

« Integration de SDN pour l'Optimisation des Performances dans l'Informatique Mobile EdgeIoT» :

ABSTRACT : The article explores the integration of the Internet of Things (IoT) with Mobile Edge Computing using a **Software-Defined Networking (SDN)** approach. The main goal is to enhance network efficiency and management in IoT environments by leveraging SDN capabilities at the edge.

SDN enables centralized network control, allowing for dynamic configuration and programmability of network infrastructure. The study highlights how this approach can improve the performance of IoT applications deployed at the edge while ensuring efficient resource utilization.

In conclusion, adopting SDN within Edge Computing for IoT offers new opportunities for creating smarter and more adaptable networks, capable of meeting growing demands for connectivity and data processing at the network's periphery.

The combination of IoT and Mobile Edge Computing provides significant advantages in terms of data proximity and reduced latency for applications. However, effective resource management remains a major challenge. This article proposes an SDN-oriented approach to improve resource handling in this context. By applying SDN principles, the approach enables more dynamic orchestration of network resources, leading to better adaptation to changing IoT application needs and more efficient resource allocation.

Résumé : L'article explore l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) avec l'informatique mobile Edge, en utilisant une approche orientée Software-Defined Networking (SDN). L'objectif principal est d'améliorer l'efficacité et la gestion des réseaux dans les environnements de l'IoT en exploitant les capacités de SDN au niveau de l'Edge.

SDN permet une gestion centralisée du réseau, facilitant ainsi la configuration dynamique et la programmabilité des infrastructures réseau. L'étude met en lumière comment cette approche peut optimiser les performances des applications IoT déployées à l'Edge, tout en assurant une utilisation efficace des ressources.

En conclusion, l'adoption de SDN dans l'informatique mobile Edge IoT ouvre de nouvelles perspectives pour des réseaux plus intelligents et adaptables, répondant aux exigences croissantes de connectivité et de traitement de données à la

périphérie du réseau. L'Internet des Objets (IoT) combiné à l'Informatique Mobile Edge computing offre des avantages significatifs en termes de proximité des données et de latence réduite pour les applications.

Cependant, la gestion efficace des ressources reste un défi majeur. Dans cet article, nous proposons une approche orientée SDN pour améliorer la gestion des ressources dans ce contexte. En intégrant les principes de SDN, nous parvenons à une orchestration plus dynamique des ressources réseau, permettant une allocation plus efficace des ressources et une meilleure adaptation aux besoins changeants des applications IoT.

Des expériences ont montré que notre approche permet une utilisation plus efficace des ressources tout en garantissant des performances optimales pour les charges de travail IoT variées.

Mots-clés : Informatique mobile Edge, IoT, SDN, gestion des ressources, orchestration réseau, EDGE Computing

Méthodologie

Dans cette étude, nous allons utiliser la méthodologie descriptive qui est une approche qui consistera à procéder par la description de chaque élément faisant objet du sujet ou du thème que nous exploitons et ensuite expliquerons l'importance de ces technologies dans quelques domaines de la vie. Décrire les défis liés à chaque élément ainsi que les perspectives d'avenir et ensuite nous prendrons soin de donner des conclusions partielles sur chaque point dans le but de permettre à nos lecteurs de comprendre le quoi de chaque point illustré.

SECTION 1: Le SDN (Software-Defined Networking)

L'informatique mobile EdgeIoT orientée SDN (Software-Defined Networking) représente une convergence innovante de technologies visant à optimiser les performances des réseaux IoT (Internet des Objets) à travers le Mobile Edge Computing (MEC). Cette approche combine les avantages de SDN, qui centralise et programme le contrôle réseau, avec les capacités de calcul et de stockage décentralisées du MEC, localisées au bord du réseau. Cette synergie promet de répondre efficacement aux exigences croissantes de latence, de bande passante et de sécurité des applications IoT déployées dans des environnements distribués et dynamiques.

1. Comprendre SDN et ses applications dans l'IoT

SDN révolutionne la gestion des réseaux en séparant le plan de contrôle (qui prend des décisions sur le routage et la gestion des ressources) du plan de données (qui transporte effectivement les données). Cette architecture permet une gestion centralisée et programmable du réseau, adaptée aux besoins diversifiés et en constante évolution de l'IoT. En centralisant le contrôle, SDN facilite l'optimisation du trafic, la gestion des politiques de sécurité et l'adaptation aux changements dynamiques dans les conditions du réseau.

2. Définition du SDN

Le SDN est une approche réseau qui sépare le contrôle (qui décide où envoyer le trafic réseau) du plan de données (qui transfère effectivement le trafic). Cette séparation est réalisée en déplaçant le contrôle réseau vers un contrôleur logiciel centralisé, ce qui permet une gestion et une configuration centralisées et programmables des périphériques réseau, tels que les commutateurs et les routeurs.

Le SDN (**Software-Defined Networking**) est une architecture de réseau qui permet la centralisation et la programmation du contrôle du réseau, séparant ainsi le plan de contrôle du plan de données traditionnellement intégré dans les réseaux informatiques.

3. Principe de fonctionnement du SDN

1. **Contrôleur SDN** : Le cœur du SDN est le contrôleur, un logiciel centralisé qui communique avec tous les périphériques réseau et prend des décisions sur la manière dont le trafic doit être acheminé à travers le réseau.

2. **Périphériques de transfert de données** : Ces périphériques, tels que les commutateurs et les routeurs, exécutent les instructions données par le contrôleur pour transférer le trafic selon les règles définies.

3. **Protocole de communication** : Pour permettre la communication entre le contrôleur et les périphériques, le SDN utilise les protocoles suivants :

a) **OpenFlow** : OpenFlow est l'un des premiers protocoles SDN à avoir été largement adopté. Il définit un ensemble de règles de communication entre le contrôleur SDN et les commutateurs réseau. Le contrôleur envoie des instructions aux commutateurs via le protocole OpenFlow, leur indiquant comment router ou transférer les paquets de données. OpenFlow permet une programmabilité granulaire du réseau, ce qui signifie que les administrateurs peuvent définir des politiques de routage et de gestion du trafic avec une grande précision.

b) NETCONF : NETCONF (Network Configuration Protocol) est un protocole de gestion de réseau utilisé pour la configuration et la gestion des équipements réseau. Contrairement à OpenFlow, qui se concentre principalement sur le contrôle du trafic, NETCONF est utilisé pour la configuration et la surveillance des périphériques réseau eux-mêmes. Il permet aux administrateurs de définir et de modifier la configuration des commutateurs, routeurs et autres périphériques réseau de manière centralisée, à l'aide de messages XML structurés.

c) RESTCONF : RESTCONF est une version basée sur REST (Representational State Transfer) du protocole NETCONF. Il permet aux administrateurs de configurer et de gérer des équipements réseau en utilisant des API HTTP RESTful. Contrairement à NETCONF, qui utilise XML pour structurer les données, RESTCONF utilise JSON (JavaScript Object Notation), ce qui le rend plus simple à utiliser pour les développeurs et les intégrations avec d'autres systèmes.

Ces protocoles SDN offrent une flexibilité et une programmabilité accrues dans la

Gestion des réseaux, permettant aux organisations de créer des infrastructures réseau plus dynamiques, évolutives et réactives aux besoins changeants de l'entreprise.

4. Contrôleurs SDN

Les contrôleurs SDN, ou contrôleurs de réseau défini par logiciel, sont des éléments clés de l'architecture SDN. Ils agissent comme des cerveaux du réseau, centralisant la gestion et le contrôle des commutateurs et des routeurs via des interfaces programmables. Ils permettent de séparer le plan de contrôle du plan de données, offrant ainsi une gestion centralisée et une programmabilité accrue du réseau.

a) Fonctions

Les contrôleurs SDN remplissent plusieurs fonctions essentielles, notamment la découverte de la topologie réseau, la gestion des tables de flux, la distribution des règles de routage, la gestion des politiques de sécurité, et la coordination des opérations de réseau. Ils offrent également des API pour permettre aux applications de contrôler le réseau de manière dynamique.

b) Types de contrôleurs (centralisés, décentralisés)

Il existe deux principaux types de contrôleurs SDN : les contrôleurs centralisés et les contrôleurs décentralisés. Les contrôleurs centralisés sont concentrés dans un emplacement unique et offrent une vue globale du réseau. En revanche, les contrôleurs décentralisés répartissent les fonctions de contrôle sur plusieurs nœuds, offrant ainsi une redondance et une tolérance aux pannes accrues.

c) Intégration avec des infrastructures existantes

L'intégration des contrôleurs SDN avec des infrastructures existantes peut être un défi, car elle nécessite souvent des ajustements pour assurer une compatibilité et une interopérabilité optimales. Les contrôleurs SDN doivent être configurés pour fonctionner avec les équipements réseau existants, les protocoles de communication et les systèmes de gestion de réseau déjà en place. Cela peut nécessiter des adaptations et des configurations spécifiques pour garantir une transition fluide vers une architecture SDN.

