



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة العربي التبسي
تبسة



Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de MASTER Domaine
: Mathématiques et Informatique
Filière : Informatique
Option : Réseau et Sécurité Informatique

Thème

Une approche de contrôle du trafic réseau basé SDN pour les applications multimédia sensible au délai dans les environnements Fog et Edge computing

Présenté par :

Meriem Mohammedi

Devant le jury :

Mr Souahi MS

MCB Université Larbi Tébessi - Tébessa Président

Mr Mahmoudi Rachid

MAB Université Larbi Tébessi - Tébessa Examineur

Mr Sahraoui Abdelatif

MCA Université Larbi Tébessi - Tébessa Encadreur

Date de soutenance : 30/06/2022

Résumé

La popularité croissante des appareils mobiles intelligents, à savoir les dispositifs, favorise le développement des applications IoT en utilisant le paradigme Cloud Computing Mobile (MCC). Ce paradigme améliore l'utilisation massive des ressources mobile et réduit le coût de développement de ces applications en intégrant les infrastructures centraliser du Cloud Computing (CC). Cependant, le nombre croissant de services cloud (par exemple Dropbox, Apple iCloud, etc.) et la réalisation de nouveaux services (par exemple, la vidéo ultra HD, l'Internet des objets, les appareils portables intelligents, etc.) induisent une charge réseau élevée sur le réseau mobile. Il est prévu que la tendance à la croissance du trafic de données serait multipliée chaque année. De plus, les retards du WAN rendent impossible la diffusion des services innovants (par exemple, la réalité augmentée, la réalité virtuelle). Mobile Edge Computing (MEC) est un nouveau concept d'architecture de réseau qui fournit des capacités informatiques et de cloud computing à la périphérie du réseau mobile. Comme à proximité des abonnés, MEC peut offrir un environnement de service avec une latence ultra-faible, une bande passante élevée et un accès direct aux informations réseau en temps réel. L'objectif de ce travail est de proposer une approche de contrôle basé SDN du trafic réseau pour les applications multimédia sensible au délai dans des environnements Fog et Edge Computing. En particulier, nous nous intéressons à la satisfaction des demandes de communication en temps réel dans les environnements MEC et à l'amélioration de la latence et qualité de service (QoS).

Mots clés : Mobile Edge Computing (MEC), Fog Computing (FC), Software Defined Architecture (SDN), Contrôleurs, Data Plane, Contrôle Plane, les application sensibles au délai.

Abstract

The growing popularity of smart mobile devices, i.e. devices, is driving the development of IoT applications using the Mobile Cloud Computing (MCC) paradigm. This paradigm improves the massive use of mobile resources and reduces the cost of developing these applications by integrating centralized Cloud Computing (CC) infrastructures. However, the growing number of cloud services (e.g. Dropbox, Apple iCloud, etc.) and the realization of new services (e.g., ultra HD video, Internet of Things, smart wearable devices, etc.) are inducing a high network load on the mobile network. It is expected that the growth trend of data traffic would be multiplied every year. Additionally, WAN delays make it impossible to deliver innovative services (e.g., augmented reality, virtual reality). Mobile Edge Computing (MEC) is a new concept in network architecture that provides computing and cloud computing capabilities at the edge of the mobile network. As close to subscribers, MEC can provide a service environment with ultra-low latency, high bandwidth, and direct access to real-time network information. The objective of this work is to propose an SDN-based network traffic control approach for delay-sensitive multimedia applications in Fog and Edge Computing environments. In particular, we are interested in meeting real-time communication demands in MEC environments and improving latency and quality of service (QoS).

Keywords: Mobile Edge Computing (MEC), Fog Computing (FC), Software Defined Architecture (SDN), Controllers, Data Plane, Control Plane, delay-sensitive applications.

تؤدي الشعبية المتزايدة للأجهزة المحمولة الذكية، أي الأجهزة، إلى تطوير تطبيقات إنترنت الأشياء باستخدام نموذج الحوسبة السحابية المتنقلة (MCC). يعمل هذا النموذج على تحسين الاستخدام المكثف لموارد الأجهزة المحمولة ويقلل من تكلفة تطوير هذه التطبيقات من خلال دمج البنى التحتية المركزية للحوسبة السحابية (CC). ومع ذلك، فإن العدد المتزايد من الخدمات السحابية (مثل Apple iCloud و Dropbox وما إلى ذلك) وإدراك الخدمات الجديدة (مثل الفيديو فائق الدقة وإنترنت الأشياء والأجهزة الذكية القابلة للارتداء وما إلى ذلك) يؤدي إلى زيادة حمل الشبكة على شبكة الجوال. من المتوقع أن يتضاعف اتجاه نمو حركة البيانات كل عام. بالإضافة إلى ذلك، تجعل تأخيرات WAN من المستحيل تقديم خدمات مبتكرة (على سبيل المثال، الواقع المعزز، الواقع الافتراضي). يعد MEC (Mobile Edge Computing) مفهومًا جديدًا في بنية الشبكة يوفر إمكانات الحوسبة والحوسبة السحابية على حافة شبكة الهاتف المحمول. نظرًا لقربها من المشتركين، يمكن لـ MEC توفير بيئة خدمة ذات زمن انتقال منخفض للغاية وعرض نطاق ترددي عالٍ ووصول مباشر إلى معلومات الشبكة في الوقت الفعلي. الهدف من هذا العمل هو اقتراح نهج للتحكم في حركة مرور الشبكة قائم على SDN لتطبيقات الوسائط المتعددة الحساسة للتأخير في بيئات Edge و Fog Computing. على وجه الخصوص، نحن مهتمون بتلبية متطلبات الاتصال في الوقت الفعلي في بيئات MEC وتحسين زمن الوصول وجودة الخدمة (QoS).

الكلمات المفتاحية: الحوسبة المتنقلة (MEC)، حوسبة الضباب (FC)، الهندسة المعمارية المحددة بالبرمجيات (SDN)، وحدات التحكم، مستوى البيانات، مستوى التحكم، التطبيقات الحساسة للتأخير.

Dédicace

A mes très chers parents

A mon mari

A Mes frères, A Mes Sœurs

A Mon Encadreur Dr. Sahraoui Abdellatif

Remerciement

Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme

Je remercie mes très chers parents, aucun acte ou expression ne pourra exprimer mes sentiments envers vous, que dieux vous garde pour nous

Je remercie aussi mon cher mari merci d'être là pour moi.

Je remercie mes frères, mes sœurs, mes amies et toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation

Enfin, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. Sahraoui Abdellatif, je vous le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant ma préparation de ce mémoire

TABLEAU DES MATIERES

Résumé	1
Abstract.....	2
Dédicace.....	4
Remerciement.....	5
Introduction Générale.....	11

CHAPITRE 01

Introduction au Mobile Edge Computing

Page 13

1.2. Edge Computing	13
1.2.1. Définition.....	13
1.2.2. Avantages du Edge Computing	15
1.2.3. Domaines d'application.....	15
1.2.4. Caractéristiques de l'Edge Computing	17
1.3.1. Définition.....	18
1.3.2. Les avantages de Fog computing.....	19
1.3.3. Les caractéristiques de Fog computing.....	19
1.3.4. La différence entre Edge computing et Fog computing	21
1.4.2. Les caractéristiques de Mobile Edge Computing	22
1.4.3. Architectures mobile edge computing	23
1.4.3.1. Architecture a trois couche	23
1.4.3.2. Computation Offloading.....	25
1.4.4. Principaux facilitateurs de MEC.....	26
1.4.5. Besoin d'un serveurs MEC.....	28

CHAPITRE 02

Les architectures SDN pour le contrôle du trafic réseau

Page 32

2.1. Introduction	32
2.2. Définition de l'architecture SDN.....	32
2.3. L'architecture SDN	33
2.4. Interface de communication	34

Tableau De Matières

2.5.	Les avantages SDN.....	35
2.6.	Le protocole Openflow dans l'architecture SDN	36
2.6.1	Architecture de protocole Openflow	36
2.6.2	Les messages Openflow	37
2.6.2.1	Messages contrôleurs-commutateurs.....	37
2.6.2.2	Messages asymétriques.....	37
2.6.2.3	Messages symétriques	38
2.7.	Quelques contrôleurs SDN.....	38
2.8.	Cas d'utilisation SDN.....	39
2.9.	Conclusion.....	42

CHAPITRE 03

Une architecture de contrôle du trafic dans les environnements MEC Page 44

3.1	Introduction	44
3.2	Contexte du travail	44
3.2.1	La communication en temps réel	44
3.2.2	Mobile Edge Computing	45
3.2.3	Réseau edge intelligent défini par l'architecture SDN	45
3.3	Problématique	46
3.4	La contribution	46
3.4.1	Déploiement des architectures Edge	48
3.4.2	La prédiction de la charge du travail	48
3.4.3	La prédiction de la charge du travail	Error! Bookmark not defined.
3.4.3.1	L'interaction et la gestion dynamique des ressources	48
3.4.3.2	La gestion de la qualité de services	49
3.5	Les plans de contrôle.....	49
3.6	l'environnement de travail	50
	Conclusion Générale.....	55

LISTE DE FIGURES

Page

Figure 1-1 Architecture d'une réseau Edge computing.....	16
Figure 1-2 Architecture a trois couches	25
Figure 1-3 l'architecture de MEC	26

Figure 2-1 réseau traditionnel et SDN.....	32
Figure 2-2 l'architecture SDN	33

Figure 3-1 architecture de contrôle du trafic dans les environnements MEC	47
Figure 3-2 version de mininet.....	50
Figure 3-3 installation de mininet sur la machine virtuelle	51
Figure 3-4 applique topologie par défaut sudo mn	52
Figure 3-5 installation de la machine contrôleur SDN sur la machine virtuelle.....	53
Figure 3-6 liaison entre mininet et SDN controller	53
Figure 3-7 affichage après l'application de la liaison entre mininet et SDN controller.....	54

Introduction Générale

Depuis les années 2000, la croissance de l'internet et des technologies de réseau s'est rapidement développé avec l'évènement de divers appareils tels que smart phones, les tablettes et les appareils portables. Selon les demandes des utilisateurs qui ont besoin d'une connexion Internet à l'aide de divers appareils, beaucoup de données sur Internet peuvent être collectées, traitées et transférées à d'autres appareils si nécessaire, et cela est devenu une prise de pied pour diriger l'ère de la 4ème révolution industrielle. L'Internet des objets (IdO) (en anglais the internet of things ou IOT) l'IdO est un nouveau concept dans lequel différents objets sont connectés et communiquent entre eux via un réseau intelligent, générant une énorme quantité de données.

Aujourd'hui, l'IdO est utilisé aussi dans divers domaines tels que la gestion logistique (la température et l'humidité, la sécurité des installations, comme la détection des incendies et des intrusions externes, la construction de villes intelligentes, etc.)

Cependant il existe plusieurs problèmes tels que la limitation de la bande passante de transmission, le retard de transmission du réseau et le temps de traitement des données à cause du traitement en temps réel d'un grand volume de données plusieurs chercheurs ont tenté de résoudre ce problème au moyen de cloud computing fog computing et mobile edge computing.

Un MEC est un nouveau paradigme de réseau qui offre des capacités d'infonuagique au sein du réseau d'accès radio. En permettant le trafic mobile direct entre le réseau central et l'utilisateur final. Un MEC connecte l'utilisateur directement au réseau de périphérie du service infonuagique le plus proche.

Par conséquent, pour soutenir une évolutivité élevée, une latence ultra-faible, un débit élevé et une transmission fiable des données, le paradigme de réseau défini par l'architecture (SDN) est considéré comme l'une des solutions. SDN est une architecture qui sépare le plan de contrôle du plan de données, compte tenu des caractéristiques de la technologie SDN qui permet une configuration réseau dynamique et programmatique efficace, il est possible d'améliorer les performances et la faible latence du serveur périphérique.

Dans ce mémoire nous avons développé une approche de contrôle du trafic réseau basé sur une architecture SDN pour des applications multimédia sensible au délai dans des environnements Fog et Edge Computing. Notre travail est organisé en trois chapitres suivis d'une conclusion générale à savoir :

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter les concepts de base de l'Edge Computing (CC) en présentant leur définition, ses caractéristiques et ses avantages. Enfin, nous

Introduction Générale

consacrons le reste du chapitre à la définition et à la description du Mobile Edge Computing.

- Le deuxième chapitre est consacré pour exprimer l'architecture SDN
- Le troisième chapitre, une vue conceptuelle de notre modèle de simulation sera proposée.

