

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

ⵜⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⵔⴰⵏⵜ ⵜⴰⵎⴰⵔⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⵔⴰⵏⵜ ⵜⴰⵎⴰⵔⴰⵢⵜ

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

ⵎⴰⵏⴰⵙⵜ ⵜⴰⵎⴰⵔⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⵔⴰⵏⵜ ⵜⴰⵎⴰⵔⴰⵢⵜ

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE  
SUPÉRIEURE  
D'INFORMATIQUE

المدرسة الوطنية العليا للإعلام الآلي

ⵎⴰⵏⴰⵙⵜ ⵜⴰⵎⴰⵔⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⵔⴰⵏⵜ ⵜⴰⵎⴰⵔⴰⵢⵜ

École nationale Supérieure d'Informatique

## Rapport de projet

### 2<sup>e</sup> année Cycle Supérieur (2CS)

Option : Systèmes Informatiques (SQ)

### Titre :

Simulation d'un réseau 5G Core

#### Équipe N° 06 :

DERROUECHE Samia

REBHI Assala Nour Elimane

LARBAOUI Yasmine Badr Elhouda

ZOUTAT Marwa

BOUDIAF Fadia

HERKAT Wifak

HAMED Hiba

#### Encadré par :

M. Nacer HAMANI

M. Hakim AMROUCHE

Année universitaire : 2024/2025

# Résumé

Ce rapport présente une étude approfondie sur la technologie 5G et son architecture cœur (5G Core), en mettant l'accent sur les aspects théoriques et pratiques nécessaires à la simulation d'un réseau 5G.

Dans une première partie, nous analysons les composants fondamentaux du réseau 5G, notamment les fonctions réseau (AMF, SMF, UPF), les interfaces standardisées et les technologies sous-jacentes telles que la virtualisation (NFV) et les réseaux définis par logiciel (SDN). Une attention particulière est accordée aux avantages et défis liés à ces technologies, ainsi qu'à leur impact sur les performances globales du réseau.

La deuxième partie du rapport présente une étude comparative des principaux simulateurs 5G disponibles : OpenAirInterface (OAI), free5GC, NS-3 avec 5G-LENA et Open5GS. Chaque outil est évalué selon plusieurs critères, tels que le support complet du réseau 5G, la gestion des services uRLLC, la flexibilité des topologies, la facilité d'installation et les performances. L'objectif principal est de déterminer l'outil le mieux adapté pour simuler un réseau 5G Core, en particulier pour des scénarios impliquant l'optimisation du placement des UPF (User Plane Function) et la gestion des services critiques.

En conclusion, ce travail met en évidence l'importance de choisir un simulateur adapté aux exigences techniques et aux objectifs du projet. L'analyse comparative réalisée permet d'orienter ce choix vers une solution efficace pour la simulation d'un réseau 5G Core, tout en mettant en lumière les compromis nécessaires entre performance, flexibilité et complexité d'implémentation.

**Mots-clés :** 5G Core (5GC) Network Slicing , NFV (Network Function Virtualization) ,SDN (Software-Defined Networking), UPF (User Plane Function), Edge Computing, uRLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications), Simulation réseau.

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>i</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Chapitre 1 : Introduction à la 5G</b>	<b>2</b>
1.1 Définition :	2
1.2 L'évolution des réseaux mobiles : de la 1G à la 5G	2
1.3 Les avantages de la 5G	3
1.4 Cas d'usage de la 5G	4
<b>2 Chapitre 2 : La technologie 5G</b>	<b>5</b>
2.1 Architecture du Réseau 5G	5
2.1.1 La couche d'accès radio (RAN)	5
2.1.2 Réseau de transport	6
2.1.3 Cœur de réseau 5G (5GC)	7
2.1.4 Architecture SBA (Service-Based Architecture)	8
2.1.5 Mode Standalone vs Non-Standalone	9
2.2 Interfaces et protocoles	9
2.3 Les UPFs (User Plane Function)	10
2.3.1 Rôles et Fonctions Clés de l'UPF dans l'Architecture 5G	10
2.3.2 Multiples Instances d'UPFs et Modularity	10
2.3.3 Gestion Dynamique du Placement et de la Reconfiguration des UPF	11
2.3.4 Interfaces de l'UPF	12
2.4 La Virtualisation des Fonctions Réseau	12
2.4.1 Principe de la virtualisation	12
2.4.2 Réseaux définis par logiciel (SDN)	13
2.4.3 Virtualisation des fonctions réseau (NFV)	14
2.4.4 Complémentarité SDN et NFV	14
2.5 Network Slicing	15
2.5.1 Principe du Network Slicing	15
2.5.2 Fonctionnalités clés du Network Slicing	15
2.5.3 Architecture du Network Slicing en 5G	15
2.5.4 Création d'une slice en 5G	17
2.6 Réseaux 5G Privés	18
2.6.1 Définition	18

2.6.2	Avantages Clés . . . . .	18
2.6.3	Applications et Cas d'Utilisation : . . . . .	19
2.6.4	Architecture et Technologies Clés . . . . .	20
2.7	La 5G dans Edge Computing Architectures . . . . .	20
2.7.1	Définition de l'Edge Computing . . . . .	20
2.7.2	Avantages de l'Edge Computing . . . . .	20
2.7.3	La 5G dans Edge Computing Architectures . . . . .	21
2.7.4	Impact de l'Edge Computing sur les UPF et les Réseaux 5G Privés . . . . .	22
2.7.5	Défis et Limitations de l'Edge Computing en 5G . . . . .	22
2.8	Conclusion . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Chapitre 3 : Étude comparative des simulateurs de réseaux 5G</b>	<b>24</b>
3.1	Introduction . . . . .	24
3.2	Critères d'évaluation des outils de simulation . . . . .	24
3.2.1	Nature de l'outil . . . . .	24
3.2.2	Support du Core Network 5G . . . . .	24
3.2.3	Prise en charge des services URLLC . . . . .	24
3.2.4	Gestion avancée des UPFs . . . . .	25
3.2.5	Virtualisation des fonctions réseau . . . . .	25
3.2.6	Outils d'analyse et débogage . . . . .	25
3.2.7	Performances et scalabilité . . . . .	25
3.2.8	Exigences matérielles . . . . .	25
3.2.9	Flexibilité des topologies . . . . .	25
3.2.10	Network Slicing et Edge Computing . . . . .	25
3.3	Analyse des outils étudiés . . . . .	26
3.3.1	NS-3 avec 5G-LENA . . . . .	26
3.3.2	Simu5G avec OMNeT++ . . . . .	27
3.3.3	OpenAirInterface (OAI) . . . . .	28
3.3.4	Open5GS . . . . .	29
3.3.5	Free5GC . . . . .	29
3.4	Comparaison synthétique des outils . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>31</b>

# Table des figures

1.1	L'évolution des réseaux mobiles : de la 1G à la 5G . . . . .	3
2.1	Interfaces principales du réseaux 5G . . . . .	10
2.2	Les interfaces de l'UPF . . . . .	12
2.3	Slicing Network . . . . .	17
2.4	Réseaux 5G privé . . . . .	18
3.1	NS-3 avec 5G-LENA . . . . .	26
3.2	Simu5G avec OMNeT++ . . . . .	27
3.3	OpenAirInterface (OAI) . . . . .	28
3.4	Open5GS . . . . .	29
3.5	Free5gc logo . . . . .	29

# Liste des sigles et abréviations

- **5G** Fifth Generation (Cinquième génération de réseaux mobiles)
- **4G / LTE** Long Term Evolution
- **NR** New Radio
- **RAN** Radio Access Network
- **gNB** gNodeB (Station de base 5G)
- **eNodeB** Evolved Node B (Station de base 4G)
- **EPC** Evolved Packet Core
- **UE** User Equipment (Équipement utilisateur)
- **RAT** Radio Access Technology
- **5GC** 5G Core
- **SBA** Service-Based Architecture
- **CP** Control Plane (Plan de Contrôle)
- **UP** User Plane (Plan Utilisateur)
- **CUPS** Control and User Plane Separation
- **CNFs** Cloud-Native Functions
- **UPF** User Plane Function
- **AMF** Access and Mobility Management Function
- **SMF** Session Management Function
- **AUSF** Authentication Server Function
- **UDM** Unified Data Management
- **PCF** Policy Control Function
- **NRF** Network Repository Function
- **NEF** Network Exposure Function
- **AF** Application Function
- **SCP** Service Communication Proxy
- **SEPP** Security Edge Protection Proxy
- **NWDAF** Network Data Analytics Function
- **NSSF** Network Slice Selection Function
- **NSSAAF** Network Slice Specific Authentication & Authorization Function
- **NSACF** Network Slice Admission Control Function
- **LMF** Location Management Function
- **GMLC** Gateway Mobile Location Center
- **CHF** Charging Function
- **GTP-U** GPRS Tunneling Protocol – User Plane