5. Architectures SDN

Les architectures SDN, ou architectures de réseaux définis par logiciel, décrivent les différentes manières dont les éléments d'un réseau SDN sont organisés et interconnectés. Ces architectures définissent la répartition des fonctions de contrôle, la gestion des flux de données et la coordination des politiques réseau.

a) Architecture à Un Seul Contrôleur

Dans une architecture à un seul contrôleur, l'ensemble du réseau est géré par un seul contrôleur SDN centralisé. Ce contrôleur est responsable de la gestion de l'ensemble du réseau, offrant ainsi une vue centralisée et simplifiant les opérations de gestion et de contrôle. Cependant, cette approche peut poser des problèmes de scalabilité et de disponibilité, car la défaillance du contrôleur unique peut entraîner une interruption du réseau.

b) Architecture à Plusieurs Contrôleurs

Dans une architecture à plusieurs contrôleurs, le réseau est géré par plusieurs Contrôleurs SDN répartis dans différentes parties du réseau. Chaque contrôleur est responsable d'une zone spécifique du réseau, ce qui offre une meilleure redondance et une tolérance aux pannes accrue. Cependant, cela nécessite une coordination efficace entre les contrôleurs pour assurer la cohérence et la stabilité du réseau.

c) Architecture Hiérarchique

Dans une architecture hiérarchique, le réseau est organisé en plusieurs niveaux de Contrôle, chacun étant responsable d'une partie spécifique du réseau. Cette approche divise le réseau en domaines logiques distincts, appelés domaines de contrôle ou domaines de gestion. Chaque domaine est géré de manière autonome par un contrôleur SDN dédié, souvent désigné comme un contrôleur de domaine.

Au sommet de la hiérarchie se trouve un contrôleur de niveau supérieur, également appelé contrôleur de domaine principal ou contrôleur global. Ce contrôleur coordonne les opérations entre les différents domaines et assure une vue globale du réseau. Il prend des décisions stratégiques concernant l'allocation des ressources, la gestion des politiques réseau et la coordination des opérations de maintenance.

Chaque domaine de contrôle peut être subdivisé en sous-domaines, chacun étant géré par un contrôleur de niveau inférieur. Ces sous-domaines peuvent correspondre à des zones géographiques spécifiques, des types de trafic particuliers ou des segments de réseau distincts.

Chaque contrôleur de domaine est responsable de la gestion des périphériques réseau et des flux de données à l'intérieur de son domaine, en appliquant les politiques définies par le contrôleur de niveau supérieur.

6. Couches du SDN

Le SDN est généralement structuré en trois couches principales :

1. **Couche d'application** : Où résident les applications de gestion de réseau et les services réseau qui utilisent les capacités du SDN pour améliorer la gestion, la sécurité, etc.

2. **Couche de contrôle** : Où réside le contrôleur SDN, qui prend des décisions sur la manière dont le trafic doit être géré et dirigé à travers le réseau.

3. **Couche d'infrastructure** : Où résident les périphériques réseau (commutateurs, routeurs, etc.) qui transfèrent physiquement les données en fonction des instructions du contrôleur SDN.

7. Importance du SDN

Le SDN présente plusieurs avantages significatifs :

- ✚ **Flexibilité et agilité** : Permet une gestion centralisée et dynamique du réseau, facilitant l'adaptation aux changements de trafic et aux nouvelles exigences des applications.
- ✚ **Optimisation des performances** : Permet un contrôle précis du trafic réseau, optimisant ainsi l'utilisation des ressources et réduisant la congestion.
- ✚ **Réduction des coûts d'exploitation** : Simplifie la gestion du réseau en centralisant les fonctions de contrôle, ce qui peut réduire les coûts opérationnels et les besoins en matériel.
- ✚ **Centralisation de la gestion** : SDN permet une gestion centralisée du réseau à partir d'un point de contrôle unique. Cela simplifie la configuration, la surveillance et la gestion des politiques réseau à travers l'ensemble de l'infrastructure.
- ✚ **Flexibilité et programmabilité** : Grâce à SDN, les administrateurs peuvent programmer et configurer dynamiquement le réseau via des interfaces logicielles. Cela permet une adaptation rapide aux changements de trafic et aux besoins applicatifs, facilitant ainsi l'innovation et l'évolutivité.
- ✚ **Optimisation des ressources** : SDN permet une utilisation plus efficace des ressources réseau en optimisant la bande passante, en minimisant la latence et en améliorant la qualité de service (QoS) pour les applications critiques.
- ✚ **Automatisation accrue** : L'automatisation est simplifiée grâce à SDN, réduisant ainsi les erreurs humaines et accélérant les déploiements de réseau et les mises à jour.
- ✚ **Sécurité renforcée** : SDN facilite la mise en œuvre de politiques de sécurité cohérentes à travers tout le réseau, renforçant ainsi la protection contre les menaces et simplifiant la gestion des accès.
- ✚ **Évolutivité et agilité** : En séparant le plan de contrôle du plan de données, SDN permet une évolutivité linéaire en ajoutant simplement des commutateurs compatibles. Cela rend le réseau plus agile pour répondre aux besoins croissants de trafic et d'applications.

En résumé, le SDN représente une évolution majeure dans la gestion des réseaux informatiques, offrant une gestion centralisée, flexible et sécurisée du trafic réseau. Cette approche est cruciale pour répondre aux défis croissants de gestion des réseaux dans des environnements de plus en plus complexes et dynamiques.

8. Mobile Edge Computing (MEC) : Améliorer la performance et la latence

Le Mobile Edge Computing étend les capacités de calcul et de stockage au plus près des utilisateurs et des appareils IoT, souvent situés au bord du réseau. Cela réduit la latence en rapprochant le traitement des données des points où elles sont générées et consommées, améliorant ainsi l'expérience utilisateur et la réactivité des applications critiques telles que la réalité augmentée, la conduite autonome et la télémédecine.

9. Avantages de l'intégration de SDN dans le MEC pour l'IoT

1. **Optimisation des ressources** : SDN permet une allocation dynamique et efficace des ressources réseau et de calcul nécessaires pour répondre aux demandes fluctuantes des applications IoT déployées via le MEC.

2. **Sécurité améliorée** : En centralisant la gestion des politiques de sécurité, SDN renforce la protection des données sensibles et des appareils connectés dans les environnements IoT.

3. **Gestion centralisée** : Selon Zhang et al. (2014), SDN permet une gestion agile des réseaux, offrant une vue unifiée et programmable des ressources réseau, ce qui est crucial pour répondre aux défis d'échelle posés par l'IoT (Zhang, Wen, Zhu, & Zhang, 2014).

Une vue unifiée et programmable du réseau facilite la gestion des performances et des politiques, réduisant ainsi la complexité opérationnelle et les coûts associés à la maintenance et à l'optimisation des réseaux IoT déployés au bord du réseau.

MEC : Optimisation des performances et de la latence

Le Mobile Edge Computing (MEC) déplace les capacités de calcul et de stockage vers les bordures du réseau, plus proches des utilisateurs finaux. Cela réduit la latence et améliore les performances des applications critiques telles que la réalité augmentée et la conduite autonome. SDN facilite cette transition en permettant une allocation dynamique des ressources réseau nécessaires pour soutenir les applications MEC à travers le réseau distribué. Dans leur étude, Kang, Hu et Huang (2017) examinent les architectures de réseau optimisées par SDN pour le MEC, soulignant l'importance de la gestion efficace des ressources réseau dans les environnements de calcul de périphérie (Kang, Hu, & Huang, 2017).

Section.2 : Edge Computing

Le Edge Computing est une approche de traitement des données qui consiste à effectuer le traitement et l'analyse des données aussi près que possible de leur source, c'est-à-dire à la périphérie (ou "edge") du réseau, plutôt que de les transférer vers des centres de données (Data Center) distants ou vers le cloud pour traitement.

Cette technologie vise à **minorer(réduire)les délais de latence**, à **améliorer la bande passante**, à **renforcer la sécurité et à permettre une prise de décision** plus rapide en déplaçant le traitement des données là où elles sont générées, souvent au niveau des appareils eux-mêmes ou à proximité. Le Edge Computing trouve des applications dans divers domaines, tels que l'Internet des objets (IoT), les véhicules autonomes, les villes intelligentes, la santé connectée, les jeux en ligne et bien d'autres, où des données doivent être traitées rapidement et efficacement.