CHAPITRE 01

Introduction au Mobile Edge Computing

1.1. Introduction

Aujourd'hui, tous les types de réseaux connaissent un paysage concurrentiel en termes de performances. Les utilisateurs attendent des services qui répondent à leurs besoins rapidement et qui soient disponibles à tout moment. En fait, la vitesse de transmission est l'une des considérations de la plupart des utilisateurs. Actuellement, on constate que les utilisateurs abandonnent les applications qui chargent plus de cinq secondes. Afin de répondre à ces attentes élevées, les chercheurs actuels dans le domaine réseau donnent la priorité aux solutions réseau qui leur permettent de fournir des services informatiques rapide et fiable. Heureusement, le développement d'une architecture informatique de pointe a rendu possible la livraison sur les deux fronts. La présence omniprésente des dispositifs IoT aujourd'hui génère des données incrémentielles qui doivent être capturées, stockées, traitées et analysées. Le paradigme Edge Computing (CC) est considéré comme une opportunité pour étendre les infrastructures Cloud près aux sources de données et aux utilisateurs finaux. Dans les endroits où les données résident traditionnellement dans un centre de données ou dans le Cloud, il existe des avantages et des innovations qui peuvent être obtenus en traitant les données générées par ces appareils à proximité de l'endroit où elles sont produites.

Dans ce chapitre, nous allons introduire les concepts de base de l'Edge Computing (CC) en présentant leur définition, ses caractéristiques et ses avantages. Enfin, nous consacrons le reste du chapitre à la définition et à la description du Mobile Edge Computing.

1.2. Edge Computing

1.2.1. Définition

L'Edge Computing (CC) est un nouveau paradigme informatique en réseau visant à rapprocher les ressources informatiques aussi près que possible de la source de données (c.-à-d. les objets). L'objectif principal de ce paradigme est de réduire les paramètres de réseau à savoir, la latence et l'utilisation massive de la bande passante. En termes plus générale, les applications Edge Computing consiste à exécuter moins de processus dans le Clouds distants en déplaçant ces processus vers des environnements locaux, tels que les dispositifs d'un utilisateur, un appareil PDA ou un serveur de périphérie. De plus, amener le calcul à la périphérie du réseau minimise la quantité de communication longue distance qui doit se produire entre un client et un serveur.[1]

Dans les architectures réseau cellulaire, les serveurs sont déployés à proximité de chaque station de base (BS). Les utilisateurs utilisent alors les ressources fournies par les serveurs situés dans la cellule à laquelle ils sont connectés. Ces serveurs effectuent les calculs nécessitant des ressources plus conséquentes. Une telle architecture est également utile lors du stockage de données et le passage rapide des demandes de l'utilisateur au serveur situé en périphérie du réseau. Si ce réseau ne dispose pas la ressource demandée, la requête est transmise à l'infrastructure Cloud. Lorsque les données sont renvoyées par le Cloud, elles sont mises en cache afin de pouvoir répondre directement aux futures requêtes, comme illustre par la Figure 1.1. Les serveurs situés à la périphérie du réseau ont des ressources moins importantes que celles du Cloud mais suffisantes pour effectuer certains calculs ayant besoin d'une faible latence.

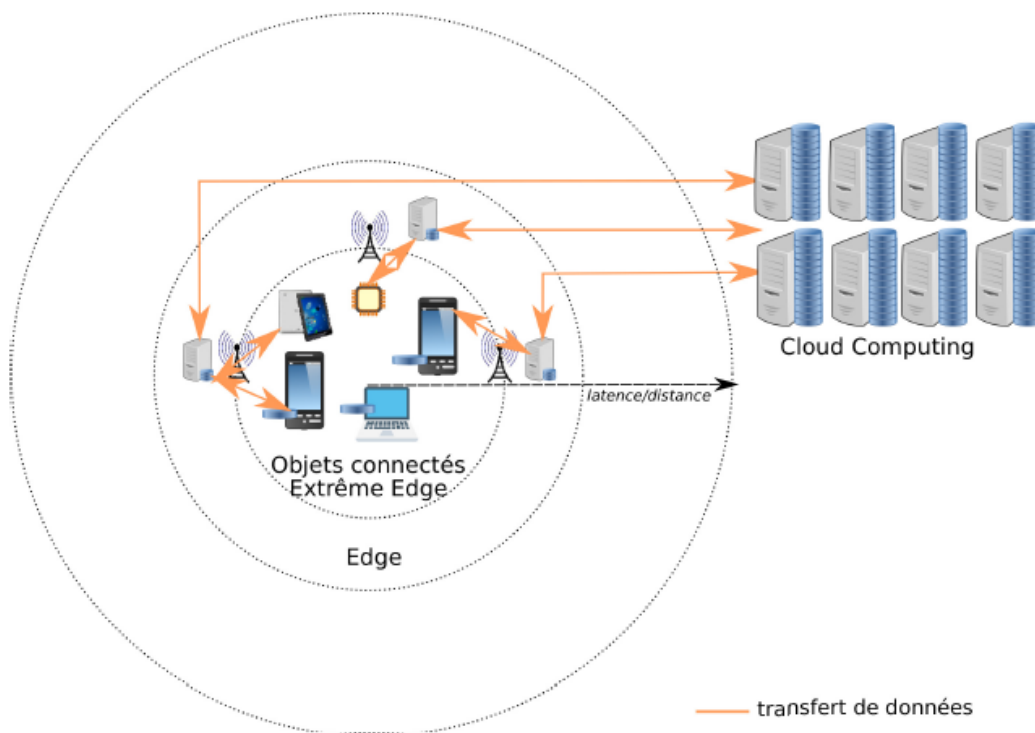


Figure 1-1 Architecture d'une réseau Edge computing [2]

1.2.2. Avantages du Edge Computing

Comme nous avons vu précédemment, l'Edge Computing changeant un calcul d'une infrastructure Cloud d'une entreprise et le place à proximité des dispositifs où les données sont générées, ce qui apporte plusieurs avantages clés résumées comme suit : [13]

Réduction du temps de réponse pour les utilisateurs :

Le serveur frontière (Edge Server) peut déjà avoir la réponse dans son cache et donc répondre immédiatement à un ensemble des requêtes. Dans le cas où le serveur principal du fournisseur doit être interrogé en cas un problème de cache, le temps d'accès n'est que très légèrement augmenté en passant par le point d'accès et l'enregistrement dans le cache accélérera la prochaine requête similaire.

Mutualisation transparente des ressources de calculs :

Les points d'accès des FAI sont des ressources disponibles entre plusieurs fournisseurs peuvent servir sans que ces derniers s'en rendent compte.

Diminution du coût de l'infrastructure :

Pour la prise en charge des requêtes des clients et mettre en cache les réponses afin de les réutiliser pour des requêtes similaires. Le serveur d'application du fournisseur de service sera beaucoup moins sollicité. Une machine moins puissante donc coûteuse pourra répondre au besoin et à une éventuelle grappe de machine devient superflu.

La disponibilité des services :

Un serveur peut se suppléer pour répondre aux demandes en cas de la disparition d'un serveur frontière du FAI.

Réduire l'usage de la bande passante :

Les transferts utilisent moins la bande passante reliant chaque point d'accès à un autre.

La vitesse améliorée :

Du point de vue des performances, les applications Edge Computing sont capables de répondre aux demandes des utilisateurs avec un délai beaucoup plus rapide. Rapprocher les fonctions de calculs à la proximité d'un réseau Edge réduit considérablement ce délai est de rendre le calcul beaucoup plus près de la source des données.

1.2.3. Domaines d'application

Parmi les applications ciblées par l'Edge Computing, on peut citer principalement la transmission de flux de média, les portails web. Nous pensons aussi qu'une telle

technologie peut être utilisée pour le *bulk-mailing*, les forums de discussion et les jeux massivement multi-joueurs.

La transmission du flux multimédia

Le transfert du flux multimédia est un sort d'application de visualisation accessible à travers l'internet d'une vidéo ou de l'écoute d'un morceau musical, qui est très gourmand en ressource. Cela nécessite une bande passante importante afin de transmettre un flux vidéo d'un serveur vers une application cliente tout en garantissant une qualité acceptable de visualisation, un temps de calcul réduit du serveur pour transmettre le flux et répondre efficacement aux demandes des utilisateurs. Un serveur Edge peut aussi adapter le flux vidéo en fonction du terminal sur lequel le client va le visualiser (PC, PDA, TV, TV Haute Définition, Téléphonie 3G...).

L'Edge Computing permet de répondre à ces besoins particuliers. Par exemple, dans le cas d'une vidéo demandée pour la première fois par un client, celle-ci sera "*poussée*" sur un serveur périphérique, peut être mise en cache, d'un fournisseur d'accès à l'internet (FAI). Au plus près du client final, le réseau sera moins surchargé par ce flux et le transfert seulement est nécessaire. De plus, pour d'autres demandes clientes sur le même point d'accès, il n'est pas nécessaire de transférer la vidéo à nouveau. Le point d'accès accueillant la vidéo ayant beaucoup moins de client à gérer que le serveur qui transmet la vidéo, il pourra fournir facilement la vidéo à tous les demandeurs clients et disposer de la puissance de calcul nécessaire pour adapter éventuellement à un client particulier.

Portails web

Un portail web (*web portals*) peut se personnaliser automatiquement en fonction de l'utilisateur demandant la page. Ce type de page se décompose en deux parties : une partie générique commune à toutes pages et une partie spécifique à l'utilisateur. Ce dernier peut choisir d'afficher la météo, le cours de la bourse ou l'affichage de ses mails à l'intérieur de la page du portail. Ce type de portail se base sur une technologie appelée *portlet* qui permet d'effectuer cet assemblage. Si cet assemblage est toujours calculé par le serveur de l'hébergeur, qui requiert un grand nombre de requêtes et nécessite une puissance de calcul importante. L'Edge Computing permet de limiter les échanges entre client et le fournisseur de service. L'ensemble des caractéristiques particulières à un utilisateur sont servies et mises en cache sur le point d'accès. Seules les mises à jour sont envoyées vers le serveur frontière. Il est aussi chargé de l'assemblage afin de

décharger le serveur du fournisseur. Pour le cas où un certain composant est demandé par plusieurs clients, sa présence en cache économise un nouveau téléchargement (par exemple plusieurs clients demandant la météo).

Les courriers électroniques publicitaires (*bulk-mailing*) (ainsi que leur variante par SMS / MMS) sont de plus en plus composés d'une partie générique valable pour tous les clients et d'une partie personnalisée en fonction des informations issues du profil client. Suivant le même fonctionnement que les portails web, l'envoi de ces messages publicitaires peut être amélioré en utilisant l'Edge Computing. Les informations personnalisées d'un client sont envoyées aux serveurs SMTP frontiers afin de calculer les courriers à envoyer. Cette technique permet à l'hébergeur de réduire le trafic SMTP dans son réseau.

Communication instantanée

Un autre domaine d'application particulièrement en vogue aujourd'hui concerne la communication instantanée (*Instant Messaging*). En effet, des groupes d'utilisateurs *chatent* et se réunissent en communautés géographiques ou thématiques. Il est donc envisageable d'héberger le canal de discussion sur des serveurs géographiquement proches des utilisateurs. Ainsi le temps de réponse du forum de discussion sera amélioré.

Jeux massivement multi-joueurs

Les jeux massivement multi-joueurs hébergent les parties sur des serveurs de jeu (réflecteurs). Les joueurs se connectent sur ces serveurs afin de se rencontrer et de jouer. Ces nouveaux types de jeux ont un très fort succès. Par exemple « *World of Warcraft* » a enregistré plus de 1 500 000 d'abonnements en moins de 6 mois.

L'utilisation de l'Edge Computing peut améliorer le temps de réponse lors des parties de ces jeux. En effet, en hébergeant les parties sur des réflecteurs plus proches de l'utilisateur, les transferts seront plus rapides (et la qualité du jeu améliorée).

1.2.4. Caractéristiques de l'Edge Computing

La technologie Edge Computing possède plusieurs caractéristiques sont les suivants :

Distribution géographique dense

L'Edge Computing rapproche les services Cloud de l'utilisateur en déployant de nombreuses plateformes informatiques dans les réseaux de périphérie [4].

Aide à la mobilité

Comme le nombre d'appareils mobiles augmente rapidement, l'Edge computing prend également en charge la mobilité. [5]

Proximité

Dans l'Edge computing, les ressources de calcul et services sont disponibles à proximité des utilisateurs qui peuvent améliorer leur expérience. La disponibilité des ressources de calcul et des services dans le voisinage local permet aux utilisateurs d'exploiter les informations de contexte de réseau pour prendre des décisions de déchargement et des décisions d'utilisation de service [5]

Fiabilité latence

L'Edge Computing rapproche les ressources de calcul et les services des utilisateurs, ce qui réduit la latence d'accès aux services [5].

