



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Télécommunications  
Réseaux et Télécommunications

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Guessoum malak khattab roumaissa**

Le : lundi 26 mai 2025

## Étude comparative d'un réseau 5G avec et sans SDN

---

### Jury :

|     |                  |     |                           |            |
|-----|------------------|-----|---------------------------|------------|
| Dr. | Guesbaya tahar   | MCA | Mohamed kheider de biskra | Président  |
| Dr. | Hendaoui Mounira | MCB | Mohamed kheider de biskra | Rapporteur |
| Dr. | Ihssane houhou   | MCB | Mohamed kheider biskra    | Examineur  |



Année universitaire : Choisissez une année

Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Entrez votre filière

Entrez votre spécialité

Réf. : Entrez la référence du document

---

Étude comparative d'un réseau 5G avec et sans SDN .

Le : lundi 26 mai 2025

**Présenté par :**

Guessom malak

Khattab roumaissa

**Avis favorable de l'encadreur :**

Ms. Hendaoui mounira

**Signature Avis favorable du Président du Jury**

**Cachet et signature**

# Remerciment

*Nous souhaitons exprimer nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'achèvement de ce travail. Cette réalisation n'aurait pas été possible sans le soutien et les conseils de nombreuses personnes, que nous tenons à remercier du fond du cœur. Tout d'abord, nous louons et remercions Dieu Tout-Puissant pour Ses innombrables bénédictions. Il nous a accordé la santé, la force et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail. Toute louange et gratitude reviennent à Dieu pour Son succès et pour toutes les grâces qu'Il nous a accordées. Nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à Madame le Professeur Hindaoui Mounira, notre encadrante académique, pour son soutien constant et ses conseils précieux tout au long de la préparation de ce mémoire. Ses orientations et son accompagnement ont été pour nous une source d'inspiration et d'encouragement. Nous remercions également les membres distingués du jury de soutenance : Dr ihssane houhou , présidente du jury, et Pr guesbaya tahar, examinateur du jury. C'est un grand honneur pour nous que vous acceptiez d'évaluer et de discuter ce travail, et nous attendons avec impatience vos remarques précieuses, qui ne manqueront pas d'enrichir ce mémoire. Nous exprimons aussi notre gratitude à l'ensemble de nos professeurs du Département de Génie Électrique de la Faculté des Sciences et Technologies. Les savoirs et les compétences qu'ils nous ont transmis au cours de nos années d'études ont constitué une base essentielle pour l'élaboration de ce mémoire. Nous ne saurions oublier le soutien et l'encouragement de nos camarades et amis tout au long de la préparation de ce travail. Merci à vous tous pour votre motivation et votre appui moral. Enfin, nous exprimons notre plus profonde reconnaissance et notre amour à notre chère famille, qui a toujours été notre pilier, nous apportant amour, patience et soutien. Que Dieu vous bénisse tous, et nous prions pour la réussite et la guidance de chacun.*

# ***Dédicaces***

*À ma chère famille, À ma chère mère Benflis Salwa et à mon cher père Guessoum Djamel, À mes chères sœurs Rania et Célia, À mes chers frères Abdenmour et Nassim, Je vous exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance pour votre soutien constant et vos encouragements tout au long de mes années d'études. Vous avez toujours été ma source de force et d'inspiration, et vos prières ainsi que votre appui ont été la plus grande motivation pour atteindre cet accomplissement. À ma collègue de mémoire, À mes chers camarades de spécialité, À mes chers amis, Le parcours universitaire a été d'autant plus agréable grâce à votre présence à mes côtés. Merci d'avoir partagé mes joies et mes peines, et pour ce soutien mutuel qui a transformé cette expérience en un souvenir inoubliable À tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce travail, Je vous remercie du fond du cœur pour votre appui et votre accompagnement. J'espère que ce travail est le fruit de vos efforts, et qu'il contribuera à apporter les bénéfices escomptés. Avec toute ma considération et mon respect.*

# ***Dédicaces***

*À ma chère famille, À ma chère mère Ben Nacer warida et à mon cher père Khattab Djmoui, À ma chère sœurs Kounouz et, À mon cher frère Mohammed Salem, Je vous exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance pour votre soutien constant et vos encouragements tout au long de mes années d'études. Vous avez toujours été ma source de force et d'inspiration, et vos prières ainsi que votre appui ont été la plus grande motivation pour atteindre cet accomplissement. À ma collègue de mémoire, À mes chers camarades de spécialité, À mes chers amis, Le parcours universitaire a été d'autant plus agréable grâce à votre présence à mes côtés. Merci d'avoir partagé mes joies et mes peines, et pour ce soutien mutuel qui a transformé cette expérience en un souvenir inoubliable À tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce travail, Je vous remercie du fond du cœur pour votre appui et votre accompagnement. J'espère que ce travail est le fruit de vos efforts, et qu'il contribuera à apporter les bénéfices escomptés. Avec toute ma considération et mon respect.*

# Résumé

---

La technologie des réseaux définis par logiciel (SDN – Software-Defined Networking) joue un rôle essentiel dans la transformation des réseaux mobiles de cinquième génération (5G). En dissociant le plan de contrôle du plan de données, le SDN permet une gestion centralisée, programmable et dynamique des ressources réseau, répondant ainsi aux exigences croissantes de la 5G en matière de flexibilité, de performance et de mécanisme. Ce travail présente les concepts fondamentaux du SDN et met en lumière son intégration dans l'architecture 5G. Il explore les avantages offerts par cette approche, tels que la simplification de la gestion réseau, la création de réseaux virtuels via le network slicing, l'optimisation du routage, et l'adaptabilité aux applications critiques à faible latence. Il aborde également les défis liés à la sécurité, à la compatibilité avec les infrastructures existantes et à la fiabilité du contrôleur centralisé. L'application du SDN Dans réseau 5G a optimisée les prammètres de qualité de services (QOS): debit, latence, perte de donnée, trafic, vitesse de téléchargement, consommation d'énergie, connectivité massive par apport à réseau 5G sans SDN .En conclusion, le SDN constitue une brique technologique clé pour atteindre les objectifs ambitieux de la 5G, en ouvrant la voie à des réseaux plus intelligents, évolutifs et centrés sur les services.

Mots clés :SDN(Software-Defined Networking),5G,Network slicing ,NFV,Qualite de service(Qos)

---

# Abstract

---

The Role of Software-Defined Networking (SDN) in 5G Networks Software-Defined Networking (SDN) plays a key role in transforming fifth-generation (5G) mobile networks. By decoupling the control plane from the data plane, SDN enables centralized, programmable, and dynamic network resource management, thereby meeting the growing demands of 5G in terms of flexibility, performance, and mechanism. This paper presents the fundamental concepts of SDN and highlights its integration into the 5G architecture. It explores the benefits of this approach, such as simplified network management, the creation of virtual networks through network slicing, optimized routing, and adaptability to low-latency critical applications. It also addresses the challenges related to security, compatibility with existing infrastructures, and the reliability of the centralized controller. The application of SDN in 5G networks has optimized key Quality of Service (QoS) parameters, including throughput, latency, data loss, traffic management, download speed, energy consumption, and massive connectivity, compared to 5G networks without SDN. In conclusion, SDN is a key technological component for achieving the ambitious goals of 5G, paving the way for smarter, more scalable, and service-oriented networks.

**Keywords :** Software-Defined Networking (SDN), 5G, Network slicing, Network Functions Virtualization (NFV), Quality of Service (QoS)

## ملخص

تلعب تقنية الشبكات المحددة بالبرمجيات (SDN) دورًا حيويًا في تحويل شبكات الهاتف المحمول من الجيل الخامس (5G) من خلال فصل مستوى التحكم عن مستوى البيانات، يتيح SDN إدارة مركزية وقابلة للبرمجة وديناميكية لموارد الشبكة، مما يلبي متطلبات 5G المتزايدة للمرونة والأداء والألية. يقدم هذا العمل المفاهيم الأساسية لـ SDN ويسلط الضوء على تكاملها في بنية 5G. ويستكشف هذا الكتاب الفوائد التي يوفرها هذا النهج، مثل تبسيط إدارة الشبكة، وإنشاء شبكات افتراضية عبر تقسيم الشبكة، وتحسين التوجيه، والقدرة على التكيف مع التطبيقات الحرجة ذات زمن الوصول المنخفض. كما يتناول التحديات المتعلقة بالأمن والتوافق مع البنى التحتية الحالية وموثوقية وحدة التحكم المركزية. تطبيق ( ) SDN في شبكات (5G) يحسن معايير جودة الخدمة (QoS) مثل معدل نقل، الكمون، فقدان البيانات، حركة المرور، سرعة التنزيل، استهلاك الطاقة، والاتصال الضخم مقارنة بشبكات (5G) بدون (SDN). وفي الختام، تعد شبكات SDN بمثابة حجر الأساس التكنولوجي الرئيسي لتحقيق الأهداف الطموحة لتقنية الجيل الخامس، مما يمهد الطريق لشبكات أكثر ذكاءً وقابلية للتوسع وتركز على الخدمة.

الكلمات الرئيسية : الشبكات المعرفة برمجيا ( SDN ). الجيل الخامس (5G). تقسيم الشبكة ( Network slicing). الوظائف الشبكة الافتراضية (NFV). جودة الخدمة (QoS)



## **Introduction Générale**

### **Chapitre 1 : La technologie 5G**

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introduction.....</b>                           | <b>3</b>  |
| <b>2. Définition du réseau 5G.....</b>                | <b>3</b>  |
| <b>3. Les objectifs des réseaux 5 G.....</b>          | <b>5</b>  |
| <b>4. Architecture du réseau 5G.....</b>              | <b>6</b>  |
| 4.1 Réseaux d'accès radio de 5G(NG-RAN).....          | 8         |
| 4.2 Réseaux COEUR 5G.....                             | 9         |
| <b>5. les 10 piliers de 5G.....</b>                   | <b>10</b> |
| 5.1 Évolution des RAT existants.....                  | 10        |
| 5.2 Déploiement Hyperdense sur petites cellules.....  | 11        |
| 5.3 Réseaux auto-organisés.....                       | 11        |
| 5.4 Communication de type machine.....                | 11        |
| 5.5 Développement de RATS à ondes millimétriques..... | 11        |
| 5.6 Refonte des liens de liaison.....                 | 11        |
| 5.7 Efficacité énergétique.....                       | 11        |
| 5.8 Attribution d'un nouveau spectre pour la 5G.....  | 12        |
| 5.9 Partage du spectre.....                           | 12        |
| 5.10 Virtualisation RAN.....                          | 12        |
| <b>6 .Les technologies du réseau 5G.....</b>          | <b>12</b> |
| 6.1 Découpage du réseau en 5G(network slicing).....   | 12        |
| 6.2 NFV.....                                          | 13        |
| 6.3 Edge/ Cloud computing.....                        | 14        |
| 6.3.1 Cloud Computing (CC) .....                      | 15        |
| 6.3.1.2 Les services du Cloud.....                    | 15        |
| 6.3.1.2 Les services du Cloud.....                    | 16        |
| 6.4 SDN(software defined networks).....               | 18        |
| 6.5 Massive MIMO.....                                 | 18        |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>7. Les paramètres de qualité service avec les interfaces.....</b>         | <b>21</b> |
| 7.1 Débit de Données (Bit Rate).....                                         | 21        |
| 7.2 Latence.....                                                             | 21        |
| 7.3 Fiabilité.....                                                           | 22        |
| 7.4 Taux de Perte de Paquets.....                                            | 22        |
| 7.5 Niveaux de Priorité.....                                                 | 22        |
| 7.6 Allocation de Blocs de Ressources.....                                   | 22        |
| 7.7 Orientation et Redirection du Trafic.....                                | 22        |
| 7.8 Paramètres de Handover (Transfert Inter-cellules).....                   | 22        |
| 7.9. Contrôle de la Congestion.....                                          | 22        |
| 7.10 Débit Garanti (GBR - Guaranteed Bit Rate).....                          | 22        |
| <b>8. domaines d'application le 5G avec des exemples de chaque domaine..</b> | <b>25</b> |
| 8.1 Applications de l'Internet des Objets (IoT).....                         | 25        |
| 8.2 Applications de Conduite Autonome.....                                   | 26        |
| <b>9.Conclusion.....</b>                                                     | <b>27</b> |

## **chapitre2 : SDN(software defined networks)**

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.Introduction.....</b>                                                 | <b>33</b> |
| <b>2. Definition du SDN .....</b>                                          | <b>33</b> |
| <b>3. Architecteur du réseau SDN.....</b>                                  | <b>34</b> |
| 3.1 La couche application.....                                             | 35        |
| 3.2 La couche contrôle.....                                                | 36        |
| 3.2.1 Interface south-bound.....                                           | 36        |
| 3.2.2 interface north-bound.....                                           | 36        |
| 3.3.La couche infrastructure.....                                          | 36        |
| 3.3.1 Interface south-bound.....                                           | 36        |
| 3.3.2 Interface north-bound.....                                           | 37        |
| <b>4.SDN pour les réseaux 5G.....</b>                                      | <b>37</b> |
| 4.1 Vers une architecture SDN/NFV/Cloud pour la gestion de la mobilité.... | 38        |
| 4.2 SDN et la 5G : une tranformation progressive.....                      | 38        |
| 4.3 Évolution vers un cœur de réseau 5G plus souple.....                   | 49        |
| <b>5.Le Principe de la commutation dans SDN.....</b>                       | <b>43</b> |
| 5.1 Séparation entre le Plan de Contrôle et le Plan de Données.....        | 43        |
| 5.1.1 Plan de données (Data Plane) .....                                   | 43        |

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.2 Plan de contrôle (Control Plane).....                            | 43        |
| 5.2 Programmabilité de la Commutation.....                             | 43        |
| 5.3 Rôle des Protocoles comme Open Flow.....                           | 44        |
| <b>6.les avantages des SDN et des réseaux programmables.....</b>       | <b>44</b> |
| 6.1 Contrôle renforcé avec plus de souplesse et un débit accéléré..... | 44        |
| 6.2 Infrastructure réseau personnalisable.....                         | 44        |
| 6.3. Sécurité renforcée.....                                           | 44        |
| 6.4 Innovation et imptovisation beaucoup plus rapides.....             | 45        |
| 6.5 Gestion du Cloud.....                                              | 45        |
| <b>7.conclusion.....</b>                                               | <b>45</b> |

## **Chapitre 3 : La sumilation d'un réseau 5Gavec et sans SDN(software defined networks)**

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.Introduction.....</b>                                              | <b>47</b> |
| <b>2. Présentation de la bibliothèques utilisables .....</b>            | <b>47</b> |
| 2.2.1 Numpy.....                                                        | 47        |
| 2.2.2 Matplotlib.....                                                   | 47        |
| <b>3.Etude des paramètres de qualité de services.....</b>               | <b>48</b> |
| 3.1 Débit(throughput).....                                              | 49        |
| 3.2 Paquets perdus(data dropped).....                                   | 49        |
| 3.3 Latence (latancy).....                                              | 49        |
| 3.4 Le traffic(traffic networks).....                                   | 49        |
| 3.5 Connectivité massive(massive connectivity).....                     | 50        |
| 3.6 Consommation d'énergie(energy consumption).....                     | 50        |
| 3.7 Vitesse de téléchargement(downlaod speed).....                      | 50        |
| <b>4.L'algorithme de simulation du réseau 5G avec et sans SDN .....</b> | <b>51</b> |

|                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. Tableau résumé des fonctions du programme.....</b>                                                                          | <b>53</b> |
| <b>6. Simulation.....</b>                                                                                                         | <b>54</b> |
| <b>7. Comparaison entre 5G avec SDN et 5G sans SDN.....</b>                                                                       | <b>61</b> |
| <b>8. Évaluation appliquée des performances du réseau 5G avec SDN et sans SDN selon les paramètres de qualité de service.....</b> | <b>62</b> |
| <b>9. conclusion.....</b>                                                                                                         | <b>63</b> |
| <b>Conclusion Générale</b>                                                                                                        |           |

---

# LIST DU FIGURES

---

|                    |                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure1. 1</b>  | La 5G vise troisgrandes classes d’applications.....                                                                                                                                                    | 4  |
| <b>Figure1.2</b>   | Architecture de base d’un réseau mobile.....                                                                                                                                                           | 6  |
| <b>Figure1.3</b>   | Sessions PDU et flux de QoS : Plan utilisateur.....                                                                                                                                                    | 7  |
| <b>Figure1. 4</b>  | Répartition des fonctions 5G entre le NG-RAN et le cœur 5G.....                                                                                                                                        | 8  |
| <b>Figure1.5</b>   | Structure de l'Architecture NG-RAN.....                                                                                                                                                                | 9  |
| <b>Figure1.6</b>   | Architecture du système 5G sans itinérance (no-roaming).....                                                                                                                                           | 10 |
| <b>Figure1.7</b>   | Tranches de réseau 5G fonctionnant sur une infrastructure commune<br>multi-fournisseurs et multi-accès. Chaque tranche est gérée de manière<br>indépendante et répond à un cas d’usage particulie..... | 13 |
| <b>Figure1.8</b>   | L’architecture de la NFV.....                                                                                                                                                                          | 14 |
| <b>Figure1.9</b>   | Service du cloud computing.....                                                                                                                                                                        | 16 |
| <b>Figure1.10</b>  | Démonstration générale du Edge Computing.....                                                                                                                                                          | 17 |
| <b>Figure1.11</b>  | Visualisation du MU-MIMO, du massive MIMO, et du CoMP ou M-MIMO<br>cellulaire distribué.....                                                                                                           | 21 |
| <b>Figure1.12.</b> | Scénarios (ou exigences) définis pour les réseaux 5G (à gauche) et<br>capacités offertes dans ces scénarios (à droite).....                                                                            | 24 |
| <b>Figure1.13</b>  | Applications prospectives de l’Internet des objets (IoT).....                                                                                                                                          | 26 |
| <b>Figure1.14</b>  | Usages des systèmes intelligents dans les domaines stratégiques de la vie                                                                                                                              |    |

|              |    |
|--------------|----|
| moderne..... | 27 |
|--------------|----|

---

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure2.1</b> Réseau traditionnel vers le réseau SDN.....                            | 34 |
| <b>Figure2.2</b> Architecteur SDN.....                                                  | 35 |
| <b>Figure2.3</b> NFV SLICE dans le réseau 5G.....                                       | 40 |
| <b>Figure2.4</b> ONF pipeline dans le réseau 5G.....                                    | 41 |
| <b>Figure2.5</b> illustre le schéma de données dans une architecture SDN classique..... | 43 |

---

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure3.1</b> Numpy.....                                                                                  | 47 |
| <b>Figure3.2</b> Matplotlib.....                                                                             | 48 |
| <b>Figure3.3</b> Les services typiques qui nécessitent l'utilisation de la qualité de service (QoS)<br>..... | 49 |
| <b>Figure3.4</b> Le débit (Throughput) du 5G avec SDN ET sans SDN.....                                       | 54 |
| <b>Figure3.5</b> La latence (Latency) du 5 G avec SDN ET sans SDN.....                                       | 54 |
| <b>Figure3.6</b> Le perte de donnée(Data Dropped) du 5G avec SDN et sans SDN.....                            | 55 |
| <b>Figure3.7</b> Le trafic réseau( Network traffic) du 5G avec SDN et sans SDN.....                          | 55 |
| <b>Figure3.8</b> La vitesse de téléchargement ( Downlaod speed) du 5G avec SDN et sans<br>SDN.....           | 55 |

|                                                                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure3.9</b> La consommation d'énergie( Energy consumption) du 5G avec SDN et sans SDN.....                                       | <b>56</b> |
| <b>Figure3.10</b> La connectivité massive( Massive Connectivity) du 5G avec SDN et sans SDN.....                                      | <b>56</b> |
| <b>Figure3.11</b> La valeur moyinne du Débit ( throughput) du 5G avec SDN et sans SDN.....                                            | <b>57</b> |
| <b>Figure3.12</b> La valeur moyenne du la latence( Latency) du 5G avec SDN et sans SDN.....                                           | <b>57</b> |
| <b>Figure3.13</b> La valeur moyenne du perte de données (Data Dropped) du 5G avec SDN et sans SDN.....                                | <b>58</b> |
| <b>Figure3.14</b> La valeur moyenne du trafic( Network traffic) du 5G avec SDN et sans SDN.....                                       | <b>58</b> |
| <b>Figure3.15</b> la valeur moyenne du vitesse de téléchargement ( Downlaod speed) du 5G avec SDN et sans SDN.....                    | <b>69</b> |
| <b>Figure3.16</b> La valeur moyenne du consommation d'énergie (Energy comsumption) du 5G avec et sans SDN.....                        | <b>60</b> |
| <b>Figure3.17</b> La valeur moyenne du connectivité massive(Massive connectivity) du 5G avec et sans SDN.....                         | <b>61</b> |
| <b>Figure3.18</b> Évaluation appliquée des performances du réseau 5G avec et sans SDN selon les paramètres de qualité de service..... | <b>62</b> |

## Liste des tableaux

---

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau3.1</b> : Tableau résumé des fonctions du programme..... | <b>53</b> |
| <b>Tableau 3.2</b> Comparaison entre 5G avec et sans SDN.....      | <b>61</b> |

## Acronymes

**2G** 2<sup>ème</sup> Génération

**3G** 3<sup>ème</sup> Génération

**4G** 4<sup>ème</sup> Génération

**5G** 5<sup>ème</sup> Génération

**API** Application Program Interface

**AP** Acces Point

**BS** Base Station

**COTs** Commercial Off Organises

**CC** Cloud Computing

**CSI** Channel State Information

**CP** Control Plan

**DML** Distributed Machine Learning

**DMM** Distributed Mobility Management

**DAS** Distributed Antenna System

**gNB-CU** GNodeB Central Unit

**gNB-CP** GNB Control Plane

**HTTP** HyperText Transfer Protocol



**IOT** Internet of Things

**IaaS** Infrastructure as a Service

**LTE** Long Term Evolution

**MTC** Machine Type Communication

**MU** Multi-User

**MMTC** massive Machine-Type Communications

**NG-RAN** Next Generation Radio Acces Network

**NFV** Network Function Virtuatization

**NR** New Radio

**NBI** North-Bound Interface

**ONAS** Open Network Operating System

**ONF** Open Networking Fondation

**PAAS** Platform a sa service

**PDU** Protocol Data Unit

**Qos** Quality Of Service

**REST** Representational State Transfer

**RA** Router Advertisement

**RV** Route Vector

**RAN** Radio Access Network

**SDN** Software-Defined Networking

**SBI** South-Bound Interface

**TCP** Transmission Control Protocol

**UE** User Equipment

**URLLC** Ultra-Reliable Low Latency Communications

**UPFS** User Plane Functions

**UHD** Ultra High Definition

**UP** User Plane

**WI MAX** Worldwide Interoperability for Microwave Access

# Introduction Générale

---

La combinaison des réseaux SDN (Software Defined Networking) et de la technologie 5G représente l'un des changements majeurs dans les infrastructures de télécommunication modernes. Les réseaux 5G promettent des vitesses inédites, une latence très faible et la capacité de connecter un grand nombre d'appareils simultanément. Cependant, ces réseaux doivent relever de nombreux défis pour gérer ces performances, notamment parce que les approches traditionnelles ne sont pas toujours adaptées à ces nouvelles exigences.