- L'Edge Computing consiste à traiter les données près de leur source, c'est-à-dire au niveau de l'« edge » ou du périphérique, plutôt que de les transmettre à un centre de données central pour traitement. Cela réduit la latence et la bande passante nécessaire pour les applications en temps réel.

Cette technologie émergente offre de nombreux avantages, notamment une réduction de la latence, une bande passante réseau optimisée, une meilleure sécurité des données et une disponibilité accrue des services. Nous explorerons en détail les concepts, les principes fondamentaux du Edge Computing, y compris son architecture, ses composants clés et les technologies sous-jacentes qui le rendent possible. Nous discuterons également sur des différences et /ou le rapport entre le Edge Computing et le Cloud Computing, Edge Computing et IOT, les réseaux 6G et le Edge Computing ainsi que leur impact dans la vie d'aujourd'hui et celle d'avenir, ses applications, ses avantages et ses défis.

Le fonctionnement de la technologie Edge Computing repose sur la décentralisation du traitement des données, en rapprochant les capacités de calcul des sources de données elles-mêmes. Cela fonctionne généralement sous les concepts suivants :

1. **Collecte des données** : Les données sont générées par des capteurs, des appareils IoT (Internet des objets), des équipements industriels, des véhicules connectés, ou d'autres sources. Ces données peuvent être de différents types, allant des données environnementales aux données de suivi des performances des équipements.

2. **Traitement local initial** : Plutôt que d'envoyer immédiatement toutes les données à un centre de données centralisé (comme dans le **Cloud Computing** traditionnel), une partie du traitement initial est effectuée localement, au niveau du périphérique ou à proximité. Cela peut inclure des tâches telles que la **filtration des données**, la **compression**, la **normalisation** ou même des **analyses préliminaires pour identifier des tendances ou des anomalies**.

3. **Analyse et traitement avancés** : Après le traitement initial, les données peuvent être envoyées vers des serveurs Edge (situés dans un **datacenter**¹ plus proche du lieu de génération des données) pour un traitement plus avancé. Ce traitement peut impliquer des analyses plus approfondies, des algorithmes d'apprentissage automatique (**Machine Learning**)² ou d'autres techniques d'analyse de données pour extraire des informations significatives.

¹Un data center, ou centre de données, est un espace dans lequel sont concentrés les équipements permettant de faire tourner des systèmes d'information — routeurs, serveurs, baies de stockage, ordinateurs centraux, etc[<https://www.numerama.com/tech/>]

²Une Machine Learning est un système informatique capable d'apprendre à partir de données et de généraliser des connaissances pour effectuer des tâches ou prendre des décisions sans programmation explicite pour chaque situation rencontrée.

4. Prise de décision locale ou remontée des résultats : En fonction des besoins de l'application et de la criticité des décisions à prendre, les résultats de l'analyse peuvent être utilisés localement pour déclencher des actions immédiates, par exemple ajuster les paramètres d'un équipement en temps réel en tenant compte du conditionnement physique du milieu. Alternativement, les résultats peuvent être renvoyés vers un système centralisé (par exemple, un Cloud) pour des actions ultérieures ou pour une analyse plus approfondie.

5. Automatisation et orchestration

L'edge computing permet également d'automatiser et d'orchestrer les applications afin de rationaliser le déploiement de nouveaux services et d'accélérer les délais de mise sur le marché. Ces capacités sont inestimables sur le marché hautement concurrentiel d'aujourd'hui.

6. Intégration avec le Cloud : Le Edge Computing ne remplace pas nécessairement le Cloud, mais il le complète. Les données et les résultats peuvent être envoyés vers le Cloud pour un stockage à long terme, une analyse historique, une intégration avec d'autres systèmes, ou d'autres tâches qui nécessitent des ressources informatiques plus importantes ou une vision globale des données. Mais le Transfert **est sélectif** : « Seules les données agrégées ou les résultats de traitement pertinents sont transférés vers le centre de données central ou le cloud. Cela réduit la bande passante nécessaire pour les transferts de données ».

Edge computing, IOT, Cloud Computing et les Réseaux 6G quelle relation ? En effet, L'EDGE computing est la couche intermédiaire entre les Devices (Matériels) et le cloud Computing alors que les réseaux 6G constituent les moyens de transport à grande vitesse qui serait utilisé pour le déplacement des données comme on peut le constater sur la figure ci-dessous :

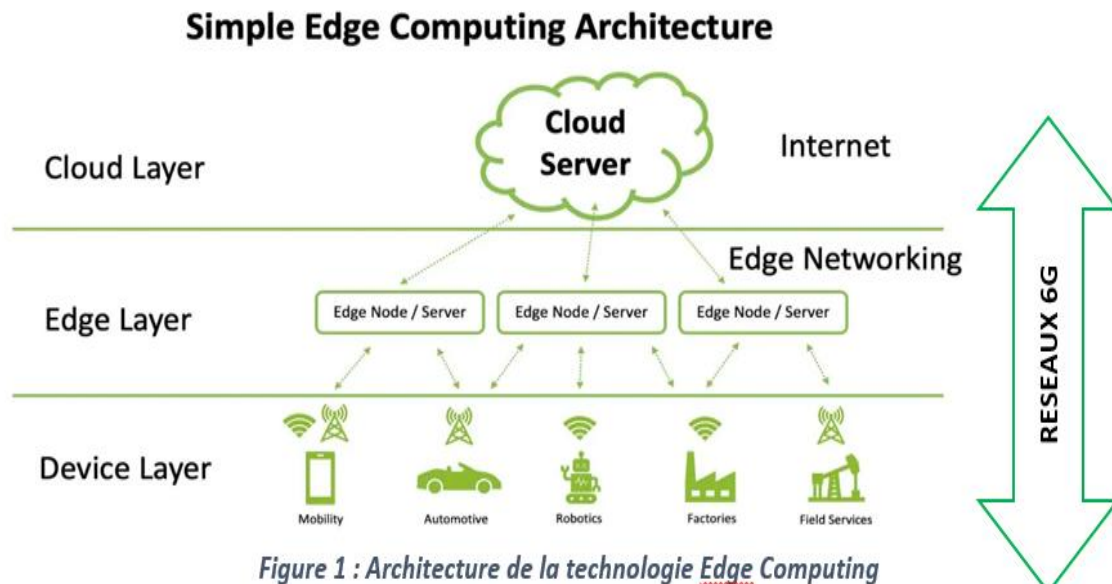


Figure 1 : Architecture de la technologie Edge Computing

1. Couche (Layer) Cloud :

- **Fondement :** La couche cloud est basée sur la fourniture de ressources informatiques à la demande via Internet. Cela inclut le stockage de données, la puissance de calcul et divers services et applications. Le cloud computing permet aux entreprises et aux individus d'accéder à ces ressources sans avoir à gérer l'infrastructure sous-jacente.

- **Fonctionnalités clés :** Évolutivité, flexibilité, partage de ressources, accès à distance, paiement à l'utilisation.

- **Utilisation typique :** Stockage de données à grande échelle, traitement de données volumineuses, déploiement d'applications et de services web.

2. Couche (Layer) Device (Dispositif) :

- **Fondement :** La couche dispositif comprend tous les appareils physiques, tels que les capteurs, les smartphones, les objets connectés, robots, panneaux de signalisation intelligents, etc., qui collectent des données et interagissent avec l'environnement.

- **Fonctionnalités clés** : Collecte de données, capteurs et actionneurs, traitement de base, communication avec d'autres dispositifs ou systèmes.

- Utilisation typique : Capteurs environnementaux, dispositifs portables, gadgets domestiques intelligents.

3. Couche(Layer) Edge (Bord) :

- **Fondement** : La couche edge est située près du lieu où les données sont produites (par opposition au cloud, qui est généralement situé à distance). Elle consiste en des serveurs ou des dispositifs de traitement local qui peuvent pré-traiter ou analyser les données avant de les envoyer au cloud.

- **Fonctionnalités clés** : Traitement en temps réel, réduction de la latence, filtrage des données, pré-traitement local, prise de décision décentralisée.

- Utilisation typique : Analyse en temps réel, traitement de données sensibles à la latence, optimisation de la bande passante, réduction des coûts de transmission de données.

4. Réseaux 6G :

- **Fondement** : Les réseaux 6G sont la prochaine génération de réseaux de communication mobiles, offrant des vitesses de transmission extrêmement élevées, une latence ultra-faible et une connectivité massive pour répondre aux besoins des applications émergentes telles que l'IoT, la réalité virtuelle/augmentée et le cloud computing.