Sensibilisation au contexte

La connaissance du contexte est la caractéristique des appareils mobiles et peut être définie de manière interdépendante par rapport à la connaissance de l'emplacement. Les informations contextuelles de l'appareil mobile dans les environnements Edge peuvent être utilisées pour prendre des décisions de déchargement et accéder aux services Edge [6]

Hétérogénéité

L'hétérogénéité dans l'Edge computing fait référence à l'existence de plates-formes, d'architectures, d'infrastructures, de technologies informatiques et de communication variées utilisées par les éléments du Edge computing (appareils finaux, serveurs Edge et réseaux) [5].

1.3. Fog computing

1.3.1. Définition

La technologie Fog Computing est une architecture informatique distribuée géographiquement avec un pool de ressources qui se compose d'un ou plusieurs appareils hétérogènes connectés de manière ubiquitaire (y compris les appareils périphériques) à la périphérie du réseau et non exclusivement soutenus de manière transparente par des services cloud, pour fournir de manière collaborative un calcul, un

stockage et une communication élastiques (et de nombreux autres nouveaux services et tâches) dans des environnements isolés a une large échelle de clients à proximité [7].

1.3.2. Les avantages de Fog computing

Le Fog Computing apporte de nombreux bénéfices pour l'IoT. Ces bénéfices peuvent être résumés comme suit :

Flexibilité

Les applications du Fog Computing peuvent être rapidement développées et déployées. De plus, ces applications peuvent programmer la machine pour qu'elle fonctionne selon les besoins du client [8].

Faible latence

Le Fog a la capacité de prendre en charge des services en temps réel (par exemple, jeux, streaming vidéo) [9].

Distribution géographique à grande échelle

Le Fog computing peut fournir des ressources de calcul et de stockage distribuées à des applications de grande taille et largement distribuées [9].

Réduire les coûts d'exploitation

Economie de la bande passante du réseau en traitant les données sélectionnées localement au lieu de les envoyer vers le Cloud pour les analyser [8]. En particulier, les données sensibles au temps des systèmes en temps réel.

Hétérogénéité

Le Fog Computing permet d'établir la collaboration de différents environnements physiques et infrastructures entre plusieurs services [10].

Evolutivité

La proximité du Fog computing avec les terminaux permet de faire évoluer le nombre d'appareils et de services connectés [8].

1.3.3. Les caractéristiques de Fog computing

Selon les travaux de Yuan Ai et al.[11]., et Shanhe Yi et al [7] les caractéristiques du Fog computing peuvent être résumées comme suit :

La détection de l'emplacement et de la faible latence

Fog computing prend en charge la connaissance de l'emplacement et peut déployer des nœuds de reconnaissance à différents endroits. De plus, comme Fog est plus proche du terminal, il permet de réduire la latence lors du traitement des données du terminal.

La distribution géographique

Contrairement aux clouds centralisés, les services et applications fournis par Fog sont distribués et peuvent être déployés n'importe où.

L'évolutivité

Il existe de vastes réseaux de capteurs qui surveillent l'environnement environnant, et le fog computing fournit des ressources de calcul et de stockage distribuées qui peuvent fonctionner avec ces périphériques à grande échelle.

L'interaction en temps réel

Les applications de calcul du Fog fournissent des interactions en temps réel entre les nœuds du Fog plutôt que le traitement par lots utilisé dans le cloud.

L'hétérogénéité

Les nœuds du Fog, dans lesquels les terminaux sont conçus par différents fabricants, ont donc des formes différentes, et doivent être déployés en fonction de leurs plateformes.

L'interopérabilité

Les composants du Fog peut interagir et travailler avec différents fournisseurs de services dans différents domaines.

La prise en charge de l'analyse en ligne et de l'interaction avec cloud

Le Fog est placé entre le cloud et les terminaux IoT et joue un rôle important dans l'absorption et le traitement des données à proximité des terminaux.

L'accompagnement à la mobilité

Un aspect important des applications du Fog est la capacité de communiquer directement avec les appareils mobiles et donc d'activer des méthodes de navigation.

1.3.4. La différence entre Edge computing et Fog computing

Le Fog computing et le Edge computing déplacent tous deux le calcul et le stockage vers la périphérie du réseau et plus près des utilisateurs, mais ces paradigmes ne sont pas identiques. Le tableau 1 montre brièvement la différence entre ces deux modèles.

Les critères	Fog Computing	Edge Computing
<i>déploiement</i>	Déployé dans les locaux des utilisateurs mobiles .	Déployé comme un centre de données traditionnel avec des capacités étendues.
<i>ressources</i>	Appareil virtualisé avec stockage de données intégré, installation informatique et de communication.	Il utilise un serveur de périphérie similaire à un serveur de centre de données traditionnel.
<i>fonctionnement</i>	peut être adapté à partir de composants systèmes existants.	il est entièrement construit comme un nouveau système ou un petit centre de données cloud
<i>Ressources consumer par rapport à cloud</i>	La consommation d'énergie du brouillard est inférieure à celle des services cloud, mais la surcharge est élevée par rapport au cloud.	Un réseau edge utilise moins de ressources que la surcharge initiale du cloud à créer est élevée par rapport au cloud.
<i>contrôle du cloud</i>	La consommation d'énergie du brouillard est inférieure à celle des services cloud, mais la surcharge est élevée par rapport au cloud.	serveur edge utilisant les technologies cloud et la virtualisation utilisée pour contrôler les composants edge.

<i>Contrôle d'opérateur de réseaux</i>	il peut ne pas être contrôlé par les opérateurs de réseau et il utilise une distribution personnalisée.	Permet aux opérateurs de réseaux mobiles d'améliorer les services existants avec edge.
--	---	--

Tableau 1-2 la différence entre edge computing et fog computing [12]

1.4. Mobile Edge Computing

1.4.1. Définition

Selon l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI), le Mobile Edge Computing (MEC) est défini comme : "Le MEC offre un environnement de services informatiques et des capacités de cloud computing à la périphérie du réseau mobile, au sein du réseau d'accès radio (RAN) et à proximité des abonnés mobiles." C'est un nouveau paradigme de réseau qui offre des capacités d'infonuagique au sein du réseau d'accès radio. En permettant le trafic mobile direct entre le réseau central et l'utilisateur final. Un MEC connecte l'utilisateur directement au réseau de périphérie du service infonuagique le plus proche. Le déploiement de MEC à la station de base améliore le calcul, évite les goulots d'étranglement et les défaillances du système.

1.4.2. Les caractéristiques de Mobile Edge Computing

Selon le livre blanc publié par l'ETSI, mobile edge computing peut être caractérisée par :

Sur place

Le MEC fonctionne dans des ségrégations qui améliorent ses performances dans un environnement machine à machine. La propriété de ségrégation de MEC par rapport à un autre réseau la rend également moins vulnérable.

Proximité

Le MEC déployée au plus proche, a l'avantage d'analyser et de matérialiser le Big Data. Il est également bénéfique pour les appareils avides de calcul, tels que l'analytique vidéo

Latence réduite

Les services mobile edge computing de sont déployés à l'emplacement le plus proche des dispositifs utilisateurs qui isolent les mouvements de données réseau du réseau central. Par conséquent, l'expérience utilisateur est comptabilisée de haute qualité avec une latence ultra-faible et une bande passante élevée.

Connaissance de l'emplacement

Les dispositifs distribués en bordure utilisent la signalisation de bas niveau pour le partage d'information. MEC reçoit de l'information des périphériques du réseau d'accès local pour connaître l'emplacement de l'appareil.

Information sur le contexte de réseau

Les applications qui fournissent de l'information et des services sur le réseau de données en temps réel peuvent profiter aux entreprises et aux événements en intégrant MEC à leur modèle d'affaires. Sur la base des informations RAN en temps réel, ces applications peuvent juger de la congestion de la cellule radio et de la bande passante du réseau qui, à l'avenir, les aider à prendre une décision intelligente pour une meilleure livraison des clients.

1.4.3. Architectures mobile edge computing

1.4.3.1. Architecture a trois couche

Un réseau MEC est une couche qui se situe entre le Cloud et les appareils mobiles. Par conséquent, l'infrastructure est dérivée sous forme de hiérarchie à trois couches : Cloud, MEC et les appareils mobiles. Ce MEC est principalement conforme à la capacité du CC pour soutenir et améliorer les performances des appareils finaux. La figure 2 illustre la formation d'un modèle de service à trois couches.

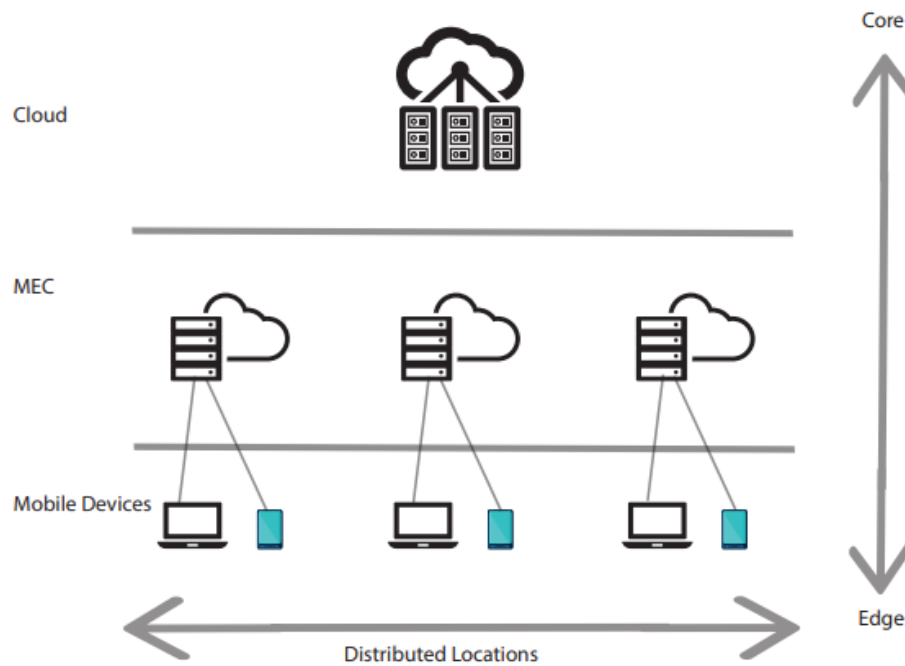


Figure 1-2 Architecture a trois couches [13]

Comme illustré, les appareils mobiles sont connectés au réseau central par le réseau périphérique, c.-à-d. le réseau d'accès radio et le MEC, et le réseau central est connecté au réseau infonuagique. Avec l'évolution de la RAN basée sur LTE, il est devenu plus faisable de déployer MEC qui apportent des services en nuage près des abonnés mobiles

L'architecture générale de mobile edge computing est illustrée à la figure 3. Un MEC constitue des serveurs géo distribués ou des serveurs virtuels avec des services IT intégrés. Ces serveurs sont mis en œuvre localement dans les locaux des utilisateurs mobiles par exemple parcs, terminaux d'autobus, centres commerciaux, etc. Le MEC peut utiliser des éléments de réseau cellulaire, comme une station de base, un point d'accès Wi-Fi ou un point d'accès femto (exemple une station de base cellulaire à faible puissance). Ainsi, il peut être déployé à un emplacement fixe, par exemple, dans un centre commercial ou un appareil mobile situé dans un objet en mouvement, une voiture, un autobus, etc. Le MEC peut être également déployé à la station de base LTE (eNodeB) ou au site d'agrégation de cellules multi technologies (3G/LTE). Le site d'agrégation de cellules multi-technologies peut être à l'intérieur ou à l'extérieur. Pour pousser l'intelligence dans les stations de base et optimiser efficacement les services RAN, la technologie mobile edge computing développe un écosystème énergétique et

une nouvelle chaîne de valeur qui permet des services intelligents et intelligents à proximité des abonnés mobiles.

En résumé, la proposition de valeur clé de MEC est qu'elle offre Cloud Computing en poussant les ressources en Cloud, comme le calcul, le réseau et le stockage à la périphérie du réseau mobile afin de répondre aux exigences des applications avides de calcul (par exemple les applications de jeux), sensibles à la latence (par exemple applications de réalité augmentée) et bande passante exigeante (par exemple analyse des Big Data mobiles).