Le SDN apparaît comme une solution révolutionnaire en séparant le plan de contrôle du réseau du plan de données. Cette séparation permet une programmation flexible du réseau, une gestion centralisée et une allocation dynamique des ressources en fonction des besoins. Elle transforme profondément la conception, le déploiement et l'exploitation des réseaux, offrant ainsi une souplesse accrue pour répondre aux divers usages de la 5G, qu'il s'agisse d'améliorer la connectivité mobile, de prendre en charge des communications critiques ou d'alimenter l'Internet des objets (IoT).

Ce mémoire explore l'intégration de la technologie SDN dans les réseaux 5G, en analysant leur architecture, les défis de mise en œuvre et les bénéfices en termes de performance. À travers des analyses comparatives et des simulations, nous démontrons comment les réseaux 5G intégrant le SDN optimisent l'utilisation des ressources. Cela permet de construire une infrastructure télécom capable de s'adapter aux évolutions technologiques futures.

Pour traiter ce sujet, le travail est structuré en trois chapitres : ·

- Chapitre 1 : La technologie 5G présente une introduction et une définition des réseaux 5G, suivies d'une exploration de leurs objectifs et de leur architecture. Sont détaillés les éléments clés de l'infrastructure 5G, tels que les Réseaux d'Accès Radio de Nouvelle Génération (NG-RAN), les Réseaux Cœur 5G, ainsi que la gestion des sessions PDU, des flux de données et de la qualité de service. Sont également abordés les dix piliers fondamentaux de la 5G et les technologies clés comme le découpage du réseau (Network Slicing), la virtualisation des fonctions réseau (NFV), le edge/cloud computing, le SDN et le MIMO massif. Une attention particulière est portée aux paramètres de qualité de service, notamment pour des applications telles que l'Internet des objets et les véhicules autonomes. ·
- Chapitre 2 : Les réseaux définis par logiciel (SDN) Ce chapitre offre une définition complète du SDN et présente son architecture en trois couches — application, contrôle et infrastructure — ainsi que leurs interfaces. Il met en lumière l'intégration

## Introduction Générale :

---

du SDN dans les réseaux 5G, les principes de commutation et les avantages des réseaux programmables dans les télécommunications modernes. ·

- Chapitre 3 : Étude pratique et simulations Ce dernier chapitre est consacré à des simulations comparatives entre réseaux 5G avec et sans SDN. Après présentation de la méthodologie de simulation, sont détaillés les outils utilisés, notamment les bibliothèques NumPy et Matplotlib pour l'analyse et la visualisation des données. Plusieurs paramètres clés sont évalués : débit, perte de paquets, latence, trafic réseau, connectivité massive, consommation d'énergie et vitesses de téléchargement. L'analyse comparative met en évidence les améliorations apportées par l'intégration du SDN dans les réseaux 5G.

Ainsi, ce mémoire combine à la fois des explications théoriques et des preuves pratiques pour démontrer comment la technologie SDN peut transformer et améliorer les réseaux 5G de nouvelle génération.

Enfin, une conclusion générale résume l'ensemble des travaux réalisés dans ce mémoire.

# **chapitre 1**

## **La technologie 5G**

---

## **1. Introduction :**

La 5G marque une avancée majeure dans l'évolution des réseaux mobiles, succédant à la 4G en apportant des innovations matérielles et logicielles significatives. Déployée progressivement depuis 2019 à l'échelle mondiale, elle devrait concerner plus de 2,4 milliards d'appareils d'ici 2025. Son développement s'inscrit dans la continuité des efforts visant à démocratiser l'accès aux réseaux tout en augmentant les débits. Elle se distingue par des performances accrues en termes de vitesse, de latence et de capacité, rendant possible l'émergence d'applications disruptives dans de nombreux domaines : véhicules autonomes, industrie 4.0, réalité augmentée, téléchirurgie, sécurité publique, etc. La 5G exploite un spectre radio élargi (de 600 MHz à plusieurs dizaines de GHz) et des technologies avancées comme le Massive MIMO. Elle constitue un véritable bond technologique, offrant un socle pour les villes intelligentes et une société plus connectée et automatisée.

## **2. Définition du réseau 5G :**

Le système de Cinquième Génération (5G) est conçu pour offrir aux appareils des connexions ultra haut débit au-delà de l'année 2020. L'émergence de nouveaux algorithmes capables de traiter de grandes quantités de données, tels que l'apprentissage automatique (Machine Learning - ML) et l'apprentissage automatique distribué (Distributed Machine Learning - DML), exigera le développement de nouvelles générations de réseaux cellulaires sans fil. Cette nouvelle technologie cellulaire devra garantir aux utilisateurs, aux appareils et aux services un débit minimum de 10 Gbps, un débit de pointe de 20 Gbps, une latence quasi nulle de l'ordre de 1 milliseconde pour des transmissions ultra-fiabiles, une latence plus faible de 15 à 20 millisecondes pour le transfert massif de données vers le cloud, et une prise en charge d'une densité allant jusqu'à un million d'appareils connectés par kilomètre carré.



**Figure1.1:** La 5G vise trois grandes classes d'applications.[1]

Un grand nombre de services sans fil diversifiés, dotés de fonctionnalités avancées, devront être pris en charge de manière fluide, flexible et à un coût raisonnable. Pour répondre aux exigences de ces services variés, l'architecture du système 5G devra être mise à jour pour adopter une approche orientée services (*Service Oriented*). Les services pourront être créés et supprimés dynamiquement à la demande. L'architecture orientée services (SOA – *Service Oriented Architecture*) est un paradigme technologique dans les domaines du calcul, du stockage, des réseaux et des affaires, développé il y a plusieurs décennies, et généralement composé de fournisseurs et de consommateurs. Le système sans fil 5G serait capable de fournir aux appareils différents services de manière fine et granulaire, en les décomposant et en allouant dynamiquement les ressources nécessaires aux utilisateurs via les fournisseurs de services.

Une tâche importante consiste à construire les services réseau de manière efficiente et rentable. Une solution appropriée de décomposition des services est souhaitable pour répondre aux besoins de flexibilité et de gestion des flux de services réseau. En outre, un problème de modélisation inter-couches et d'optimisation peut être formulé afin de traiter conjointement les tâches de fourniture de services et d'allocation des ressources de façon globale. Pour modéliser et optimiser avec précision le système 5G, qui est complexe, dynamique et stochastique, de nouveaux paradigmes et méthodes sont nécessaires dans plusieurs domaines, notamment la décomposition des services, la modélisation pour l'optimisation et la conception d'algorithmes. L'architecture future de la 5G et les paradigmes clés seront abordés en mettant l'accent sur les techniques qui permettront la mise en place de nouveaux services.

Avec la croissance rapide des communications sans fil et la prolifération des services de données mobiles, la demande pour des applications cellulaires haut débit et à faible latence est



en forte augmentation. Les normes cellulaires plus récentes, notamment la quatrième génération (4G) LTE (*Long-Term Evolution*), ont répondu à ces exigences dans une large mesure, mais il existe encore un potentiel d'amélioration considérable. En réponse, des plans sont en cours pour déployer le système cellulaire sans fil de cinquième génération (5G) d'ici l'année 2020. La prochaine génération de technologie mobile devra répondre à la demande de performances élevées, en particulier en termes de débit, de latence, et bien plus encore. Pour satisfaire à toutes ces spécifications, un changement de paradigme dans la conception des réseaux 5G est nécessaire.

Dans ce contexte, les notions de Réseaux Définis par Logiciel (SDN – *Software Defined Networking*) et de Virtualisation des Fonctions Réseau (NFV – *Network Function Virtualization*), largement utilisées dans les réseaux filaires, devraient transformer les réseaux sans fil du futur. Cet article propose une méthode novatrice pour adapter l'architecture 5G définie par le 3GPP aux principes des Réseaux Définis par Logiciel (SDN). [2]

### 3. Les objectifs de réseau 5G :

La 5G est appelée à transformer profondément la société, tant pour les individus que pour les objets connectés. L'augmentation des besoins en données mobiles et la recherche d'un service plus performant ont conduit au développement de cette nouvelle génération de réseau. L'un de ses atouts majeurs réside dans sa capacité à établir une connectivité à l'échelle mondiale .[3]

Les principaux objectifs de la 5G sont les suivants :

- Fournir un accès Internet à très haut débit sur smartphones, tablettes et autres appareils mobiles.
- Atteindre des vitesses de téléchargement pouvant aller jusqu'à **1 Gbit/s**.
- Offrir des **forfaits data plus conséquents**, avec une capacité de données multipliée par **1000**.
- Accélérer considérablement la transmission des données.
- Réduire fortement la **latence**, pour un réseau ultra-réactif.

- Limiter le nombre d'antennes tout en augmentant leur capacité : chaque antenne pourra connecter jusqu'à **100 fois plus de terminaux**, selon les fréquences utilisées.
- Réduire de **90 %** la consommation énergétique du réseau.
- Prolonger l'**autonomie des batteries** jusqu'à **10 ans** pour les objets connectés.
- Augmenter de **1000 fois la bande passante** disponible par unité de surface.
- Garantir une **disponibilité quasi totale** du réseau, avec un taux de fonctionnement de **99,999 %**.

#### 4. Architecture du réseau 5G :

- Le réseau 5G se compose de deux éléments principaux : le **réseau d'accès 5G (AN)** et le **réseau cœur 5G**. Le réseau d'accès intègre la **nouvelle génération de réseau d'accès radio (NG-RAN)**, qui utilise la nouvelle interface radio 5G appelée **NR (New Radio)**. Il peut également inclure des réseaux d'accès non-3GPP, connectés au cœur du réseau 5G. L'ensemble de ces entités est interconnecté via une **infrastructure de transport basée sur le protocole TCP/IP**, conçue pour prendre en charge les exigences de **qualité de service (QoS)** .[4]

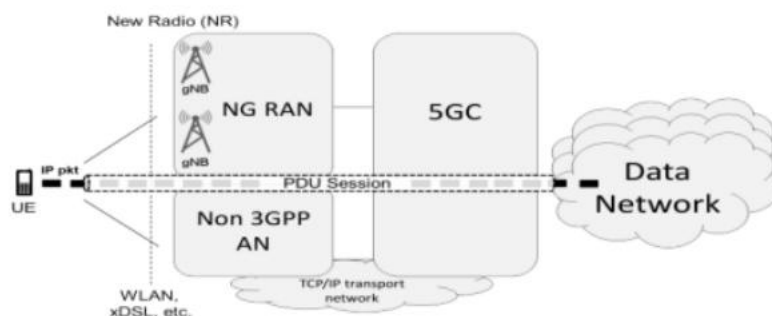


Figure1.2 : Architecture de base d'un réseau mobile.[5]

## Connexion utilisateur et session PDU dans le réseau 5G

Comme illustré dans la figure 1.3, le réseau 5G relie l'**équipement utilisateur (UE)** à des **réseaux de données externes**. Le service de connectivité est assuré par la **session PDU (Protocol Data Unit)**, qui représente l'unité logique de la communication dans la 5G. Cette session est composée d'une **série de tunnels NG au sein du cœur de réseau 5G (5GC)**, associés à un ou plusieurs **porteurs radio** sur l'interface radio. L'ensemble de ces « canaux » relie précisément l'UE à ses fonctions de contrôle, ainsi qu'aux réseaux de données externes, pour permettre l'échange de trafic utilisateur (voir figure 1.4).

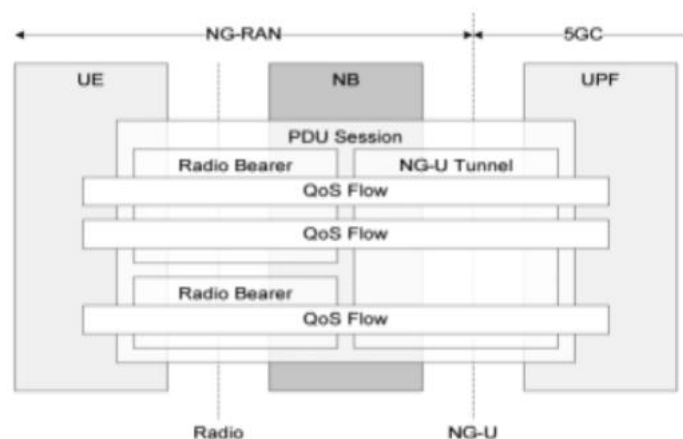
La session PDU est comparable à un **porteur EPS** dans le réseau LTE, bien qu'elle diffère sur deux points essentiels :

- Le **modèle de qualité de service (QoS)**
- Le **type de données supportées**

En effet, une session PDU peut transporter non seulement des **paquets IP**, mais aussi des **trames Ethernet** ou d'autres types de **cadres non IP**, ce qui rend possible la **communication de couche 2** entre différents groupes d'UE.

Le modèle 5G repose sur une nouvelle approche appelée **flux de QoS**, qui représente le **plus haut niveau de granularité** pour la différenciation des services selon leur qualité de service.[4]

Les différents flux de QoS peuvent coexister au sein d'une même session PDU.



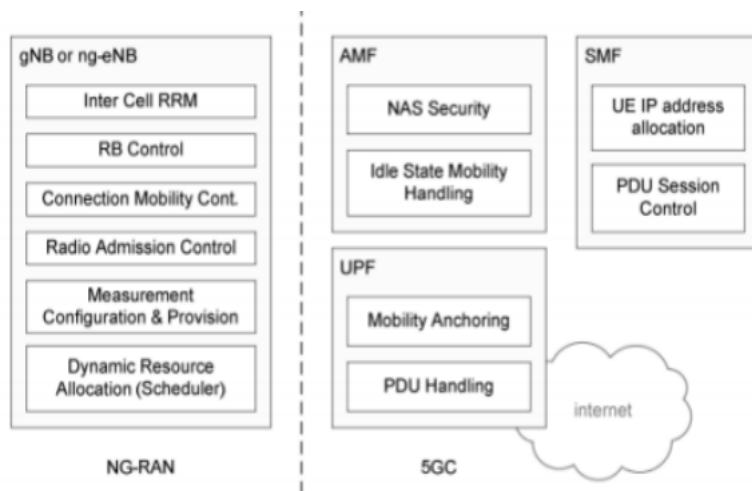
**Figure.1.3 :** Sessions PDU et flux de QoS : Plan utilisateur.[5]

La figure [I.5] illustre la séparation des responsabilités entre les composants du NG-RAN (Next Generation Radio Access Network) et ceux du cœur de réseau 5G (5GC). En périphérie du réseau, le NG-RAN est chargé de l'établissement, du maintien et de la libération des segments de session PDU qui transitent via l'interface radio.

Il est également responsable de la gestion des contraintes physiques du réseau, comme les interférences radio, la réduction de la consommation d'énergie, le handover entre stations de base (gNB), ainsi que le multiplexage et la planification des sessions PDU.

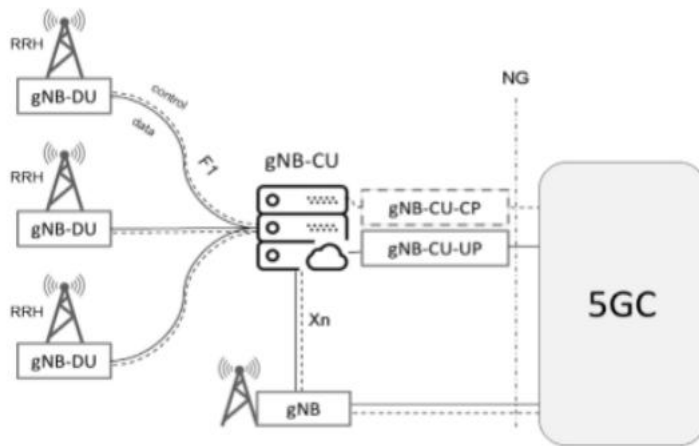
De son côté, le 5G Core (5GC) prend en charge les autres aspects de la session PDU, ainsi que tous les processus non liés à l'accès radio, tels que :

- La gestion de la mobilité,
- La sécurité,
- L'attribution des adresses IP,
- Et d'autres fonctions de gestion réseau essentielles.[4]



**Figure .1.4 :** Répartition des fonctions 5G entre le NG-RAN et le cœur 5G.[5]

#### 4.1.Réseau d'accès radio de 5G génération (NG-RAN) :



**Figure I.5 :** Structure de l'Architecture NG-RAN.[5]

Comme représenté dans la **figure. 1.6**, le **NG-RAN** est constitué d'un ensemble de **stations de base 5G**, appelées **gNBs** (next-generation NodeB). Ces gNBs sont interconnectées au **5G Core (5GC)** via un ensemble d'interfaces logiques. Les **gNBs** peuvent être reliées entre elles à travers l'**interface Xn**, ce qui améliore les fonctions de **mobilité** (comme le **handover** entre cellules) et de **gestion** (notamment la coordination des **interférences intercellulaires**).

Le fonctionnement des **gNBs** peut être réparti. Dans ce cas, l'architecture résultante est composée d'une **unité centrale (gNB-CU)**, qui nécessite une ou plusieurs **unités distribuées (gNB-DU)**, connectées à une **carte radio distante (RRH)**. L'unité centrale (**gNB-CU**) est elle-même divisée en deux sous-unités :

- **gNB-CU-CP** : gère les fonctions du **plan de contrôle**,
- **gNB-CU-UP** : s'occupe des fonctions du **plan utilisateur**. [4]

#### 4.2 . Le Réseau Cœur 5G (5GC) :

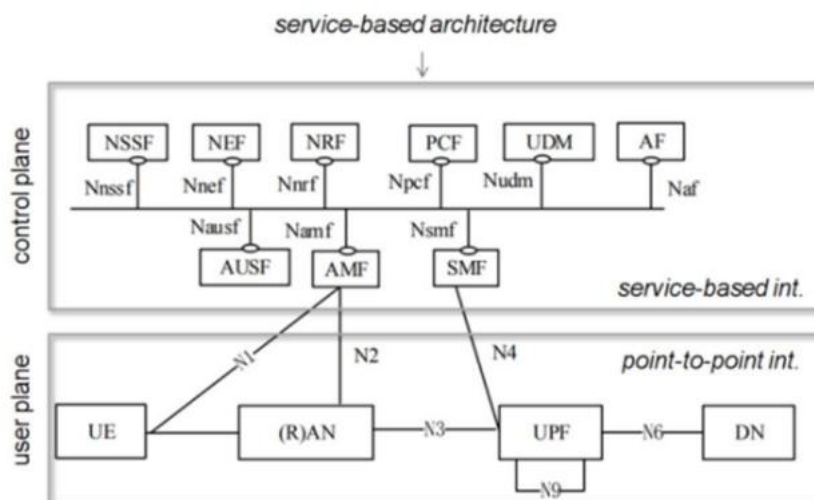
La **décomposition des fonctions** des nœuds de réseau des générations précédentes a conduit à l'élaboration d'une **architecture 5G** où les fonctions de réseau sont entièrement définies sous forme de **services**. Cette évolution se reflète également dans le **NG-RAN**, où une séparation entre le **plan de contrôle** et le **plan utilisateur** a été mise en place.