- **Fonctionnalités clés** : Haut débit, faible latence, connectivité massive, efficacité énergétique, sécurité améliorée.

- **Utilisation typique** : Communication à grande vitesse et à faible latence entre les appareils, prise en charge des applications gourmandes en données et en temps réel, déploiement de l'IoT à grande échelle.

Voyons maintenant comment les concepts de Edge Computing, l'Internet des Objets (IoT) et le Cloud Computing pourraient être liés aux réseaux 6G de manière symétrique :

1. Edge Computing et Réseaux 6G :

- Le Edge Computing et les réseaux 6G peuvent travailler en synergie pour fournir un traitement des données ultra-rapide et une faible latence.

- Les capacités de traitement local du Edge Computing peuvent être complétées par les performances améliorées des réseaux 6G, permettant ainsi de fournir des services en temps réel encore plus efficaces.

2. Internet des Objets (IoT) et Réseaux 6G :

- Les réseaux 6G pourraient prendre en charge une connectivité encore plus étendue et plus fiable pour l'IoT, permettant ainsi de connecter un nombre encore plus important d'appareils.

- Les performances accrues des réseaux 6G pourraient permettre une communication bidirectionnelle plus rapide et plus efficace entre les appareils IoT et les systèmes de traitement des données.

3. Cloud Computing et Réseaux 6G:

- Les réseaux 6G pourraient étendre la portée et l'accessibilité du Cloud Computing en offrant des vitesses de transmission de données plus élevées et une connectivité plus stable.

- Les applications de Cloud Computing pourraient bénéficier des performances améliorées des réseaux 6G pour transférer rapidement des données entre les périphériques Edge et les centres de données cloud.

Dans l'ensemble, les réseaux 6G pourraient jouer un rôle crucial dans l'amélioration de la connectivité, de la vitesse et de la fiabilité des systèmes basés sur l'EdgeComputing, l'IoT et le Cloud Computing, en facilitant une communication plus rapide et plus efficace entre les périphériques, les services cloud et les centres de données.

Ensemble, ces couches forment une infrastructure informatique distribuée qui permet la collecte, le traitement et l'analyse des données à partir de dispositifs distribués dans le monde entier, en exploitant les avantages de chaque couche pour répondre aux besoins spécifiques des applications et des services modernes qui bouleverseront le monde de demain du numérique.

Composants de l'edgecomputing

L'edgecomputing comprend différents composants qui fonctionnent ensemble pour traiter les données en périphérie. Ces éléments sont les suivants :

- **Passerelles** : Les passerelles sont utilisées pour gérer les données et connecter les appareils aux services en cloud. Elles constituent l'interface par laquelle les utilisateurs peuvent interagir avec les nœuds périphériques.

La passerelle Edge est une instance de calcul implantée à la transition entre deux réseaux. Dans des environnements IoT, les passerelles Edge sont utilisées comme nœuds entre l'Internet des objets et le réseau central.

On a aussi de puissants routeurs, capables de supporter de fortes puissances de calcul pour assurer le traitement des données de l'IoT. Pour ce faire, les passerelles Edge disposent de diverses interfaces permettant de transférer les données soit par câble, soit par radio, et de standards de communication, comme l'Ethernet, le Wifi, le Bluetooth, la téléphonie 3G, LTE, Zigbee, Z-Wave, CAN-Bus, Modbus, BACnet ou SCADA.

Nœuds de périphérie : Il s'agit de dispositifs informatiques tels que des ordinateurs, des routeurs et des dispositifs IoT connectés à la passerelle. Ils sont chargés de collecter les données et de les envoyer à la passerelle.

Services en cloud : Les services en cloud stockent et analysent les données reçues des nœuds périphériques. Ces services en cloud peuvent inclure des bases de données, des outils d'analyse ou des algorithmes de Machine Learning.

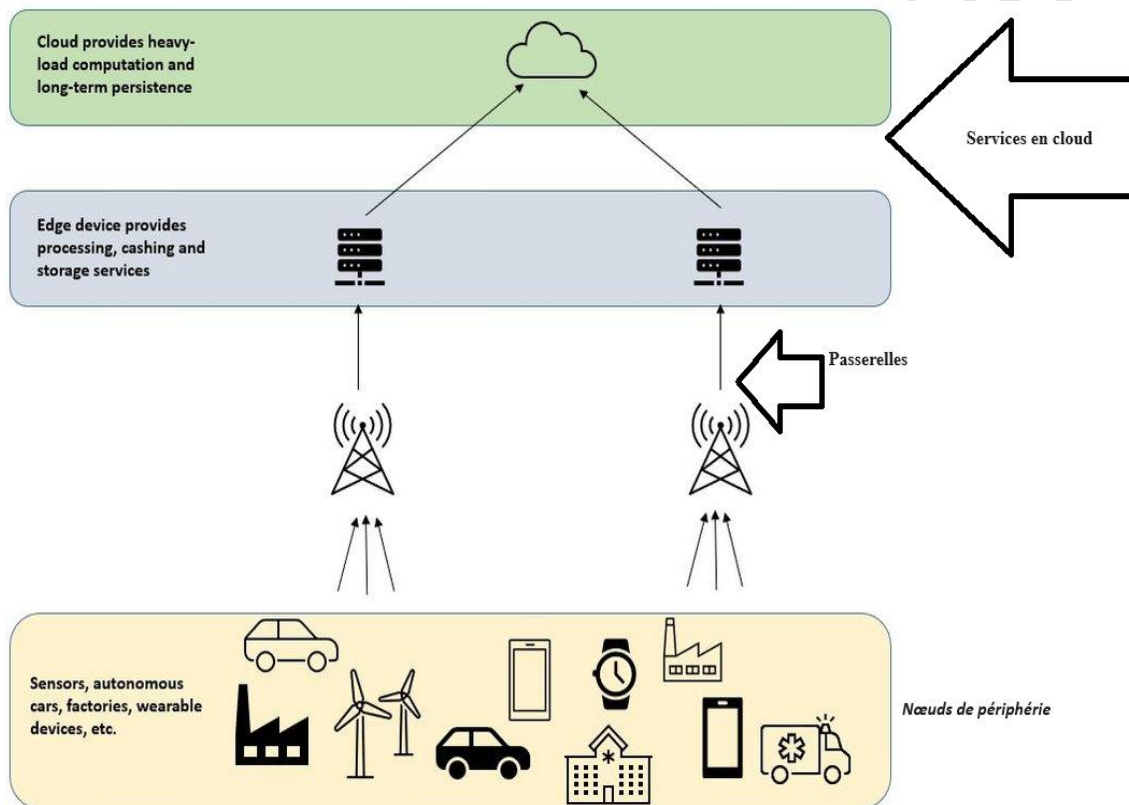


Figure 1: Composants de l'edge computing

Section 3. Applications du Edge Computing et les perspectives d'avenir

1. Avantages du Edge Computing, IOT et les réseaux 6G et perspectives d'avenir

Les avantages offerts par ces technologies par rapport aux approches traditionnelles de traitement des données centralisé, notamment la réduction de la latence, l'amélioration de la bande passante, la confidentialité et la sécurité accrues, ainsi que la résilience et la disponibilité améliorées. Grâce à cela beaucoup de domaines de la vie professionnels ont été contraints de s'adapter à ces métamorphoses technologiques.

Les technologies Edge Computing, IOT et les réseaux 6G ont un impact significatif dans les domaines de la médecine et des sciences, offrant de nouvelles opportunités pour améliorer les soins de santé, la recherche médicale, transport, environnement, logistique et tant d'autre activités scientifiques.

L'intégration du EdgeComputing, des IoT (Internet des Objets) et des réseaux 6G offre un potentiel énorme pour transformer le domaine de la médecine. Ils ont joué un rôle prépondérant dans quelques-uns des principaux aspects de cet impact :

A) En médecine

1. Télémédecine améliorée (soins de santé à distance)

Le Edge Computing permet la mise en place de solutions de télémédecine plus efficaces en offrant un traitement local des données médicales, ce qui réduit la latence et améliore la qualité de service pour les consultations à distance. Les dispositifs médicaux connectés pourraient envoyer les données directement aux infrastructures de Edge Computing locales pour un traitement en temps réel, permettant aux professionnels de la santé d'obtenir des informations précieuses plus rapidement.

- Les dispositifs IoT connectés aux patients, tels que les moniteurs de santé portables et les capteurs biométriques, peuvent collecter en continu des données sur la santé des patients, comme la pression artérielle, le rythme cardiaque, la glycémie, etc.