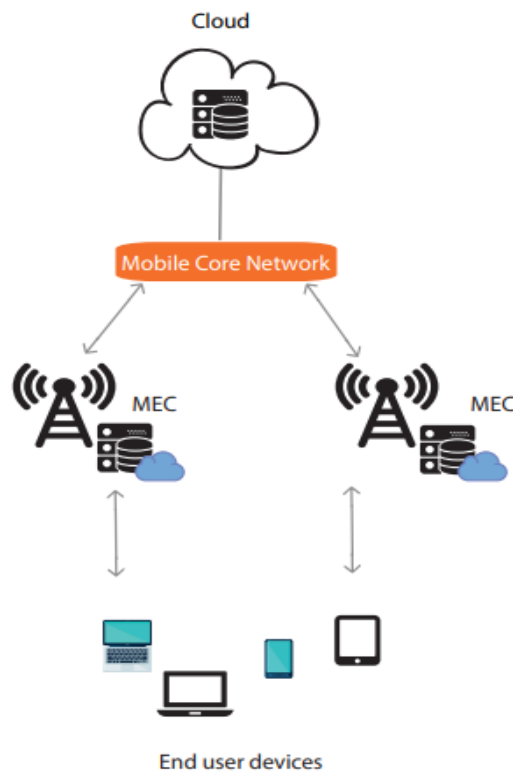


Figure 1-3 l'architecture de MEC [14]

1.4.3.2. Computation Offloading

Le déchargement informatique est un processus de migration des tâches informatiques vers des sources externes, telles que le Cloud, la grille ou le cluster [10]. Computation offloading est une solution pour améliorer la capacité des appareils mobiles en transférant le calcul à des serveurs plus ingénieux situés à l'emplacement externe [11].

L'émergence d'applications exigeantes en ressources, comme les jeux 3D, continuera d'exiger davantage de ressources mobiles. L'amélioration du matériel et du réseau mobile ne permettra toujours pas de faire face à la tendance de la demande. Par conséquent, les appareils mobiles devront toujours faire des compromis avec leurs ressources limitées, comme le matériel de *Resourcepoor*, les connexions non sécurisées et les tâches informatiques axées sur l'énergie. Par exemple, l'édition de clips vidéo sur téléphone mobile nécessite une grande quantité d'énergie et de calcul qui est obtenu avec une certaine limitation par rapport à l'ordinateur de bureau ou portable. Pour faire face à ces contraintes, de nombreux chercheurs ont réussi à décharger le calcul sur les ressources de puissance de calcul, comme le Cloud.

1.4.4. Principaux facilitateurs de MEC

Les nouvelles tendances MEC introduisent plusieurs possibilités pour la virtualisation des fonctions réseau (NFV), les réseaux définis par logiciel et les réseaux sans fil de cinquième génération.

Virtualisation des fonctions réseau

La virtualisation des fonctions réseau permet de virtualiser l'environnement des services réseau lancés par le matériel dédié. Le but de NFV est de déplacer les fonctions réseau des périphériques matériels dédiés vers des serveurs génériques. NFV est livré avec plusieurs attributs bénéfiques, tels que la flexibilité, la rentabilité, l'évolutivité et la sécurité. En fonction de l'évolution de la demande, la NFV permet un accès flexible aux opérateurs et aux prestataires de services pour y étendre les services. La virtualisation des périphériques réseau installés à la périphérie du réseau sera bénéfique pour les utilisateurs finaux en intégrant MEC dans l'environnement virtualisé.

Software Defined Network(SDN)

Software Defined Network (SDN) est une innovation au réseau informatique qui sépare la couche de contrôle et la couche de données [12]. La couche de données contient les messages générés par l'utilisateur et est responsable de les transmettre à l'aide des tables de transmission préparées par la couche de contrôle [13]. Ceci est géré par un système de contrôle centralisé. Le concept MEC et le SDN peuvent rendre le contrôle

centralisé plus efficace et fiable, par exemple, dans la connectivité véhicule-véhicule, le ratio de perte de paquets peut être résolu.

Réseau sans fil de cinquième génération

Le système sans fil de 5eme génération sera le prochain standard de communication qui sera probablement plus rapide et plus fiable que les réseaux 4G. La 5G et le MEC peuvent offrir une meilleure expérience utilisateur. La MEC à la périphérie du réseau fournira des services pour le traitement et l'acheminement du trafic complexe. L'architecture principale de la 5G reposera sur les technologies de pointe. D'autres possibilités comprennent la diffusion vidéo en direct et l'internet des objets.

Live vidéo streaming

Live Vidéo Streaming comme la télévision en direct ou la conférence en direct sur les appareils mobiles nécessite une bande passante élevée et une latence ultra faible. Ce flux de données crée un trafic énorme qui stresse le réseau mobile. De plus, un important mouvement de données sur le réseau fait référence à une interruption de service ou à un déni de service. . Puisque Live Vidéo Streaming est l'un des principaux objectifs des réseaux 5G, MEC jouera un rôle majeur pour le streaming vidéo en poussant l'intelligence au bord du réseau près de l'utilisateur final.

Internet des objets (IoT)

L'IoT est une technologie émergente dans laquelle les objets physiques communiquent entre eux principalement par Internet. Ces objets physiques nécessitent une transmission rapide des données et une puissance de calcul élevée afin de conserver l'intégrité des données. L'IoT peut largement bénéficier de la technologie MEC et offrir de meilleurs services.

1.4.5. Besoin d'un serveurs MEC

	Sans le serveur Mobile Edge Computing	Avec le serveur Mobile Edge Computing
Optimisation de contenu	L'optimisation traditionnelle du contenu est effectuée pour satisfaire les attentes des utilisateurs. Il utilise l'historique Web de l'utilisateur stocké dans la base de données	L'optimiseur de contenu peut être hébergé sur les serveurs MEC afin d'améliorer la performance du réseau, la qualité de l'expérience et l'ajout de nouveaux services.
Déchargement et agrégation	Le calcul traditionnel à haute tension comme le déchargement et l'agrégation ne peut pas être effectué dans l'appareil. Afin de résoudre ce problème, les applications sont divisées en petites tâches et effectuées au sein du réseau central	Décharger les tâches sur le serveur périphérique sans transférer les tâches sur le réseau central réduira certainement la latence.
Analyse de Big data	Le processus de collecte de données à partir des périphériques et de transfert vers le réseau central prend une large bande passante et une latence élevée..	Mobile Edge Computing serveur peut effectuer l'analyse de Big data processus et après l'analyse, les résultats peuvent être envoyés au réseau central. Par conséquent, la réduction de la consommation de bande passante et l'amélioration de la latence

Tableau 1-2 Les besoins potentiels d'un serveur MEC [15]

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, d'une manière générale, les concepts de base de certaines généralités de l'Edge Computing, Fog computing et Mobile Edge Computing. Tout d'abord, nous avons présenté le paradigme Edge Computing avec ses architectures, ses caractéristiques et ses différents domaines d'applications. Puis, nous mentionnant une comparative clé entre les environnements Edge et Fog. Enfin, nous avons présenté les architectures Mobile Edge Computing (MEC), ses applications de déchargement et les besoins essentiel de mise en œuvre d'un réseau Edge.

Notre objectif est de proposer une architecture MEC basé SDN pour les applications de déchargement qui sont sensible au délai dans les environnements Edge et Fog Computing. Dans le chapitre suivant, nous essayons décrire les différentes architectures MEC basé SDN. Ainsi que les techniques et les approches de déchargement de ces applications dans un environnement MEC

CHAPITRE 02

Les architectures SDN pour le contrôle du
trafic réseau

2.1. Introduction

Depuis plusieurs années, les solutions SDN (*Software-Defined Networking*) sont présentées comme l'avenir du déploiement d'infrastructures réseaux, plus souples, plus évolutives car il permet aux applications d'interagir directement avec les réseaux, avec une coopération à double sens : l'application informe le réseau du comportement désiré, le réseau informe les applications de ses capacités. Qu'est-ce que le SDN ? Qu'est-ce qu'OpenFlow ?

Ce chapitre décrit dans un premier temps l'architecture SDN et ces avantages puis nous allons présenter l'architecture openflow, quelques contrôleurs SDN et les cas d'utilisations du SDN

2.2. Définition de l'architecture SDN

Le SDN signifie littéralement Software Defined Networking, est un nouveau paradigme qui décrit une architecture réseau dont le plan de contrôle est totalement séparé du plan de données, comme montre la figure 2-1

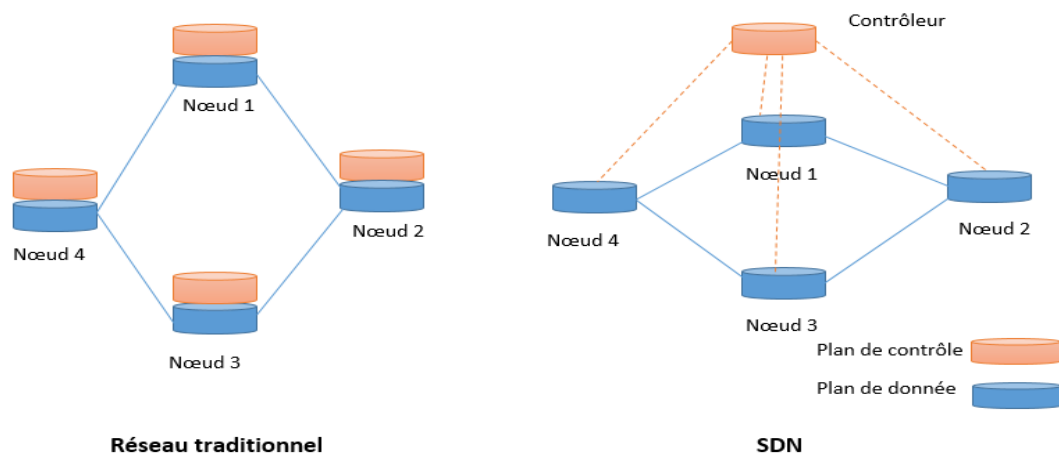


Figure 2-1 réseau traditionnel et SDN

Selon L'ONF [16] le SDN est une architecture qui sépare le plan de contrôle du plan de données, et unifie les plans de contrôle de plusieurs périphériques dans un seul software de contrôle externe appelé « Contrôleur », qui voit le réseau dans sa totalité pour gérer

l'infrastructure via des interfaces de communications appelées APIs. Le contrôleur en question fait abstraction de la couche physique pour les applications qui communiquent en langage développeur, permettant la programmation du réseau.

On peut dire qu'une architecture réseau suit le paradigme SDN si, et seulement si, elle vérifie les points suivants :

- Séparation le plan de données du plan de contrôle.
- Périphériques simplifiés.
- Contrôle centralisé
- Automatisation du réseau et virtualisation
- Open source.

2.3. L'architecture SDN

L'architecture SDN permet de découpler totalement le plan de contrôle du plan de donnée cela est illustré par la figure2-2

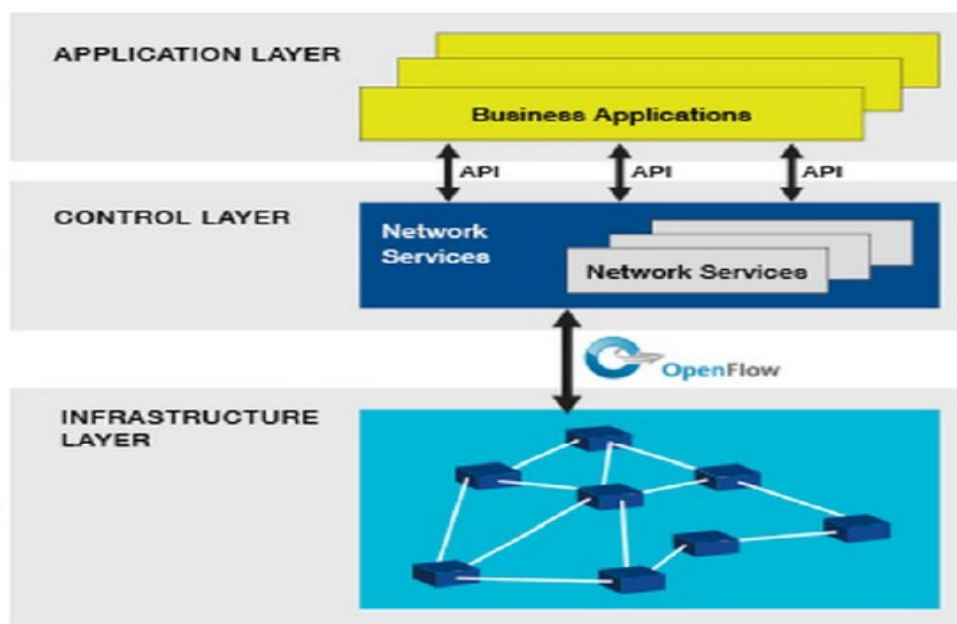


Figure 2-2 l'architecture SDN [17]

Le SDN est composé principalement de trois couches et d'interfaces de communication, nous décrivons dans ce qui suit ces couches, ainsi que les interfaces de communications [18] : (Figure 2-2)

- **La couche de transmission** : appelée aussi « plan de données », elle est composée des équipements d'acheminement tels que les switches ou les

routeurs, son rôle principal est de transmettre les données, et collecter les statistiques

- **-La couche de contrôle** : appelée aussi « plan de contrôle », elle est constituée principalement d'un ou plusieurs contrôleurs SDN, son rôle est de contrôler et de gérer les équipements de l'infrastructure à travers une interface appelée 'south-bound API'.
- **La couche application** : représente les applications qui permettent de déployer de nouvelles fonctionnalités réseau, comme l'ingénierie de trafic, QoS, la sécurité, etc. Ces applications sont construites moyennant une interface de programmation appelée 'north-bound API'

L'architecture SDN est donc définie par trois abstractions [19]

- **L'abstraction de transmission** : Permet aux applications de programmer et de prendre les décisions concernant le réseau sans pour autant connaître les détails de l'infrastructure physique. Ceci est achevé à travers l'usage de protocoles ouvert et standardisé pour la communication avec les équipements réseau.
- **L'abstraction de distribution** : Elle est implémentée par le contrôleur et est essentiellement responsable de deux tâches. La première est d'insérer les règles de transfert dans les switches. La seconde est de récupérer les informations de la couche inférieure, pour informer les applications de l'état de celle-ci, pour pouvoir former une vue globale du réseau
- **L'abstraction de spécification** : Permet aux applications d'exprimer le comportement désiré du réseau sans en être directement responsable

2.4. Interface de communication

Il existe principalement trois types d'interfaces qui permettent aux contrôleurs de communiquer avec leur environnement : interface Sud, Nord et Est/Ouest.