Dans le **plan utilisateur**, on trouve des fonctions appelées **UPFs (User Plane Functions)**, dont le rôle principal est d'assurer le **transfert de paquets** entre les différents **tunnels NG-U**

(voir figure. 1.4), qui composent la **session PDU**. Toutes les autres fonctions du réseau relèvent du **plan de contrôle**.

Un autre changement majeur par rapport aux générations précédentes réside dans la **modélisation des interfaces**. Le passage d'une **interface point-à-point orientée bit** (bit-oriented point-to-point) à une **interface basée sur des services web** (web-oriented service-based) constitue un tournant. En effet, le **5GC** repose sur une **architecture basée sur les services**, ce qui permet de définir des **procédures sous forme de services réutilisables**[4].

De plus, contrairement aux générations précédentes (2G, 3G, 4G), où les interfaces entre les entités réseau étaient **normalisées en point-à-point**, le **5GC** utilise des interfaces basées sur des services. Ces interfaces sont prises en charge par des **protocoles web** modernes comme **HTTP/2, REST** et **JSON**, facilitant ainsi les interactions entre les entités du **plan de contrôle**. [4]



**Figure .1.6 :** Architecture du système 5G sans itinérance (no-roaming).[5]

## 5. Les 10 Piliers de la 5G :

Nous identifions 10 blocs de construction essentiels pour la 5G, et nous détaillons chacun de ces blocs tout en soulignant leur rôle et leur importance pour atteindre les objectifs de la 5G.

### 5.1. Évolution des RAT existants :

La 5G NR (New Radio) est une technologie d'accès radio (RAT) nouvelle, développée par le 3GPP pour le réseau mobile 5G. Elle est conçue pour être la norme mondiale de l'interface

radio des réseaux 5G. La série de spécifications 38 du 3GPP fournit les détails techniques de la 5G NR, une RAT qui dépasse les capacités de LTE.

## **5.2 Déploiement hyperdense sur petites cellules :**

Le terme "small cell" regroupe les stations de base mobiles utilisées pour renforcer les signaux dans des zones intérieures, telles que les centres commerciaux et les bureaux.

## **5.3 Réseaux auto-organisés (SON) :**

Les réseaux auto-organisés (SON) sont un autre élément clé de la 5G. À mesure que le nombre de petites cellules augmente, les capacités SON s'étendent. En effet, près de 80 % du trafic sans fil provient de l'intérieur des bâtiments. Afin de gérer cette demande élevée, un déploiement de petites cellules à haute densité est nécessaire, souvent dans des unités montées et principalement entretenues par l'utilisateur, non contrôlées par l'opérateur.

## **5.4 Communication de type machine (MTC) :**

La **Machine-Type Communication (MTC)** est un catalyseur important de la 5G, permettant la transition du réseau câblé central au réseau de communication, et facilitant le partage de l'infrastructure sans fil entre différents opérateurs.

## **5.5 Développement des RAT à ondes millimétriques :**

La technologie **5G mmWave** révolutionne la communication cellulaire en offrant une largeur de bande massive et une capacité exceptionnelle grâce aux bandes de fréquences supérieures à 24 GHz.

## **5.6 Refonte des liens de liaison :**

Alors que les opérateurs migrent de la 4G vers la 5G, il devient essentiel de prendre en compte l'évolution du réseau d'accès radio (RAN). Ce dernier constitue le lien principal entre les sites radio et le réseau de transport. Étant donné la dispersion géographique des RANs, leur gestion devient complexe, mais toute évolution visant à améliorer l'efficacité ou réduire les coûts opérationnels est primordiale.

## **5.7 Efficacité énergétique :**

L'efficacité énergétique dans la 5G est mesurée par le nombre de bits transmis par **Joule** d'énergie. Elle se décompose en deux aspects :

- **Côté réseau** : la quantité de bits reçus ou transmis par unité d'énergie du réseau d'accès radioélectrique (RAN).
- **Côté dispositif** : la quantité de bits d'information par unité d'énergie consommée par le module de communication.

### 5.8 Attribution d'un nouveau spectre pour la 5G :

Le spectre 5G couvre la gamme des fréquences inférieures à 6 GHz ainsi que les fréquences des ondes millimétriques (mmWave), à partir de 24,25 GHz. Il permet de transporter les données depuis l'équipement utilisateur (UE) vers les stations de base cellulaires.

### 5.9 Partage du spectre :

Le partage du spectre est un concept innovant qui permet de réutiliser le matériel, le spectre et les sites existants. Cette approche améliore la couverture des bandes moyennes et hautes et permet aux opérateurs de se diriger vers une 5G autonome, réduisant ainsi les investissements en nouveaux sites tout en optimisant les nouvelles applications de la 5G.

### 5.10 Virtualisation RAN :

La **virtualisation du RAN** est un catalyseur clé de la 5G, facilitant le partage de l'infrastructure sans fil entre plusieurs opérateurs. Ce processus déplace la virtualisation du réseau central filaire (commutateurs et routeurs) vers le RAN, apportant plus de flexibilité et d'efficacité.

## 6. Les technologies du réseau 5G:

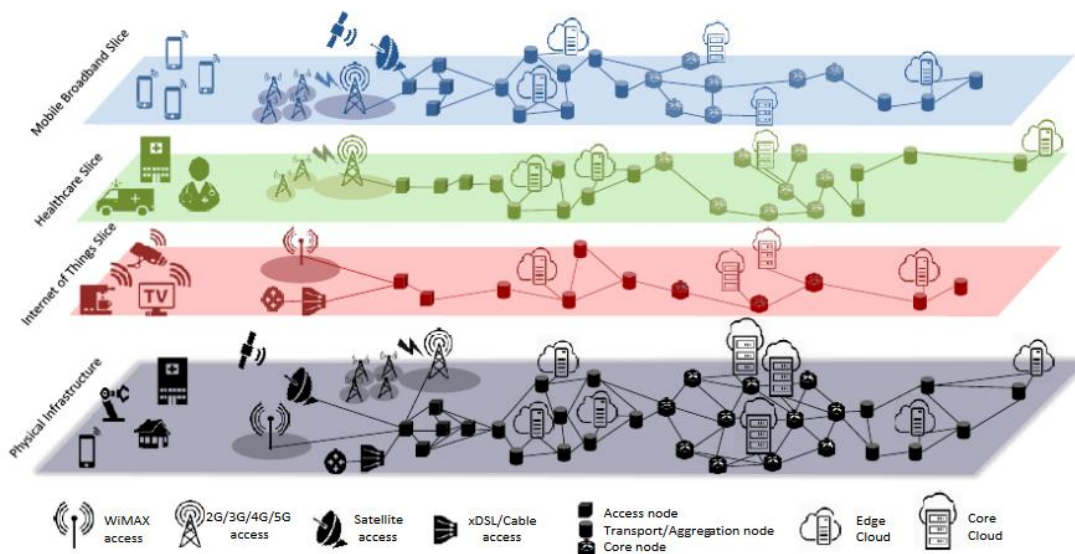
### 6.1. Découpage du réseau en 5G(network slicing) :

La 5G devrait permettre d'offrir d'importants gains de productivité et d'efficacité dans un large éventail d'industries verticales. Avec un nombre d'utilisateurs compétitif croissant, une conception de réseau flexiblement découpé est nécessaire pour répondre aux nombreux besoins des nouveaux services horizontaux de la 5G. Les slices de réseau dans 5G sont une combinaison logique de réseau, utile pour rendre les services de réseau 5G uniques et innovateurs pour différents segments, à savoir, les réseaux d'application IoT pour les véhicules connectés, réseau d'application de diffusion intelligente, réseau d'application médico-santé pour les soins continus des patients, réseau d'application industrielle pour le



suivi des équipements en temps réel, réseau d'application VR et AR, réseau d'application de confiance et sécurisé. [6]

Dans un planning d'évolution progressive, ces applications nécessiteront des types de réseaux différents, et chacun d'eux aura ses propres exigences sur la performance en ce qui concerne la latence, la fiabilité, le déluge de trafic, etc. En conséquence, la qualité de services (QoS) dans tout un réseau résultera dans une engageabilité des ressources à travers le réseau. Il devient alors très difficile pour l'opérateur de planifier la QoS. Le découpage est un processus dans le quel un réseau physique est découpé en ressources logiques isolées afin de répondre aux besoins d'applications et de services différents. En 5G, plusieurs technologies de découpage sont normalisées à des niveaux d'OS, de RAN, de kernel, ou de service d'application. [7] Pour une gestion de ressources unifiée (RAN, réseau cœur, transport d'acheminement de données), un découpage matériel au niveau physique est alors nécessaire. Le SDN au niveau d'OS est un bon candidat pour cette approche d'architecture.



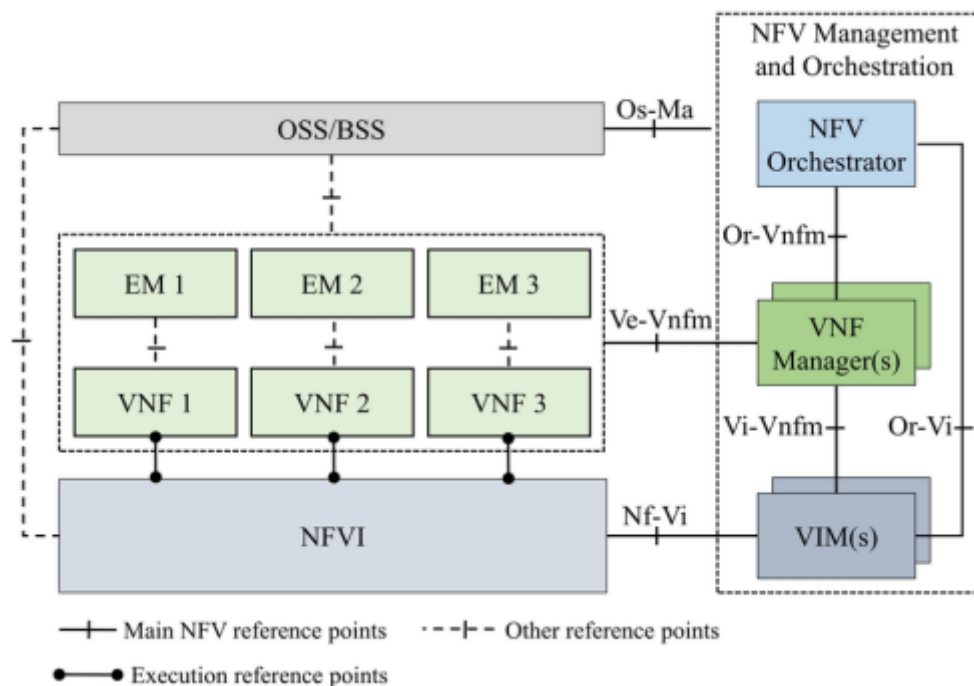
**Figure .1.7 :** Tranches de réseau 5G fonctionnant sur une infrastructure commune multi-fournisseurs et multi-accès. Chaque tranche est gérée de manière indépendante et répond à un cas d'usage particulier. [7]

## 6.2 NFV(Network Function Virtualization):

La virtualisation des fonctions réseau (NFV – *Network Function Virtualization*) consiste à remplacer les fonctions traditionnellement assurées par des équipements spécialisés, tels que

les routeurs et les pare-feu, par des instances logicielles s'exécutant sur du matériel standard du commerce (COTS – *Commercial Off-The-Shelf*). Cette approche vise à redéfinir la conception des réseaux et la fourniture des services en permettant aux entreprises de simplifier de nombreuses tâches réseau, d'améliorer l'efficacité opérationnelle et de déployer plus rapidement et plus facilement de nouveaux services à forte valeur ajoutée. [8]

La NFV joue un rôle fondamental dans le développement de l'infrastructure 5G, en facilitant la virtualisation de l'ensemble des équipements réseau. Grâce au *network slicing* (découpage réseau), il devient possible de créer des architectures réseau virtuelles distinctes, adaptées à des besoins spécifiques, tout en partageant une infrastructure physique commune. Cette flexibilité permet de proposer des réseaux personnalisés pour les applications, les dispositifs, les services, les opérateurs et les utilisateurs finaux. Par ailleurs, la NFV rend possible l'implémentation d'un *Cloud* distribué, offrant aux opérateurs la capacité de construire des réseaux plus agiles, programmables et évolutifs. La figure III.8 présente l'architecture de la NFV et ses différentes composantes.



**Figure.1.8 :** L'architecture de la NFV.[9]

### 6.3.Edge/ Cloud computing :

### 6.3.1. Cloud Computing (CC) :

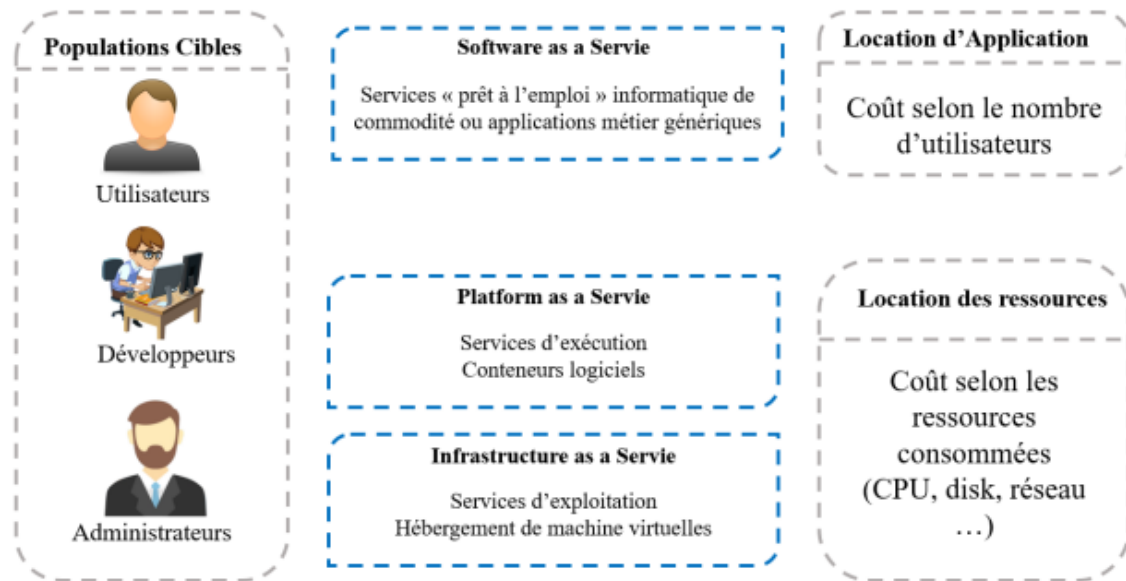
#### 6.3.1.1 Définition du cloud computing :

Le **Cloud computing** désigne le principe de délocalisation des traitements informatiques, traditionnellement exécutés sur le poste de l'utilisateur, vers des serveurs distants. [10] En d'autres termes, il s'agit de la mise à disposition de services informatiques à la demande — tels que des serveurs, du stockage, des bases de données, des solutions de gestion réseau, des logiciels, des outils d'analyse ou encore des services d'intelligence artificielle — via Internet (le « cloud »).

Cette approche permet de favoriser l'innovation, d'accéder à des ressources informatiques flexibles et de bénéficier d'économies d'échelle. Le modèle repose généralement sur une tarification à l'usage : l'utilisateur ne paie que pour les services effectivement consommés. Cela permet de réduire les coûts d'exploitation, d'optimiser la gestion de l'infrastructure informatique et d'ajuster facilement les ressources en fonction de l'évolution des besoins de l'entreprise. La figure 3 illustre les principes fondamentaux du cloud computing.

#### 6.3.1.2. Les services du Cloud :

Les services de cloud computing se répartissent généralement en trois grandes catégories : **IaaS** (*Infrastructure as a Service*), **PaaS** (*Platform as a Service*) et **SaaS** (*Software as a Service*). Ces modèles sont souvent décrits comme une « pile » de services, chacun reposant sur le précédent. Comprendre la nature et les spécificités de ces différentes couches permet de mieux choisir les solutions adaptées à ses besoins et d'optimiser l'utilisation du cloud pour atteindre plus efficacement ses objectifs. [11]



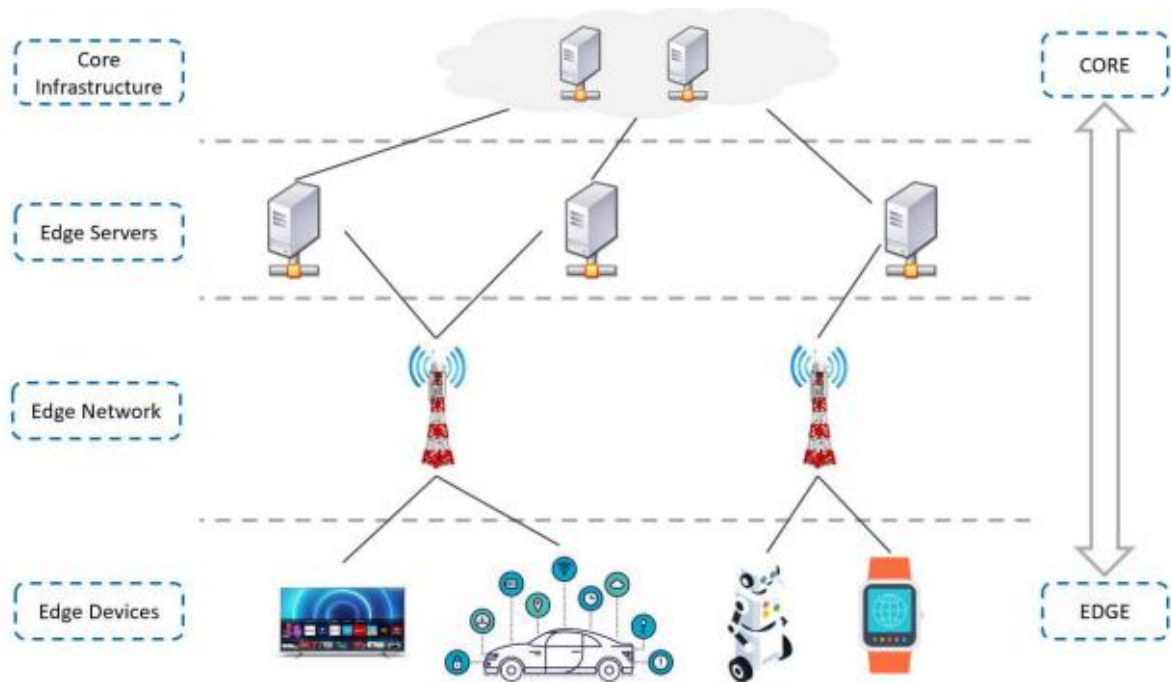
**Figure.1.9** : Service du cloud computing.[12]

### 6.3.2.Edge Computing :

Le cloud computing, avec ses structures classiques de cloud privé et de cloud public, est désormais bien connu. Toutefois, l'évolution des besoins en traitement des données et en performance a conduit à l'émergence de nouveaux paradigmes, dont le **Edge Computing**, qui vient enrichir et complexifier l'écosystème du cloud.

Le terme *Edge* désigne la périphérie du réseau, tandis que *Computing* fait référence aux traitements informatiques. Le **Edge Computing**, ou informatique en périphérie, consiste donc à effectuer les traitements au plus près des sources de données, c'est-à-dire à proximité des utilisateurs, des dispositifs connectés ou des capteurs.

Il s'agit d'une infrastructure de calcul physique située entre les équipements terminaux et les centres de données cloud traditionnels (hyperscale). En rapprochant la puissance de traitement des points de collecte des données, le Edge Computing permet de réduire considérablement la latence, de désengorger les réseaux et d'améliorer les performances des applications, notamment celles qui nécessitent des réponses en temps réel.



**Figure.1.10** : Démonstration générale du Edge Computing.[12]

Le **Edge computing** est souvent associé aux environnements **IoT**, car les données générées par les objets connectés proviennent généralement de sites distants, éloignés des centres de données traditionnels. Avec l'explosion du nombre d'appareils intelligents connectés à Internet au cours de la dernière décennie, la consommation de bande passante a également fortement augmenté. En rapprochant les capacités de traitement des capteurs et des dispositifs IoT, les entreprises peuvent réagir plus rapidement aux données collectées en temps réel.