- **PDU** Protocol Data Unit
- **SDF** Service Data Flow
- **PFD** Packet Flow Description
- **DSCP** Differentiated Services Code Point
- **F1** Interface entre CU et DU
- **N1 / N2 / N3 / N4 / N6 / N9** Interfaces standardisées entre fonctions réseau
- **Xn** Interface entre gNBs
- **NG-RAN** Next Generation RAN
- **SDAP** Service Data Adaptation Protocol
- **PDCP** Packet Data Convergence Protocol
- **RRC** Radio Resource Control
- **NFV** Network Functions Virtualization
- **VNF** Virtual Network Function
- **NFVi** Network Functions Virtualization Infrastructure
- **MANO** Management and Orchestration
- **NFVO** NFV Orchestrator
- **VIM** Virtualized Infrastructure Manager
- **VNFM** Virtual Network Function Manager
- **SDN** Software-Defined Networking
- **MEC** Multi-access Edge Computing
- **MILP** Mixed-Integer Linear Programming
- **RL** Reinforcement Learning
- **CODIPAS-RL** Combined Online Decision-making with Iterative Policy Adjustment Scheme
- **eMBB** Enhanced Mobile Broadband
- **uRLLC** Ultra-Reliable Low Latency Communications
- **mMTC / mIoT** Massive Machine-Type Communications / Massive Internet of Things

# Introduction

L'évolution des réseaux mobiles a marqué une transformation majeure dans la manière dont les individus, les objets et les machines communiquent. Avec l'avènement de la 5G, cette évolution franchit une nouvelle étape, offrant des performances inégalées en termes de vitesse, de latence, de connectivité massive et d'efficacité énergétique. La 5G ne se limite pas à améliorer les services existants ; elle ouvre également la voie à des applications innovantes telles que les véhicules autonomes, les villes intelligentes, la télémédecine et l'Internet des objets (IoT). Pour répondre aux exigences de ces nouveaux cas d'usage, le cœur de réseau 5G (5G Core) repose sur une architecture modulaire et flexible, basée sur des principes modernes. Cependant, la complexité de l'architecture 5G, en particulier celle du cœur de réseau, pose des défis techniques importants en termes de conception, de déploiement et d'optimisation.

Dans ce contexte, la simulation d'un réseau 5G Core revêt une importance capitale. Elle permet de tester, valider et optimiser les différentes fonctions réseau avant leur déploiement dans des environnements réels. **Problème posé** La conception et la mise en œuvre d'un réseau 5G Core soulèvent plusieurs défis techniques et pratiques. Parmi ces défis, l'optimisation du placement des fonctions réseau, notamment les UPF (User Plane Functions), joue un rôle clé pour garantir des performances optimales, notamment en termes de latence et de qualité de service. De plus, l'intégration de technologies comme le network slicing et l'Edge Computing nécessite une infrastructure flexible et modulaire, capable de s'adapter à des scénarios variés.

Cependant, les simulateurs actuels présentent des limitations. Il est donc essentiel d'évaluer ces outils pour identifier celui qui répond le mieux aux exigences du projet, notamment pour simuler efficacement un réseau 5G privé avec des contraintes spécifiques (optimisation des emplacements des UPFs).

Ce rapport est structuré en trois chapitres afin de couvrir exhaustivement les différents aspects de l'étude :

- **chapitre 1** : présente une introduction à la 5G et son évolution
- **chapitre 2** : présente une analyse détaillée de la technologie 5G
- **chapitre 3** : présente une étude comparative des simulateurs 5G disponibles
- **Conclusion**



# 1. Chapitre 1 : Introduction à la 5G

## 1.1 Définition :

La 5G, ou cinquième génération des réseaux mobiles, succède aux générations précédentes : 1G, 2G, 3G et 4G. Elle constitue une nouvelle norme mondiale de communication sans fil, conçue pour connecter quasiment tout — les personnes, les objets, les machines et les appareils. Elle se distingue par des débits de données très élevés (multi-Gbps), une latence extrêmement faible, une fiabilité accrue, une capacité réseau massive, et une expérience utilisateur homogène. La 5G ouvre la voie à de nouveaux usages innovants et à la transformation numérique de nombreux secteurs industriels.

## 1.2 L'évolution des réseaux mobiles : de la 1G à la 5G

### 1G (années 1980)

- Première génération de téléphonie mobile, limitée aux appels vocaux.
- Nombreuses contraintes : mauvaise qualité audio, appareils encombrants, faible autonomie, et absence de chiffrement.
- Technologie principale : AMPS (Advanced Mobile Phone System).

### 2G (années 1990)

- Introduction du GSM (Global System for Mobile Communication).
- Passage au numérique, offrant une meilleure qualité vocale et l'apparition des SMS.
- Débit limité (64 Kbps), insuffisant pour le multimédia.
- L'émergence de la 2.5G a permis des débits jusqu'à 144 Kbps, rendant possible l'accès au web et aux e-mails.

### 3G (années 2000)

- Apparition des smartphones et des services de données à haut débit (jusqu'à 14 Mbps).
- Nouveaux usages : streaming, visiophonie, itinérance mondiale.

- Inconvénients : coût élevé des infrastructures et des terminaux, consommation énergétique importante.

## 4G (années 2010)

- Débits pouvant atteindre 1 Gbps, favorisant la vidéo HD et la navigation fluide.
- Technologie clé : LTE (Long Term Evolution).
- Limitations : forte consommation énergétique et coût élevé du déploiement.

## 5G (à partir de 2020)

- Révolution numérique : vitesses en gigabits par seconde, latence quasi nulle ( $< 1$  ms), et connectivité de masse (jusqu'à 1 million d'appareils/km<sup>2</sup>).
- Supporte des cas critiques : véhicules autonomes, villes intelligentes, Internet des objets (IoT).
- Plus économe en énergie que la 4G, malgré ses performances supérieures.

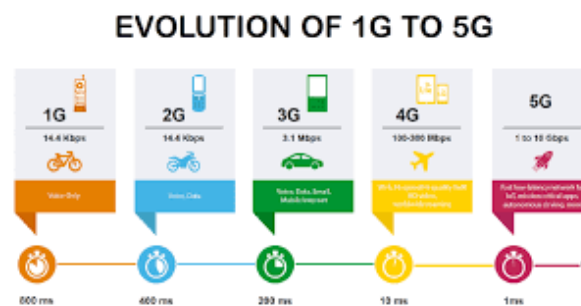


FIGURE 1.1 – L'évolution des réseaux mobiles : de la 1G à la 5G

## 1.3 Les avantages de la 5G

- **Débit et capacité accrus** : Jusqu'à 100 fois plus rapide que la 4G, permettant des usages avancés tels que la vidéo 4K/8K, la réalité augmentée ou les hologrammes.
- **Latence ultra-faible** : Délais de réponse inférieurs à 1 milliseconde, essentiels pour les applications sensibles comme la chirurgie à distance ou les véhicules autonomes.
- **Connectivité massive** : Capacité de connecter jusqu'à 1 million d'objets/km<sup>2</sup>, idéale pour les environnements IoT.
- **Efficacité énergétique** : Réduction de la consommation énergétique par bit transmis, comparée à la 4G.

## 1.4 Cas d'usage de la 5G

- **Haut débit mobile amélioré (eMBB)** : Pour les usages grand public comme le streaming HD, les jeux en ligne, ou les applications multimédias.

*Exemple* : regarder un film en 4K sans mise en mémoire tampon.

- **Communication ultra-fiable à faible latence (uRLLC)** : Pour les systèmes critiques nécessitant une réactivité instantanée.

*Exemple* : véhicules autonomes ou interventions chirurgicales à distance.

- **Internet des objets massif (mIoT)** : Pour la gestion de milliards d'objets connectés dans des environnements variés.