- **Interfaces Sud**

Ce sont les interfaces (South-bound) qui permettent le processus de communication entre le contrôleur et les switches/routeurs et autres éléments de la couche infrastructure réseau. C'est par le biais de cette interface et notamment le protocole Openflow dans le cas du standard Open SDN [16], que le contrôleur injecte les différentes politiques aux équipements, et récupère les informations permettant aux applications de construire une vue globale du réseau [20].

- **Interfaces Nord**

Les interfaces Nord servent à programmer les équipements de transmission, en exploitant l'abstraction du réseau fourni par le plan de contrôle. Il est noté que contrairement à la Southbound API qui a été standardisé, l'avantage d'une API nord ouverte est aussi important, une API nord ouverte permet plus d'innovation et d'expérimentation. Plusieurs implémentations de cette interface existent, chaque une de ces implémentations offre des fonctionnalités bien différents. Le RESTful considéré comme l'API nord le plus répandue dans les réseaux SDN.

- **Interfaces Est/Ouest**

Les interfaces Est/Ouest sont des interfaces de communication qui permettent la communication entre les contrôleurs dans une architecture multi-contrôleurs pour synchroniser l'état du réseau. Ces architectures sont très récentes et aucun standard de communication inter-contrôleur n'est actuellement disponible.

2.5. Les avantages SDN

INET Framework est une

- **Réseaux programmables**

Avec SDN, il est plus simple de modifier les stratégies réseau car il suffit de changer une politique de haut niveau et non de multiples règles dans divers équipements de réseau [21].

- **Flexibilité**

SDN apporte également une grande flexibilité dans la gestion du réseau. Il devient facile de rediriger le trafic, d'inspecter des flux particuliers ou découvrir des flux inattendus et de tester de nouvelles stratégies [21].

- **Politique unifiée**

Avec son contrôleur, SDN garantit également une politique réseau unifiée et à jour, puisque le contrôleur est responsable de l'ajout de règles dans les commutateurs, il n'y a aucun risque qu'un administrateur de réseau ait oublié un commutateur ou installé des règles incohérentes entre les dispositifs. En effet, l'administrateur va simplement spécifier une nouvelle règle et le contrôleur adaptera la configuration pour envoyer des règles cohérentes dans chaque dispositif pertinent [21].

- Routage

SDN peut également être utilisé pour gérer les informations de routage de manière centralisée en déléguant le routage et en utilisant une interface pour le contrôleur [21].

- Gestion du Cloud

SDN permet également une gestion simple d'une plateforme cloud. En effet, la dynamique apportée par SDN traite des problèmes spécifiques aux clouds tels que l'évolutivité, l'adaptation, ou des mouvements de machines virtuelles [21].

- Simplification matérielle

SDN a tendance d'utiliser des technologies standard et de base pour contrôler les équipements du réseau, tandis que la puissance de calcul n'est requise qu'au niveau du contrôleur. Ainsi, les équipements de réseau deviendront des produits à bas prix offrant des interfaces standard [21]. Avec ce type de matériel, il serait également simple d'ajouter de nouveaux périphériques, puisqu'ils ne sont pas spécialisés, de les connecter au réseau et de laisser le contrôleur les gérer conformément à la politique définie. Ainsi, le réseau devient facilement évolutif dès que le contrôleur est évolutif [21].

2.6. Le protocole Openflow dans l'architecture SDN

Openflow est le protocole utilisé pour la communication entre la couche transmission et la couche de contrôle, il a été initialement proposé et implémenté par l'université de Stanford, et standardisé par la suite par l'ONF [16].

Nous détaillons par la suite la structure d'openflow, son fonctionnement, ses différentes spécifications, ainsi que quelques contrôleurs openflow.

2.6.1 Architecture de protocole Openflow

L'architecture openflow est l'implémentation réelle des réseaux SDN, Cette architecture est basée principalement sur trois composantes : le plan de données, qui est composée des switches openflow ; le plan de contrôle, constitué par des contrôleurs OpenFlow ; une chaîne sécurisée qui permettent aux commutateurs de se connecter au plan de contrôle

2.6.2 Les messages Openflow

Tous les messages sont initiés par l'entête OpenFlow qui définit la longueur, l'identificateur de transaction et le type de message. Connaissant l'adresse IP du Contrôleur, le commutateur initie une connexion TLS avec le commutateur, ces messages sont sécurisés et assurés par une connexion TLS sur TCP. On trouve trois catégories de message (symétrique, asymétrique, et Contrôleur-commutateur) [16].

2.6.2.1 Messages contrôleurs-commutateurs

Ces messages servent à vérifier l'état du switch et gérer et vérifier son état et peuvent demander des réponses de la part du switch [22]. Ces messages sont initiés par le Contrôleur.

On trouve trois catégories de message (symétrique, asymétrique, et Contrôleur-commutateur) [16].

- Features : le contrôleur peut demander l'identité et les capacités d'un switch cela se passe en envoyant une requête.
- Modify-state : ce type de message permet de gérer l'état des switches ; ils permettent de modifier ou ajouter, effacer les entrées dans les tables openflow.
- Configuration : le contrôleur peut définir les paramètres de configuration du switch. Ce dernier répond aux requêtes envoyés par le contrôleur.
- Read-state : le contrôleur utilise ces messages pour collecter différentes informations du switch, tel que les statistiques, les capacités et sa configuration actuelle.
- Packet-out : ces messages sont utilisés pour le transfert de paquets reçus par les messages Packet-in. Le message doit contenir un paquet entier ou l'ID du buffer faisant référence à un paquet stocké dans le switch. Si la liste d'actions du message est vide le paquet sera détruit.
- Barrier : utilisé par le contrôleur pour recevoir des notifications de l'opération terminée.

2.6.2.2 Messages asymétriques

Les messages asymétriques sont envoyés par le switch vers le contrôleur pour indiquer un changement d'état ou l'arrivée d'un paquet [22], Ces messages sont :

- Packet-in : avec ce message le switch transfère le contrôle du paquet au contrôleur.

- Flow-removed : le switch informe le contrôleur de la suppression d'une entrée dans la table du flux.
- Port-status : avec ce message le switch informe le contrôleur d'un changement sur un port.
- Role-status : quand un nouveau contrôleur est aux commandes, le switch envoie un Role-status à son contrôleur

2.6.2.3 Messages symétriques

Les messages symétriques sont envoyés sans aucune sollicitation ni du switch ni du contrôleur. Ces messages sont :

- Hello : envoyer pour vérifier la connectivité entre le contrôleur et le switch.
- Echo : une fois la connexion établie ces messages sont échangés entre le contrôleur et le switch. Chaque message ECHO_REQUEST doit être acquitté par un ECHO_REPLY.
- Error : utilisé par le contrôleur et le switch pour signaler un problème de connexion.

2.7. Quelques contrôleurs SDN

Le contrôleur SDN permet d'implémenter un changement sur le réseau en traduisant une demande globale en une suite d'opérations sur les équipements réseau (ajouts d'états Openflow, configuration en CLI les ordres sont donnés au contrôleur par une application via une API dite « **Northbound** » ou nord. . Le contrôleur communique avec les équipements via une ou plusieurs API dites « **Southbound** » ou sud. Openflow se positionne comme une API sud agissant directement sur le plan de données [17], il existe plusieurs contrôleurs SDN, tel que :

- **NOX**
Initialement développé chez Nicira, NOX est le premier contrôleur OpenFlow. C'est Open-source et écrit en C ++ . Il est actuellement à la baisse: il n'y a pas eu de changements majeurs depuis mi 2012 [21].
- **POX**
POX est le plus jeune frère de NOX . C'est un contrôleur open-source écrit en Python, et comme NOX, fournit un cadre pour le développement et le test d'un contrôleur OpenFlow, mais les performances POX sont nettement inférieures à

celles des autres contrôleurs et ne convient donc pas au déploiement d'entreprise [21].

- **Beacon**

Beacon est un contrôleur Java connu par sa stabilité. Il a été créé en 2010 et est toujours maintenu, il a été utilisé dans plusieurs projets de recherche. En raison de ses performances, c'est une solution fiable pour l'utilisation dans des conditions réelles. Ce contrôleur a également été utilisé dans d'autres projets tels que Floodlight ou OpenDaylight [21]

- **Floodlight**

Floodlight est un contrôleur open-source OpenFlow basé sur Java, pris en charge par BigSwitch Networks. Il est sous licence Apache [23]. Il est facile à configurer et à montrer aussi de grandes performances. Avec toutes ses fonctionnalités, Floodlight est plus une solution complète [21].

- **OpenDaylight**

OpenDaylight est un projet de la Fondation Linux pris en charge par l'industrie. C'est Un framework open source pour faciliter l'accès au logiciel de définition de réseau (SDN). Comme Floodlight, il peut également être Considéré comme une solution complète [21].

2.8. Cas d'utilisation SDN

Le marché du SDN est en constante évolution depuis son apparition sur la scène mondiale en 2011, et ceci grâce aux nombreux avantages apportés par la technologie dans les différents domaines. Ce qui fait que les cas d'utilisations sont très variés et s'étendent sur toutes les parties du réseau.

- **QoS sur internet**

Internet a toujours été une architecture qui ne garantit pas la stabilité, or les services nouvelle génération de streaming vidéo, VoD ou autre Visioconférence sont très peu tolérant des délais et erreurs de transmissions et nécessitent donc un réseau stable pour l'acheminement des paquets. En se basant sur la vue centralisée du réseau offerte par SDN, on peut sélectionner selon le débit, des chemins différents pour les divers flux de trafic. C'est à partir de là qu'est né le concept du

VSDN (Video over SDN), une architecture qui détermine le chemin optimale en se basant sur la vue globale qu'offre la centralisation de contrôle [24]

- **Data center**

Oracle SDN est un exemple de système qui fournit un réseau virtualisé du data center. Ce système relie dynamiquement des machines virtuelles avec les serveurs de réseau. À l'aide de l'interface du gestionnaire d'Oracle Fabric, la configuration et la surveillance de réseau virtuel est possible en tout lieu, et le déploiement de nouveaux services comme le pare-feu, l'équilibrage de charge et le routage devient à la demande. Selon Oracle, leur proposition augmente de 30 fois les performances des applications, et peut faire gagner un débit de serveur à serveur de 80 Gb/s .

- **Réseaux mobiles :**

Avec l'avènement imminent de la 5G, les opérateurs se doivent d'optimiser leur infrastructure de sorte à pouvoir gérer des masses de données de plus en plus importantes tout en assurant la qualité de service qui accompagne une telle technologie. Le SDN est une des pièces maitresses qui permettront aux opérateurs d'exploiter le potentiel de l'infrastructure et permettre d'optimiser les débits au maximum tout en gardant une importante visibilité sur le comportement de leurs équipements réseau. Une architecture appelée CSDN (Cellular SDN) a été proposée par [26] c'est une approche qui utilise les concepts SDN pour une exploitation dynamique et centralisé des ressources, elle collecte les données des utilisateurs et les conditions du réseau, et les fait remonter au contrôleur afin d'optimiser la consommation d'énergie, l'utilisation des ressources et la personnalisation des services aux utilisateurs

- **Sécurité**

La nature dynamique de SDN a été exploitée par un groupe de chercheurs [27] qui ont réussi à réduire de 99% le risque de récupération d'information par un analyseur de paquet externe. Leur approche s'est basé sur une mutation aléatoire et assez fréquente de l'adresse IP de l'hôte

Des propositions ont été faites et notamment des mécanismes pour contrer les attaques de déni de service (DDoS), Dans l'architecture suggérée, deux éléments clés ont été exploités : Les IDS pour la détection d'intrusions intra-LAN et les switchs Openflow pour l'isolation dynamique des équipements infectés [28].