Cependant, le Edge computing ne se limite pas uniquement aux environnements IoT. Dans certains cas, l'ensemble des traitements, notamment l'analyse des données, peut être effectué localement, à proximité immédiate de la source, rendant inutile la transmission des données vers un centre distant via Internet. Même en l'absence de connexion réseau, des contraintes subsistent, telles que la limitation de l'espace physique, la capacité de calcul réduite ou encore les exigences strictes en matière de sécurité.

#### 6.4.SDN (software defined networks) :

Les réseaux définis par logiciel (SDN) visent à accroître l'adaptabilité et la flexibilité des infrastructures réseau. À l'origine, le SDN a été conçu comme une approche permettant de concevoir, construire et gérer les réseaux en dissociant les plans de contrôle et de transmission. Cette séparation rend le contrôle du réseau programmable et permet d'abstraire l'infrastructure physique au profit des applications et services réseau.

Le principe fondamental du SDN repose sur l'indépendance du plan de contrôle par rapport au matériel réseau, en introduisant un contrôle externe des données à travers un composant logiciel centralisé appelé **contrôleur**. [13] Placé entre les équipements réseau et les applications, ce contrôleur orchestre la gestion des flux de paquets, rendant ainsi le réseau plus intelligent et plus réactif.

Nous en parlons en détail dans le chapitre 2.

#### 6.5. Massive MIMO:

Les standards sans fil de nouvelle génération déploient des réseaux d'antennes à grande ouverture, de l'ordre de la longueur d'onde, sur les stations de base (BS) et les dispositifs mobiles, dans une multitude de configurations.

Les applications vont du *beamforming* purement analogique au traitement numérique complet du signal entre les éléments de l'antenne.

Les schémas de diversité, également appelés *diversité spatiale* ou *spatial diversity combining*, similaires aux systèmes d'antennes à faisceaux commutés, peuvent être essentiels côté réception pour atténuer les effets d'obstruction (*shadowing*).

Des applications plus avancées incluent des schémas de multiplexage spatial, pouvant être réalisés avec divers nombres d'antennes géographiquement réparties ou étroitement localisées, que ce soit au niveau des stations de base ou des dispositifs.

Cela peut s'effectuer en liaison montante (*uplink*) comme en liaison descendante (*downlink*).

Le **MIMO multi-utilisateur en downlink (MU-MIMO)** est particulièrement attrayant. Il permet la transmission simultanée de paquets à plusieurs utilisateurs sur les mêmes blocs de ressources, tout en moyennant l'atténuation du canal pour chaque utilisateur, ce qui peut permettre une réduction de la puissance de transmission.

Cela nécessite des stratégies adéquates d'ordonnancement d'utilisateurs (*scheduling*) et de

retour d'état du canal (*feedback*), basées sur la quantification par codebook et l'estimation du canal.

Un avantage majeur de l'architecture multi-antennes est l'amélioration du gain de beamforming, donc du débit.

Le *beamforming* conventionnel requiert une connaissance quasi parfaite de l'état du canal (CSI) sur tous les éléments de l'antenne, afin d'aligner en phase les copies du signal émis, pour les combiner de manière constructive au niveau de l'utilisateur ciblé et interférer de façon destructive ailleurs.

Cela devient possible grâce à des degrés de liberté supplémentaires, mais implique une complexité accrue.

La nécessité de CSI pousse parfois à adopter des solutions sous-optimales. Des approches récentes visent à relâcher ces exigences, en permettant une CSI imparfaite.

L'analyse, réalisée dans un régime asymptotique à très grand nombre d'antennes, montre qu'un grand nombre d'antennes non corrélées est nécessaire pour s'approcher d'une performance idéale .[12]

Le **Massive MIMO** (*multiple-input-multiple-output massif*) est proposé comme solution aux nombreux défis de la 5G.

Dans ce paradigme, les stations de base utilisent un grand réseau d'antennes pour desservir simultanément plusieurs utilisateurs, chacun avec son propre flux de données, sur des ressources temps ou fréquence orthogonales.

En utilisant l'inverse de la matrice de covariance du canal comme précodage, on obtient des gains en couverture, débit et efficacité, supérieurs aux stations de base classiques avec peu d'antennes.

Ces affirmations sont généralement issues d'analyses dans des régimes asymptotiques à grand nombre d'antennes.

Cependant, la faisabilité du Massive MIMO de première génération est remise en question à cause des limites du signal de pilote (*pilot signaling*) et du feedback.

Une méthode pour le Massive MIMO en LTE est examinée, où 16 antennes sont combinées dans un réseau compact.

Les performances sont analysées selon les types de codebooks et les produits scalaires (*dot-products*) avant sélection.

Les analyses montrent que les codebooks qui réduisent l'erreur de quantification et la

sélectivité fréquentielle sont les plus efficaces.

Avec une durée d'entraînement réduite, des latences inférieures à 1 ms sont atteignables.[14]

Des réseaux avec plus d'une centaine d'antennes sont envisagés pour surmonter les limitations fondamentales de la densification 5G.

Dans le paradigme Massive MIMO, les stations de base équipées de grands réseaux d'antennes desservent plusieurs utilisateurs en blocs temps/fréquence orthogonaux.

L'**annulation successive des interférences (SIC)** en liaison montante, combinée à une augmentation linéaire du gain avec le nombre d'antennes en beamforming descendant, appuie fortement l'adoption du Massive MIMO.

Cependant, les comparaisons par simulateur freinent les attentes, d'où le besoin de recherches expérimentales sur les codes, les stratégies de feedback et les imperfections matérielles.

Le Massive MIMO permet d'importants gains en efficacité énergétique, bien que la linéarité des amplificateurs de puissance puisse réduire les gains attendus.

Leur linéarité en fonction de la puissance transmise et la sélectivité fréquentielle sont souvent négligées.

L'application d'un modèle haute fidélité de l'infrastructure non linéaire donne une vision très différente du débit en uplink et de la qualité du précodage, tout en révélant des erreurs d'analyse et des économies potentielles sur le matériel.

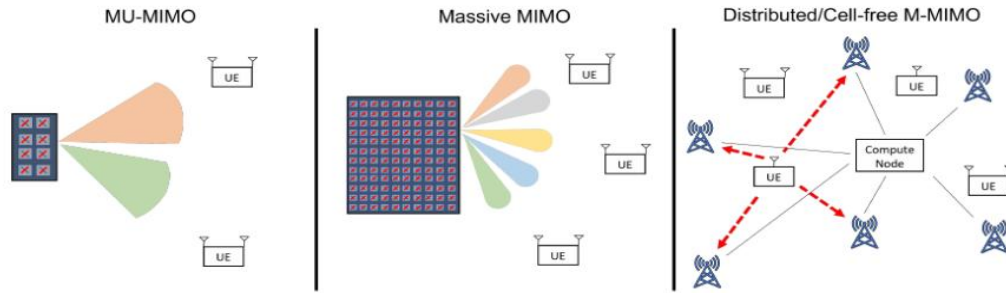
En parallèle à la quantification côté réception, la modélisation des ouvertures de feedback révèle que la diversité multi-utilisateur récupérable offre des gains de débit significatifs avec 16 utilisateurs, comparables à ceux obtenus avec des estimations directes du canal.

Des expériences matérielles démontrent des débits inédits tout en conservant les avantages d'un système avec pertes.

L'égalisation de réseaux massifs avec peu de symboles par bloc de cohérence est revisitée avec des estimations de canal à facteurs de lissage multiples, ce qui améliore fortement la robustesse au bruit coloré.

Un design de pilotage d'antenne en boucle fermée, limité par couche et réseau, permet des gains d'ergodicité sur plusieurs configurations. [15]





**Figure 1.11 :** Visualisation du MU-MIMO, du massive MIMO, et du CoMP ou M-MIMO cellulaire distribué. [16]

- Dans le MIMO massif sans cellule (cell-free massive MIMO), il existe un nœud de calcul centralisé, plusieurs points d'accès et des équipements utilisateurs (UE). Le nœud de calcul utilise les points d'accès distribués comme des éléments logiques et traite les données à travers le réseau. [16]

## 7.les paramètres de qualité service avec les interfaces :

Les paramètres de Qualité de Service (QoS) dans la 5G NR (New Radio) jouent un rôle crucial pour garantir que les différents services et applications bénéficient du niveau de performance et des ressources appropriés alloués par le réseau. Ces paramètres sont définis afin de répondre aux exigences variées de cas d'usage allant du haut débit mobile amélioré (eMBB) à la communication massive de type machine (mMTC), en passant par la communication ultra-fiable à faible latence (URLLC).

Examinons en détail les principaux paramètres QoS techniques de la 5G NR :

### 7.1. Débit de Données (Bit Rate) :

- **Définition :** Le débit de transfert de données attendu ou garanti pour une liaison ou un service spécifique.
- **Détail technique :** Exprimé en bits par seconde (bps), ce paramètre garantit que le réseau alloue suffisamment de ressources pour satisfaire les besoins de débit du service concerné.

### 7.2. Latence :

- **Définition** : Temps nécessaire pour que les données voyagent de la source à la destination.
- **Détail technique** : Différents services ont des exigences de latence variées. Par exemple, les services eMBB peuvent tolérer une latence plus élevée que les services URLLC. Les paramètres QoS précisent la latence maximale acceptable pour chaque service.

### 7.3. Fiabilité :

- **Définition** : Probabilité que les données soient transmises avec succès, sans erreur ni perte.
- **Détail technique** : Les services URLLC, tels que les applications critiques, exigent une très haute fiabilité. Cela inclut des métriques comme le taux d'erreur de paquets pour garantir la communication fiable.

### 7.4. Taux de Perte de Paquets :

- **Définition** : Pourcentage de paquets perdus pendant la transmission.
- **Détail technique** : Les paramètres QoS définissent un taux de perte de paquets acceptable, notamment critique pour les applications en temps réel ou les systèmes de contrôle où chaque paquet est important.

### 7.5. Niveaux de Priorité :

- **Définition** : Différenciation du trafic selon sa priorité, pour assurer un traitement préférentiel des services critiques.
- **Détail technique** : Chaque service ou application se voit attribuer un niveau de priorité. Les services à haute priorité bénéficient d'une meilleure allocation des ressources et d'un accès plus rapide au réseau.

### 7.6. Allocation de Blocs de Ressources :

- **Définition** : Répartition des ressources en fréquence et en temps pour une liaison spécifique.

- **Détail technique** : Les paramètres QoS déterminent la quantité de spectre et la durée allouée à un utilisateur ou service, essentielle pour respecter les exigences de débit et d'efficacité du réseau.

#### 7.7. Orientation et Redirection du Trafic :

- **Définition** : Capacité à orienter ou rediriger le trafic selon les conditions du réseau et les besoins du service.
- **Détail technique** : Les paramètres QoS permettent de diriger intelligemment les services vers la cellule ou la tranche réseau la plus appropriée, selon la charge ou la qualité du signal.

#### 7.8. Paramètres de Handover (Transfert Inter-cellules) :

- **Définition** : Paramètres régissant le passage d'une cellule ou d'un nœud réseau à un autre.
- **Détail technique** : Les QoS assurent une transition fluide entre les cellules tout en maintenant les niveaux de qualité requis, essentiel pour une expérience utilisateur continue.

#### 7.9. Contrôle de la Congestion :

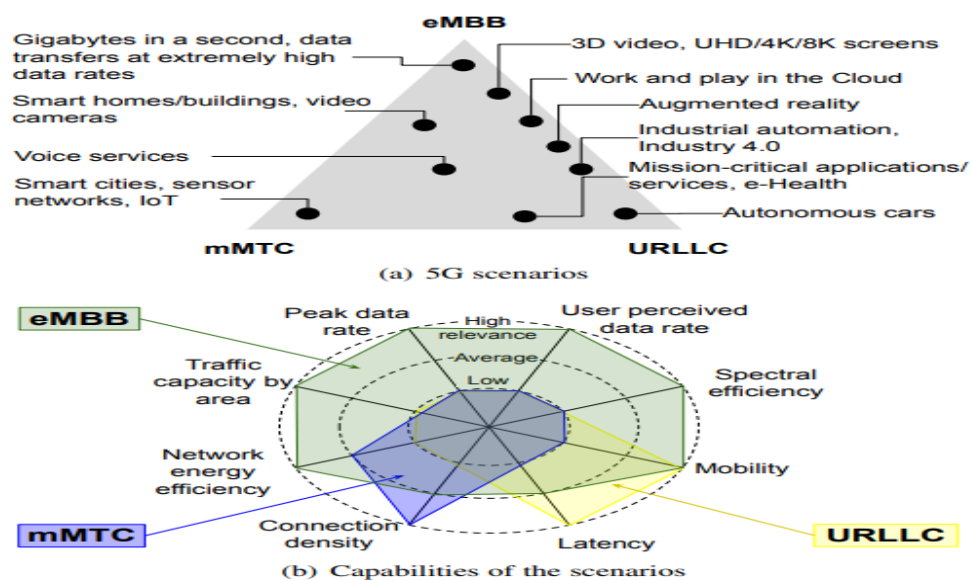
- **Définition** : Mécanismes pour contrôler et réduire la congestion dans le réseau.
- **Détail technique** : Les paramètres QoS intègrent des mécanismes de gestion des ressources afin d'éviter les engorgements et préserver la qualité de service, surtout en cas de forte demande.

#### 7.10. Débit Garanti (GBR - Guaranteed Bit Rate) :

- **Définition** : Le débit minimal garanti pour un service donné.
- **Détail technique** : Ce paramètre est essentiel pour les services nécessitant une bande passante constante (streaming, applications en temps réel). Le réseau garantit la disponibilité de ce débit minimal à tout moment.[17]

- Les paramètres QoS dans la 5G NR sont un ensemble de spécifications techniques qui

Définissent les performances et l'allocation des ressources pour différents services. Ils sont essentiels pour offrir une large gamme d'applications avec des exigences variables, assurant ainsi une expérience utilisateur de haute qualité, fiable et cohérente.



**Figure 1.12:** Scénarios (ou exigences) définis pour les réseaux 5G (à gauche) et capacités offertes dans ces scénarios (à droite). [18]

- **eMBB (broadband mobile amélioré)** – Cela nécessite une capacité élevée, une vitesse élevée et une allocation dynamique de la bande passante. Une vitesse élevée permet de téléverser et télécharger plus rapidement du contenu vidéo, y compris de grande taille (en gigaoctets), tandis que la bande passante peut être allouée à la demande pour des services comme la vidéo ultra haute définition (UHD), la réalité virtuelle (RV), la réalité augmentée (RA), etc.
- **uRLLC (communications ultra-fiables et à faible latence)** – Ces services requièrent une fiabilité élevée, une disponibilité maximale et une latence minimale. La haute fiabilité prend en charge des services critiques comme les usines robotisées connectées et la chirurgie à distance, tandis que la faible latence rend possibles des services sensibles aux délais tels que les voitures autonomes et les drones télécommandés.

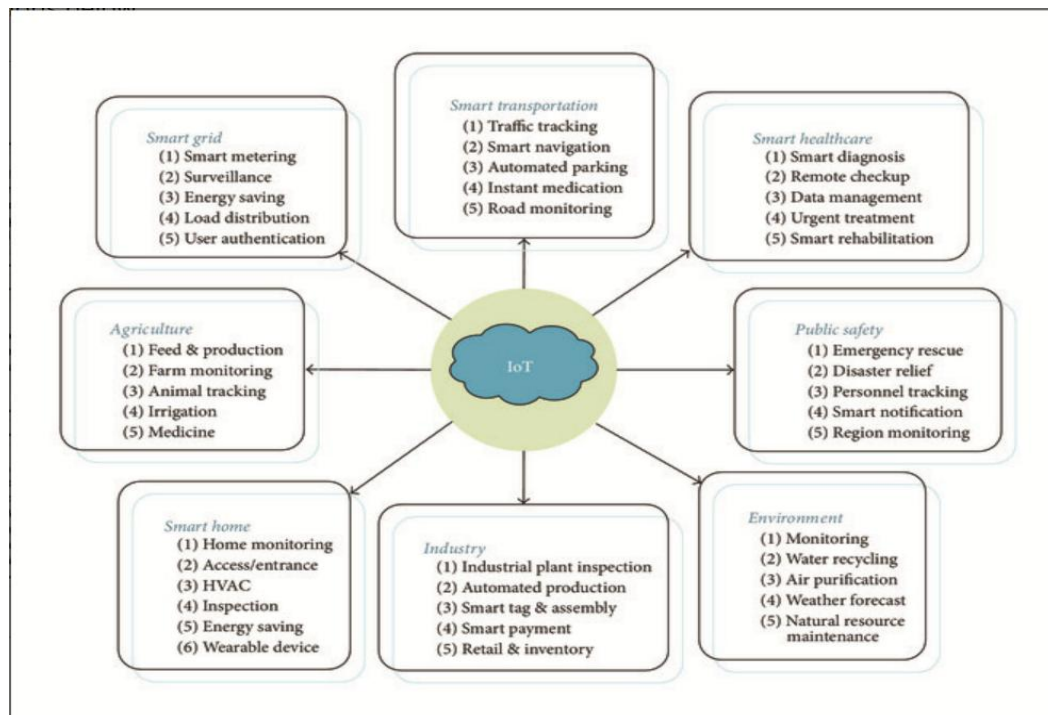
- **mMTC (communications massives de type machine)** – Une capacité élevée, une vitesse élevée et une allocation dynamique de la bande passante caractérisent cette catégorie de services. Elle est particulièrement adaptée aux services de l'internet des objets (IoT), comme les villes intelligentes, en prenant en charge des milliards d'« objets » et de « dispositifs », jusqu'à une densité d'un million par kilomètre carré. [19]

## **8. Domaine d'application le 5G avec des exemple de chaque domaine :**

### **8.1. Applications de l'Internet des Objets (IoT) :**

Depuis l'introduction de la technologie de l'Internet des Objets (IoT), de nombreux dispositifs ont été interconnectés, ce qui leur a permis de partager des données entre eux et d'exécuter diverses tâches de manière autonome. Toutefois, la croissance de l'écosystème IoT a engendré des défis à la fois technologiques et sociaux concernant la gestion de l'information liée à ces dispositifs, car des millions d'appareils physiques et de capteurs doivent être connectés de manière sécurisée à l'infrastructure de l'informatique en nuage, afin que les données puissent être exploitées efficacement.

Les réseaux 5G peuvent faciliter et accélérer le déploiement à grande échelle de la technologie IoT, en permettant une connectivité massive entre des appareils proches. [20] L'implémentation de la technologie SDN dans les réseaux 5G offre des avantages significatifs pour les applications IoT, tels que l'automatisation des processus de changement de configuration réseau, une gestion centralisée et basée sur une vision d'ensemble des appareils connectés, un contrôle optimal de l'allocation de la bande passante des ressources réseau, et une reconfiguration flexible du réseau selon les opérations IoT.



**Figure .1.13 :** Applications perspectives de l'Internet des objets (IoT).[20]

## 8.2. Applications de Conduite Autonome :

Les véhicules autonomes détectent efficacement les informations de leur environnement à l'aide de capteurs et peuvent se déplacer de manière autonome tout en évitant les collisions avec les obstacles sur leur trajectoire. Pour mettre en œuvre une telle technologie, de nouveaux systèmes radar ont été développés pour surveiller en continu les objets en mouvement dans l'espace. En outre, des systèmes de communication véhicule-à-véhicule (V2V) et véhicule-à-infrastructure (V2I) sont également nécessaires pour transmettre des mises à jour sur l'état des routes et des signaux de circulation, afin d'améliorer la précision des prédictions de mobilité.

Ces applications exigent une bande passante élevée, un débit important, et une fiabilité maximale dans la transmission des informations. Les réseaux 5G offriront des communications ultra-fiables à faible latence (URLLC) afin de garantir la fiabilité des données de prédiction de trajectoire et de permettre le transfert rapide des informations routières pour ajuster en temps réel la vitesse et la direction des véhicules autonomes.

L'utilisation de la technologie SDN dans les réseaux 5G apporte une valeur ajoutée permettant de répondre à ces exigences imposées par les conditions des applications de conduite autonome, en proposant une différenciation des services basée sur des profils de

qualité de service (QoS), en assurant l'isolation des données de service accessibles uniquement aux véhicules désignés, et en fournissant des niveaux de QoS contrôlables, aussi bien entre groupes qu'au sein d'un même groupe, pour les véhicules et les données .[21]



**Figure1.14.**Usages des systèmes intelligents dans les domaines stratégiques de la vie moderne.  
[21]

## 8.Conclusion:

La communauté scientifique dans son ensemble a publié ses exigences en matière de réseaux cellulaires pour 2020 et au-delà, désignées sous le nom de systèmes 5G. Ces exigences comprennent des débits de données de pointe élevés, une capacité accrue, une efficacité spectrale élevée, une couverture étendue, une réduction de la latence, ainsi qu'une



augmentation de la fiabilité, de la disponibilité et de la sécurité. Plusieurs chercheurs se sont appuyés sur ces exigences pour mener des recherches approfondies sur les diverses technologies et systèmes qui pourraient faire partie des futurs systèmes 5G.