*Exemple* : capteurs environnementaux dans les villes intelligentes surveillant la qualité de l'air en temps réel.

## 2. Chapitre 2 : La technologie 5G

### 2.1 Architecture du Réseau 5G

L'architecture du réseau 5G a été entièrement repensée afin de répondre aux exigences croissantes en matière de débit, de latence, de fiabilité et de connectivité massive. Elle repose sur une organisation modulaire et flexible, structurée autour de trois grands ensembles : la couche d'accès radio (RAN), le réseau de transport, et le cœur de réseau (5GC). Cette nouvelle architecture permet l'intégration de technologies avancées telles que la virtualisation des fonctions réseau, le découpage réseau (network slicing) et le edge computing, essentielles au déploiement de services 5G innovants.

#### 2.1.1 La couche d'accès radio (RAN)

Le RAN 5G constitue l'infrastructure fondamentale permettant la communication entre les utilisateurs et le réseau cœur. Il repose principalement sur des stations de base appelées gNodeB (gNB), qui représentent une évolution significative par rapport aux stations de base 4G (eNodeB). Ces gNodeBs intègrent des technologies avancées pour optimiser les performances et répondre aux exigences spécifiques des services 5G.

##### Composants principaux :

**User Equipment (UE) :** L'UE regroupe tous les appareils connectés au réseau, tels que les smartphones, les objets connectés (IoT), les drones, etc. Bien que l'UE ne fasse pas partie du RAN, il interagit directement avec le gNB pour accéder aux services réseau.

**gNodeB (gNB) :** Le gNodeB est une station de base évoluée qui joue un rôle central dans le réseau 5G.

##### Ses principales fonctionnalités incluent :

- La Gestion de la transmission radio entre le réseau et l'UE.
- L'Attribution dynamique des ressources radio.
- La communication avec le réseau cœur via les interfaces N2 et N3.
- La gestion de la mobilité à travers l'interface Xn.
- L'Optimisation des transmissions grâce à des technologies comme le Beamforming et le Massive MIMO .

## Architecture distribuée du gNB :

Le gNB est divisé en plusieurs unités pour une meilleure répartition des tâches et une optimisation du réseau :

- **Distributed Unit (DU)** : Située près des antennes, elle gère les couches basses du protocole radio (PHY et MAC) et réagit rapidement aux changements de signal radio. Elle communique avec la CU via le Fronthaul .
- **Centralized Unit (CU)** : Située plus loin du site radio, souvent dans un data center, elle gère les couches hautes du protocole radio (RRC et PDCP). Elle peut superviser plusieurs DU simultanément pour optimiser l'utilisation des ressources et communique avec le réseau cœur (5GC) via les interfaces N2 et N3.

## Types d'architectures RAN :

- **Centralized RAN (C-RAN)** : Une partie du traitement est centralisée pour optimiser la gestion des ressources radio.
- **Distributed RAN (D-RAN)** : Chaque station de base gère indépendamment son propre traitement radio.

## Technologies avancées :

- **Massive MIMO** : Exploite plusieurs antennes sur une station de base 5G pour augmenter la capacité et la couverture du réseau en formant des faisceaux directionnels.
- **Beamforming** : Oriente les signaux radio sous forme de faisceaux vers un utilisateur ou un groupe d'utilisateurs, améliorant ainsi la qualité et réduisant les interférences.
- **Dual Connectivity (NSA)** : Permet une connexion simultanée à la 4G et à la 5G pour garantir une transition fluide vers les réseaux 5G.

## 2.1.2 Réseau de transport

Le réseau de transport joue un rôle crucial dans la connectivité entre les différentes parties du réseau 5G :

- **Fronthaul** : relie les antennes aux unités centralisées (CU/DU) avec une faible latence et un débit élevé, principalement via la fibre optique et des interfaces comme eCPRI.
- **Midhaul** : relie les unités centralisées (CU) aux stations de base centrales, assurant l'orchestration et la répartition des charges.
- **Backhaul** : Connecte le RAN au réseau cœur (5GC) et à Internet via des fibres optiques, des liaisons micro-ondes ou des réseaux satellites.

### 2.1.3 Cœur de réseau 5G (5GC)

#### Évolution et Architecture du 5GC :

Une fois les données transmises par le RAN via le réseau de transport, elles sont prises en charge par le cœur de réseau 5G (5GC), qui joue un rôle central dans la gestion du trafic, des abonnés et des services. Contrairement aux générations précédentes, le 5GC adopte une **architecture orientée services (SBA)**, composée de fonctions réseau indépendantes mais interconnectées. Cette architecture est conçue selon une approche **cloud-native**, facilitant la virtualisation, la programmabilité et la gestion dynamique des ressources. Le 5GC est structuré en deux plans distincts :

- **Le plan de contrôle (CP)** : responsable de la signalisation, de la gestion de la mobilité et des politiques réseau,
- **Le plan utilisateur (UP)** : dédié au transport efficace et rapide des données utilisateurs.

Cette évolution architecturale permet une meilleure flexibilité, une évolutivité accrue et une efficacité énergétique optimale.

#### Fonctions Clés du Cœur de Réseau 5G :

##### Gestion des Ressources Réseau :

- **Network Repository Function (NRF)** : Répertoire central permettant la découverte dynamique des services réseau.
- **Network Slice Selection Function (NSSF)** : Sélectionne et assigne dynamiquement une tranche réseau adaptée à l'UE.
- **Network Data Analytics Function (NWDAF)** : Collecte et analyse les données réseau pour l'optimisation et la prédiction des performances.

##### Signalisation :

- **Security Edge Protection Proxy (SEPP)** : Sécurise les échanges de signalisation entre opérateurs en itinérance.
- **Service Communication Proxy (SCP)** : Optimise le routage et la résilience du trafic de signalisation.

##### Exposition des Fonctions Réseau et Application :

- **Network Exposure Function (NEF)** : Expose de manière sécurisée les services réseau aux applications externes via des API.
- **Application Function (AF)** : Permet aux applications d'interagir avec le réseau pour influencer le routage et l'application des politiques.

### Gestion des Politiques :

- **Policy Control Function (PCF)** : Applique les règles de gestion du réseau en fonction des abonnements et des politiques de QoS.
- **Charging Function (CHF)** : Assure la tarification et la facturation des services consommés sur le réseau.

### Contrôle des Paquets :

- **Access & Mobility Management Function (AMF)** : Gère l'authentification, la mobilité et la connexion des équipements utilisateurs.
- **Session Management Function (SMF)** : Supervise les sessions utilisateurs, l'attribution IP et le respect des politiques réseau.

### Gestion des Abonnés :

- **Authentication Server Function (AUSF)** : Authentification des abonnés via le protocole 5G-AKA et les clés de chiffrement.
- **Unified Data Management (UDM)** : Centralise la gestion des abonnés et l'interaction avec les bases de données réseau.

### Services de Localisation 5G :

- **Location Management Function (LMF)** : Détermine la position des UE via des mesures du réseau d'accès radio 5G.
- **Gateway Mobile Location Center (GMLC)** : Gère l'échange d'informations de localisation, notamment en cas d'urgence ou d'itinérance.

## 2.1.4 Architecture SBA (Service-Based Architecture)

L'architecture 5G adopte une approche modulaire basée sur les services (SBA), remplaçant le modèle monolithique de la 4G.

### Évolution de l'Architecture :

- **Monolithique (4G)** : Les fonctions réseau sont des blocs logiciels statiques communiquant via des protocoles rigides, limitant la flexibilité.
- **SOA (Service-Oriented Architecture)** : Introduit un bus de services facilitant l'interconnexion entre fonctions via des API, mais induisant une latence et un point de défaillance unique.
- **Microservices** : Décompose les fonctions réseau en services indépendants déployés sous conteneurs, communiquant via des protocoles légers (HTTP/2, gRPC).

## Applications de l'Architecture SBA :

- **Network Slicing** : Crée des tranches de réseau virtuelles dédiées à des cas d'usage spécifiques.
- **SOA (Service-Oriented Architecture)** : Déploie rapidement de nouvelles fonctionnalités comme l'IoT massif (mMTC) ou les communications ultra-fiables à faible latence (URLLC).