- **Réseau de campus et d'entreprise**

Les dernières années ont été marquées par un changement radical de la perception des équipements de travail en entreprise et dans les campus universitaires. En effet la mode BYOD (Bring Your Own Device), où chaque employée et étudiant utilise son propre matériel sur le campus, ce qui nous pousse à repenser le réseau pour y infuser un souffle de flexibilité sans lequel l'administrateur du réseau est très vite pris de court par la quantité de trafic à gérer manuellement et par les opérations manuelles qui pourraient permettre de connecter tous les utilisateurs à internet par exemple. Le SDN dont l'un des avantages est l'automatisation et la programmation des réseaux nous apparaît comme une évidence pour combler les lacunes des réseaux de campus qui deviennent de plus en plus complexes. Une des applications les plus intéressantes pour les campus au-delà de la virtualisation, est la programmation d'un réseau conscient d'applications (Application aware routing). Le nombre d'applications tournant sur les équipements des utilisateurs est considérable (Réseaux sociaux, streaming audio et vidéo ...), ce qui conduit dans la plupart des cas à une surcharge sur le réseau et peut induire une latence sur les applications déployés dans un but business ou académique. SDN permet de gérer ces applications en introduisant des priorités pour les différentes applications et en installant un équilibreur de charge (Load Balancer), éliminant ainsi toute forme de congestion, ce qui offre aux professionnels et étudiants un environnement de travail fluide.

Le réseau d'accès radio (RAN) fait partie de l'infrastructure du système de communication du réseau cellulaire qui facilite la connexion entre le téléphone mobile ou toute machine sans fil avec le réseau central mobile. Dans le système radio cellulaire traditionnel, les équipements d'utilisateur sans fil se connectent par RAN aux réseaux d'opérateurs mobiles. L'équipement utilisateur comprend les stations mobiles, les ordinateurs portables, etc. RAN couvre la vaste zone géographique qui est divisée en plusieurs cellules et chaque cellule est intégrée à sa station de base. Les stations de base sont généralement connectées les unes aux autres par micro-ondes ou des lignes terrestres au contrôleur de réseau radio (RNC) également connu sous le nom de contrôleur de station de base (BSC). La CMR est responsable de contrôler la station de base du nœud (BS du nœud) et d'exécuter certaines fonctions de gestion mobile. La plupart du cryptage est fait avant d'envoyer des données d'utilisateur au réseau de base.

Les RNCs sont connectés à un ou deux réseaux de retour. Les réseaux cellulaires sont devenus plus efficaces qu'auparavant, parce que la technologie LTE fournit des réseaux d'accès radio sans fil à haute vitesse avec une faible latence et une bande passante élevée. L'évolution de l'architecture système (SAE) du cœur RAN LTE est conforme aux réseaux hétérogènes et aux systèmes existants, tels que les interfaces aériennes du service radio général par paquets (GPRS) ou les télécommunications mobiles universelles (UMTS). L'UMTS est un système de troisième génération qui peut dépendre du système mondial de communication mobile (GSM) qui a été développé en Europe.

2.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni une vue générale sur SDN (Software Defined Networking), notamment les avantages et l'architecture de SDN. Ensuite nous avons présenté le protocole OpenFlow, son fonctionnement, et quelques contrôleurs SDN. Ensuite nous avons présenté quelques cas d'utilisations SDN.

CHAPITRE 03

Une Architecture de contrôle du trafic dans les
environnements MEC

3.1 Introduction

Nous avons discuté dans les chapitres précédents de l'importance de l'évolution de l'Internet des objets dans les environnements Edge Computing, ainsi que du potentiel du paradigme Mobile Edge Computing (MEC) pour améliorer la qualité de service (QoS) et la connectivité locale. Ces environnements sont sensibles aux performances du réseau (c'est-à-dire latence, retard, etc.) et souffrent de surcharge lorsque le trafic entrant ou demandé dépasse la capacité des canaux de transmission pour répondre aux exigences de communication en temps réel. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la satisfaction des demandes de communication en temps réel dans les environnements MEC et à l'amélioration de la qualité de service (QoS)). Pour cela, nous proposerons un système de contrôle du trafic réseau en temps réel pour les environnements intelligents.

3.2 Contexte du travail

3.2.1 La communication en temps réel

Les applications multimédia sensibles aux retards sont une classe d'applications émergentes, notamment la visioconférence, le streaming vidéo, le streaming de jeux et d'autres applications de trafic en temps réel qui s'exécutent sur un protocole de transmission réseau peu fiable appelé User Datagram Protocol (UDP).

Ce type d'application nécessite le calcul d'un délai aller-retour et d'une bande passante de transmission suffisante. De plus, le trafic multimédia quotidien est généralement classé en deux catégories, un trafic interactif étant sensible au temps réel (par exemple, Talk et Stream) et un trafic non interactif qui n'étant pas sensible au temps réel (transfert de fichiers et e-mail).

La classe d'application interactive ne nécessite pas beaucoup de bande passante mais ces applications sont très sensibles aux retards et à la perte de paquets. Ces applications reposent sur plusieurs types de communication nécessitant une fiabilité extrêmement élevée, un taux d'erreur de paquet très faible et une latence ultra-faible, car ils envoient des informations via le protocole TCP (Transmission Control Protocol), de sorte que le paquet de retransmission sera produit chaque fois que la destination aura perdu des paquets précédents. Cependant, il y a moins de restriction sur la latence de

communication et la bande passante. Dans les environnements de communication d'aujourd'hui, les transmissions d'applications interactives interactives et non interactives se feront dans la même infrastructure réseau avec une gestion dynamique des ressources pour répondre au besoin de QoS pour chaque classe de trafic.

3.2.2 Mobile Edge Computing

Des clouds locaux (MEC, fog computing) ont été introduits pour améliorer la QoS pour diverses applications réseau, en particulier pour les applications en temps réel. La présence de MEC établit des réseaux intelligents dans les espaces périphériques. Cette approche préserve une bande passante de communication plus élevée et fournit les types de communication requis pour la communication en temps réel. Pendant ce temps, MEC s'occupe de résoudre des problèmes de limitation de capacité alors qu'il est nécessaire d'offrir des services hétérogènes pour les calculs massifs. Certaines applications avec des exigences de ressources du calcul plus élevées sont nécessaires pour accéder au serveur à distance. De plus, la protection de la confidentialité pour le cloud sur site doit être prise en compte pour la sécurité des communications et l'intégrité des données. Les méthodes de mise en cache sont essentielles pour réduire la latence, obtenir une bande passante plus élevée et économiser des ressources pour le plan utilisateur et le plan de données. Plusieurs défis ont été introduits dans les scénarios MEC, tels que l'expansion de l'infrastructure, la consommation d'énergie, la gestion des ressources et les problèmes de sécurité. En raison du fait qu'une variété d'informations utilisateur sont stockées dans MEC dans un réseau de périphérie, cela nécessite des systèmes de contrôles intelligentes de communications dans les environnements Edge

3.2.3 Réseau edge intelligent défini par l'architecture SDN

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, une architecture SDN est une technologie de référence pour permettre la mise en réseau future pilotée par des solutions logicielles et des techniques de réseau intelligent. Une architecture SDN fournit une vue globale de l'état du réseau et l'état du système entièrement programmable au niveau du plan de contrôle. En outre, SDN est un concept de découplage d'un plan de transfert du plan de contrôle. En outre, SDN est un concept de découplage d'un plan de transfert du plan de contrôle. De plus, cette séparation gagne en commodité en termes de flexibilité et d'évolutivité, , tandis que le plan utilisateur

nécessite une bande passante plus élevée et le plan de contrôle nécessite une latence plus faible. Dans lequel, les applications Edge Computing à savoir, le routage, la surveillance, la planification, le contrôle des politiques, la sécurité et l'équilibrage de charge sont effectuées par le contrôleur SDN

3.3 Problématique

Le réseau de cinquième génération (5G) offre une vitesse de communication élevée, une fiabilité et un faible délai de bout en bout en millisecondes. Chaque couverture cellulaire de la station de base fournit un service local dans un rayon de 100 m, offrant une connectivité robuste, en temps réel, d'appareil à appareil et prend en charge la connexion d'appareils utilisateurs massifs également dans les cas des environnements sensibles tels que la vidéoconférence, le streaming, etc. Bien que la 5G offre une bande passante énorme et une très faible latence et prend en charge les futures applications utilisateur telles que le trafic réseau et le trafic de jeu. Cependant, la capacité est encore limitée dans la zone commune du réseau. Par conséquent, , cette région conserve la similitude avec le système de communication précédent qui peut résulter des problèmes de congestion du trafic et de ressources insuffisantes dans la zone de cette région. Actuellement, Mobile Edge Computing (MEC) et Software-Defined Network (SDN) sont des technologies nécessaires qui ont été impliqués pour surmonter les problèmes annoncés par le réseau 5G dans le but d'améliorer les performances du réseau et de bénéficier d'une réduction des coûts.

3.4 La contribution

Notre contribution consiste à proposer une architecture MEC permettant de réduire la surcharge du réseau en déchargeant les données localement dans un réseau Edge. En particulier, l'architecture proposée prend en charge un système intelligent de classification et de contrôle de trafic basé sur SDN entre les appareils IoT. L'objectif principal de cette classification est d'améliorer la QoS en classant les différents flux et en mettant en place un plan de données guidé par un ensemble des règles de contrôle. La figure suivante montre l'architecture MEC que nous proposons en intégrant les contrôleurs MEC avec les passerelles de liaison.

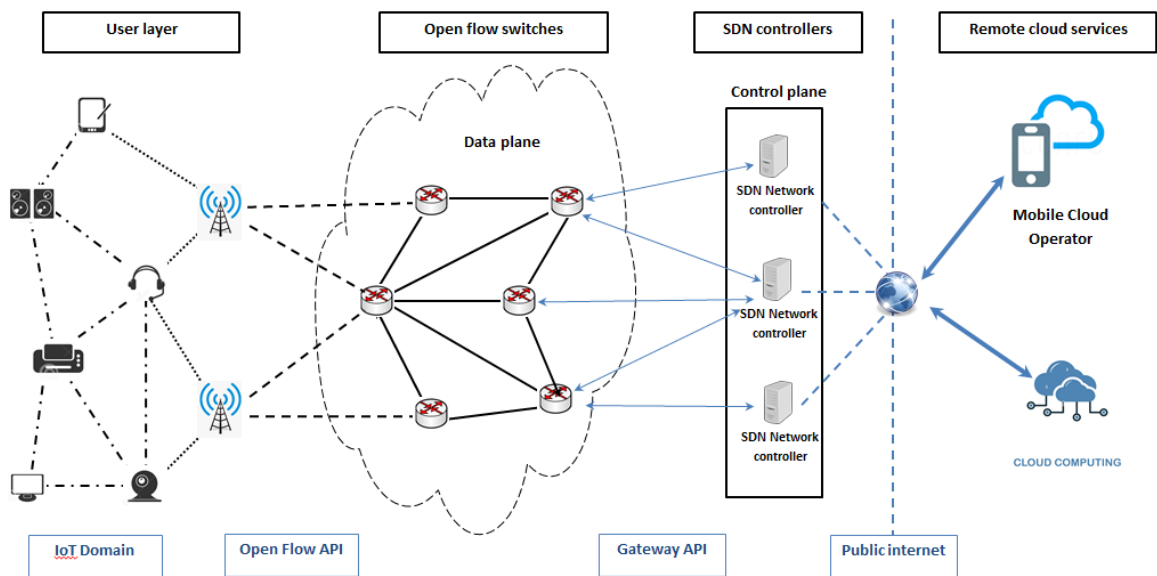


Figure 3-1 architecture de contrôle du trafic dans les environnements MEC

Dans cette architecture, nous décrivons une architecture de contrôles du trafic réseau sensible à la latence et les délais, elle décrit une structure hiérarchique en plusieurs couches et un aspect écosystème pour les environnements IoT. L'objectifs de chaque couche SDN vise à optimiser les performances des applications multimédia sensible au délai et en améliorant la gestion des ressources des dispositifs IoT. L'architecture en couches est organisée en quatre couches distinctes, à savoir la couche des dispositifs IoT, la couche DSN, la couche de contrôle et la couche Cloud traditionnel.