L'architecture du réseau cellulaire 5G est relativement nouvelle et sa standardisation est encore en cours. Les 25 prochaines années verront l'apparition d'applications exigeant de grands débits de données et une forte densité d'appareils connectés. Par conséquent, les différences entre les réseaux terrestres et les réseaux satellitaires devront être surmontées, ces deux types de réseaux étant appelés à fonctionner de manière fluide et intégrée, comme une seule et même entité.

Les réseaux Métro et Edge joueront un rôle majeur dans la réduction du trafic de retour (backhaul) sur les canaux de macro-fronthaul des grandes stations de base macrocellulaires. Les liens Fronthaul, Backhaul et Midhaul des futurs réseaux de retour verront l'implémentation de différentes technologies optiques telles que : le multiplexage en longueur d'onde dense (DWDM), les réseaux optiques passifs et actifs, les réseaux optiques en espace libre (Free Space Optical), et les liaisons radio-sur-fibre (Radio-over-Fiber).

La majorité de la littérature existante repose sur l'application des principes SDN (Software Defined Networking) aux réseaux LTE. Plusieurs travaux examinent différents aspects du cœur de réseau LTE/Evolved Packet Core et de l'évolution à long terme, à travers des études analytiques et des simulations. Une nouvelle architecture de réseau LTE plat est proposée, visant à améliorer la scalabilité en fusionnant les fonctionnalités du Serving Gateway (SGW) et du Packet Data Network Gateway (PGW). L'objectif est de réduire les coûts de signalisation et de tunneling dans le cœur de réseau en remplaçant ces deux éléments par un commutateur OpenFlow unique.

L'impact, souvent négligé, des revenus des opérateurs et de la gestion des files d'attente dans cette architecture proposée est également analysé. Un autre travail propose plusieurs solutions architecturales décrivant la distribution optimale des éléments du cœur de réseau, dans le but de réduire les coûts des opérateurs et d'améliorer les performances du réseau.



## chapitre2 : SDN(Software Defined Networks)

---

## **1.Introduction :**

De nos jours, l'internet connaît un énorme succès. Il est devenu un outil universel et indispensable pour les entreprises et la vie quotidienne de milliards d'individus. Avec l'explosion du nombre de terminaux mobiles, l'utilisation massive des réseaux sociaux et l'apparition de nouvelles tendances des technologies de l'information comme le Cloud Computing, la virtualisation, le BIG-DATA, et l'internet des objets (50 milliards d'objets connectés) qui sont génératrices de gros volumes de données, l'internet doit relever le défi de traiter ces volumes de trafic de plus en plus gigantesques .

Cependant, l'internet est devenu une infrastructure critique à cause de l'absence de changements dans le réseau cœur et de la rigidité des équipements déployés, qui rendent la mise en place et le déploiement de nouveaux services réseaux difficiles et coûteux .

Toutefois, l'un des problèmes qui subsiste et que tout le monde veut résoudre est la mise en place de solutions fortes, sûres et à faible coût sur lesquelles il est possible de se baser et qui soient faciles à traiter tout en étant assez puissantes pour la résolution des problèmes qui peuvent survenir.

Cela a donné aux chercheurs un motif pour passer à une architecture à contrôle centralisé, dynamique, facile à gérer et hautement évolutive d'où le SDN -Software-Defined-Networking c'est-à- dire le réseau défini par l'application. Ce qui a bouleversé l'approche traditionnelle des réseaux.

Dans ce chapitre, nous présentons les technologies des réseaux qui sont utilisées actuellement telles que la ritualisation, la centralisation, le Cloud, et le besoin d'avoir un réseau programmable et aussi nous présentons sur la technologie SDN.

## **2.Defintion du SDN :**

Le **SDN** (Software-Defined Networking) est un nouveau paradigme qui décrit une architecture réseau dans laquelle le plan de contrôle est complètement découplé du plan de données.

Selon l'ONF (Open Networking Fondation), le SDN est une architecture qui sépare le plan de contrôle du plan de données, et centralise toute l'intelligence du réseau dans une entité programmable appelée « contrôleur », afin de gérer plusieurs éléments du plan de données

(par exemple, les commutateurs ou les routeurs) via des API (Application Programmons Interfaces).

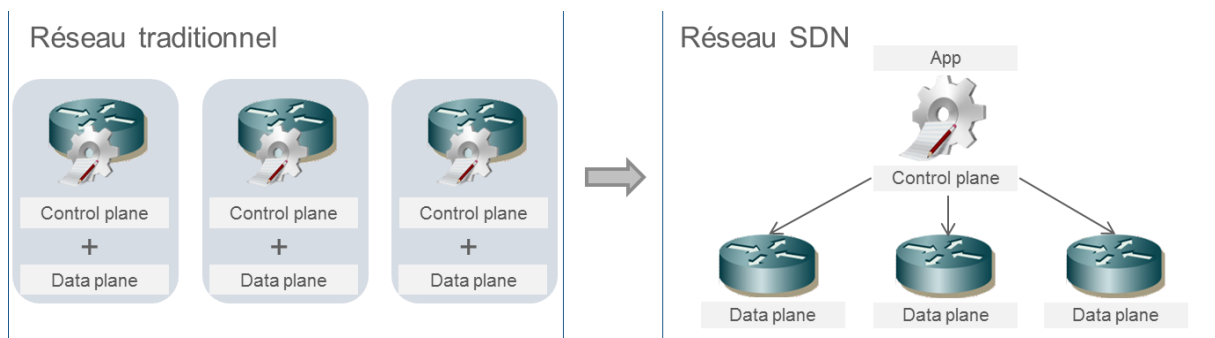
Plus concrètement, on peut dire qu'une architecture réseau suit le paradigme SDN si, et seulement si, elle vérifie les points suivants. [22]

Le plan de contrôle est complètement découplé du plan de données. Cette séparation est matérialisée à travers la définition d'une interface de programmation (Southbound API).

Toute l'intelligence du réseau est externalisée dans un point logiquement centralisé appelé contrôleur SDN, qui offre une vue globale sur toute l'infrastructure physique.

Le contrôleur SDN est un composant programmable qui expose une API (Northbound API) permettant de spécifier les applications de contrôle.

La figure 2.1 illustre la différence entre une architecture réseau traditionnelle et une architecture SDN, ainsi que la transition de l'une vers l'autre.



**Figure 2.1:**Réseau traditionnel vers le réseau SDN.[23]

### 3.Architecture du réseau SDN :

L'architecture du SDN se compose de trois couches principales :

Le plan de données (Data Plane) : situé au niveau le plus bas, il est responsable de la transmission des paquets.

Le plan de contrôle (Control Plane) : positionné entre les deux autres couches, il assure le lien entre l'infrastructure réseau et les applications.

Le plan d'application (Application Plane) : placé au niveau supérieur, il regroupe les applications réseau intelligentes.

La communication entre les contrôleurs et le Data Plane est assurée par l'interface South-Bound (SBI), située au niveau des commutateurs SDN.

Quant à la communication entre les applications et le contrôleur, elle se fait via l'interface **North-Bound (NBI), localisée dans le Control Plane, comme illustré dans la figure 3.**

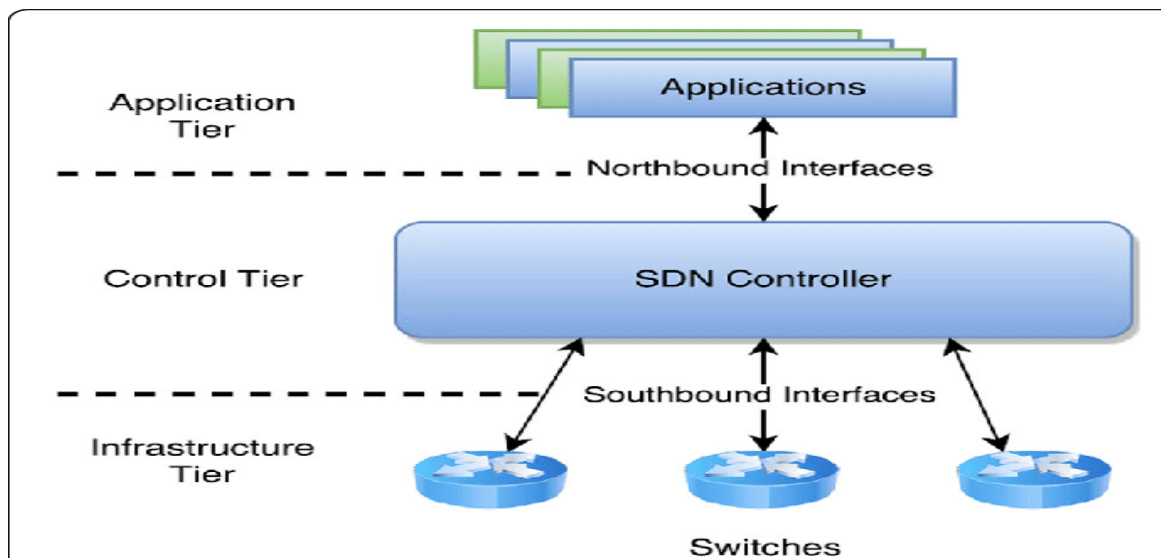


Figure 2.2:Architecteur SDN.[24]

- **3.1 La couche application :**

La couche application regroupe l'ensemble des logiciels SDN destinés à gérer les équipements réseau. Grâce à la plateforme programmable offerte par la couche de contrôle, ces applications peuvent :

accéder aux dispositifs de commutation dans la couche d'infrastructure,

introduire de nouvelles fonctions et services selon les besoins de l'infrastructure.

- Exemples d'applications SDN :

Application d'équilibrage de charge (Load Balancing).

Virtualisation du réseau.

- **3.2.La couche contrôle :**

La couche de contrôle, entièrement logicielle, repose sur le contrôleur SDN. Elle permet de gérer le plan de données en définissant les règles que les équipements doivent suivre. Elle agit comme un pont entre la couche infrastructure et la couche application, à l'aide de deux interfaces :

- **3.2.1. Interface South-Bound :**

Elle assure l'interaction avec les équipements physiques. Elle permet notamment de :

Importer les règles de transmission de paquets depuis le contrôleur pour définir le comportement des équipements réseau.

Envoyer les états du réseau au contrôleur.

Supporter des protocoles comme **OpenFlow**, qui agit comme une API sud permettant une action directe sur le Data Plane.

Établir les tables de routage.

- **3.2.2. Interface North-Bound :**

Elle permet l'interaction avec la couche application. Cette interface offre des points d'accès aux services via des **API**, permettant aux applications de :

accéder aux informations envoyées par les commutateurs,

prendre des décisions,définir dynamiquement les règles de transfert de paquets.

- **3.3.La couche infrastructure :**

Entièrement logicielle, la couche de contrôle repose sur le **contrôleur SDN**, qui joue un rôle central dans la gestion du réseau. Elle établit les règles que le **plan de données** doit suivre et fait le lien entre la **couche infrastructure** et la **couche application** à l'aide de deux interfaces clés :

- **3.3.1.Interface South-Bound (SBI) :**

Cette interface assure la communication entre le contrôleur et les équipements physiques (commutateurs, routeurs, etc.). Elle permet notamment de :

Transmettre les règles de traitement des paquets définies par le contrôleur aux dispositifs du réseau.

Remonter l'état du réseau vers le contrôleur pour une prise de décision en temps réel.

Utiliser des protocoles comme **OpenFlow**, qui agit en tant qu'API sud, permettant une gestion directe du Data Plane.

Mettre en place les **tables de routage** au sein des équipements réseau.

- **3.3.2 Interface North-Bound (NBI) :**

Cette interface facilite la communication entre le contrôleur et les applications SDN. Elle propose des **points d'accès (API)** permettant aux applications de :

Accéder aux informations collectées depuis les équipements du réseau.

Prendre des décisions intelligentes basées sur l'état du réseau.

Définir dynamiquement les règles de traitement et de transfert des paquets, en fonction des besoins spécifiques.

## **4. SDN pour les reseau 5G :**

L'attribution de pseudo adresses, la gestion des ressources radio, et bien d'autres. Il interagit également avec d'autres éléments programmables de la pile de protocoles, comme les couches MAC et PHY programmables .[25, 26]

Contrairement aux générations précédentes de réseaux cellulaires (2G et 3G), le réseau 4G/LTE a été conçu dès le départ pour intégrer ces concepts via une séparation claire entre les fonctions de **contrôle**, assurées par le cœur du réseau, et celles de **transport**, prises en charge par le réseau d'accès (backhaul).

Cependant, l'introduction d'un plan de contrôle SDN dans ce contexte soulève plusieurs **défis** :

La gestion à grande échelle des abonnés,

La prise de décision en temps réel,

La mesure et le contrôle précis du trafic réseau.

De nombreuses recherches ont été menées pour répondre à ces défis. La majorité d'entre elles se sont concentrées sur le **temps de réponse**, un paramètre crucial dans les réseaux mobiles, beaucoup plus difficile à maîtriser que dans les réseaux à infrastructure fixe, en raison de la nature dynamique et imprévisible des médias sans fil. [27–29]

#### 4.1. Vers une architecture SDN/NFV/Cloud pour la gestion de la mobilité :

Pour dépasser les limitations de l'architecture LTE centralisée (monitoring, contrôle d'accès, filtrage, transfert de données, etc.), une **nouvelle architecture de gestion de la mobilité** a été proposée, fondée sur les concepts du SDN, du NFV et du Cloud Computing.

Cette architecture propose de :

**Redistribuer les composants P-GW** du réseau LTE en les rapprochant de la périphérie, sous forme de **P-EGWs (PDN Edge Gateways)**,

**Séparer les plans de données et de signalisation**, en créant un **plan de signalisation centralisé et vitalisé**,

Adopter une gestion de la mobilité **partiellement distribuée (DMM)**.

Dans cette configuration :

Le **plan de données** est constitué de **commutateurs SDN (P-EGWs)**,

Le **plan de contrôle**, dirigé par un **contrôleur SDN**, gère la signalisation et l'allocation des adresses IP,

Les fonctions LTE classiques (MME, HSS, PCRF) sont **centralisées et virtualisées** grâce au Cloud Computing .[25, 28]

L'évaluation des performances de cette architecture montre une **meilleure flexibilité**, une **meilleure évolutivité** et une **réduction des coûts** par rapport à l'architecture traditionnelle LTE.

#### 4.2.SDN et la 5G : une transformation progressive :

L'un des objectifs fondamentaux du SDN est la **dissociation du plan de contrôle (logiciel)** du **plan de données (matériel)**, ce qui permet :

- une innovation rapide.
- une meilleure ouverture.
- une utilisation optimisée des ressources.
- un support natif de la virtualisation.

Cette approche représente probablement la transformation la plus radicale qu'aient connue les réseaux mobiles depuis leur passage du 1G (analogique) au 2G (numérique). Même la LTE n'a pas apporté un changement aussi profond.

Cependant, le **déploiement massif du SDN** dans les réseaux mobiles reste **progressif**. Dans la 5G, son application se limite souvent à des **cas d'usage spécifiques**, tandis que l'attention se concentre davantage sur :

- la **densification** des réseaux.
- l'utilisation des **ondes millimétriques**.
- les **systèmes d'antennes distribuées (DAS)**.

dans le but d'atteindre des objectifs ambitieux :

**1000x** la capacité, **100x** le débit de données, et **100x** plus de connexions simultanées par rapport à la 4G. Il est important de souligner que **les stratégies commerciales principales de la 5G ne reposent pas exclusivement sur le SDN**.

#### 4.3.Évolution vers un cœur de réseau 5G plus souple :

Le standard **5G NR (New Radio)** du 3GPP vise à rapprocher l'architecture des réseaux mobiles du modèle SDN, à travers :

- la **séparation du plan de contrôle (CP)** et du **plan utilisateur (UP)** dans le **NGC (Next Generation Core)**,
- la **modularisation des fonctions de contrôle**,
- la **définition d'interfaces normalisées** entre les deux plans.

Les réseaux 5G devront répondre à des exigences croissantes en termes de **bande passante** et de **qualité de service (QoS)** .[29] La **virtualisation des fonctions réseau (NFV)** est un levier essentiel dans cette transformation, permettant au SDN et au NFV de **travailler ensemble pour construire les réseaux du futur**. [30]



Malgré les avancées significatives depuis 2020, plusieurs **défis majeurs** persistent :

- la **grande évolutivité** requise par l'Internet des objets (IoT),
- les **contraintes énergétiques** sur les terminaux,
- l'**optimisation de la latence** et de la bande passante,
- une **gestion efficace des ressources**,
- la **réduction des coûts de déploiement**. [31]

Voir la figure suivante :

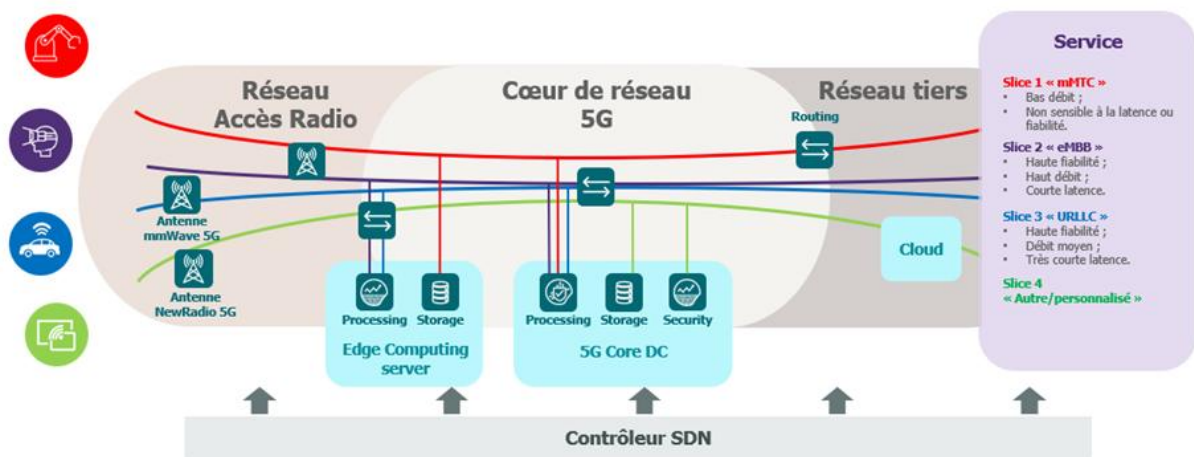


Figure2.3 : NFV SLICE dans le réseau 5G.[32]

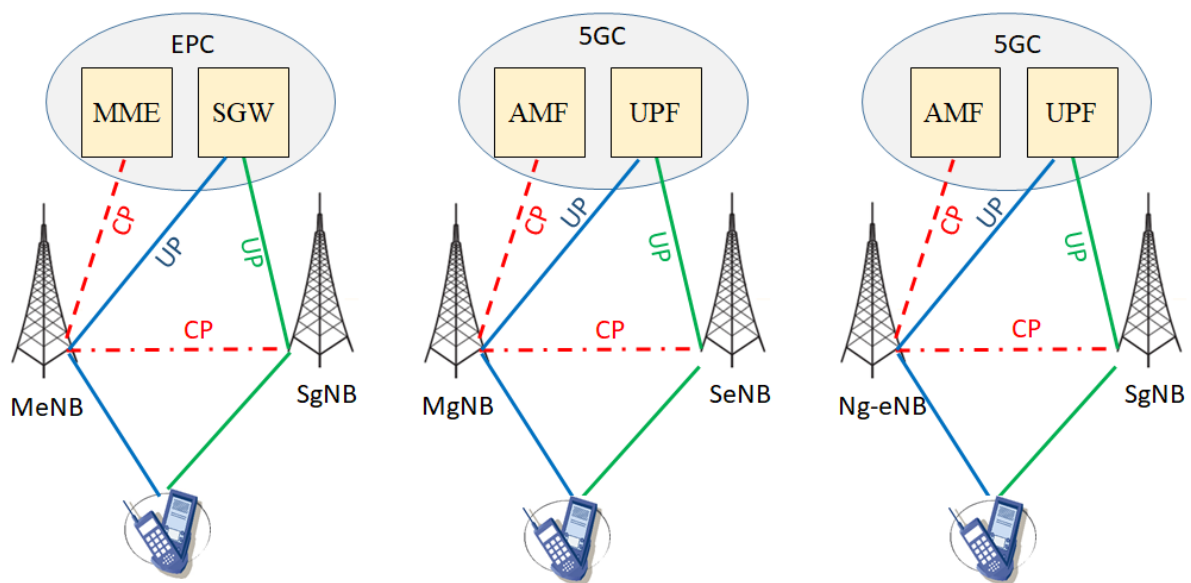
Dans le but d'offrir des services fiables personnalisés tout en limitant les coûts d'installation et d'exploitation au sein des réseaux 5G, la technique de subdivision logique du réseau (network slicing) a été récemment proposée au sein des réseaux sans fils en tant que principal catalyseur de la convergence des services du réseau et des services personnalisés à la demande. En partitionnant un réseau physique en plusieurs partitions logiques (slices) dans le but d'offrir des services personnalisés, les ressources de l'infrastructure du réseau peuvent être allouées de façon dynamique et efficace aux différentes partitions du réseau logique en fonction des requis en matière de qualité de service. Dans la littérature, la gestion de la mobilité et l'allocation vitalisée des ressources n'ont pas été suffisamment étudiées pour les réseaux 5G basés sur le partitionnement virtuel du réseau.