### 2.1.5 Mode Standalone vs Non-Standalone

La 5G repose sur deux architectures :

- **5G NSA (Non-Standalone)** : Dépend du cœur de réseau 4G (EPC). Signalisation et transport via LTE. Déploiement rapide et économique, mais avec une latence plus élevée.
- **5G SA (Standalone)** : Indépendant de la 4G, avec un cœur 5GC natif. Latence ultra-faible ( 1 ms), supporte l'URLLC, le mMTC et le Network Slicing. Coût élevé et complexité de mise en œuvre.

## 2.2 Interfaces et protocoles

Les interfaces définissent la communication entre les différents éléments du réseau sous des protocoles standardisés par le 3GPP.

### Interfaces principales :

- **N1** : Entre l'UE et le réseau cœur (via le gNB).
- **N2** : Entre le gNB et le Core (Plan de contrôle).
- **N3** : Entre le gNB et le Core (Plan utilisateur).
- **Xn** : Entre différents gNBs pour gérer la mobilité des utilisateurs.
- **F1** : Entre la DU et la CU dans le gNB.
- **NG** : Interface entre le RAN et le cœur de réseau 5G (5GC).

### Protocoles clés :

- **NG-RAN (Next Generation RAN)** : Standard qui définit les interfaces et protocoles du RAN 5G.
- **SDAP (Service Data Adaptation Protocol)** : Gère la QoS et la priorisation du trafic.



- **NR-PDCP (Packet Data Convergence Protocol)** : Sécurise et compresse les données avant envoi.
- **RRC (Radio Resource Control)** : Gère les connexions radio et la mobilité des utilisateurs.

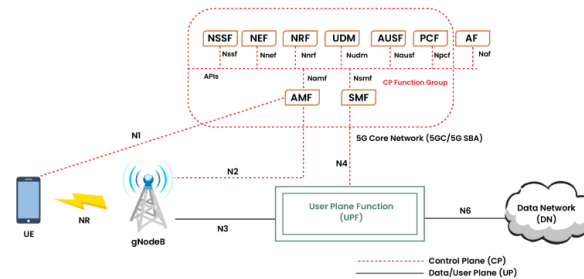


FIGURE 2.1 – Interfaces principales du réseaux 5G

## 2.3 Les UPFs (User Plane Function)

La fonction de plan utilisateur 5G (UPF) est un composant clé de l'architecture New Radio (NR) du 3GPP. Issue de la séparation du plan de contrôle et du plan utilisateur (CUPS), elle permet la décentralisation du traitement des paquets et l'optimisation de la bande passante en rapprochant l'agrégation du trafic de la périphérie du réseau. L'UPF joue un rôle essentiel dans la prise en charge des applications 5G, notamment pour l'IoT et les services à haut débit. Intégrée dans une infrastructure cloud-native, où elle est déployée sous forme de microservices dans un environnement virtualisé et conteneurisé, elle assure le traitement des paquets au sein des architectures basées sur les services (SBA) et facilite des fonctionnalités avancées telles que le découpage du réseau (Network Slicing).

### 2.3.1 Rôles et Fonctions Clés de l'UPF dans l'Architecture 5G

- Point d'interconnexion entre l'infrastructure mobile et le réseau de données (DN), assurant l'encapsulation/décapsulation GTP-U.
- Ancrage de session PDU pour la continuité de la mobilité inter-RAT.
- Routage et transfert des paquets via UL-CL ou I-UPF, selon les filtres de trafic.
- Détection d'applications via SDF ou PFD à 3 tuples.
- Gestion de la QoS (QoS reflective, limitation, marquage DSCP).
- Rapports d'utilisation pour la facturation et l'interception légale (LI).

### 2.3.2 Multiples Instances d'UPFs et Modularity

Contrairement à l'architecture 4G centralisée avec un PGW unique, la 5G permet une architecture distribuée avec plusieurs instances d'UPF, ce qui permet :

- Une plus grande flexibilité selon les besoins applicatifs.
- Une latence réduite grâce à des UPF placés en périphérie.
- Une résilience accrue via une architecture redondante.

### **Types d'Instances d'UPF :**

#### **1) PDU Session Anchor (PSA) / Anchor UPF (A-UPF) :**

- Point d'ancrage des sessions de données vers le DN.
- Attribution et maintien de l'adresse IP utilisateur.
- Garant de la continuité de service durant les déplacements.

#### **2) Intermediate UPF (I-UPF) :**

- Sert de pont entre le RAN et l'A-UPF.
- Utilisé pour la redondance (ex. services URLLC avec tunnels N3/N9).
- Augmente la résilience en assurant un chemin de secours.

#### **3) Uplink Classifier (UL-CL) et Branching Point (BP) :**

- **UL-CL** : Classifie les paquets en fonction de leur type ou application.
- **BP** : Permet la duplication ou redirection du trafic pour la redondance.

## **2.3.3 Gestion Dynamique du Placement et de la Reconfiguration des UPF**

### **Approches d'optimisation pour le placement des UPF :**

#### **1) Modélisation par MILP (Mixed-Integer Linear Programming)**

- Prend en compte : mobilité, latence, tolérance aux pannes.
- Réduction des coûts jusqu'à 30% tout en respectant les contraintes réseau.

#### **2) Apprentissage Automatique et IA**

- Utilise le Reinforcement Learning (RL) ou CODIPAS-RL.
- Anticipe les pics de trafic et reconfigure dynamiquement.
- CODIPAS atteint jusqu'à 92% de précision en prédiction des besoins réseau.

### **Stratégies de Reconfiguration Dynamique :**

#### **1) Partitionnement logiciel/matériel**

- Combinaison VNFs et matériel dédié.
- Performances jusqu'à 200 Gbps atteintes.
- Scalabilité horizontale et load balancing intelligent.

## 2) Gestion de la mobilité et équilibrage de charge

- "Pinning" des sessions à un cœur de traitement.
- Réduction de la latence et meilleure stabilité.

## 3) Réseaux en tranches (Network Slicing)

- UPF déployé selon la nature de la slice :
  - **uRLLC** : UPF en périphérie.
  - **eMBB** : UPF centralisé mais élastique.

### 2.3.4 Interfaces de l'UPF

- **N3** : Interface entre le gNB et l'UPF initial.
- **N9** : Interface entre I-UPF et A-UPF.
- **N6** : Interface entre le DN et l'UPF.
- **N4** : Interface entre SMF et UPF.

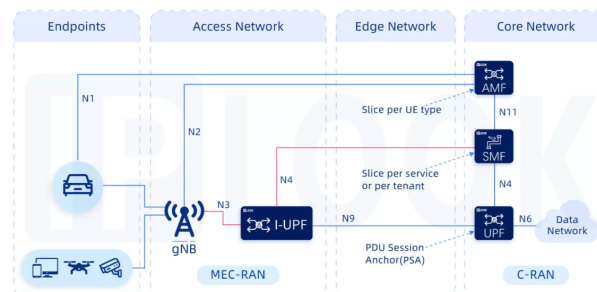


FIGURE 2.2 – Les interfaces de l'UPF

## 2.4 La Virtualisation des Fonctions Réseau

### 2.4.1 Principe de la virtualisation

La virtualisation est une technologie qui permet de faire fonctionner plusieurs environnements isolés (machines virtuelles ou conteneurs) sur une même infrastructure physique. Elle repose sur des logiciels appelés **hyperviseurs**, qui permettent de partager les ressources matérielles tout en maintenant l'isolation entre les applications.

Elle vise principalement à :

- Optimiser l'utilisation des ressources ;
- Réduire les coûts d'infrastructure ;
- Améliorer la flexibilité, la sécurité et la portabilité des services.

Plusieurs types de virtualisation existent :

- **Virtualisation des réseaux** : pour créer des réseaux logiques indépendants de l'infrastructure physique ;
- **Virtualisation au niveau du système (conteneurs)** : plus légère que les machines virtuelles classiques ;
- **Virtualisation des applications** : pour simplifier le déploiement multi-environnements ;
- **Virtualisation des postes de travail** : pour centraliser les environnements utilisateur.

Ces approches jouent un rôle fondamental dans l'évolution vers des réseaux *cloud-native*, flexibles et dynamiques, tels que ceux de la 5G.

## 2.4.2 Réseaux définis par logiciel (SDN)

Le SDN (Software-Defined Networking) est une approche qui sépare le *plan de contrôle* (*control plane*) du *plan de données* (*data plane*) dans un réseau.

- **Plan de contrôle** : le “cerveau” du réseau, qui prend les décisions concernant l'acheminement des paquets ;
- **Plan de données** : le “corps” du réseau, qui transporte les paquets selon les règles définies par le plan de contrôle.

