour à la distribution avec une superposition des deux solutions entre les années 2020 et 2025.

Cette distribution devrait revenir avec le paradigme des réseaux participatifs et l'Internet des Edges à base de réseaux participatifs. L'Internet des Edges est un concept qui reprend les propriétés de base de l'Internet telles qu'elles avaient été définies à sa naissance avec une distribution des pouvoirs pour permettre une forte résilience, une bonne sécurité en évitant des points de forte sensibilité et une gestion distribuée.

Dans la suite de cet ouvrage nous examinerons l'état actuel des réseaux Edges provenant des réflexions des années 2010 et arrivant à maturité et le passage vers les réseaux distribués de nouvelle génération qui seront dominants à partir de 2025.

Bibliographie

- Aazam, M., Harras, K.A., Zeadally, S. (2019). Fog Computing for 5G Tactile Industrial Internet of Things: QoE-Aware Resource Allocation Model. *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 15, 3085–3092.
- Ahmed, A., Ahmed, E. (2016). A survey on mobile edge computing. Dans *10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 1–8.
- Ahmed, E., Gani, A., Khan, M.K., Buyya, R., Khan, S.U. (2015). Seamless application execution immobile cloud computing: Motivation, taxonomy, and open challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 52, 154–172.

- Ahvar, E., Orgerie, A., L ebre, A. (2019). Estimating Energy Consumption of Cloud, Fog and Edge Computing Infrastructures. *IEEE Trans. Sustain. Comput.*, 1–12.
- Anttalainen, T. (1999). *Introduction to Telecommunications Network Engineering*. Artech House, Norwood.
- Byrne, P. (2017). *Computer Networking*. Larsen and Keller Education.
- Clark, M.P. (1997). *Networks and Telecommunications: Design and Operation*. Wiley, New York.
- Comer, D.E. (2013). *Internetworking with TCP/IP Volume 1: Principles, Protocols, and Architecture*, 5^e  dition. Prentice Hall, Hoboken.
- Czarnecki, C., Dietze, C. (2017). *Reference Architecture for the Telecommunications Industry: Transformation of Strategy, Organization, Processes, Data, and Applications*. Springer, Berlin.
- Davies, D.W., Barber, D.L.A. (1973). *A Communication Networks for Computers*. Wiley, New York.
- Elkhodr, M., Hassan, Q. (2017). *Networks of the Future: Architectures, Technologies, and Implementations*. Chapman & Hall, London.
- Fajjari, I., Aitsaadi, N., Pi ro, M., Pujolle, G. (2014). A new virtual network static embedding strategy within the Cloud’s private backbone network. *Computer Networks*, 62(7), 69–88.
- Frahim, J., Josyula, V. (2017). *Intercloud: Solving Interoperability and Communication in a Cloud of Clouds*. Cisco Press, Indianapolis.
- Freeman, R. (1999). *Fundamentals of Telecommunications*. Wiley, New York.
- Goralski, W. (2017). *The Illustrated Network, Second Edition: How TCP/IP Works in a Modern Network*. Morgan Kaufmann, Burlington.
- Hanako (2016). *Communications and Computer Networks*. Clanrye International, New York.
- H erold, J.F., Guillotin, O. (2015). *Informatique industrielle et r seaux*. Dunod, Malakoff.
- Kurose, J.F., Ross, K.W. (2016). *Computer Networking*. Addison-Wesley, New York.
- Lohier, S., Pr sent, D. (2016). *R seaux et transmissions – Protocoles, infrastructures et services*. Dunod, Malakoff.
- Macchi, C., Guilbert, J.-F. (1988). *T l informatique*. Dunod, Malakoff.
- Mckenzie, V.D. (2017). *Mobile Networks: Concepts, Applications and Performance Analysis*. Nova Science Pub Inc., Hauppauge/New York.

- Musa, S., Wu, Z. (2017). *Aeronautical Telecommunications Network: Advances, Challenges, and Modeling*. CRC Press, Boca Raton.
- Oliver, N., Oliver, V. (2006). *Computer Networks: Principles, Technologies and Protocols for Network Design*. Wiley, New York.
- Peterson, L., Davie, B.S. (2017). *Computer Networks, Fourth Edition: A Systems Approach*. Morgan Kaufmann, Burlington.
- Pujolle, G. (2019). *Les réseaux*. Eyrolles, Paris.
- Robertazzi, T.G. (2017). *Introduction to Computer Networking*. Springer, Berlin.
- Robinson, D. (2017). *Content Delivery Networks: Fundamentals, Design, and Evolution*. Wiley, New York.
- Rojas-Cessa, R. (2017). *Interconnections for Computer Communications and Packet Networks*. CRC Press, Boca Raton.
- Severance, C.R. (2015). *Introduction to Networking: How the Internet Works*. Create Space Independent Publishing Platform, Scotts Valley.
- Tanenbaum, S. (2010). *Computer Networks*. Prentice Hall, Hoboken.
- Valdar, A. (2017). *Understanding Telecommunications Networks*. IET Press.
- White, C. (2015). *Data Communications and Computer Networks: A Business User's Approach*. Cengage, Boston.