La couche IoT décrit un environnement Pervasif contient plusieurs capteurs et dispositifs IoT qui sont responsables de la détection des données en temps réel et de les transmettre à la sous-couche supérieur via un réseau mobile cellulaire. Ce dernier vise à sélectionner un ensemble des antennes avec une large bande passante. Contextuellement, les dispositifs de transfert IoT (par exemple, les commutateurs, les routeurs, les téléphones, les dispositifs de stockage, etc.) fournissent les données des capteurs aux nœuds connectés directement aux réseaux cellulaire. Ce processus est contrôlé par des stations de base proches au réseau Edge pour transférer finalement toutes les informations des capteurs à l'environnement SDN.

3.4.1 Déploiement des architectures Edge

Dans cette architecture et pour préserver des bonnes performances, l'emplacement des serveurs Edge est un grand enjeu. Un processus de mise en œuvre de l'infrastructure MEC appropriée est alors requis. Dans ce but, il faut que :

- L'emplacement des serveurs doit maximiser l'utilisation des ressources de calcul pour chaque nœud Edge.
- Fournir des services fiables en temps réel efficaces en termes de délai et de latence
- Garantir la qualité de l'expérience pour les utilisateurs mobiles.

Pour ce faire, nous avons identifié trois étapes pour implanter l'infrastructure MEC.

3.4.2 La prédiction de la charge du travail

Si en supposant qu'aucune infrastructure MEC existante n'est déjà déployée à côté de la station de base (BS). Dans ce cas-là, on peut construire une infrastructure MEC en se basant sur des prévisions de charge de travail d'un trafic mobile dans chaque emplacement du BS. Par exemple, le trafic mobile massif reçu à des emplacements BS spécifiques peut augmenter la congestion du réseau sur le Cloud et avoir un impact négatif sur les performances du réseau. Le déploiement d'une infrastructure MEC localisée dans les zones BS à fort trafic peut bénéficier aux fournisseurs de Cloud conventionnels, aux opérateurs de base mobiles et aux fournisseurs de services Internet.

3.4.2.1 L'interaction et la gestion dynamique des ressources

L'architecture MEC interagit avec les utilisateurs finaux mobiles et définit comment elle gère les ressources pour satisfaire leurs demandes accrue. Ceci nécessite un processus de gestion efficace qui pourrait être décrit comme le moyen de décider où la ressource informatique MEC pour chaque utilisateur doit être exécutée, quelle quantité de chaque ressource est nécessaire et quelles ressources doivent être allouées, en tenant compte :

- L'imprévisibilité du comportement de mobilité des utilisateurs.
- Les propriétés dynamiques du réseau.

3.4.2.2 La gestion de la qualité de services

Le routage dans notre architecture MEC doit être optimisé pour répondre à la demande de performances des applications multimédia interactives. Une telle application doit utiliser efficacement ses ressources mobiles ainsi que l'ensemble de ressources agrégées au niveau de l'infrastructure Edge. À ce stade, il est essentiel d'identifier les paramètres de QoS à optimiser pour chaque type d'application, y compris les paramètres globale de réseau à savoir la bande passante et le temps d'attentes.

Pour mettre en œuvre avec une infrastructure MEC efficace dans les environnements Edge , nous prévoit ces étapes:

Etape 1 : Estimez la charge du trafic mobile reçu des utilisateurs finaux mobiles à un emplacement spécifique.

Etape 2 : Virtualiser automatiquement l'infrastructure MEC en utilisant service de réseau virtualisé (VNF).

Phase 3: Installez le cadre MEC à l'aide de matériel et de logiciels supplémentaires pour la gestion des ressources MEC et fournissez une décision de mise à l'échelle VNF.

Phase 4 : Optimiser la QoS fournit par l'infrastructure MEC en utilisant les plans contrôles réseau.

3.5 Les plans de contrôle

Les contrôleurs MEC agissent comme un serveur de mise en cache qui met en mémoire tampon le trafic entrant, tel que les conversations, le streaming, les communications interactives et en arrière-plan. Comme mentionné précédemment, le schéma proposé comprend trois étapes, à savoir la classification du trafic, la mise en cache et le contrôle du trafic classifié.

- *La classification du trafic et mise en cache MEC* décrit un découpage en tranches du réseau est appelé le fractionnement du trafic utilisateur en 2 tranches différentes telles que la tranche 1 pour le Streaming, la tranche la tranche 2 pour la communication en arrière-plan.

- Le processus de classification était basé sur chaque caractéristique de trafic, telle que le taux d'erreur sur les paquets, la taille de l'unité de données de protocole et d'autres paramètres QoS. Chaque tranche de trafic a été mise en cache dans différents pools MEC, et chaque pool MEC fournit les ressources de mémoire tampon pour mettre en file d'attente le trafic entrant en attente de service. Le découpage du trafic peut être effectué en utilisant la méthode d'apprentissage automatique K-mean,. Commencez par le nombre déterminant de groupes $K = 2$, puis calculez le centroïde. Pour la première fois, le centroïde doit sélectionner 2 sous-ensembles différents en 2 classes au hasard. Dans l'étape suivante, la distance doit être calculée pour chaque classe.
- Les contrôleurs MEC ont été intégrés dans la passerelle de liaison pour servir de tampons pour les trois classes de trafic, de sorte que chaque classe de trafic a son serveur MEC individuel.

3.6 l'environnement de travail

Mininet

Mininet est un émulateur de réseau qui crée un réseau d'hôtes virtuels, de commutateurs, de contrôleurs et de liens. Les hôtes Mininet exécutent un logiciel réseau Linux standard, et ses commutateurs prennent en charge OpenFlow pour un routage personnalisé hautement flexible et un réseau défini par logiciel.

Mininet 2.2.2

Mininet 2.2.2 is primarily a compatibility and bug fix release for Mininet 2.2.1.

Release Announcement:

<http://mininet.org/blog/2017/03/17/announcing-mininet-2-2-2/>

Release Notes:

<https://github.com/mininet/mininet/wiki/Mininet-2.2.2-Release-Notes>

Download and upgrade instructions:

<http://mininet.org/download>

Figure 3-2 version de mininet

Mininet combine plusieurs des meilleures fonctionnalités des émulateurs, des bancs d'essai matériels et des simulateurs.

Les caractéristiques de mininet

Par rapport aux approches basées sur la virtualisation complète du système, Mininet :

- Bottes plus rapides : secondes au lieu de minutes
- Échelles plus grandes : des centaines d'hôtes et de commutateurs par rapport à un chiffre
- Offre plus de bande passante : typiquement 2Gbps de bande passante totale sur un matériel modeste
- S'installe facilement : une VM préemballée est disponible et s'exécute sur VMware ou Virtual Box pour Mac/Win/Linux avec les outils OpenFlow v1.0 déjà installés.

Comparé aux bancs d'essai matériels, Mininet

- Est peu coûteux et toujours disponible (même avant les dates limites des conférences)
- Est rapidement reconfigurable et redémarrable

Comparé aux simulateurs, Mininet

- Exécute du code réel non modifié, y compris le code de l'application, le code du noyau du système d'exploitation et le code du plan de contrôle (code du contrôleur OpenFlow et code Open vSwitch)
- Se connecte facilement aux réseaux réels
- Offre une performance interactive - vous pouvez y taper

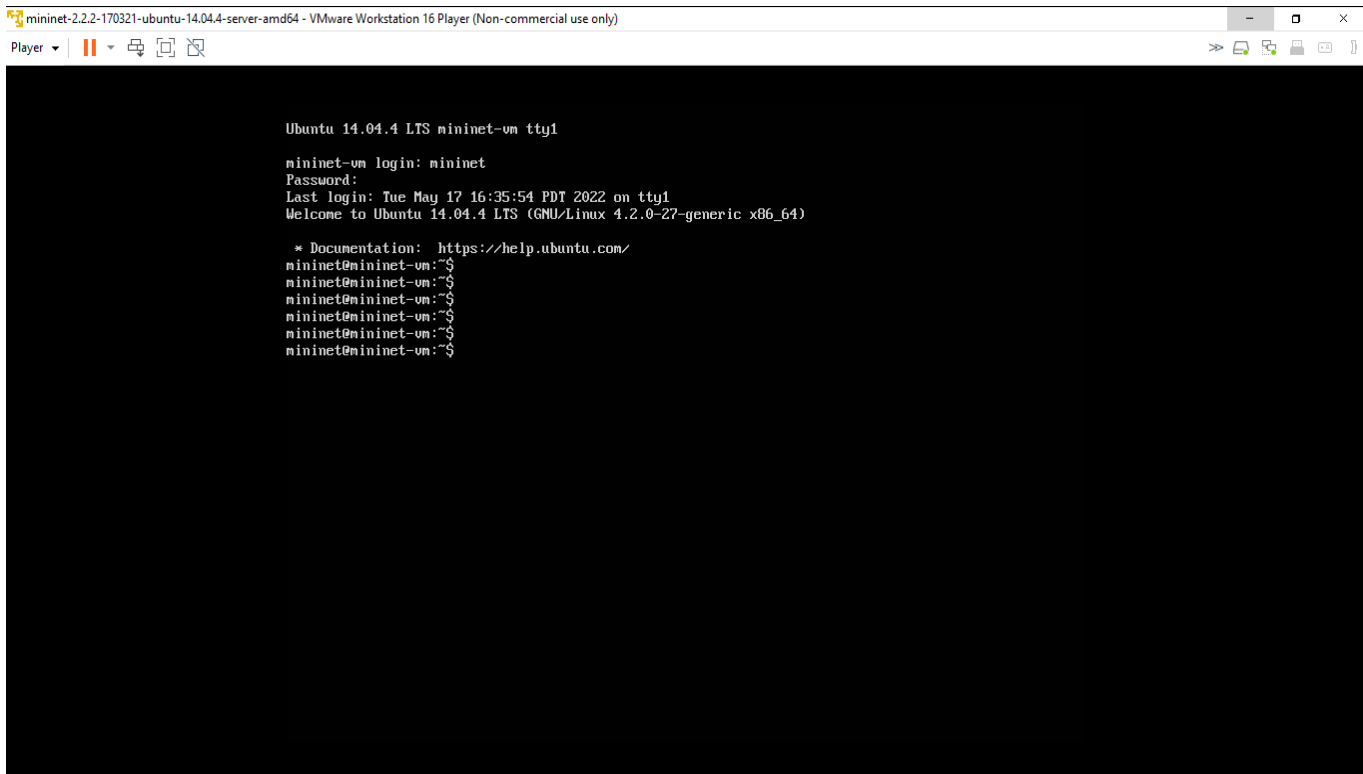


Figure 3-3 installation de mininet sur la machine virtuelle

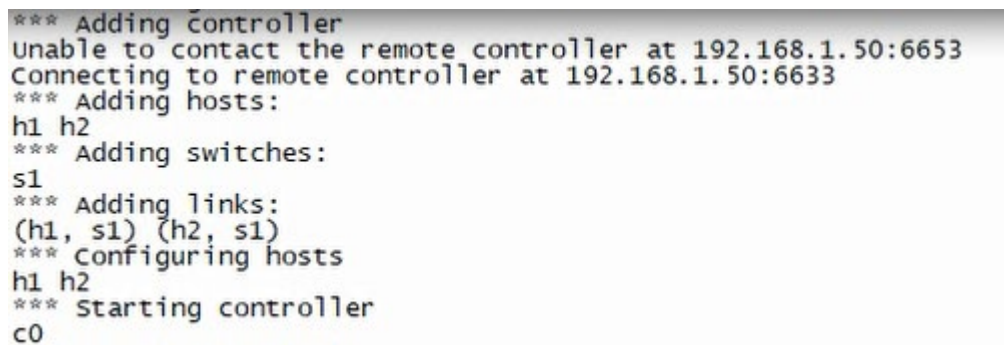


Figure 3-4 applique topologie par défaut sudo mn

HPE VAN SDN Controller Software

Le contrôleur HPE Virtual Application Networks (VAN) SDN fournit un point de contrôle unifié dans un réseau compatible SDN, simplifiant la gestion, le provisionnement et l'orchestration. Cela permet de fournir une nouvelle génération de services réseau basés sur les applications. Il fournit également des interfaces de programmation d'applications ouvertes (API) pour permettre aux développeurs de créer des solutions innovantes pour lier dynamiquement les exigences opérationnelles à

l'infrastructure réseau via des programmes Java personnalisés ou des interfaces de contrôle RESTful à usage général. Le contrôleur VAN SDN est conçu pour fonctionner sur un campus, un centre de données ou un fournisseur de services