Bien que plusieurs types de réseaux mobiles dominant dans les années 2020. Il existe également de nombreux défis, tels que: atténuer la consommation d'énergie des appareils et

des stations de base, une meilleure allocation des ressources, des débits de données plus élevés, garantir des temps d'aller-retour plus courts, réduire tous les coûts, développer et renforcer les politiques de gestion de la mobilité, l'élasticité, l'agilité et l'évolutivité. [33]

A l'heure actuelle, le SDN est une technologie innovante dans le domaine du réseautage qui consiste à définir les fonctionnalités du réseau dans des progiciels. Cela permet une efficacité sur la configuration du réseau et son allocation de ressources. Par la séparation entre le plan de contrôle et le plan de données, le SDN garantit une transparence entre l'infrastructure réseau et les applications en cours d'exécution. Ainsi, chaque contrôleur gère divers équipements du réseau en tant que commutateurs et s'attend à un contrôle plus flexible et intelligent des données échangées sur le réseau. [32]

Contrairement au réseau à motif trivial qui éprouve une difficulté dans l'allocation des ressources et son agencement, SDN est un candidat favori pour de tels réseaux non gérés en découplant la gestion et le volet utilisateur. [33] Pour ce faire, SDN implémente (OpenFlow) en tant que protocole de communication, qui est normalisé par ONF (Open networking Foundation). [34]

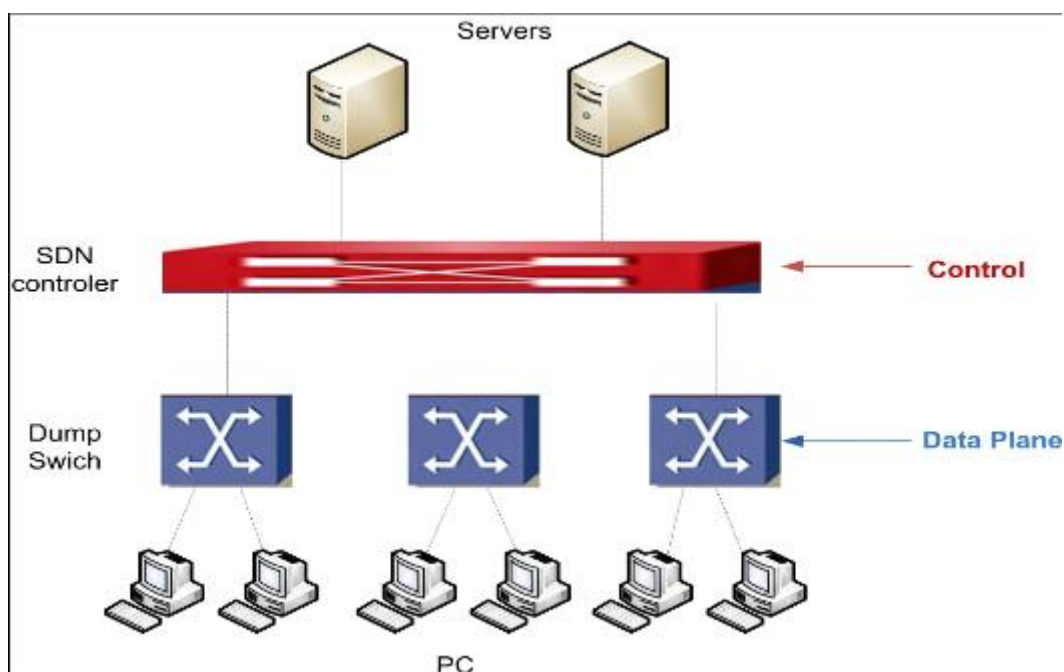


**Figure.2.4:** ONF pipeline dans le réseau 5G.[35]

En SDN, la découverte de la topologie est considérée comme le chef-d'œuvre des contrôleurs SDN et elle permet de contrôler diverses applications comme: le routage des données, la virtualisation du réseau, la migration en direct, l'optimisation des ressources... etc. La topologie du réseau n'est pas uniquement destinée à déterminer la transmission des données, mais aussi pour gérer les ressources du réseau. [36] Au sein du réseau SDN, le plan de données est responsable de la transmission des données entre les appareils connectés et les contrôleurs. Les commutateurs exécutant le protocole Open Flow forment le plan d'information, tandis que les contrôleurs sont distribués et connectés entre eux pour former le plan de contrôle .[37] SDN peut avoir un impact positif en termes de flexibilité et de programmabilité. [38]

Ainsi, le SDN est un moyen d'introduire la virtualisation au sein des réseaux IP classiques .[39], offrant une nouvelle vision et rassemblant de nouvelles fonctionnalités en termes de connaissance et de déploiement. En outre, les réseaux mobiles peuvent à leur tour bénéficier des avantages du SDN, conduisant à améliorer le contrôle et la gestion du réseau .[40]

Au niveau de la partie frontale du réseau, la technologie SDN actuelle ne définit pas une vision claire en raison des caractéristiques particulières de cette partie en consommation électrique et en coût des éléments qui se répartissent sur une zone géographique définie.[41]



**figure2. 5** : le schéma de données dans une architecture SDN classique.[42]

Comme le montre la figure ci-dessus, le réseau est divisé en deux plans principaux, les appareils connectés constituent le plan de données et sont responsables de l'acheminement du trafic réseau. Pour ce faire, les commutateurs activés pour le flux ouvert doivent suivre les règles de commutation et les stratégies qu'ils reçoivent du contrôleur SDN qui forme le plan de contrôle.

## **5.Le principe de la commutation dans SDN :**

Le principe fondamental de la commutation dans un réseau SDN (Software-Defined Networking) repose sur la séparation du plan de contrôle et du plan de données. [43], [44]. Cette architecture permet une gestion centralisée, flexible et programmable du réseau, rendant possible une adaptation dynamique aux besoins changeants .[45]

### **5.1.Séparation entre le Plan de Contrôle et le Plan de Données :**

#### **5.1.1.Plan de données (Data Plane) :**

Responsable du transport effectif des paquets dans le réseau. Les commutateurs SDN (ou switches) appliquent les règles de commutation définies par le plan de contrôle, sans prendre eux-mêmes de décisions. [43]

#### **5.1.2.Plan de contrôle (Control Plane) :**

Dédié à la prise de décisions concernant l'acheminement des paquets. Dans un environnement SDN, cette fonction est centralisée au sein d'un contrôleur SDN (tel qu'Open Daylight ou ONOS) .[46], [47], qui communique avec les commutateurs via des protocoles comme OpenFlow) [43], [45]

Cette séparation permet au contrôleur d'adapter dynamiquement les politiques de commutation selon l'état du réseau, optimisant ainsi la gestion du trafic .[44]

### **5.2.Programmabilité de la Commutation :**

Un autre principe clé du SDN est la programmabilité du réseau [44], [45] :

Les commutateurs SDN sont configurables à distance par le contrôleur.

Ils peuvent acheminer le trafic de manière dynamique en fonction de la topologie du réseau, des besoins en bande passante ou des priorités de service.

Cette approche permet de créer des politiques réseau en temps réel, à la différence des infrastructures traditionnelles, où les configurations sont souvent statiques et rigides . [43]

### **5.3.Rôle des Protocoles comme OpenFlow :**

OpenFlow est un protocole essentiel dans les architectures SDN .[43]

Il permet au contrôleur de définir les règles de traitement des paquets à distance.

Par exemple, un contrôleur peut ordonner à un commutateur de gérer un flux spécifique (basé sur l'adresse IP, le port, ou le type d'application).

Grâce à OpenFlow, les commutateurs SDN agissent comme de simples agents d'exécution, tandis que l'intelligence du réseau est concentrée dans le contrôleur .[45]

## **6.Les avantages des SDN et des réseaux programmables :**

Le SDN offre de nombreux avantages par rapport aux réseaux traditionnels, notamment :

### **6.1.Contrôle renforcé avec plus de souplesse et un débit accéléré :**

au lieu de programmer manuellement plusieurs dispositifs matériels spécifiques à un fournisseur, les développeurs peuvent contrôler le flux de trafic sur un réseau simplement via la programmation d'un contrôleur logiciel standard ouvert. Les administrateurs réseau bénéficient également de plus de souplesse dans le choix de l'équipement réseau, dans la mesure où ils peuvent utiliser un protocole open source pour communiquer avec un nombre quelconque de dispositifs matériels via un contrôleur central.

### **6.2.Infrastructure réseau personnalisable:**

avec un réseau software-défini, les administrateurs peuvent configurer les services réseau et allouer des ressources virtuelles pour modifier l'infrastructure du réseau en temps réel à partir d'un seul et même emplacement centralisé. Ainsi, les administrateurs réseau peuvent optimiser le flux de données à travers le réseau, en donnant la priorité aux applications qui nécessitent une plus grande disponibilité.

### **6.3.Sécurité renforcée :**

un réseau software-défini offre une visibilité sur l'ensemble du réseau, avec une vue plus globale des menaces de sécurité. Avec la prolifération de terminaux intelligents qui se connectent à Internet, le SDN offre des avantages évidents par rapport aux réseaux

traditionnels. Les développeurs peuvent créer des zones distinctes pour les terminaux qui nécessitent différents niveaux de sécurité, ou mettre immédiatement en quarantaine les terminaux menacés afin qu'ils ne puissent pas infecter le reste du réseau. Une plus grande fiabilité : en raison de la gestion centralisée et de l'automatisation de la gestion des périphériques réseau. Cela entraînera moins d'erreurs de configuration, une mise en œuvre plus rapide des modifications à l'échelle du réseau et se traduira par l'application d'une politique de réseau cohérente. [44]

#### **6.4.Innovation et improvisation beaucoup plus rapides :**

car cela se fera au niveau du logiciel et sera indépendant du fournisseur. Cela se traduira par un plus grand nombre d'entreprises, de développeurs individuels et de fournisseurs de logiciels utilisant l'API commune pour apporter des services innovants et générer des revenus.

#### **6.5.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.

### **7.Conclusion :**

Le SDN représente une révolution dans la gestion des réseaux, offrant plus de flexibilité, de centralisation et d'automatisation dans la gestion des infrastructures. En séparant le plan de contrôle du plan de données, le SDN permet une gestion plus souple, plus rapide et plus adaptable aux besoins changeants des entreprises. Cela facilite l'optimisation des ressources, réduit les coûts et améliore l'agilité dans le déploiement des services. Cependant, des défis restent, notamment en termes de sécurité, d'intégration avec les infrastructures existantes et de gestion de la complexité à grande échelle. Malgré ces obstacles, le SDN continue de gagner en popularité et de redéfinir le paysage des réseaux pour les entreprises et les fournisseurs de services

## Chapitre 3 :

# La simulation d'un réseau avec et sans SDN( software defined networks)

---

## 1.Introduction :

Après avoir étudié l'aspect théorique dans les deux premiers chapitres, qui traitent des technologies 5G et de leur évolution visant à offrir un débit Internet plus élevé ainsi que des connexions stables pour un grand nombre d'appareils, il apparaît que cette évolution nécessite un réseau plus intelligent et plus flexible. C'est ce qui nous a conduits à utiliser le SDN (Software Defined Networking), une technologie permettant d'optimiser le réseau 5G à moindre coût tout en améliorant les paramètres de qualité de service (QoS). Ainsi, nous avons appliqué le SDN dans un réseau 5G en utilisant Python pour l'analyse des données, en raison de la précision des résultats obtenus et de la simplicité d'utilisation de ce langage. L'objectif est de comprendre et d'analyser l'impact de l'intégration de la technologie SDN dans le réseau 5G sur certains paramètres de qualité de service (QoS).

## 2. Présentation de la bibliothèques utilisables :

- **Numpy :**

Numpy est l'une des bibliothèques Python les plus populaires, largement utilisée pour les calculs mathématiques et scientifiques. Elle fournit un large éventail de fonctionnalités puissantes, essentielles dans de nombreux projets en **Data Science**. Maîtriser NumPy constitue une étape incontournable pour toute personne souhaitant se former sérieusement à la Data Science. Voici tout ce qu'il faut savoir pour bien comprendre et utiliser NumPy efficacement. [46]

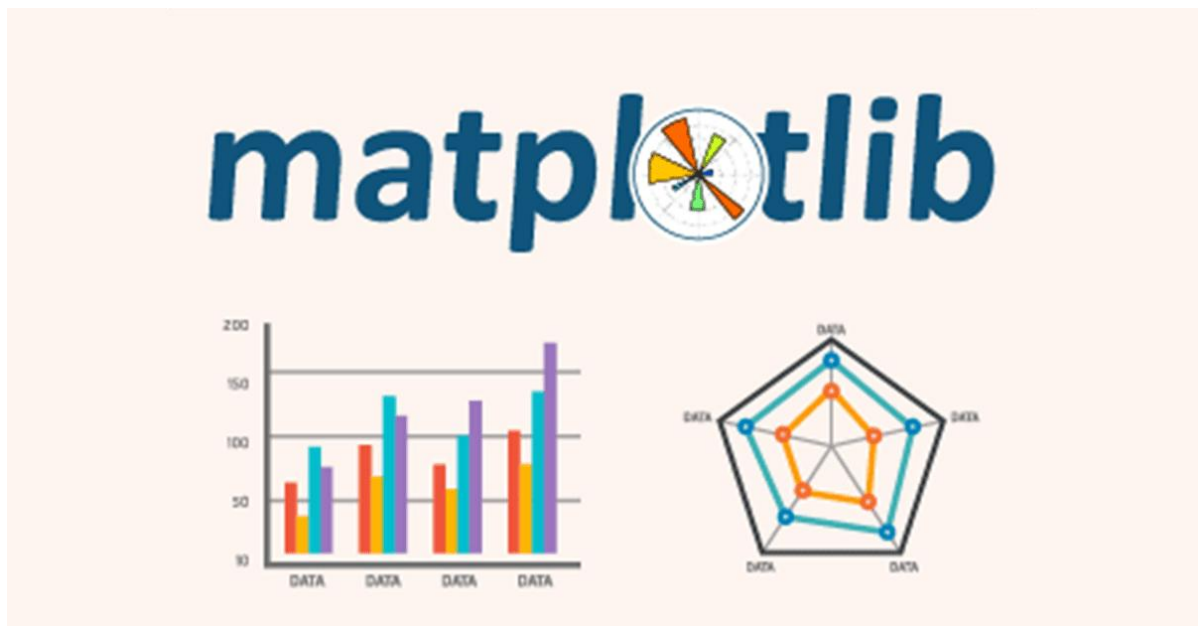


**Figure3.1 :NUMPY.** [47]

- **Matplotlib :**

**Matplotlib** est la bibliothèque incontournable pour la création de visualisations statiques en Python. Elle permet de représenter les données sous diverses formes graphiques, allant des visualisations simples comme les courbes, histogrammes et diagrammes en barres, jusqu'à des représentations plus complexes telles que les graphiques 3D ou les nuages de points (*scatter plots*). [48]





**Figure3.2** :Matplotlib. [47]

### 3.Etude des paramètres de qualité de services :

La qualité de service (QoS) est un mécanisme de réseau utilisé pour gérer la qualité et déterminer la priorité de la transmission du trafic de données sur un réseau. Elle garantit que les différents types de trafic de données, tels que la voix, la vidéo et les données, reçoivent des niveaux de service appropriés. Ses principaux objectifs sont de permettre aux réseaux et aux entreprises de donner la priorité au trafic, notamment en fournissant une bande passante dédiée, en contrôlant la gigue et en réduisant le temps de latence. Il est essentiel pour améliorer les performances des applications d'entreprise, des réseaux étendus (WAN) et des réseaux de fournisseurs de services. Les services typiques qui nécessitent l'utilisation de la qualité de service sont décrits ci-dessous. [49]



**Figure3.3:** Les services typiques qui nécessitent l'utilisation de la qualité de service (QoS).  
[49]

### 3.1Débit (Throughput) :

Le débit, ou "throughput", correspond à la quantité de données transmises avec succès sur le réseau pendant une période donnée. Il est généralement exprimé en Mbps ou Gbps.

- **Sans SDN** : Le débit est souvent limité à cause de la rigidité des chemins de transmission et du manque de flexibilité dans l'allocation des ressources.
- **Avec SDN** : Grâce à une gestion centralisée et dynamique des flux, le SDN permet une amélioration significative du débit.

### 3.2Perte de donnée (Data Loss) :

Les paquets perdus désignent les données envoyées qui n'atteignent jamais leur destination, souvent à cause de la congestion, des collisions ou des erreurs de routage.

- **Sans SDN** : Le réseau réagit lentement aux surcharges, ce qui entraîne un taux de perte plus élevé.
- **Avec SDN** : Le contrôle en temps réel permet de réorienter intelligemment le trafic pour éviter les pertes.

### 3.3Latence (Latency) :

La latence est le temps nécessaire pour qu'un paquet de données voyage de la source à la destination. Elle est critique pour les applications temps réel (vidéo, jeux, santé connectée).

- **Sans SDN** : Routage moins efficace, chemins plus longs, entraînant une latence plus élevée.
- **Avec SDN** : Optimisation continue des chemins de données réduit significativement la latence.

### 3.4Trafic (Traffic network) :

La gestion du trafic consiste à organiser et prioriser les flux de données pour éviter la congestion et assurer un service fluide.

- **Sans SDN** : La gestion est décentralisée et manque de coordination globale.
- **Avec SDN** : Le contrôleur central du SDN offre une vue d'ensemble du réseau, permettant une gestion dynamique et efficace des flux.

### 3.5 Connectivité massive (Massive Connectivity) :

Capacité du réseau à supporter un grand nombre de dispositifs connectés simultanément, notamment les objets IoT.

- **Sans SDN** : Difficulté à gérer la scalabilité et les demandes croissantes.
- **Avec SDN** : Orchestration souple permettant l'intégration efficace de millions de dispositifs connectés.

### 3.6 Consommation d'énergie (Energy Consumption) :

Quantité d'énergie utilisée par les composants du réseau pour assurer la connectivité.

- **Sans SDN** : Utilisation inefficace des ressources, provoquant une surconsommation d'énergie.
- **Avec SDN** : Meilleure allocation des ressources et mise hors tension des éléments inactifs, ce qui réduit la consommation énergétique.

### 3.7 Vitesse de téléchargement (Download Speed) :

La **vitesse de téléchargement** désigne la quantité de données qu'un utilisateur peut recevoir depuis le réseau dans un laps de temps donné. Elle est exprimée généralement en **Mbps** (méga bits par seconde) ou **Gbps** (giga bits par seconde), et elle est essentielle pour des usages comme le streaming vidéo, le cloud computing ou les transferts de fichiers lourds.

#### **Sans SDN :**

- Le réseau repose sur une configuration fixe et une gestion distribuée du trafic, ce qui peut entraîner des goulots d'étranglement.
- La vitesse de téléchargement peut être affectée par la congestion réseau et l'absence de priorisation dynamique du trafic.
- Résultat : **débit variable et souvent sous-optimal**, surtout en période de forte demande.

#### Avec SDN :

- Le SDN introduit une **gestion centralisée** et intelligente des ressources réseau.
- Il permet une **allocation dynamique de la bande passante** en fonction des besoins et des priorités.
- Résultat : **vitesse de téléchargement plus élevée, plus stable et mieux adaptée aux applications critiques.**

#### 4.L'algorithme de simulation du réseau 5G avec et sans SDN :

##### 4.1. Algorithm for 5G Network Simulation with SDN :

###### 1.Initialize Parameters:

Set the number of time steps (e.g., 100).

Set a random seed for reproducibility.

###### 2.Generate Baseline Metrics (without SDN):

For each metric (throughput, latency, data dropped, traffic, download speed, energy consumption, massive connectivity):

Generate random values using a normal distribution with specified mean and standard deviation.

Clip values to ensure they fall within realistic ranges.

###### 3.Generate SDN-Enhanced Metrics:

For each metric:

Multiply the baseline (non-SDN) values by a random uniform factor to simulate SDN improvements (e.g., increase throughput by 5-15%, reduce latency by 10-30%).

Clip SDN-enhanced values to ensure they fall within realistic ranges.

###### 4.Calculate Averages:

Compute the mean of each metric (both non-SDN and SDN) over all time steps.