- Le Edge Computing peut être utilisé pour traiter ces données localement en temps réel, ce qui permet un suivi médical continu et une réponse rapide aux changements de l'état de santé.

- Les réseaux 6G offriront donc des débits de données ultra-rapides et une faible latence, garantissant une communication en temps réel entre les patients et les professionnels de la santé, même à distance.

2. Diagnostic médical avancé :

- Les dispositifs d'imagerie médicale, tels que les scanners IRM et CT, pourront générer de grandes quantités de données. Le Edge Computing peut être utilisé pour traiter ces données localement, réduisant ainsi la latence et évitant le transfert massif de données vers des serveurs distants.

Les capteurs portables et les dispositifs médicaux IoT une fois implémenté dans un hôpital peuvent bénéficier du Edge Computing en effectuant un traitement préliminaire des données localement, avant de transmettre uniquement les informations pertinentes aux systèmes centraux. Cela permet une surveillance médicale continue et en temps réel des patients, facilitant le diagnostic précoce des conditions médicales et la gestion des maladies chroniques

- Les algorithmes d'IA intégrés au Edge Computing peuvent aider à analyser les images médicales en temps réel pour un diagnostic plus rapide et plus précis.

- Les réseaux 6G permettront des transferts de données ultra-rapides, permettant aux professionnels de la santé de partager des images et des informations de diagnostic en temps réel, même lorsqu'ils sont à distance.

3. Chirurgie assistée par ordinateur :

- En utilisant des dispositifs IoT et des capteurs chirurgicaux connectés, les chirurgiens pourraient avoir un accès en temps réel aux données physiologiques des patients pendant les interventions chirurgicales.

- Le Edge Computing peut fournir une puissance de calcul locale pour traiter ces données en temps réel, permettant aux chirurgiens d'effectuer des ajustements immédiats pendant la chirurgie.

- Les réseaux 6G garantiront une connectivité ultra-fiable et à faible latence, garantissant une communication fluide entre les dispositifs chirurgicaux et les systèmes de support à distance.

En combinant le Edge Computing, les IoT et les réseaux 6G, le domaine de la médecine peut bénéficier d'une surveillance continue des patients, de diagnostics plus rapides et précis, et d'une chirurgie plus sûre et plus efficace, même dans des environnements où les ressources médicales sont limitées. Ces technologies ont le potentiel de transformer radicalement les soins de santé, en offrant des solutions innovantes pour améliorer les résultats des patients et l'efficacité des prestataires de soins de santé.

4. Recherche médicale et développement de médicaments

Dans le domaine de la recherche médicale, le Edge Computing permet une analyse rapide des données massives générées par le séquençage du génome, la simulation moléculaire, ou l'imagerie médicale. En distribuant les charges de travail de calcul sur des infrastructures de Edge Computing locales, les chercheurs peuvent accélérer le processus de découverte de médicaments et d'identification de traitements personnalisés.

4. Analyse d'imagerie médicale

Le Edge Computing offre la possibilité d'effectuer une analyse d'imagerie médicale en temps réel, en particulier dans les situations d'urgence telles que les accidents vasculaires cérébraux (AVC) ou les traumatismes. Les images médicales peuvent être traitées localement pour détecter rapidement les anomalies et aider les médecins à prendre des décisions éclairées concernant le traitement des patients.

5. Sécurité des données et confidentialité

En traitant les données médicales localement au niveau du Edge, les informations sensibles peuvent être mieux protégées, car moins de données sensibles sont transmises sur les réseaux, réduisant ainsi les risques de violation de la confidentialité et de la sécurité des données.

En résumé, le Edge Computing révolutionne la manière dont les soins de santé sont dispensés et la recherche médicale est menée. En rapprochant le traitement des données des sources où elles sont générées, il offre des avantages significatifs en termes de réactivité, de précision, de sécurité et de confidentialité des données, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles avancées dans les soins de santé et les sciences.

B) Gestion de l'environnement & dans la rudologie

Le EDGE computing, combiné à l'IoT (Internet des Objets), offre une solution puissante pour améliorer la gestion des déchets et l'environnement de plusieurs façons :

1. Surveillance en temps réel :

- Les capteurs IoT peuvent être déployés sur les bennes à ordures, les conteneurs de recyclage, les stations de traitement des eaux usées, etc., pour surveiller en temps réel divers paramètres tels que le niveau de remplissage, la température, la pression, la qualité de l'eau, etc.

- Le EDGE computing permettra de faire le traitement local des données collectées par ces capteurs, ce qui permet une surveillance en temps réel des conditions environnementales. Cela permet une détection rapide des incidents tels que les déversements, les fuites, ou les niveaux de pollution anormaux.

2. Optimisation des opérations :

- En analysant les données collectées par les capteurs IoT, les systèmes EDGE peuvent optimiser les opérations de collecte des déchets. Par exemple, en identifiant les bennes à ordures qui nécessitent une vidange immédiate, les itinéraires de collecte peuvent être optimisés pour réduire les trajets inutiles et minimiser la consommation de carburant.

- De même, dans les installations de traitement des déchets, l'analyse en temps réel des données peut aider à optimiser les processus de tri, de recyclage et de traitement des déchets, ce qui réduit les coûts opérationnels et l'empreinte environnementale.

3. Gestion proactive des incidents :

- Les données en temps réel fournies par les capteurs IoT permettent une détection précoce des incidents environnementaux tels que les déversements de produits chimiques ou les niveaux élevés de pollution. Les alertes générées par ces systèmes permettent une intervention rapide pour minimiser les dommages environnementaux et les risques pour la santé publique.

4. Réduction des coûts de connectivité :

- En effectuant une partie du traitement des données sur site, le EDGE computing réduit la dépendance à l'égard des connexions Internet haut débit, ce qui permet des économies significatives en termes de coûts de connectivité. Cela est particulièrement avantageux dans les zones reculées où la connectivité Internet peut être limitée ou coûteuse.

En combinant le EDGE computing avec l'IoT, il est possible de créer des systèmes de gestion des déchets et de l'environnement plus intelligents et plus efficaces. Ces systèmes permettent une surveillance en temps réel, une optimisation des opérations, une gestion proactive des incidents et une réduction des coûts, contribuant ainsi à améliorer la durabilité environnementale et à réduire les impacts négatifs sur la santé publique.

c)Gestion de la circulation routière

L'Intégration des trois technologies émergentes est une décision très ingénieuse de la part de décideurs des villes pour bien optimiser la gestion de la circulation routière en vue de créer des routes et villes intelligentes. Comme le souligne **mohammedLaroui** : « Systèmes de ville intelligente : Une ville intelligente est une zone urbaine composée de secteurs connectés qui collaborent pour fournir des services aux utilisateurs grâce à l'analyse des données collectées à partir de différentes sources. Les villes intelligentes visent à réduire la congestion routière et la consommation d'énergie, ce qui contribue à améliorer la qualité de vie »³.

Etant donné qu'aujourd'hui l'Internet des objets (IoT) a gagné le secteur automobile. Après avoir touché l'info-divertissement, il s'est étendu à la fusion de capteurs, à la géolocalisation ainsi qu'aux communications cellulaires et à

³ **Mohammed Laroui**, Distributed edge computing for enhanced IoT devices and new generation network efficiency, HAL Open Sciences, Alger, 2023,, P.38

courte portée qui sont au cœur des nouvelles architectures V2X qui vont améliorer l'expérience de conduite et accélérer le développement des véhicules autonomes. À un niveau élémentaire, le V2X (pour Véhicule à Véhicule, V2V, et Véhicule à Infrastructures routières V2I) permet aux automobiles de communiquer des informations critiques entre l'infrastructure et d'autres véhicules pour éviter les accidents aux intersections⁴. D'où on parle souvent des véhicules intelligents⁵ ou véhicule connecté⁶.