Dans un réseau traditionnel, ces deux plans sont intégrés dans chaque équipement réseau. Avec le SDN, le plan de contrôle est centralisé dans un **contrôleur SDN**, simplifiant ainsi la gestion du réseau.

### Fonctionnement du SDN :

Le contrôleur SDN prend des décisions (par exemple, acheminer un paquet vers un certain routeur) et installe des règles (*flow rules*) dans les équipements réseau. Ces règles sont stockées dans une *flow table* sur chaque équipement, qui les utilise pour guider le trafic.

### Avantages du SDN :

- **Gestion simplifiée** : administration centralisée du réseau ;
- **Programmabilité** : le réseau s'adapte dynamiquement aux besoins applicatifs ;

- **Mises à jour simplifiées** : les services réseau peuvent être modifiés sans intervention sur chaque équipement.

### 2.4.3 Virtualisation des fonctions réseau (NFV)

La NFV (Network Functions Virtualization) permet de remplacer les fonctions réseau traditionnelles (routeurs, pare-feux, équilibreurs de charge) par des logiciels.

**Composants clés :**

- **VNF (Virtualized Network Functions)** : fonctions réseau virtualisées.  
Exemples : routeur virtuel, pare-feu virtuel ;
- **NFVi (Network Functions Virtualization Infrastructure)** : infrastructure matérielle et logicielle pour exécuter les VNF. Exemples : serveurs, hyperviseurs (KVM), conteneurs (Docker) ;
- **MANO (Management, Automation, and Network Orchestration)** : systèmes d'orchestration comme Kubernetes.

**Avantages de la NFV :**

- **Scalabilité** : déploiement/suppression des fonctions à la demande ;
- **Réduction des coûts** : moins de matériel dédié requis ;
- **Flexibilité** : mise à jour rapide des services réseau.

### 2.4.4 Complémentarité SDN et NFV

Bien que différents, SDN et NFV sont **complémentaires** :

- **SDN** : sépare le contrôle du réseau des équipements physiques, le rendant programmable et centralisé ;
- **NFV** : virtualise les fonctions réseau, les rendant exécutables sur du matériel standard.

**Ensemble** : ils permettent un réseau plus *flexible, programmable* et *économe en ressources*.

**Exemple** : un opérateur télécom peut utiliser le SDN pour gérer le trafic, et la NFV pour déployer un pare-feu virtuel sur la même infrastructure.

## 2.5 Network Slicing

Le *network slicing* (fractionnement de réseau) est une technologie clé de la 5G permettant de créer plusieurs réseaux logiques sur une même infrastructure physique. Cela signifie que des ressources physiques comme les serveurs, la mémoire et le réseau peuvent être virtualisées, puis partitionnées en plusieurs *slices* (tranches) indépendantes.

### 2.5.1 Principe du Network Slicing

Chaque slice est optimisée pour un usage spécifique avec des exigences particulières en matière de qualité de service (QoS), de bande passante, de latence et de sécurité. Par exemple :

- Une slice IoT pour connecter des objets intelligents ;
- Une slice pour véhicules autonomes garantissant une latence ultra-faible et une haute fiabilité ;
- Une slice pour smartphones optimisée pour les services classiques de communication.

Le *network slicing* couvre l'ensemble du réseau, depuis l'accès radio (*gNodeB* en 5G) jusqu'au cœur du réseau et aux serveurs applicatifs. Les slices sont isolées, garantissant qu'un problème ou une surcharge sur une slice n'affecte pas les autres.

### 2.5.2 Fonctionnalités clés du Network Slicing

- **Isolation des slices** : Chaque slice est indépendante, les ressources ne sont pas partagées. Un problème sur une slice n'impacte pas les autres.
- **Authentification et sécurité** : Une authentification spécifique peut être appliquée à certaines slices selon leur niveau de criticité.
- **Gestion dynamique des slices** : Création, modification ou suppression de slices dynamiquement selon les besoins.
- **Gestion des ressources et QoS** :
  - QoS personnalisée : latence, bande passante et fiabilité spécifiques par slice ;
  - Limitation du débit par slice : pour éviter la surcharge.

### 2.5.3 Architecture du Network Slicing en 5G

L'architecture du slicing en 5G repose sur la séparation entre le plan de contrôle (gestion) et le plan utilisateur (transport de données). Plusieurs fonctions réseau gèrent le slicing :

## NSSF (Network Slice Selection Function)

Fonction du plan de contrôle qui assigne une slice à un utilisateur (UE) selon :

- Le profil utilisateur (abonnement, appareil) ;
- Les services demandés (IoT, streaming, communication critique) ;
- La disponibilité des slices dans la zone géographique.

### Fonctionnement :

- Lors de l'enregistrement d'un utilisateur, l'AMF envoie une requête au NSSF.
- Le NSSF détermine la slice la plus adaptée et renvoie cette information à l'AMF.

### Exemples :

- Un utilisateur IoT → slice **mMTC**.
- Une voiture autonome → slice **uRLLC**.
- Un smartphone → slice **eMBB**.

## NSSAAF (Network Slice Specific Authentication and Authorization Function)

Introduit à partir de la Release 16. Il sécurise l'accès aux slices avec une authentification spécifique.

### Fonctionnement :

- L'AMF interroge le NSSAAF pour vérifier l'accès d'un utilisateur à une slice.
- Le NSSAAF consulte la base d'abonnement et décide d'autoriser ou non l'accès.
- Il peut révoquer l'accès en cas de problème.

### Exemples :

- Un utilisateur grand public n'a pas accès à une slice d'urgence ;
- Un hôpital doit s'authentifier pour accéder à une slice **uRLLC** médicale.

## NSACF (Network Slice Admission Control Function)

Introduit dans la Release 17. Il contrôle l'admission des utilisateurs sur une slice et évite la surcharge.

### Fonctionnement :

- L'AMF interroge le NSACF avant d'admettre un nouvel utilisateur.
- Le NSACF vérifie la capacité restante et autorise ou refuse l'accès.
- Il informe les composants réseau en cas de saturation.

### Exemples :

- Une slice IoT est limitée à 100 000 capteurs ;
- Une slice autonome à 10 000 véhicules maximum.

## 2.5.4 Création d'une slice en 5G

Étapes de création :

### 1) Définition des besoins

Avant tout déploiement, il est essentiel de définir :

- Le Type de service (eMBB, URLLC, mMTC), ;
- Les Exigences techniques (latence, bande passante),
- Les Utilisateurs ciblés ;
- Et la Zone de couverture.

La slice s'appuie sur les trois composantes de l'infrastructure 5G : le RAN, le cœur de réseau, et le réseau de transport.

### 2) Configuration et orchestration

La mise en place technique repose sur :

- **NFV** : Virtualisation des fonctions réseau (AMF, SMF, UPF) ;
- **SDN** : Programmation centralisée du réseau, gestion dynamique, routage intelligent ;
- **MANO** : Automatisation du déploiement.

Le **NSSF** joue un rôle clé en :

- Identifie les slices disponibles ;
- Assigne la slice à l'utilisateur ;
- Garantit la continuité lors de la mobilité.

### 3) Déploiement et activation

- Création des slices virtuelles sur les serveurs du cœur ;
- Connexion avec le RAN ;
- Attribution des ressources et paramètres QoS ;
- Tests de performance et sécurité ;
- Mise en service et supervision continue.

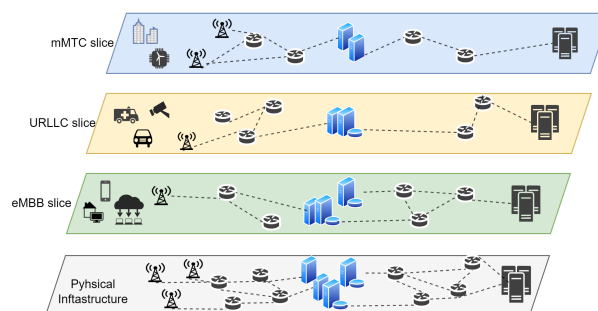


FIGURE 2.3 – Slicing Network



## 2.6 Réseaux 5G Privés

### 2.6.1 Définition

Un réseau 5G privé est une infrastructure de télécommunication sans fil construite et opérée spécifiquement pour une entité (entreprise, usine, hôpital ou campus) sur un spectre dédié ou partagé. Il permet un contrôle total sur les services, les performances et la sécurité. Contrairement aux réseaux publics, il est isolé, configuré sur mesure, et optimisé pour répondre aux exigences d'environnements industriels, logistiques ou institutionnels critiques.