###### 5.Visualize Data:

Plot time series graphs for each metric, comparing non-SDN and SDN values.  
Create bar charts comparing the average values of each metric for non-SDN and SDN.

#### 6.Output Results:

Print the mean value equation:  $(1/m) \sum x_i$ .

Display average values for all metrics (throughput, latency, data dropped, traffic, download speed, energy consumption, massive connectivity) for both non-SDN and SDN scenarios.

### 4.2.Algorithm for 5G Network Simulation without SDN :

#### 1.Initialize Parameters:

Set the number of time steps (e.g., 100).

Set a random seed for reproducibility.

#### 2.Generate Performance Metrics:

For each metric (throughput, latency, data dropped, traffic, download speed, energy consumption, massive connectivity):

Generate random values using a normal distribution with specified mean and standard deviation.

Clip values to ensure they fall within realistic ranges.

#### 3.Calculate Averages:

Compute the mean of each metric over all time steps.

#### 4.Visualize Data:

Plot time series graphs for each metric over time steps.

Create bar charts comparing the average values of each metric.

#### 5.Output Results:

Print the mean value equation:  $(1/m) \sum x_i$ .

Display average values for all metrics (throughput, latency, data dropped, traffic, download speed, energy consumption, massive connectivity).

## 5. Tableau résumé des fonctions du programme

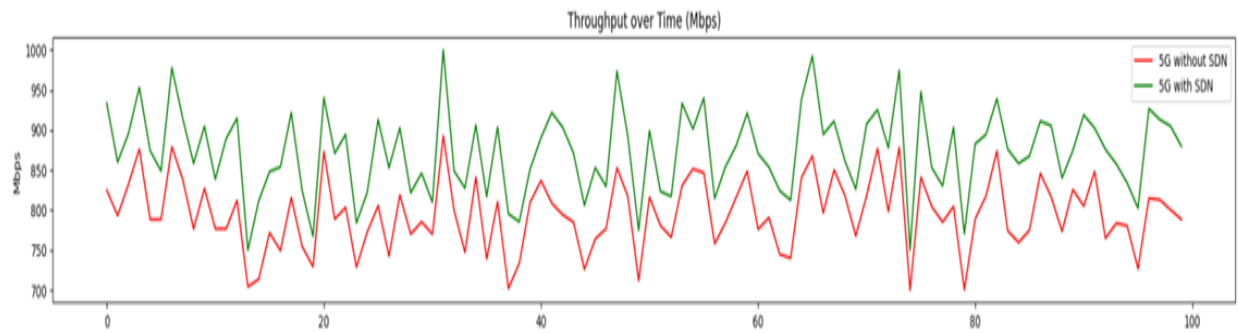
**Tableau3.1** : Tableau résumé des fonctions du programme

| Nom de la section /fonction                  | Rôle /description                                                                                   |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Paramètres de Simulation                     | Générer les données de performance pour un réseau 5G sans SDN                                       |
| Simulation 5G sans SDN                       | Générer les données de performance pour un réseau 5G avec SDN                                       |
| Simulation 5G avec SDN                       | Générer les données de performance pour un réseau 5G avec SDN                                       |
| Clip des valeurs a des intervalles Réalistes | Limiter les valeurs générées pour chaque métrique a des intervalles réalistes                       |
| Calcul des moyennes                          | Calculer la moyenne de chaque métrique pour les des ( avec et sans SDN                              |
| Affichage des Résultats moyens               | Afficher dans la console les moyennes calculées pour chaque métrique                                |
| Trace des courbes temporelles                | Trace les courbes temporelles des différentes métrique pour visualiser leur évolution dans le temps |
| Trace des graphiques en Barres               | Trace des graphiques en barres pour comparer les moyennes des métriques entre les deux scénarios    |

## 6.Simulation :

Les figures expriment une comparaison de performances entre deux configurations de réseau 5G sans SDN (rouge) et 5G avec SDN(verte) à plusieurs échelles .

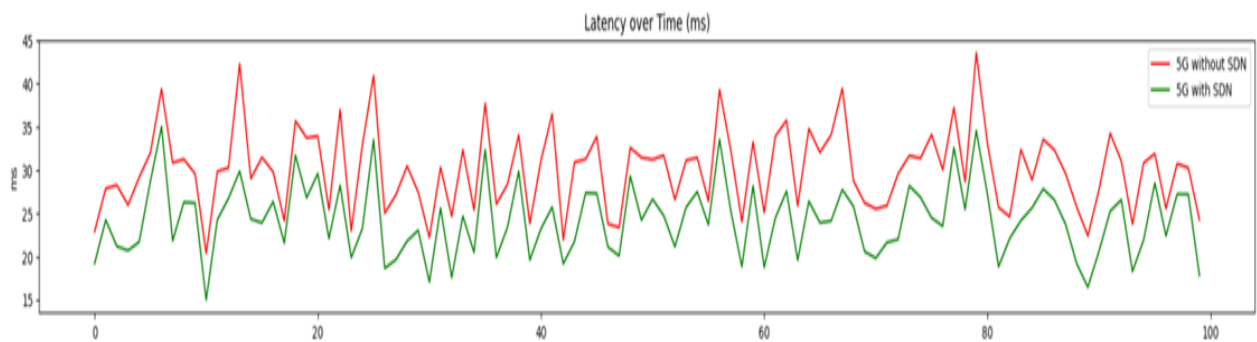
### 6.1 Débit (Throughput) :



**Figure 3.4 :** Le débit (Throughput) du 5G avec SDN ET sans SDN.

Cette figure illustre l'optimisation du débit du réseau 5G avec SDN comparée à celle sans SDN.

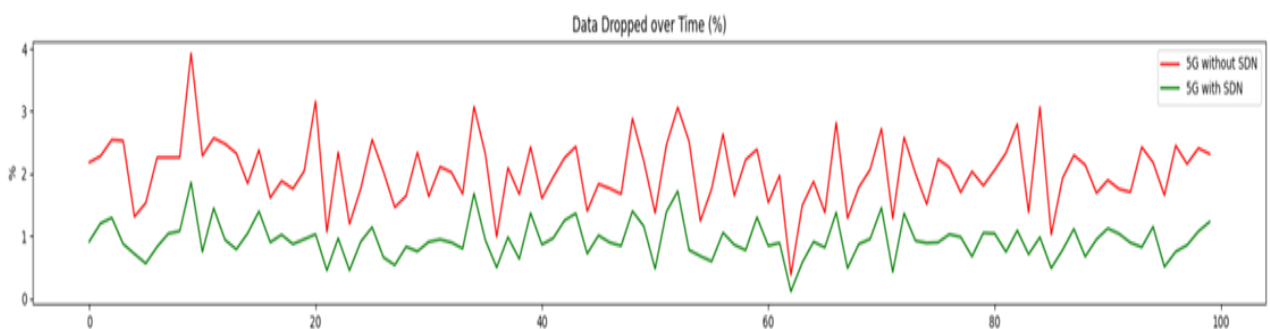
### 6.2 Latence (Latency) :



**Figure3 .5 :** La latence (Latency) du 5 G avec SDN ET sans SDN.

Cette figure illustre la réduction de la latence du réseau 5G avec SDN, comparée à celle sans SDN, ce qui permet au réseau 5G de fonctionner en temps réel.

### 6.3 Pertes de données (Data Dropped) :



**Figure3.6:** Le perte de donnée(Data Dropped) du 5G avec SDN et sans SDN.

Cette figure montre que la perte de données dans un réseau 5G utilisant la technologie SDN est inférieure à celle d'un réseau 5G sans SDN.

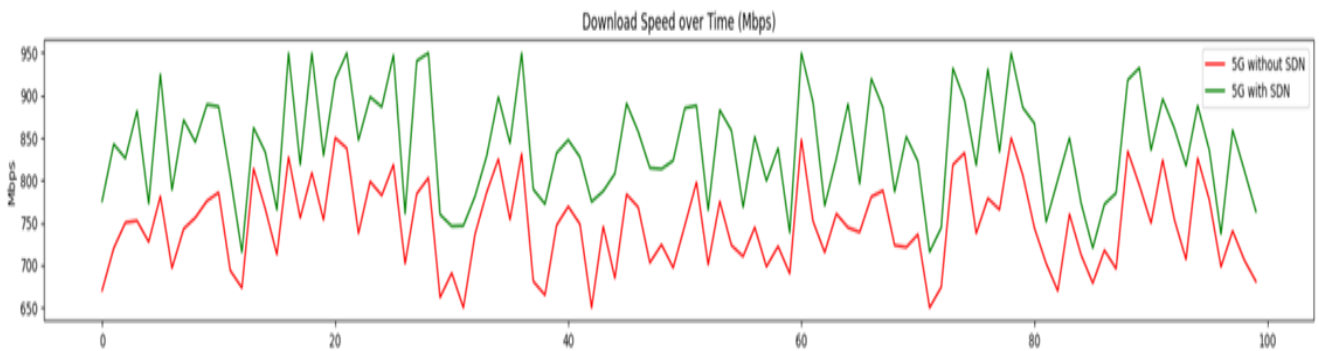
### 6.4 Trafic réseau (Network Traffic) :



**Figure3.7:** Le trafic réseau( Network traffic) du 5G avec SDN et sans SDN.

Cette figure illustre le trafic du réseau 5G élevé avec SDN par rapport à celui sans SDN.

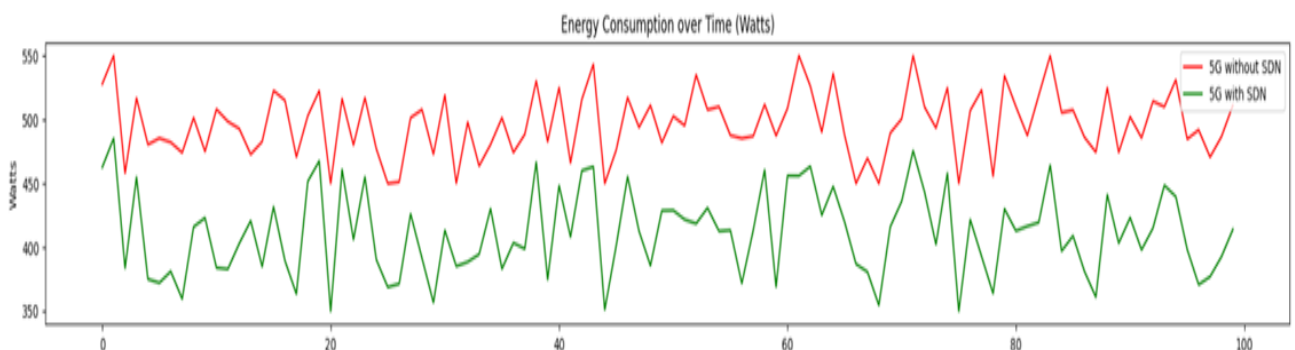
### 6.5 Vitesse de téléchargement (Download Speed) :



**figure3.8:** La vitesse de téléchargement ( Downlaod speed) du 5G avec SDN et sans SDN.

Cette figure illustre l'augmentation significative de la vitesse de téléchargement sur un réseau 5G lorsqu'il est associé à la technologie SDN (Software-Defined Networking). En comparaison, la vitesse de téléchargement est nettement inférieure sur un réseau 5G classique sans intégration de SDN.

### 6.6 Consommation d'énergie (Energy Consumption) :

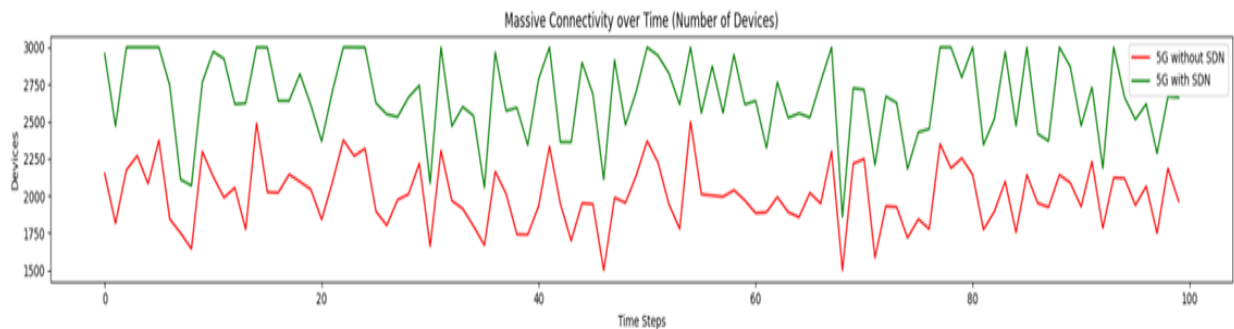


**La figure.3.9:** La consommation d'énergie( Energy consumption) du 5G avec SDN et sans SDN.



la figure illustre la consommation d'énergie du réseau 5G était très moins coût avec SDN, par contre c'était haut sans SDN.

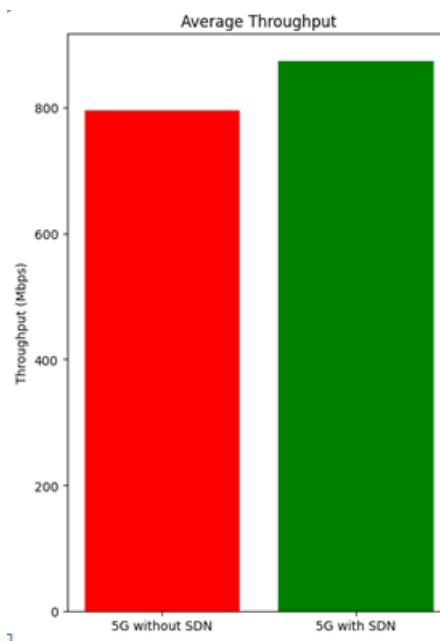
### 6.7 Connectivité massive (Massive Connectivity) :



**La figure3.10:** La connectivité massive( Massive Connectivity) du 5G avec SDN et sans SDN.

La figure illustre l'optimisation de la connectivité massive du réseau 5G avec SDN par rapport à cela sans SDN .

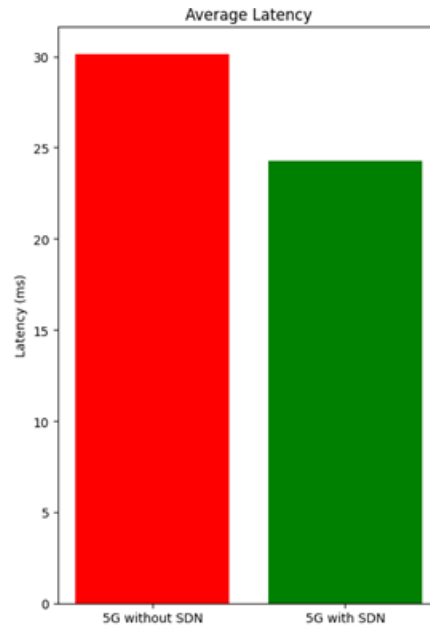
### 6.8 La valeur moyenne du Débit ( throughput) :



**Figure3.11:** La valeur moyenne du Débit ( throughput) du 5G avec SDN et sans SDN.

Dans cette figure en remarque clairement que pour le Débit du réseau 5G avec SDN est supérieure( barre verte, plus de 800 Mbps) a celui du réseau 5G sans SDN( barre rouge, moins 800Mbps).Ce qui permet d'améliorer les performances du réseau.

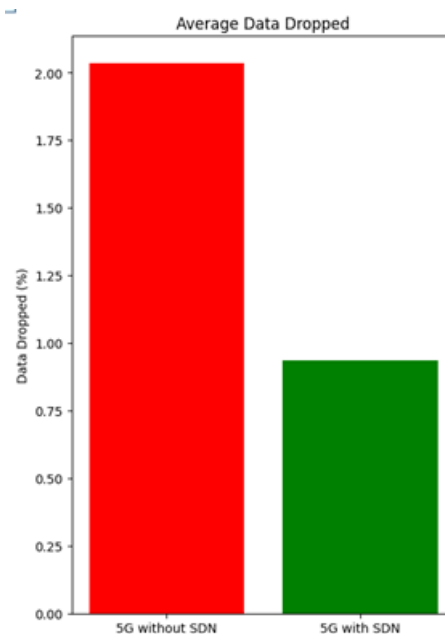
### 6.9 La valeur moyenne du la latence( Latency) :



**Figure. 3.12**La valeur moyenne du la latence( Latency) du 5G avec SDN et sans SDN.

Dans cette figure en remarque précisément que la latence du réseau 5G avec SDN est inférieure( barre verte, eviron 24ms)a celui du réseau 5G sans SDN( barre rouge, environ 30ms). Cela permet d'effectuer le travail sans aucun retard dans le temps.

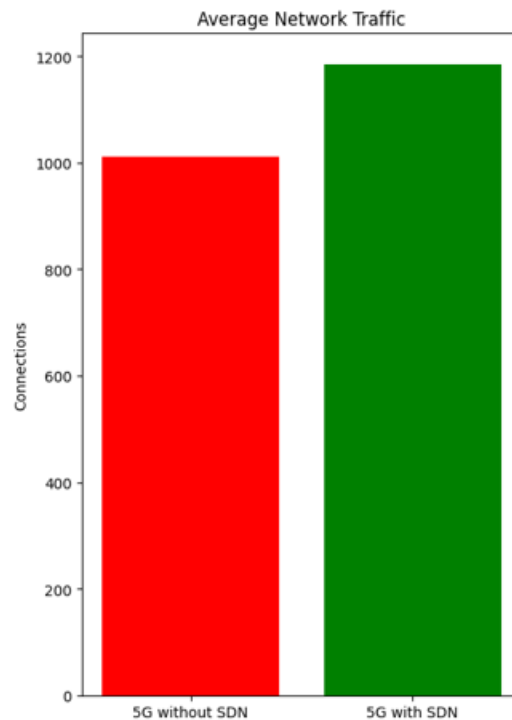
#### 6.10 La valeur moyenne du perte de données (Data Dropped) :



**Figure.3.13** : La valeur moyenne du perte de données (Data Dropped) du 5G avec SDN et sans SDN.

Dans cette figure on remarque que le pourcentage de perte de données du réseau 5G sans SDN (barre rouge, environ 2 %) est plus élevé par rapport à un réseau 5G avec SDN (barre verte, environ 0,9 %), ce qui permet à Améliorer la qualité du service.

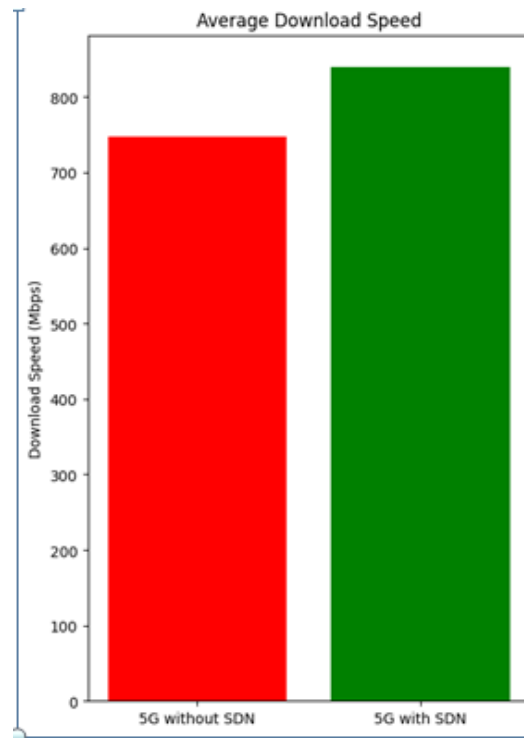
### 6.11 La valeur moyenne du traffic( Network traffic) du 5G avec et sans SDN :



**Figure3.14:** La valeur moyenne du traffic( Network traffic) du 5G avec SDN et sans SDN.

Dans cette figure, on remarque que la valeur moyenne de la connexion du réseau 5G avec SDN (barre verte) est plus élevée comparée à celle sans SDN (barre rouge). Cela permet d'améliorer la gestion du trafic et le nombre de connexions supportées.