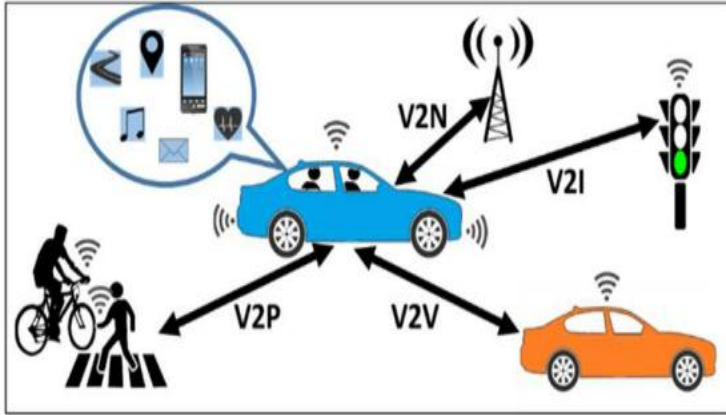


Figure 2: Véhicule Connecté

L'adoption des technologies Edge Computing, l'Internet des Objets (IoT) et les réseaux 6G peuvent jouer un rôle crucial dans le monde de demain en ce qui concerne l'amélioration de la gestion de la circulation routière de plusieurs manières notamment :

1. **Collecte de données en temps réel** : Les capteurs IoT installés sur les routes, les feux de signalisation, les véhicules eux-mêmes et d'autres infrastructures peuvent collecter une multitude de données en temps réel sur le trafic routier, y compris la vitesse, la densité du trafic, les conditions météorologiques, etc.
2. **Traitement local des données** : L'usage de Edge Computing permettra de traiter ces données localement, c'est-à-dire là où elles sont générées, plutôt que de les envoyer à des centres de données distants. Cela réduit la latence et permet des décisions plus rapides et plus précises.
3. **Analyse prédictive** : En utilisant des algorithmes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique, les données collectées pourront donc être analysées pour prévoir les schémas de trafic futurs, les congestions potentielles et les zones à risque d'accidents.
4. **Optimisation du trafic** : Sur la base des prédictions et des analyses en temps réel, les systèmes de gestion de la circulation pourront et/ou peuvent ajuster dynamiquement les feux de signalisation, les itinéraires recommandés, les restrictions de vitesse, etc., pour optimiser le flux de trafic et réduire les embouteillages.
5. **Communication véhicule-infrastructure (V2I)**: Les véhicules connectés peuvent communiquer avec les infrastructures routières, tels que les feux de signalisation intelligents, pour obtenir des informations sur les conditions de la route et recevoir des instructions pour optimiser leur trajet.
6. **Sécurité routière améliorée** : Les données en temps réel et les capacités de traitement local peuvent être utilisées pour détecter les situations dangereuses sur la route, telles que les collisions imminentes, les piétons traversant la chaussée, etc., et déclencher des avertissements ou des mesures préventives.

Les voitures connectées sont en effet confrontées à une série de défis passionnants à mesure qu'elles continuent d'évoluer. L'un des défis les plus critiques est de garantir une connectivité robuste et sécurisée, ainsi qu'une gestion efficace des

⁴ Thomas nigg et costatMeimetis, Les véhicules connectés ou l'Internet des objets qui... comptent vraiment, 2016, P. 1

⁵ Mohammed Laroui, Op.cit., P.169

⁶ [Voiture automobile dotée des technologies embarquées nécessaires pour traiter, de manière autonome, des données recueillies ou reçues, ce qui permet la commande d'actions].

données. C'est là que les technologies IoT (Internet des objets) et le Edge Computing (calcul en périphérie) jouent un rôle crucial.

En combinant ces technologies, les autorités de gestion de la circulation pourront donc créer des systèmes plus efficaces, sûrs et intelligents, contribuant ainsi à réduire les embouteillages, les émissions de CO₂, les accidents de la route et à améliorer globalement la qualité de vie dans les zones urbaines.

Section 3. Les Défis et perspectives futures

Dans cette section, nous aborderons les défis et les obstacles associés à la mise en œuvre du Edge Computing, tels que la gestion de la complexité, la sécurité des données, les questions de conformité réglementaire, ainsi que les défis liés à l'évolutivité et à l'interopérabilité. Enfin, nous discuterons des perspectives futures du Edge Computing et des tendances émergentes dans ce domaine. Les défis et les perspectives futures du Edge Computing, IOT et les réseaux 6G sont essentiels à considérer pour comprendre pleinement leur impact et évolution. Voici une analyse détaillée de ces aspects :

1. Edge Computing :

a) Défis :

➤ **Gestion des données** : L'un des principaux défis est de gérer efficacement les données à la périphérie du réseau. Le Edge Computing implique le traitement des données à proximité de leur source, ce qui nécessite une gestion efficace de la volumétrie croissante des données tout en respectant les contraintes de latence et de bande passante et une gestion efficiente des ressources informatiques réparties sur un large éventail de dispositifs et de réseaux.

➤ **Sécurité** : Avec le traitement des données à proximité des utilisateurs, il existe des risques accrus en matière de sécurité et de confidentialité des données. Les appareils Edge peuvent être plus vulnérables aux attaques, et la sécurisation de ces points d'accès est donc cruciale.

➤ **Intégration avec les réseaux existants** : Intégrer les capacités de calcul et de stockage à la périphérie du réseau avec les infrastructures existantes représente également un défi. Cela nécessite souvent des mises à niveau des équipements réseau et des logiciels pour assurer une communication transparente entre les appareils Edge et le cloud central.

➤ **Conformité réglementaire** :

Les réglementations sur la confidentialité des données et la protection de la vie privée peuvent varier d'une région à l'autre, ce qui rend la conformité réglementaire plus complexe dans un environnement de Edge Computing distribué.

➤ **Évolutivité et interopérabilité** :

Assurer l'évolutivité des infrastructures de Edge Computing pour répondre à la demande croissante des applications et garantir l'interopérabilité entre les différents dispositifs et plates-formes constituent des défis techniques et opérationnels.

➤ **Coût et rentabilité** :

Le déploiement et la maintenance des infrastructures de Edge Computing peuvent représenter un investissement financier important pour les entreprises. Il est essentiel de trouver un équilibre entre les coûts initiaux et les avantages potentiels pour garantir la rentabilité à long terme.

➤ **Les failles dues au manque du courant électriques** : Vu qu'il existe certains endroits du monde où le courant électrique n'est pas stable et parfois il n'existe presque pas donc malgré que ces technologies pourront être implémentées, mais il y aura toujours des milieux qui seront pas connectés donc, l'évidence serait de penser à une autre forme d'énergie pouvant alimenter ces dernières même dans le milieu le plus reculés du monde, comme c'est le cas de certains pays du tiers monde.

b) Perspectives futures :

❖ **Amélioration des capacités de traitement** : Les avancées dans les technologies de microprocesseurs et de stockage devraient permettre des capacités de calcul et de stockage plus puissantes à la périphérie du réseau, permettant ainsi un traitement plus efficace des données.

❖ **Intégration de l'IA et de l'apprentissage automatique** : L'intégration de l'IA et de l'apprentissage automatique dans les appareils Edge permettra des analyses plus avancées et une prise de décision autonome, ce qui est essentiel pour les applications telles que l'automatisation industrielle et les véhicules autonome.

❖ **Développement d'algorithmes de traitement des données** : Le développement d'algorithmes plus efficaces pour le traitement des données en temps réel à la périphérie du réseau permettra une utilisation plus efficace des ressources disponibles et une réponse plus rapide aux événements en temps réel.

❖ **Edge Computing orienté vers les services** :

Les fournisseurs de services cloud et les entreprises développeront des offres de services de Edge Computing plus sophistiquées, offrant des solutions clés en main pour les applications spécifiques et les industries verticales.

❖ **Normes et bonnes pratiques** :

L'élaboration de normes et de bonnes pratiques pour le Edge Computing sera essentielle pour garantir l'interopérabilité, la sécurité et la conformité réglementaire à l'échelle mondiale.

❖ **Intégration avec le Cloud Computing** :

Le Edge Computing restera en à évoluer en association avec du Cloud Computing, avec une intégration plus étroite entre les environnements de Edge et les infrastructures cloud centralisées pour offrir une flexibilité et une efficacité accrues

2. Internet des objets (IoT):

a) Défis:

- ✚ **Sécurité** : La sécurité est l'un des plus grands défis pour l'IoT. Avec un grand nombre d'appareils connectés collectant et échangeant des données sensibles, il est crucial de garantir la confidentialité et l'intégrité de ces données, ainsi que la sécurité des appareils eux-mêmes contre les attaques.
- ✚ **Interopérabilité** : L'interopérabilité entre les différents appareils et plateformes IoT est un autre défi. Les normes de communication doivent être harmonisées pour permettre une intégration fluide entre les différents appareils et systèmes.
- ✚ **Gestion des données** : Gérer efficacement le volume massif de données générées par les appareils IoT est un défi. Cela inclut la collecte, le stockage, le traitement et l'analyse de ces données pour en extraire des informations exploitables.

b) Perspectives futures :

- ❖ **Normes de sécurité plus robustes** : L'évolution vers des normes de sécurité plus robustes, telles que le chiffrement avancé et l'authentification à deux facteurs, sera essentielle pour assurer la confiance des utilisateurs et stimuler l'adoption de l'IoT à grande échelle.
- ❖ **Développement de dispositifs IoT sécurisés** : Le développement de dispositifs IoT avec des protocoles de sécurité intégrés et des mises à jour logicielles sécurisées permettra de réduire les vulnérabilités et de renforcer la sécurité des réseaux IoT.
- ❖ **Analyse avancée des données** : L'intégration de techniques d'analyse avancée, telles que l'apprentissage automatique et l'analyse prédictive, permettra d'extraire des informations plus précieuses des données IoT et de prendre des décisions plus éclairées.