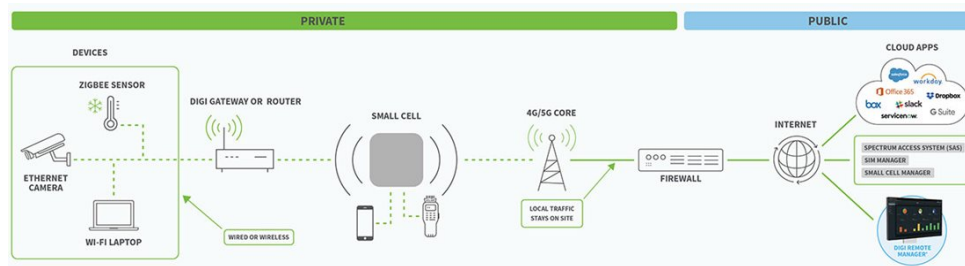


FIGURE 2.4 – Réseaux 5G privé

### 2.6.2 Avantages Clés

Les réseaux 5G privés apportent des bénéfices majeurs qui les distinguent des solutions traditionnelles :

#### Connectivité ultra-rapide et faible latence :

Avec des débits pouvant dépasser 1 Gbps et une latence inférieure à 1 ms, la 5G permet des communications en temps réel, essentielles pour des applications comme la robotique industrielle, la réalité augmentée ou les systèmes autonomes.

#### Sécurité et contrôle renforcés :

Le réseau est isolé du domaine public, ce qui réduit considérablement les risques d'intrusion. L'entreprise détient la maîtrise complète de la gestion des accès, de l'encryption des données, et des politiques de sécurité, tout en assurant une conformité aux réglementations spécifiques à son secteur.

## **Qualité de service (QoS) personnalisée :**

La priorisation dynamique du trafic permet d'ajuster les ressources en fonction des besoins critiques, garantissant la stabilité des services comme la télésurveillance ou la commande de machines sensibles.

## **Disponibilité et fiabilité élevées :**

Grâce à l'utilisation de fréquences dédiées et à l'isolation du réseau, les interférences sont réduites au minimum. Les niveaux de disponibilité de service peuvent atteindre 99.999.

## **Indépendance opérationnelle :**

Les entreprises ne sont plus tributaires des opérateurs publics pour l'évolution de leur réseau. Elles peuvent adapter librement la couverture, la configuration et les fonctionnalités en fonction de leur propre calendrier et besoins.

## **Résilience accrue :**

En étant découplé du réseau public, le réseau privé reste fonctionnel même en cas de défaillance globale ou de surcharge du réseau national, ce qui renforce la continuité des opérations critiques.

### **2.6.3 Applications et Cas d'Utilisation :**

Les réseaux 5G privés se déclinent dans des cas d'usage concrets et diversifiés, couvrant plusieurs secteurs stratégiques. Ils jouent un rôle essentiel dans la transformation numérique des secteurs critiques, en fournissant une connectivité ultra-fiable, sécurisée et adaptable.

- **Industrie 4.0** : Déploiement de robots autonomes, de capteurs IoT et de jumeaux numériques pour optimiser la production et la maintenance.
- **Santé** : Facilite le monitoring en temps réel des patients, la chirurgie assistée à distance et la sécurisation des données médicales.
- **Logistique** : Améliore la traçabilité, automatise les inspections par drone et gère des véhicules autonomes.
- **Énergie et mines** : Supervision d'infrastructures critiques et pilotage à distance d'équipements en environnements hostiles.
- **Campus d'entreprise** : Unifie les réseaux IT/OT, déploie des services collaboratifs avancés et intègre le edge computing.

Ces applications illustrent le potentiel transformateur de la 5G privée dans des environnements exigeants.

## 2.6.4 Architecture et Technologies Clés

Les réseaux 5G privés intègrent plusieurs technologies avancées qui les différencient des réseaux publics. Au cœur de l'architecture se trouve le **5G Core** (5GC), souvent déployé sur site ou en environnement edge, assurant un contrôle localisé des données, une latence minimale, et une adaptation en temps réel aux besoins métiers.

Les fonctions réseau sont virtualisées (NFV) et orchestrées via des solutions de *network slicing*, permettant de réserver dynamiquement des tranches réseau pour différents usages (vidéosurveillance, IoT, AR/VR, etc.). Le déploiement s'appuie aussi sur des stations de base (*gNB*) compatibles avec des bandes de fréquences locales (comme la bande 3,7 GHz en Europe).

L'intégration avec le **MEC** (Multi-access Edge Computing) renforce les capacités de traitement à proximité des utilisateurs, réduisant encore les délais et augmentant la fiabilité des services critiques. Enfin, les solutions d'orchestration intelligente, basées sur l'IA et l'automatisation, permettent une gestion proactive de la performance et de la sécurité du réseau.

## 2.7 La 5G dans Edge Computing Architectures

### 2.7.1 Définition de l'Edge Computing

L'Edge Computing est une approche décentralisée du traitement des données qui consiste à exécuter des calculs et à stocker des données près de la source où elles sont générées, c'est-à-dire près des utilisateurs ou des appareils. Il réduit la dépendance au cloud en déployant des ressources informatiques au bord du réseau (Edge), notamment sur :

- Des serveurs locaux,
- Des stations de base 5G (gNB),
- Des passerelles IoT,
- Des micro-datacenters.

### 2.7.2 Avantages de l'Edge Computing

- **Réduction de la latence** : Les données n'ont plus besoin de transiter jusqu'au cloud distant, ce qui accélère les temps de réponse.

- **Diminution de la charge réseau** : Moins de trafic vers les datacenters centraux, optimisant l'allocation de la bande passante.
- **Sécurité et confidentialité améliorées** : Les données sensibles peuvent être traitées localement, réduisant les risques liés aux transmissions réseau.
- **Fiabilité accrue** : Les systèmes Edge peuvent fonctionner de manière autonome même en cas de connexion instable avec le cloud.

### 2.7.3 La 5G dans Edge Computing Architectures

#### Intégration de l'Edge Computing dans la 5G

La 5G et l'Edge Computing sont deux technologies complémentaires qui, ensemble, permettent de répondre aux exigences des applications modernes. La 5G offre une connectivité ultra-rapide et fiable, tandis que l'Edge Computing permet de traiter les données localement, réduisant ainsi la latence et améliorant l'efficacité du réseau.

#### Architecture de l'Edge Computing dans les réseaux 5G

L'Edge Computing s'intègre étroitement avec la 5G grâce à des technologies comme le **Multi-access Edge Computing** (MEC), qui permet aux opérateurs d'héberger des services et applications directement au sein de l'infrastructure réseau.

L'architecture de l'Edge Computing dans un réseau 5G se compose généralement de plusieurs couches :

- **Cloud Centralisé (Core Network)** : Traitement de gros volumes de données non en temps réel.
- **Edge Cloud (MEC)** : Traitement proche des utilisateurs, hébergé sur des data centers distribués.
- **Fog Computing (Edge Devices)** : Extension de l'Edge Computing permettant de déployer des ressources à différents niveaux du réseau, entre les dispositifs IoT et le cloud. Cela permet un traitement au plus près des capteurs et terminaux, sur des routeurs, des antennes ou des objets connectés.

#### Rôle du MEC (Multi-access Edge Computing)

Le MEC est un élément clé de l'Edge Computing en 5G, il permet :

- D'exécuter des applications directement sur les infrastructures 5G (gNB, UPF, serveurs Edge).
- De gérer les fonctions réseau virtualisées (VNF), comme le placement des UPF.
- De proposer des API aux développeurs pour héberger des services à faible latence.

## 2.7.4 Impact de l'Edge Computing sur les UPF et les Réseaux 5G Privés

### Optimisation du placement des UPF :

Dans un réseau 5G privé, l'UPF (User Plane Function) est responsable de la gestion du trafic utilisateur. L'Edge Computing permet d'optimiser son placement :

- **UPF centralisé** : Situé dans un data center principal, adapté aux services nécessitant de la puissance de calcul (ex : vidéo HD en streaming).
- **UPF distribué (Edge UPF)** : Placé directement sur un MEC ou une antenne gNB, idéal pour les applications URLLC (ex : robotique industrielle, véhicules autonomes).