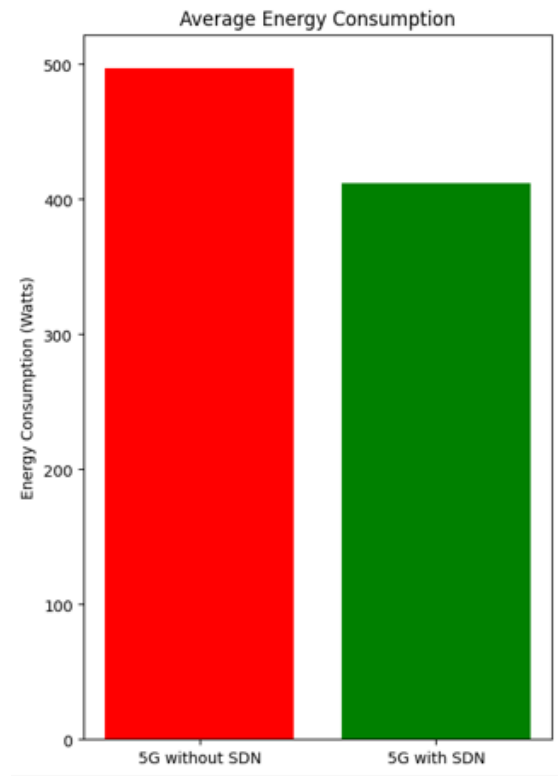
### 6.12 La valeur moyenne du vitesse de téléchargement ( Downlaod speed) du 5G avec et sans SDN :



**figure. 3.15:** la valeur moyenne du vitesse de téléchargement ( Downlaod speed) du 5G avec SDN et sans SDN.

Dans cette figure on remarque que l'augmentation du vitesse de téléchargement du réseau 5G avec SDN ( barre verte, plus 800Mbps) par contre il est faible sans SDN( barre rouge, environ 750Mbps). ce qui permet à la rapidité de téléchargement des données.

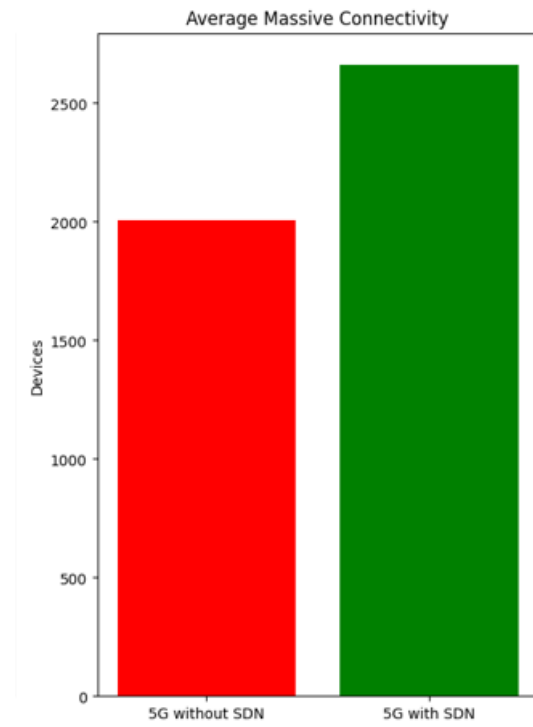
### **6.13 La valeur moyenne du consommation d'énergie (Energy consumption) du 5G avec et sans SDN :**



**La figure.3.16:** La valeur moyenne du consommation d'énergie (Energy comsumption) du 5G avec et sans SDN.

Dans cette figure, on observe que l'intégration du SDN (Software Defined Networking) dans le réseau 5G permet de réduire la consommation d'énergie, passant d'environ 500 watts pour le réseau 5G sans SDN (barre rouge) à environ 420 watts avec SDN (barre verte). Cette diminution de la consommation énergétique s'explique par une gestion plus efficace des ressources réseau rendue possible par le SDN, qui optimise le routage du trafic et l'utilisation des équipements. Par conséquent, cela peut également réduire le besoin de transport longue distance de données, contribuant ainsi à une meilleure efficacité énergétique globale du réseau.

**6.14 La valeur moyenne du connectivité massive(Massive connectivity) du 5G avec et sans SDN. :**



**La figure. 3.17:** La valeur moyenne du connectivité massive(Massive connectivity) du 5G avec et sans SDN.

Dans cette figure, on observe que la connectivité massive du réseau 5G avec SDN (barre verte, plus de 2500 appareils) est supérieure à celle du réseau 5G sans SDN (barre rouge, environ 2000 appareils). Cette amélioration illustre comment l'intégration de la technologie SDN permet au réseau 5G de gérer efficacement la connexion simultanée de millions d'appareils.

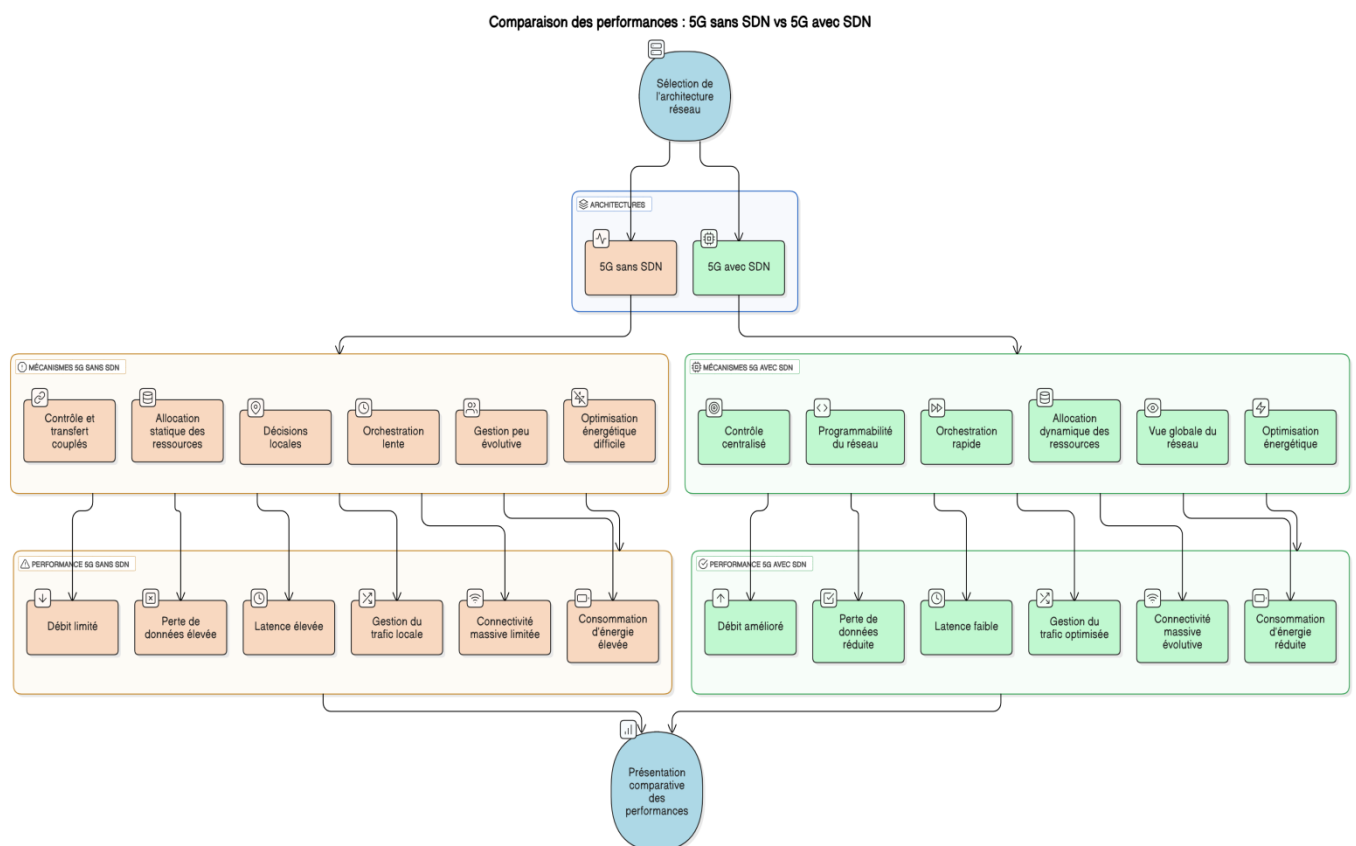
## 7.Comparaison entre 5G avec et sans SDN :

**Tableau3.2:** Comparaison entre 5G avec et sans SDN

| Critère                         | 5G avec SDN               | 5G sans SDN               | observation              |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Débit(throughput)               | Plus élevé et plus stable | Moins eleve,plus variable | Avantage de l'SDN        |
| Latence(latensy)                | Faible                    | Plus élevée               | Avantage de l'SDN        |
| Pertes de données(data dropped) | Moins de paquets perdus   | Plus de pertes            | Avantage de l'SDN        |
| Trafic réseau(network traffic)  | Plus élevé, mieux géré    | Moins intense             | SDN gère mieux le trafic |
| Vitesse de téléchargement       | Supérieure                | Inferieure                | Avantage de l'SDN        |

|                        |                           |                       |                                       |
|------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Consommation d'énergie | Moins élevé               | Plus élevée           | SDN optimise l'efficacité énergétique |
| Connectivité massive   | Supporte plus d'appareils | Capacité plus limitée | SDN améliore la sociabilité           |

## 8.Évaluation appliquée des performances du réseau 5G avec et sans SDN selon les paramètres de qualité de service :



**Figure3 .18:** Évaluation appliquée des performances du réseau 5G avec et sans SDN selon les paramètres de qualité de service

## **9. Conclusion :**

Dans les réseaux de cinquième génération 5G, la technologie SDN joue un rôle important en améliorant considérablement les performances globales : débit, latence, consommation énergétique, perte de donnée, trafic, vitesse de téléchargement et connectivité massive. Ces résultats confirment que SDN constitue une infrastructure fondamentale pour les réseaux de nouvelle génération, capables de répondre aux besoins croissants dans le domaine des communications intelligentes.



## Conclusion Général

---

### Conclusion Générale :

Au terme de cette étude approfondie sur les réseaux 5G et la technologie SDN, plusieurs enseignements majeurs se dégagent. La 5G s'impose comme une véritable révolution dans le domaine des télécommunications. Ses avancées reposent sur dix piliers technologiques essentiels : l'évolution des technologies d'accès radio (RAT), le déploiement massif de petites cellules, les réseaux auto-organisés (SON), les communications machine-to-machine (M2M), l'utilisation des ondes millimétriques, l'optimisation des liaisons montantes et descendantes, l'efficacité énergétique, l'élargissement et le partage dynamique du spectre radio, ainsi que la virtualisation du RAN (Radio Access Network).

L'architecture innovante de la 5G, articulée autour du NG-RAN (Next Generation RAN) et du cœur de réseau 5G, répond parfaitement aux besoins croissants de notre société numérique en matière de connectivité et de qualité de service (QoS). Dans ce contexte, l'intégration du SDN (Software Defined Networking) apparaît comme un levier stratégique. Grâce à sa structure en trois couches — application, contrôle et infrastructure — interconnectées par des interfaces northbound et southbound, le SDN redéfinit la gestion des réseaux en séparant clairement le plan de contrôle du plan de données.

Notre simulation comparative a permis de quantifier les bénéfices de cette synergie 5G-SDN : amélioration du débit jusqu'à 100 Mbps supplémentaires, réduction de la latence de 30 à 24 ms, diminution de plus de 50 % des pertes de paquets, meilleure répartition du trafic, augmentation de la connectivité massive, réduction de la consommation énergétique à environ 90 watts, ainsi qu'une vitesse de téléchargement pouvant dépasser 800 Mbps.

Bien que cette combinaison technologique soulève encore des défis — notamment en matière d'interopérabilité, de sécurité et de normalisation — elle ouvre la voie à des applications concrètes et ambitieuses. On pense notamment aux réseaux IoT à très grande échelle, capables de gérer plus d'un million de connexions simultanées, ou aux systèmes de conduite autonome nécessitant une communication ultra-fiable de type V2X (Vehicle-to-Everything).

Le découpage réseau (Network Slicing) et la virtualisation des fonctions réseau (NFV), rendus possibles par le SDN, permettent une allocation dynamique des ressources en fonction des besoins spécifiques, tout en automatisant la gestion pour une efficacité optimale. En conclusion, l'intégration des technologies SDN dans les réseaux 5G offre des avantages significatifs, notamment le network slicing, qui permet de créer des tranches virtuelles adaptées à différents usages, ainsi qu'une gestion centralisée, programmable et automatisée du réseau, réduisant la latence et facilitant le déploiement rapide de nouveaux services.

Toutefois, cette architecture soulève aussi plusieurs défis, tels que la sécurité du contrôleur centralisé, les limites de montée en charge, l'interopérabilité entre équipements hétérogènes, et la complexité de la gestion multi-domaine. Pour l'avenir, la combinaison du SDN, du NFV, de l'intelligence artificielle et du machine learning promet des réseaux encore plus intelligents, adaptatifs et résilients, jouant un rôle central dans l'évolution vers la 6G et les usages avancés comme les jumeaux numériques ou les communications holographiques.

---

## Bibliographie

---

- [1] 3GPP, Groupe de spécifications techniques, Services et aspects système ; Exigences de service pour le système 5G ; Étape 1 , 3GPP TS 22.261 version 17.3.0 Release 17, décembre 2022
- [2] A. M. Nayak, P. Jha, and A. Karandikar, "A Centralized SDN Architecture for the 5G Cellular Network," 2018.
- [3] FEI Hu « Opportunities in 5g Networks a Research and development Perspective » Livre, 5 avril 2016
- [4] Detti, Andrea. "Functional architecture." CNIT - Electronic Eng. Dept., Université de Rome Tor Vergata.
- [5] Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master en télécommunications  
THEME Etude et conception d'un système d'antenne large bande pour les application 5G par :  
HELLAL NAHIDA et HARBI SARRA promotion: 2021/2022 université Aboubaker Belkaïd  
-Tlemcen-
- [6] A. M. Nayak, P. Jha, and A. Karandikar, "A Centralized SDN Architecture for the 5G Cellular Network," 2018.
- [7] J. Ordonez-Lucena, P. Ameigeiras, D. Lopez, J. J. Ramos-Munoz et al., "Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures and Challenges," 2017.
- [8] Hussain, Alifya. « 5G SDN and NFV ». Medium, 20 janvier 2020. Article publié sur la page de l'autrice Alifya Hussain
- [9] Hussain, A. (2020, avril ??). 5G SDN and NFV
- [10] Cloud computing [online]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cloud\\_computing](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing), May 2021.
- [11] Qu'est-ce que le cloud computing ? [online]. <https://azure.microsoft.com/fr-fr/overview/what-is-cloud-computing/>, Jul 2021.
- [12] Mell, P., & Grance, T. (2011). The NIST Definition of Cloud Computing (Special Publication 800-145). National Institute of Standards and Technology.
- [13] ] <https://medium.com/@alifyahussain/5g-sdn-and-nfv-e411dbe927b1>. Available online on April 11,2022
- [14] R. M. Dreifuerst and R. W. Heath, "Massive MIMO in 5G: How Beamforming, Codebooks, and Feedback Enable Larger Arrays," 2023.
- [15] D. Lopez-Perez, A. D. Domenico, N. Piovesan, et al., "A survey on 5G energy efficiency: massive MIMO, lean carrier design, sleep modes, and machine learning," arXiv preprint arXiv:XXXX.XXXX, 2021. academia.edu

- [16] X. Lin, "An overview of the 3GPP study on artificial intelligence for 5G new radio," arXiv preprint arXiv:2308.05315, 2023.
- [17] Telecom Trainer, "5G NR QoS parameters,
- [18] K. Vieira Cardoso, C. Bonato Both, L. Rene Prade, C. J. A. Macedo et al., "A softwarized perspective of the 5G networks," 2020.
- [19] 5G Hub Technologies, "Quality of Service (QoS) in 5G networks,"
- [20] N. Tuan Le, M. Arif Hossain, A. Islam, D. Kim et al., "Survey of Promising Technologies for 5G Networks," 2016.
- [21] A. Algarni and V. Thayananthan, "Improvement of 5G transportation services with SDN-based security solutions and beyond 5G," Electronics, 2021. mdpi.com
- [22] (PARKOO, 2015) K.M. PARKOO, La qualité de service au niveau IAAS: vers l'utilisation du concept software-defined networking (SDN), Mémoire Master , Amadou Hampâté-Bâ de Dakar, 2015.
- [23] Open Networking Foundation. (2012). *Software-Defined Networking: The New Norm for Networks*. ONF White Paper.
- [24] Open Networking Foundation. (2013). *SDN Architecture Overview*. ONF TR-521.
- [25] A. Barakabitze, A. Ahmad, and all, <5G Network Slicing using SDN and NFV: A Survey of Taxonomy, Architectures and Future Challenges=, Computer Networks, November 2019, pp1-47, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106984>
- [26] H. Ko, I. Jang, and all, <SDN-based Distributed Mobility Management for 5G=, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2017, pp1-2, DOI: 10.1109/ICCE.2017.7889250
- [27] Q. Long, Y. Chen, and all, <Software Defined 5G and 6G Networks: a Survey=, Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature, November 2019, pp1-21, <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01397-2>.
- [28] L. Contreras, L. Cominardi, and all, <Software-Defined Mobility Management: Architecture Proposal and Future Directions=, Springer Science+Business Media, pp. 1311, January 2016, pp1-11, DOI: 10.1007/s11036-015-0663-7.
- [29] S. Hu, X. Wang, and M. Shakir, <A MIH and SDN-based Framework for Network Selection in 5G HetNet: Backhaul Requirement Perspectives=, IEEE ICC 2015 - Workshop on Next Generation Backhaul/Fronthaul Networks BackNets 2015, pp37-43, DOI: 10.1109/ICCW.2015.7247072.
- [30] C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, <SDN & NFV in 5G: Advancements and

- Challenges=, IEEE, 2017, pp1-5, DOI: 10.1109/ICIN.2017.7899398.
- [31] X. Cui, X. Gao, Y. Ma, <An Optimized Controller Placement Algorithm in 5G Based on SDN=, IEEE, 2020, pp816-820, DOI: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148091.
- [32] Open Networking Foundation. (2013). SDN Architecture Overview. ONF TR-521. Retrieved from
- [33] M. Kjolleberg, K. Kravlevska, and all, <Preventing DDos with SDN in 5G=, IEEE Globecom Workshops, 2019, pp1-7, DOI: 10.1109/GCWkshps45667.2019.9024497
- [34] A. Hussein, I. Elhajj, and all, <SDN VANETs in 5G: An Architecture for Resilient Security Services=, IEEE, Fourth International Conference on Software Defined Systems (SDS), 2017, pp67-74 DOI: 10.1109/SDS.2017.7939143
- [35] Navigating 5G-era network architecture | EXFO
- [36] Y. Qin, L. Zhang, and all, <Interference and topology-aware VM live migrations in software-defined networks=, IEEE 21st International Conference on High Performance Computing and Communications (HPCC), Aug.2019, pp1068-1075, DOI: 10.1109/HPCC/SmartCity/DSS.2019.00152
- [37] Z. Wu, Q. Wei, and all, <A dynamic defense using client puzzle for identity-forgery attack on the south-bound of software defined networks=, KSII Transactions on Internet & Information Systems, vol.11, February 2017, pp846-864, <https://doi.org/10.3837/tiis.2017.02.012>
- [38] D. Luong, Y. Hu, and all, <Metaheuristic Approaches to the Joint Controller and Gateway Placement in 5G-Satellite SDN Networks=, IEEE, 2020, pp1-6, DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9149373
- [39] O. Awobuluyi, J. Nightingale, and all, <Video Quality in 5G Networks=, IEEE International Conference on Computer and Information Technology, Ubiquitous Computing and Communications, Dependable, Autonomic and Secure Computing, Pervasive Intelligence and Computing, 2015, pp1-6, DOI: 10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.250
- [40] C. Bouras, A. Kollia, and E. Maligianni, <The techno-economic models for CR and SDN in 5G=, IFIP, mars 2019, pp39-46 DOI: 10.23919/WMNC.2019.8881823
- [41] P. Iovanna, and F. Ubaldi, <SDN solutions for 5G transport networks=, Photonics in Switching, Invited Papers IEEE, 2015, pp297-299, DOI: 10.1109/PS.2015.7329032
- [42] P. A. Morreale and J. M. Anderson, *Software-Defined Networking: Design and Deployment*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.

- [43] A. Haleplidis, K. Pentikousis, S. Denazis, J. H. Salim, D. Meyer, and O. Koufopavlou, “Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture,” *RFC 7426*, Jan. 2015. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc7426>
- [39] Open Networking Foundation, *OpenFlow Switch Specification, Version 1.5.1*, Mar. 2015. [Online]. Available:
- [40] OpenDaylight Project, “OpenDaylight Platform Overview,” [Online]. Available
- [41] ONOS Project, “ONOS – Open Network Operating System,” [Online]. Available:
- [42] Vivek Tiwari. “SDN and OpenFlow for beginners with hands on labs”. In : MMDD Multimedia LLC., Kindle Edition, Northville (2013).
- [43] ONOS Project, “ONOS – Open Network Operating System,” [Online]. Available:
- [44] Vivek Tiwari. “SDN and OpenFlow for beginners with hands on labs”. In : MMDD Multimedia LLC., Kindle Edition, Northville (2013).
- [45] Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). The Python Language Reference Manual. Network Theory Ltd.
- [46] Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... & Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362.
- [47] Matplotlib, “Matplotlib logo icon,” 11-Mar-2015.
- [48] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.
- [49] Cisco Systems, Inc. (2020). Quality of Service Networking. Cisco Networking Academy.