3. Réseaux 6G

a) Défis :

- **Développement de technologies de communication avancées** : Les réseaux 6G nécessitent le développement de technologies de communication encore plus rapides et plus fiables pour répondre aux demandes croissantes de bande passante et de connectivité et qui pourront être commercialisés à l'échelle mondiale et à moindre coût afin de donner la chance à tout le monde d'en disposer.

- **Connectivité dans des environnements difficiles** : Assurer une connectivité fiable dans des environnements difficiles, tels que les zones rurales ou les zones à forte densité de population, ou les régions montagneuses cela est un défi pour les réseaux 6G.

- **Interopérabilité avec les technologies existantes** : Les réseaux 6G doivent être compatibles avec les technologies existantes, telles que la 5G, pour assurer une transition en douceur et une intégration transparente avec les infrastructures réseau existantes.

b) Perspectives futures :

- **Vitesses de connexion encore plus rapides** : Les réseaux 6G devraient offrir des vitesses de connexion encore plus rapides que la 5G, permettant des applications et des services encore plus avancés, tels que la réalité virtuelle en streaming et les jeux

en nuage. La technologie des réseaux 6G est en cours de développement et promet des vitesses de téléchargement considérablement plus rapides que les générations précédentes.

Voici quelques points clés sur la vitesse des réseaux 6G :

- **Vitesse de Téléchargement:** Les réseaux 6G offriront des vitesses de téléchargement minimales de 100 Gb/s, soit 10 fois plus rapides que la 5G et 300 fois plus rapides que les réseaux 4G les plus performants actuels¹.
- **Capacité et Latence:** La 6G devrait permettre une capacité nettement supérieure et une latence beaucoup plus faible, avec des communications à latence d'une microseconde².
- **Débits Potentiels:** En théorie, les réseaux 6G peuvent offrir des vitesses allant jusqu'à 1 téraoctet par seconde³.
- **Disponibilité :** La commercialisation de l'internet 6G est prévue pour 2030.

Ces avancées pourraient transformer la connectivité sans fil, la cognition, la détection et l'imagerie, en intégrant l'intelligence artificielle pour une meilleure gestion des données et des ressources informatiques. Pour plus de détails, nous pouvons voir ce qui est prévu par **Huawei** qui est l'une de firmes qui développent sur cette norme, voici la figure ci-dessous qui indique le timeline de la normalisation :

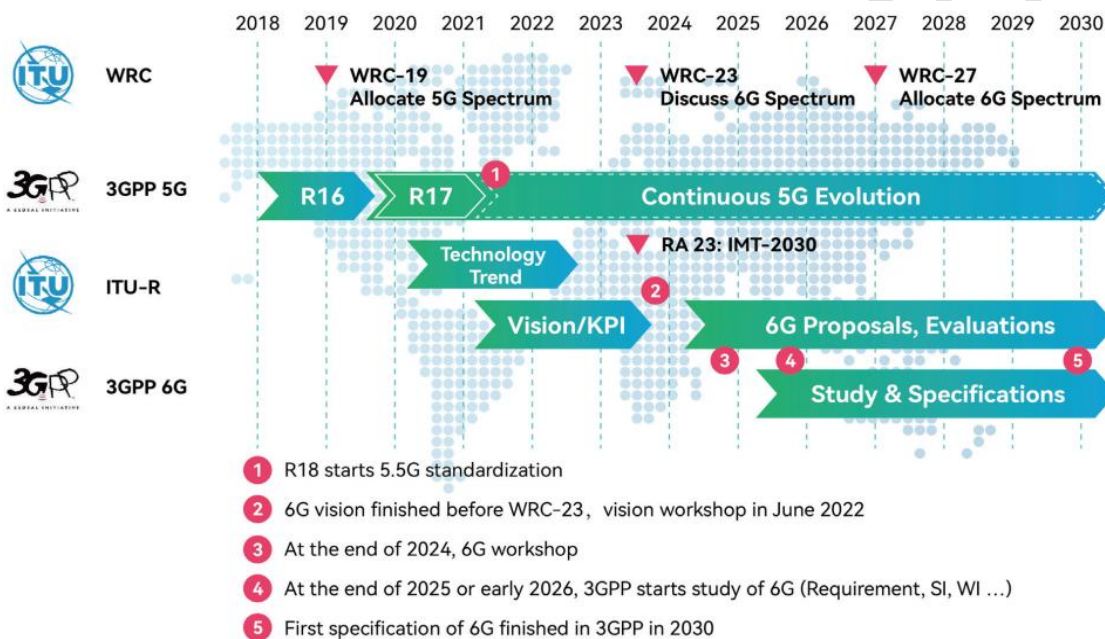


Figure 3: La chronologie attendue pour la normalisation du 6G

- **Connectivité améliorée pour les appareils IoT :** Les réseaux 6G devraient offrir une connectivité améliorée pour les appareils IoT, permettant une communication plus rapide et plus fiable entre les appareils connectés et les applications cloud.
- **Technologies de communication avancées :** Les technologies telles que le **beamforming**⁷, les antennes intelligentes et la communication par satellite joueront un rôle crucial dans l'extension de la connectivité à des endroits jusqu'ici difficiles à atteindre, tels que les zones rurales et les zones reculées.

- Croissance continue :

Le Edge Computing devrait continuer à croître rapidement, alimenté par la demande croissante de services à faible latence et la prolifération des appareils IoT. De nouvelles applications et cas d'utilisation émergeront dans divers domaines, notamment la santé, l'automobile, la fabrication et les villes intelligentes.

⁷Le **beamforming**, ou formation de faisceaux, est une technique de traitement du signal utilisée dans les réseaux d'antennes pour la transmission ou la réception directionnelle de signaux.

EDGE COMPUTING, LES IOT, FOG COMPUTING ET LES RÉSEAUX 6G FACE À L'EMPRISE PESTEL

Le modèle PESTEL est un outil d'analyse utilisé pour examiner les facteurs externes qui peuvent influencer une entreprise ou une industrie⁸. Sous plusieurs angles. Voici sur la figure suivante de quoi il est question de cette analyse :

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

⁸<https://www.lecoindesentrepreneurs.fr>

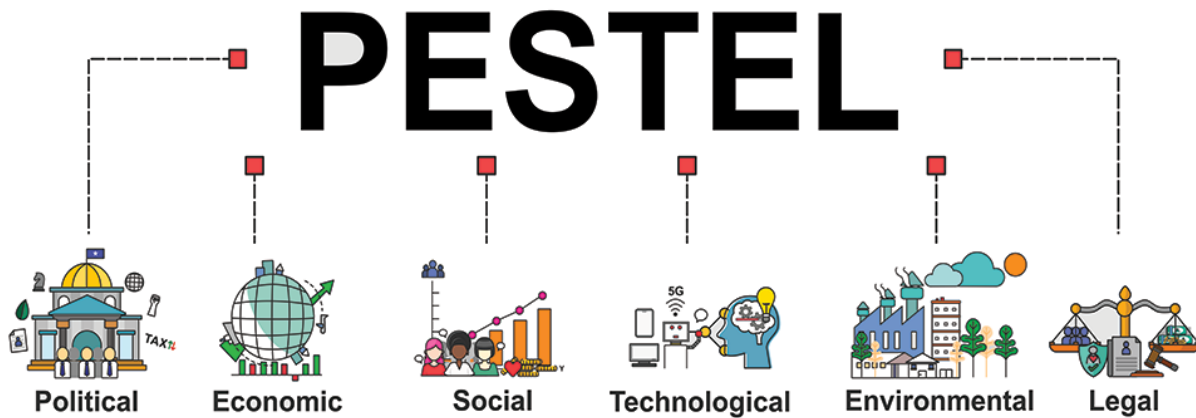


Figure 4: L'analyse PESTEL

Examinons comment la technologie Edge Computing, l'Internet des Objets (IoT) et les réseaux 6G pourront faire l'objet à chaque dimension du modèle PESTEL :

1. Politique (Politique) :

- Les réglementations gouvernementales peuvent jouer un rôle crucial dans la façon dont ces technologies sont déployées. Par exemple, les politiques de protection de la vie privée et de la sécurité des données peuvent avoir un impact sur la collecte et l'utilisation des données IoT.
- Les gouvernements peuvent également promouvoir ou restreindre le développement de ces technologies à travers des incitations fiscales, des subventions ou des restrictions.