**Exemple** : Une entreprise industrielle qui utilise des robots autonomes ne peut pas se permettre une latence de 50 ms liée à un UPF centralisé. En plaçant l'UPF directement dans l'usine sur un serveur Edge, la latence est réduite à moins de 5 ms, assurant un contrôle en temps réel.

### Scalabilité et Adaptabilité :

Avec l'Edge Computing, il devient possible de :

- Dynamiser l'allocation des UPF en fonction de la charge réseau.
- Déployer des UPF temporaires sur des infrastructures Edge lors de pics de trafic.
- Éviter la surcharge du cœur de réseau, en traitant localement les données générées par les utilisateurs.

## 2.7.5 Défis et Limitations de l'Edge Computing en 5G

### Contraintes Matérielles et Coût :

L'Edge Computing nécessite des serveurs performants déployés au plus près des utilisateurs. Toutes les entreprises n'ont pas de data center sur site, ce qui peut rendre l'investissement coûteux.

### Complexité de Gestion :

L'Edge Computing implique une orchestration avancée des ressources entre le cloud, l'Edge et les appareils connectés. La gestion des UPF dynamiques peut être difficile sans une virtualisation avancée.

## Sécurité et Confidentialité :

La distribution des données sur plusieurs sites multiplie les risques de cyberattaques. Il faut des solutions de chiffrement et d'authentification robustes.

## 2.8 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de présenter **les principes fondamentaux de la 5G**, son **architecture modulaire**, ainsi que les **technologies clés** telles que le network slicing, la virtualisation (NFV), le SDN, et le edge computing.

L'accent a été mis sur la **fonction UPF**, essentielle au traitement des données dans le cœur de réseau, et sur sa **gestion dynamique** pour répondre aux exigences de performance, de latence et de fiabilité.

Ces éléments théoriques constituent la base pour la suite du rapport, où nous explorerons les **simulateurs 5G** permettant de tester et valider ces concepts dans un environnement virtuel.

# 3. Chapitre 3 : Étude comparative des simulateurs de réseaux 5G

## 3.1 Introduction

Dans le cadre de notre projet visant à simuler un réseau Core 5G et à optimiser l'emplacement des fonctions UPF (User Plane Functions), il est essentiel de sélectionner un outil adapté aux besoins spécifiques. Cette section présente une analyse comparative des principaux simulateurs et émulateurs disponibles, en mettant l'accent sur leurs capacités à répondre aux exigences du projet.

## 3.2 Critères d'évaluation des outils de simulation

Pour identifier l'outil le mieux adapté à notre projet, nous avons défini les critères suivants :

### 3.2.1 Nature de l'outil

**Priorité** : Un émulateur réaliste est préféré, mais un simulateur flexible peut également convenir.

**Raisons** : L'émulation permet de reproduire fidèlement un réseau réel, tandis que la simulation offre une flexibilité accrue pour les tests théoriques.

### 3.2.2 Support du Core Network 5G

**Exigence** : Implémentation complète des fonctions AMF, SMF, UPF, AUSF, UDM, PCF, etc.

**Interopérabilité** : Les interfaces standardisées (N1, N2, N3, N4) doivent être prises en charge.

### 3.2.3 Prise en charge des services URLLC

**Analyse des délais** : Latence inférieure à 1 ms, gestion fine de la QoS et suivi des pertes de paquets.

**Fiabilité** : Configuration ajustable pour garantir une fiabilité élevée.

### 3.2.4 Gestion avancée des UPFs

**Déploiement et configuration** : Facilité de déploiement de multiples UPFs.

**Optimisation dynamique** : Présence d'algorithmes intégrés ou possibilité d'intégrer des méthodes externes pour optimiser l'emplacement des UPFs.

### 3.2.5 Virtualisation des fonctions réseau

**Technologies supportées** : Compatibilité avec VNF (Virtual Network Functions), SDN (Software-Defined Networking), Docker, Kubernetes et machines virtuelles.

### 3.2.6 Outils d'analyse et débogage

**Monitoring** : Fourniture d'outils de visualisation et d'analyse des métriques clés.

**Détection des goulots d'étranglement** : Identification rapide des problèmes de performance.

### 3.2.7 Performances et scalabilité

**Temps d'exécution** : Optimisation pour des scénarios complexes et multi-utilisateurs.

**Scalabilité** : Capacité à gérer des simulations à grande échelle.

### 3.2.8 Exigences matérielles

**Compatibilité** : Adaptabilité aux configurations standards tout en exploitant des infrastructures haute performance si nécessaire.

### 3.2.9 Flexibilité des topologies

**Support des architectures** : Simple (single-cell) à complexe (multi-cellules, edge computing).

### 3.2.10 Network Slicing et Edge Computing

**Network Slicing** : Création et gestion de tranches réseau avec des caractéristiques spécifiques.

**Edge Computing** : Déploiement des UPFs à la périphérie du réseau.



## 3.3 Analyse des outils étudiés

### 3.3.1 NS-3 avec 5G-LENA



FIGURE 3.1 – NS-3 avec 5G-LENA

**Définition :** NS-3 avec le module 5G-LENA est un simulateur open-source conçu pour modéliser les réseaux 5G New Radio (NR). Basé sur le simulateur NS-3, il inclut des fonctionnalités spécifiques à la 5G, telles que le support du RAN (Radio Access Network) et des services avancés comme l'uRLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication) et le network slicing.

**Évaluation selon les critères :**

- **Support complet du réseau 5G Core :** Support limité au modèle NSA (Non-Standalone), où le RAN 5G est connecté à un EPC (Evolved Packet Core) 4G. Le support d'un Core Network 5G complet (5GC) est insuffisant.
- **Support des services uRLLC :** Fournit des mécanismes pour analyser les délais de transmission, la QoS (Qualité de Service), et la perte de paquets. Configuration manuelle requise pour des scénarios spécifiques.
- **Virtualisation :** Pas de support natif pour la virtualisation des fonctions réseau (NFV) ou le SDN (Software-Defined Networking). Extensible via des modules supplémentaires ou des scripts personnalisés.
- **Network Slicing :** Pas de support natif. Possible de simuler des tranches de réseau en configurant manuellement des paramètres comme la QoS et les ressources allouées.
- **Flexibilité des topologies :** Grande flexibilité pour configurer des topologies complexes, y compris des réseaux multi-cellules et multi-BWP (Bandwidth Part).
- **Facilité d'installation et documentation :** Installation complexe, nécessitant des compétences en compilation et en gestion de dépendances. Documentation complète mais technique, ce qui peut être un obstacle pour les débutants.
- **Performance de simulation :** Performances élevées pour des simulations complexes, mais consommation importante des ressources matérielles.
- **Edge Computing :** Pas de support natif. Scénarios possibles en configurant manuellement des serveurs locaux et en ajustant les délais de traitement.
- **Ajout d'algorithmes pour l'optimisation des UPFs :** Pas d'algorithmes prédéfinis. Possibilité d'implémenter des algorithmes personnalisés via des scripts.

Python ou C++.

**Conclusion :**

- **Points forts :** Flexibilité des topologies, support des services uRLLC, performances élevées.
- **Points faibles :** Support limité du Core Network 5G, virtualisation et network slicing non natifs, nécessité de développements personnalisés.

### 3.3.2 Simu5G avec OMNeT++



FIGURE 3.2 – Simu5G avec OMNeT++

**Définition :** Simu5G avec OMNeT++ est un simulateur flexible qui prend en charge à la fois le RAN 5G et le Core Network. Il permet l'intégration de scripts personnalisés pour des fonctionnalités avancées.

**Évaluation selon les critères :**

- **Support complet du réseau 5G :** Support partiel du Core Network 5G. Nécessite des ajustements manuels pour des scénarios complexes.
- **Support des services uRLLC :** Analyse possible mais moins précise que NS-3.
- **Virtualisation :** Non natif, nécessite des extensions.
- **Network Slicing :** Limité, ajustements manuels requis.
- **Flexibilité des topologies :** Bonne pour des architectures simples, mais complexité accrue pour des configurations avancées.
- **Facilité d'installation et documentation :** Documentation moyenne, courbe d'apprentissage raide.
- **Performance de simulation :** Performances suffisantes pour des scénarios simples.
- **Edge Computing :** Pas de support natif.
- **Ajout d'algorithmes pour l'optimisation des UPFs :** Nécessite des scripts personnalisés.