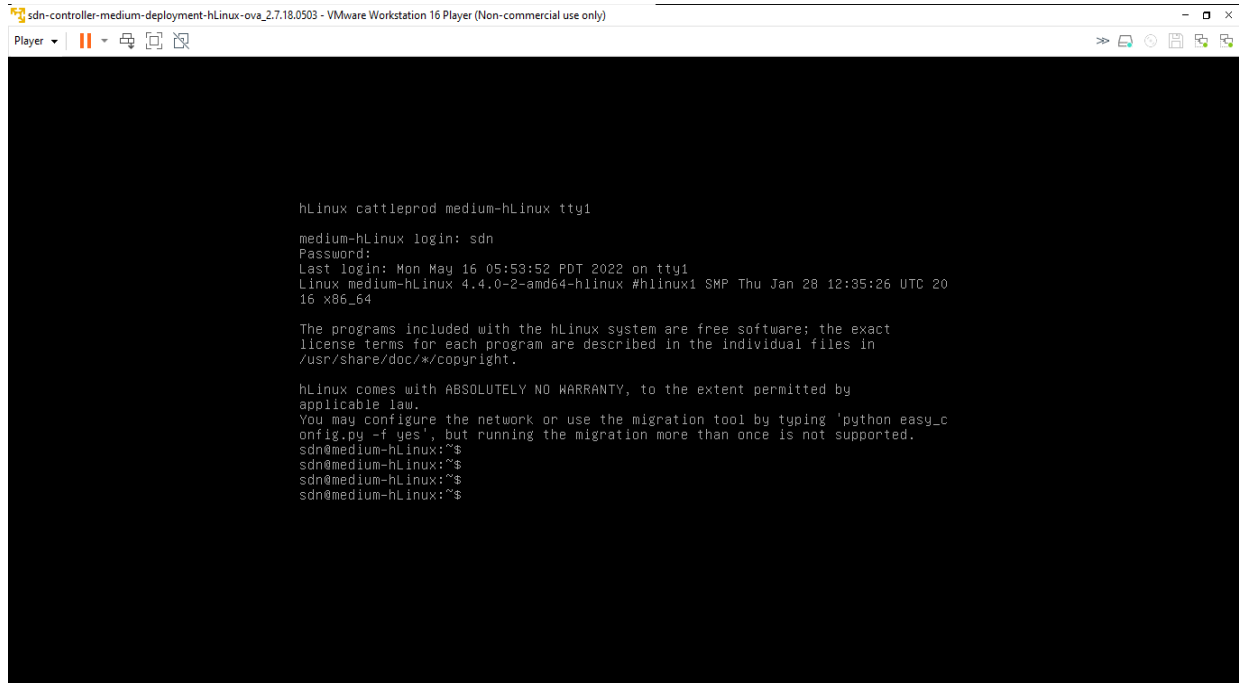


Figure 3-5 installation de la machine contrôleur SDN sur la machine virtuelle

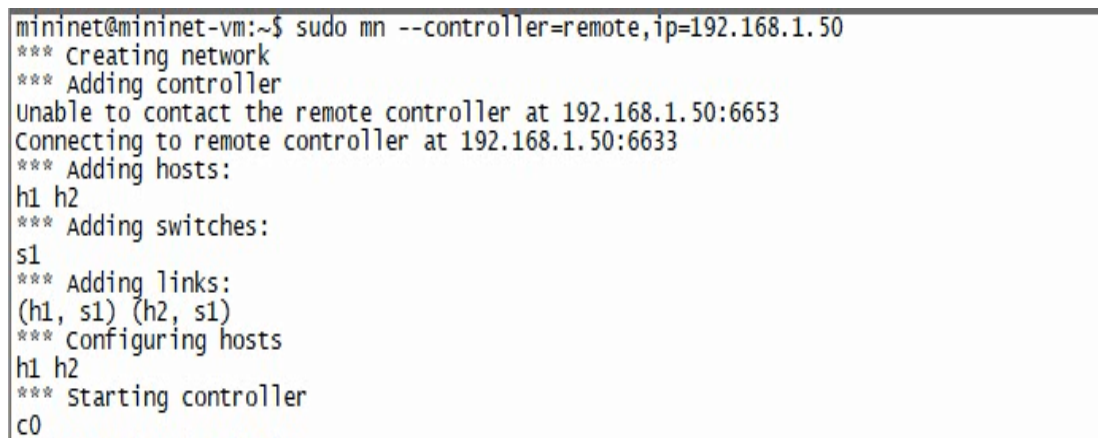


Figure3-6 liaison entre mininet et SDN controller

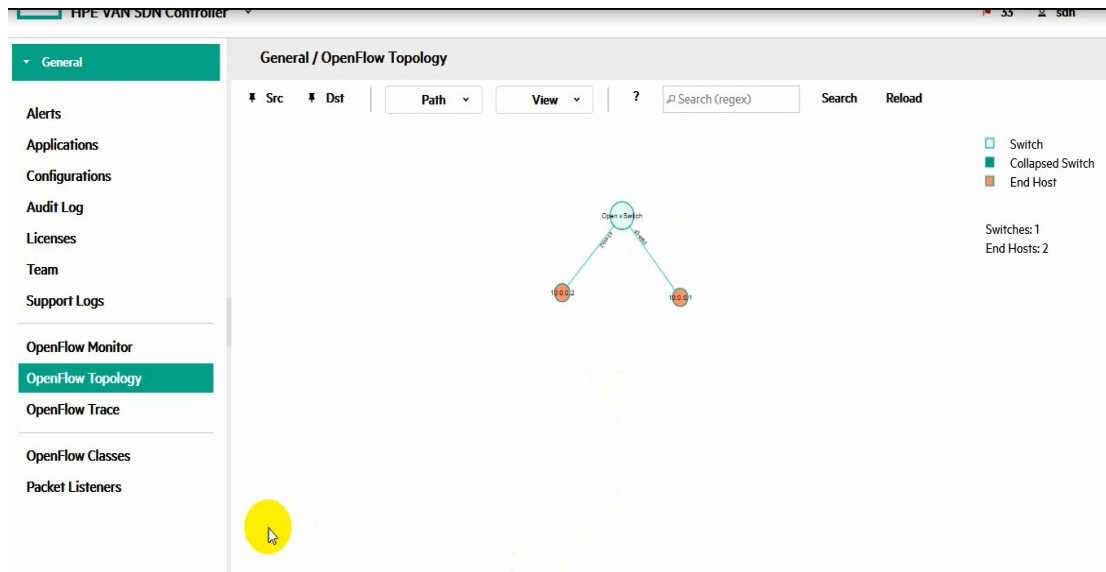


Figure3-7 affichage après l'application de la liaison entre mininet et SDN controller

3.7 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une architecture MEC permettant de réduire la surcharge du réseau en déchargeant les données localement dans un réseau Edge.

Conclusion Générale

Nous rappelons que l'objectif principale de cette mémoire est de réaliser une approche de contrôle du trafic réseau basé SDN pour les applications multimédia sensible au délai dans un environnement Fog et Edge Computing

Au début, nous avons présenté en générale les concepts de base de l'Edge Computing (CC) en présentant leur définition, ses caractéristiques et ses avantages. Enfin, nous consacrons le reste du chapitre à la définition et à la description du Mobile Edge Computing.

Ensuite, nous avons fourni une vue générale sur SDN (Software Defined Networking), notamment les avantages et l'architecture de SDN. Puis nous avons présenté le protocole OpenFlow, son fonctionnement, et quelques contrôleurs SDN et finalement nous avons présenté quelques cas d'utilisations SDN

Dans notre contribution, nous avons proposée architecture MEC permettant de réduire la surcharge du réseau en déchargeant les données localement dans un réseau Edge. En particulier, l'architecture proposée prend en charge un système intelligent de classification et de contrôle de trafic basé sur SDN entre les appareils IoT. L'objectif principal de cette classification est d'améliorer la QoS en classant les différents flux et en mettant en place un plan de données guidé par un ensemble des règles de contrôle.

Bibliographie

- [1] What is edge computing ?, howpublished= <https://www.cloudflare.com/learning/serverless/glossary/what-is-edge-computing/>,note = Accessed : 2021-07-15.
- [2] Confais, B. (2018). *Conception d'un système de partage de données adapté à un environnement de Fog Computing* (Doctoral dissertation, Université de Nantes).
- [3] Singh, S. (2017, December). Optimize cloud computations using edge computing. In *2017 International Conference on Big Data, IoT and Data Science (BIGDATA)* (pp. 49-53). IEEE.
- [4] Satyanarayanan, M. (2019). How we created edge computing. *Nature Electronics*, 2(1), 42-42.
- [5] Khan, W. Z., Ahmed, E., Hakak, S., Yaqoob, I., & Ahmed, A. (2019). Edge computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 97, 219-235.
- [6] Han, B., Wong, S., Mannweiler, C., Crippa, M. R., & Schotten, H. D. (2019). Context-awareness enhances 5G multi-access edge computing reliability. *IEEE Access*, 7, 21290-21299.
- [7] Yi, S., Hao, Z., Qin, Z., & Li, Q. (2015, November). Fog computing: Platform and applications. In *2015 Third IEEE workshop on hot topics in web systems and technologies (HotWeb)* (pp. 73-78). IEEE.
- [8] Bonomi, F., Milito, R., Natarajan, P., & Zhu, J. (2014). Fog computing: A platform for internet of things and analytics. In *Big data and internet of things: A roadmap for smart environments* (pp. 169-186). Springer, Cham.
- [9] Peralta, G., Iglesias-Urkia, M., Barcelo, M., Gomez, R., Moran, A., & Bilbao, J. (2017, May). Fog computing based efficient IoT scheme for the Industry 4.0. In *2017 IEEE*

Bibliographie

international workshop of electronics, control, measurement, signals and their application to mechatronics (ECMSM) (pp. 1-6). IEEE.

[10] *Fog Computing and the Internet of Things : Extend the Cloud to Where the Things Are. White Paper. 2016.* Available online : https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/trends/iot/docs/computingoverview.pdf. Accessed : 2021-08-11.

[11] Ai, Y., Peng, M., & Zhang, K. (2018). Edge computing technologies for Internet of Things: a primer. *Digital Communications and Networks*, 4(2), 77-86.

[12] *What is edge computing ?, howpublished =* <https://www.cloudflare.com/learning/serverless/glossary/what-is-edge-computing/>, note = Accessed : 2021-07-15.

[13] Stojmenovic, I., & Wen, S. (2014, September). The fog computing paradigm: Scenarios and security issues. In *2014 federated conference on computer science and information systems* (pp. 1-8). IEEE.

[14] Nasir Abbas. (2016). Mobile Edge Computing: A Survey:architecture, applications, approaches and challenges.

[15] Sarra Mehamel. (2020). New intelligent caching and mobility strategies for MEC /ICN based architectures.

[16] *Open Networking Foundation* . (2018) . Software-Defined Networking :(SDN) Definition.

[17] Durand, J. (2015). Le SDN pour les nuls. *Cisco Systems JRES*.

[18] Choukri, I., Ouzzif, M., & Bouragba, K. (2019, June). Software Defined Networking (SDN): Etat de L'art. In *Colloque sur les Objets et systèmes Connectés*.

[19].Kreutz, D., Ramos, F. M., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2014). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, 103(1), 14-76.

[20] Goransson, P., Black, C., & Culver, T. (2016). *Software defined networks: a comprehensive approach*. Morgan Kaufmann.

[21] Paradis, T. (2014). Software-Defined Networking.

[22] Kingston Smiler. S.(2015)., "OpenFlow Cookbook," Packt Publishing, pp292

[23] Ouafae IFAKREN.(2016) .**Software Defined Network** . Rapport du semestre, hepia

[24] Benamrane, F., & Benaini, R. (2017). An East-West interface for distributed SDN control plane: Implementation and evaluation. *Computers & Electrical Engineering*, 57, 162-175.

[25] ORACLE, SDN. 2015.

Bibliographie

- [26] Bradai, A., Singh, K., Ahmed, T., & Rasheed, T. (2015). Cellular software defined networking: a framework. *IEEE communications magazine*, 53(6), 36-43.
- [27] Jafarian, J. H., Al-Shaer, E., & Duan, Q. (2012, August). Openflow random host mutation: transparent moving target defense using software defined networking. In *Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks* (pp. 127-132).
- [28] Juba, Y., Huang, H. H., & Kawagoe, K. (2013). Dynamic isolation of network devices using OpenFlow for keeping LAN secure from intra-LAN attack. *Procedia computer science*, 22, 810-819.