2. Économique (Economic) :

- L'adoption de ces technologies peut avoir un impact significatif sur l'économie, en créant de nouvelles opportunités d'emploi dans le secteur de la technologie, en stimulant l'innovation et en améliorant l'efficacité opérationnelle.
- Cependant, il peut également y avoir des coûts initiaux élevés associés au déploiement et à la maintenance de l'infrastructure nécessaire pour prendre en charge ces technologies.

3. Socioculturel (Social and Cultural) :

- L'acceptation sociale de ces technologies peut varier en fonction de facteurs tels que la confiance dans la sécurité des données, les préoccupations concernant la vie privée et l'impact sur la vie quotidienne.
- Les avantages perçus, tels que la commodité accrue, la sécurité améliorée et la réduction de l'empreinte carbone, peuvent influencer l'adoption et l'utilisation de ces technologies.

4. Technologique (Technological) :

- Ces technologies sont à la pointe de l'innovation technologique, offrant des capacités de traitement local avancées, une connectivité ultra-rapide et une intégration transparente des appareils et des systèmes.
- Cependant, les défis technologiques tels que la sécurité des données, l'interopérabilité des appareils et la gestion de la complexité peuvent également être des considérations importantes.

5. Environnemental (Environmental) :

- Ces technologies peuvent avoir un impact sur l'environnement à la fois positif et négatif. Par exemple, l'optimisation du trafic routier grâce à des systèmes IoT et EdgeComputing peut réduire les émissions de CO2 en diminuant les embouteillages.
- Cependant, la fabrication, le déploiement et la gestion de ces technologies peuvent également avoir une empreinte environnementale, notamment en termes de consommation d'énergie et de gestion des déchets électroniques.

6. Légal (Legal) :

- Les considérations juridiques telles que la conformité aux lois sur la protection des données, les réglementations sur la sécurité routière et les responsabilités juridiques en cas d'incidents peuvent influencer la conception et la mise en œuvre de ces technologies.

- De plus, les questions de propriété intellectuelle et de droit des contrats peuvent également être importantes lors de la collaboration entre les fournisseurs de technologie, les entreprises et les gouvernements.

La technologie EdgeComputing, l'IoT et les réseaux 6G peuvent être analysés à travers le prisme du modèle PESTEL pour comprendre leur impact et les facteurs qui peuvent influencer leur adoption et leur déploiement.

10. Défis et considérations

Malgré ses avantages, l'intégration de SDN dans l'IoT orienté MEC pose plusieurs défis :

- **Complexité opérationnelle** : La gestion d'un grand nombre de périphériques IoT et de points d'accès MEC nécessite une planification minutieuse et des compétences spécialisées pour configurer et optimiser efficacement le réseau.
- **Évolutivité** : Assurer la scalabilité des infrastructures SDN dans des environnements IoT en expansion rapide, tout en maintenant des niveaux élevés de performance et de sécurité.

Conclusion partielle : L'intégration de SDN dans l'IoT orienté MEC représente une étape cruciale vers des réseaux plus intelligents, réactifs et sécurisés pour les applications IoT modernes. En exploitant les avantages de la centralisation du contrôle et de la décentralisation des capacités de calcul, cette approche offre une solution prometteuse pour répondre aux défis techniques et opérationnels posés par les déploiements IoT à grande échelle.

Conclusion générale

L'article examine l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) avec l'informatique mobile Edge en utilisant une approche orientée Software-Defined Networking (SDN). L'objectif principal est d'optimiser les performances des applications IoT déployées à la périphérie du réseau (Edge) en exploitant les capacités de programmabilité et de gestion centralisée de SDN. Cette approche vise à répondre aux défis tels que la latence réduite, la gestion efficace des ressources et la sécurisation des données dans les environnements dynamiques de l'IoT.

L'article met en avant les avantages de SDN, notamment la flexibilité accrue dans la gestion des politiques réseau, la capacité d'orchestrer dynamiquement les ressources réseau en fonction des exigences des applications IoT et la réduction de la complexité opérationnelle. En intégrant SDN à l'Edge Computing, les chercheurs montrent comment cela peut améliorer la fiabilité et la sécurité des communications IoT, tout en optimisant la bande passante et en minimisant la latence pour les applications sensibles au temps.

Donc, l'approche SDN orientée IoT pour l'informatique mobile Edge représente une avancée significative pour les réseaux modernes, offrant des solutions plus intelligentes et adaptatives aux défis croissants de connectivité et de traitement des données à la périphérie du réseau.

Pour que ces technologies puissent réaliser pleinement leur potentiel, il est crucial d'investir dans la recherche et le développement, de mettre en place des normes et des réglementations adaptées, et de favoriser la collaboration entre les acteurs du secteur public et privé. En adoptant une approche proactive pour relever ces défis, nous pouvons créer un avenir où les technologies EDGE computing, IoT et les réseaux 6G contribuent de manière significative à la transformation numérique, à l'innovation et au bien-être socio-économique à l'échelle mondiale.

Ces technologies peuvent contribuer de manière significative au développement durable en optimisant l'utilisation des ressources, en réduisant les émissions de carbone, en surveillant et en contrôlant l'environnement, en promouvant une gestion intelligente de l'énergie et en favorisant une planification urbaine durable. EdgeComputing, l'IoT et les réseaux 6G offrent tous des perspectives passionnantes pour l'avenir, mais leur adoption généralisée dépendra de la résolution des défis actuels et de l'innovation continue dans ces domaines.

RÉFÉRENCES

1. **6G** :the Next Horizon,Rapport de Huawei
2. Anses – Les Cahiers de la Recherche No 20 - Santé, Environnement, Travail – novembre 2022
3. Arcep FRANCE, Réseaux du futur - Les voitures connectées
4. **Factorysystems:EdgeComputing, Une nouvelle ère du PC Industriel !**
5. **Frédéric DESBIENS** (S.D)Open Source **POUR L'IOT** À l'ère du edgecomputing
6. **Hend Ben Hadji**(Corée du Sud)**Les fondamentaux de l'IoT**
7. **LEMAG IT,Edge Computing : quels sont les gains pour les entreprises**

8. Zhang, Q., Wen, Y., Zhu, H., & Zhang, H. (2014). Software-defined networking for big data: A survey. *IEEE Access, 2*, 1089-1106. doi:10.1109/ACCESS.2014.2332453
9. Kang, J., Hu, F., & Huang, C. (2017). A survey on MEC-enabled SDN: Network architecture and optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). doi:10.1109/ICC.2017.7996805.
10. **Markess by exaegis**(Décembre 2020) :EdgecomputingRe-distribuer la puissance informatique et étendre les frontières du Cloud
11. **Mehtab Alam ,Ihtiram Raza Khan**,*EDGE COMPUTING AND ITS IMPACT ON IOT*(March 2021)Wesleyan Journal of Research, Vol 14 No 07.
12. **Mohammed Laroui** (2022):Distributed edge computing for enhanced IoT devices and new generation network efficiency
13. Mariam Ishtiaq, Nasir Saeed, et ALL (2022):Edge Computing in IoT: A 6G Perspective,IEEE
14. par Khaldoun AL AGHA, Pauline LOYGUE et Guy PUJOLLE. **Edge Networking**,© ISTE Editions 2022.
15. **Steven Carlini**,Les tendances et les bienfaits de Edgecomputing,livre blanc N°226
16. Syed Salman Raza Naqvi (2019):**A Survey on Vehicular Edge Computing Architecture, Applications, Technical Issues, and Future Directions**
17. **VERTIV**(2018) :L'impact du cloud et de l'Internet des objets sur la demande en datacenters.
18. **Vishal Lakshminarayanan1, Aswathy Ravikumar 1 et All** :**(2023)Health Care Equity Through Intelligent Edge Computing and Augmented Reality/Virtual Reality: A Systematic Review.**

Webographie

1. [<https://www.numerama.com/tech>]
2. [6G : guide complet sur la sixième génération de réseau sans fil \(objetconnecte.com\)](https://www.objetconnecte.com)
3. https://anses.hal.science/anses-04107352/file/2022_CDRL_tognola_voitures_connectees.pdf
4. <https://www.lembarque.com/>
5. <https://fr.statista.com/>