**Conclusion :**

- **Points forts :** Flexibilité, adaptabilité pour les études de performance.
- **Points faibles :** Manque de fonctionnalités avancées, configuration manuelle intensive, moins réaliste pour des tests proches des réseaux réels.

### 3.3.3 OpenAirInterface (OAI)



FIGURE 3.3 – OpenAirInterface (OAI)

**Définition :** OpenAirInterface (OAI) est une plateforme open-source dédiée à la simulation et à l’émulation de réseaux 5G. Elle permet de tester et valider des configurations réseau sans matériel physique.

#### Évaluation selon les critères :

- **Support complet du réseau 5G :** Support complet, incluant RAN et Core Network.
- **Support des services uRLLC :** Analyse des délais, QoS et pertes de paquets possible, mais limitée sans adaptations spécifiques.
- **Virtualisation :** Compatible avec Docker et Kubernetes.
- **Network Slicing :** Support via NSSF et AMF multiples.
- **Flexibilité des topologies :** Architecture modulaire permettant des configurations variées.
- **Facilité d’installation et documentation :** Documentation détaillée mais technique.
- **Performance de simulation :** Dépendante de l’infrastructure matérielle.
- **Edge Computing :** Support limité, nécessite des développements personnalisés.
- **Ajout d’algorithmes pour l’optimisation des UPFs :** Pas d’algorithmes intégrés, nécessite des développements personnalisés.

#### Conclusion :

- **Points forts :** Support complet du réseau 5G, flexibilité des topologies, compatibilité avec la virtualisation.
- **Points faibles :** Complexité d’installation, nécessité de développements personnalisés pour l’optimisation des UPFs.

### 3.3.4 Open5GS



FIGURE 3.4 – Open5GS

**Définition :** Open5GS est une implémentation open-source du Core Network 5G et 4G, conçue pour des déploiements privés et des tests de laboratoire.

**Évaluation selon les critères :**

- **Support complet du réseau 5G :** Support complet du 5GC (AMF, SMF, UPF, etc.) et interopérabilité 4G/5G.
- **Support des services uRLLC :** Configuration manuelle requise pour garantir des délais ultra-faibles.
- **Virtualisation :** Compatible avec Docker, Kubernetes et NFV.
- **Network Slicing :** Support limité via QoS et APN.
- **Flexibilité des topologies :** Configuration flexible via fichiers YAML.
- **Facilité d'installation et documentation :** Installation simple avec interface WebUI. Documentation claire.
- **Performance de simulation :** Performances suffisantes pour des simulations à petite échelle.
- **Edge Computing :** Configuration manuelle requise.
- **Ajout d'algorithmes pour l'optimisation des UPFs :** Pas d'algorithmes natifs, nécessite des scripts externes.

**Conclusion :**

- **Points forts :** Support complet du Core Network 5G, facilité d'installation, flexibilité des topologies.
- **Points faibles :** Limitations pour l'optimisation dynamique des UPFs et l'edge computing.

### 3.3.5 Free5GC



FIGURE 3.5 – Free5gc logo

**Définition :** Free5GC est une implémentation open-source du Core Network 5G, conçue pour des déploiements réels ou virtualisés. Il prend en charge Docker/Kubernetes et propose une architecture modulaire.

### Évaluation selon les critères :

- **Support complet du réseau 5G (RAN et Core) :** Focus sur le Core Network 5G, mais nécessite des outils tiers pour le RAN.
- **Support des services uRLLC :** Conforme aux standards 3GPP, mais nécessite une configuration manuelle pour garantir des délais ultra-faibles et une QoS spécifique.
- **Configurer dynamiquement le placement des UPF :** Configuration possible, mais nécessite des scripts ou outils supplémentaires pour automatiser le processus.
- **Support de virtualisation :** Compatible avec Docker, Kubernetes et NFV, adapté aux environnements modernes.
- **Support du slicing réseau :** Supporte le network slicing, mais configuration complexe.
- **Flexibilité des topologies :** Flexible pour différentes échelles (petites à grandes).
- **Facilité d'installation et documentation :** Installation difficile, documentation insuffisante pour certains aspects.
- **Performance de simulation :** Limitée pour des simulations à grande échelle, dépend fortement du matériel.
- **Exigences matérielles :** Fonctionne sur des machines standard, mais nécessite un matériel performant pour des scénarios complexes.
- **Support du edge computing :** Possible mais nécessite une configuration manuelle pour déployer les UPFs à la périphérie.

### Conclusion :

- **Points forts :** Modularité, prise en charge de la virtualisation, flexibilité des topologies.
- **Points faibles :** Documentation insuffisante, performances limitées pour des simulations complexes, nécessité de configurations manuelles pour certaines fonctionnalités.

## 3.4 Comparaison synthétique des outils

CRITÈRES	NS-3 & 5G-LENA	OMNET++ & SIMU5G	OPENAIRINTERFACE	OPEN5GS	FREE5GC
Support du réseau 5G	Non natif	Non natif	Partiel	Oui	Oui
Support des services uRLLC	Oui (config manuelle)	Oui	Partiel	Partiel	Oui
Optimisation des emplacements des UPFs	Partiel	Partiel	Non natif	Non natif	Oui (modulaire)
Virtualisation	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Slicing réseau	Non	Non	Partiel	Oui	Oui
Performances	Excellente	Excellente	Moyenne	Performante	Performante

TABLE 3.1 – Comparaison synthétique des outils 5G

## 4. Conclusion

La 5G introduit une nouvelle manière de concevoir les réseaux mobiles, reposant sur des principes de virtualisation, de découpage logique (network slicing) et de traitement distribué. Au cœur de cette architecture, la fonction UPF assure le transport optimisé des données utilisateur selon les exigences des services.

Pour garantir la performance, la flexibilité et la résilience de ces systèmes, des techniques avancées telles que la gestion dynamique des UPF, l'orchestration cloud-native, et l'intelligence artificielle sont utilisées.

Dans ce contexte, les simulateurs 5G jouent un rôle crucial : ils permettent de modéliser, tester et évaluer ces concepts de manière contrôlée avant tout déploiement réel. Ils sont indispensables pour étudier le placement des fonctions réseau, la répartition des ressources, et les comportements adaptatifs dans différents scénarios d'usage.

Ce rapport constitue une base théorique solide pour une future phase pratique, centrée sur la simulation du cœur de réseau 5G, avec un intérêt particulier pour le positionnement optimal des UPF dans un environnement virtualisé et découpé.

# References

- *Document académique sur la virtualisation 5G :*  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/179241/Leyva-Pupo.IFIP\\_WWIC.pdf;sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/179241/Leyva-Pupo.IFIP_WWIC.pdf;sequence=1)
- *Documentation de Juniper sur CUPS SAEGW :*  
<https://www.juniper.net/documentation/fr/fr/software/junos/multi-access-user-plane/topics/topic-map/cups-saegw-overview.html>
- *Site officiel de Free5GC :*  
<https://www.free5gc.org/>
- *Dépôt GitHub de Free5GC :*  
<https://github.com/free5gc/free5gc>
- *Dépôt GitHub de UERANSIM :*  
<https://github.com/aligungr/UERANSIM>
- *Wiki sur la virtualisation de Free5GC :*  
<https://github.com/free5gc/free5gc/wiki/Virtualization>
- *Wiki sur le slicing réseau avec Free5GC :*  
<https://github.com/free5gc/free5gc/wiki/Network-Slicing>
- *Tutoriel NS-3 :*  
<https://www.nsnam.org/docs/release/3.36/tutorial/singlehtml/index.html>
- *Modèles LTE/5G dans NS-3 :*  
<https://www.nsnam.org/docs/models/html/5g-lte.html>
- *Page d'installation de NS-3 :*  
<https://www.nsnam.org/wiki/Installation>
- *Projet 5G RAN de OpenAirInterface :*  
[https://openairinterface.org/oai-5g-ran-project/?utm\\_source=chatgpt.com](https://openairinterface.org/oai-5g-ran-project/?utm_source=chatgpt.com)
- *Article Microsoft sur la fonction UPF :*  
<https://techcommunity.microsoft.com/blog/telecommunications-industry-blog/what-is-the-5g-user-plane-function-upf/3690887>