

Projet de spécialité  
2 année Cycle Supérieur (2CS)  
Option : Systèmes Informatiques (SQ)

# Simulation d'un réseau 5G Core

*Réalisé par :*

- KHADIR Amina
- HENNANE Douaa El Ikhlas
- REMIL MahaFatimaZohraa
- DEBBIH Ikram Zineb
- HADDAD Amira
- KOUADRI Nada
- BENYAHIA Yahia Abdeldjalil

*Encadré par :*

- M. HAMANI Nacer
- M. AMROUCHE Hakim

# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Liste des abréviations</b>   | <b>IV</b> |
| Résumé <sup>1</sup>   |           |
| <b>1 Introduction</b>   | <b>2</b>  |
| 1.1 Contexte général . . . . .  | 2         |
| 1.2 Présentation du projet . . . . .  | 3         |
| 1.3 Problématique . . . . .   | 4         |
| 1.4 Objectifs . . . . .   | 4         |
| <b>2 Fondamentaux des réseaux 5G</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1 Les réseaux 5G . . . . .  | 5         |
| 2.1.1 Évolution des réseaux mobiles . . . . .                                 | 5         |
| 2.1.2 Architecture d'un réseau 5G Core . . . . .                              | 8         |
| 2.2 User Plane Function (UPF) . . . . .                                       | 10        |
| 2.2.1 Interfaces du UPF et protocoles associés . . . . .                      | 10        |
| 2.2.2 Impact du placement des UPF sur les performances du<br>réseau . . . . . | 11        |
| 2.3 Virtualisation des Fonctionnalités Réseau (NFV) dans la 5G . . . . .      | 11        |
| 2.3.1 Concept de virtualisation des fonctions réseau (NFV) . . . . .          | 11        |
| 2.3.2 Concept de virtualisation des fonctions réseau (NFV) . . . . .          | 12        |
| 2.3.3 Avantages et défis de NFV . . . . .                                     | 13        |
| 2.4 Réseaux 5G privés . . . . .   | 13        |
| 2.4.1 Définition et caractéristiques des réseaux 5G privés . . . . .          | 13        |
| 2.4.2 Cas d'utilisation dans divers secteurs . . . . .                        | 14        |
| <b>3 Critères de comparaison des simulateurs.</b>                             | <b>15</b> |
| 3.1 Critères techniques . . . . .   | 15        |
| 3.2 Critères techniques . . . . .   | 16        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>Étude comparative des simulateurs 5G</b> | <b>18</b> |
| 4.1      | Présentation des simulateurs . . . . .      | 18        |
| 4.1.1    | OMNeT++ simulation framework . . . . .      | 18        |
| 4.1.2    | ns-3 . . . . .                              | 21        |
| 4.1.3    | Free5GC . . . . .                           | 24        |
| 4.1.4    | Open5GS . . . . .                           | 26        |
| 4.2      | Tableau comparatif . . . . .                | 29        |
|          | <b>Conclusion</b>                           | <b>31</b> |

# Table des figures

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Architecture 4G. . . . .   | 6  |
| 2.2 | Évolution des réseaux mobiles. . . . .                             | 7  |
| 2.3 | Architecture core 5G. . . . .                                      | 9  |
| 4.1 | OMNeT module connection. . . . .                                   | 19 |
| 4.2 | Principaux modules de la bibliothèque de modèles Simu5G . . .      | 19 |
| 4.3 | Architecture d'un nœud dans ns-3 et son interaction avec le réseau | 22 |
| 4.4 | Free5GC Architecture . . . . .                                     | 25 |
| 4.5 | Architecture Open5GC . . . . .                                     | 27 |

# List of abbreviations

- **5G** : Cinquième génération de téléphonie mobile
- **LTE** : Long Term Evolution (4G)
- **UMTS** : Universal Mobile Telecommunications System (3G)
- **TCP/IP** : Transmission Control Protocol / Internet Protocol
- **eMBB** : enhanced Mobile Broadband
- **uRLLC** : Ultra-Reliable and Low Latency Communications
- **mMTC** : massive Machine Type Communications
- **UPF** : User Plane Function
- **AMF** : Access and Mobility Management Function
- **gNB** : gNodeB (station de base 5G)
- **UE** : User Equipment (équipement utilisateur)
- **RAN** : Radio Access Network
- **NFV** : Network Functions Virtualization
- **SDN** : Software-Defined Networking
- **QoS** : Quality of Service

# Résumé

Ce rapport s'inscrit dans le cadre d'une étude approfondie sur l'optimisation des performances du réseau cœur 5G, avec un accent particulier sur les services critiques de type uRLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications). L'objectif principal du projet est de simuler différentes configurations de placement et de nombre de User Plane Functions (UPF), afin d'analyser leur impact sur la latence et la fiabilité du réseau.

Après avoir présenté les concepts fondamentaux liés à la 5G, notamment l'architecture du 5G Core, la virtualisation des fonctions réseau (NFV), ainsi que les réseaux 5G privés, le rapport se concentre sur une étude comparative de plusieurs simulateurs : OMNeT++/Simu5G, ns-3, Free5GC et Open5GS. Cette analyse a permis d'identifier Free5GC comme l'outil le plus adapté aux besoins du projet.

Enfin, des scénarios de simulation réalistes ont été proposés afin d'évaluer l'impact du positionnement des UPF dans le cadre de réseaux 5G privés, en vue de guider les futurs déploiements en milieu critique.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Contexte général

L'évolution des réseaux mobiles a conduit à la conception du réseau 5G, une technologie clé qui répond aux besoins croissants en termes de débit, de latence et de fiabilité. Parmi les trois principaux services de la 5G, les communications ultra-fiables à faible latence (uRLLC - Ultra-Reliable and Low Latency Communications) sont essentielles pour les applications nécessitant une communication instantanée et sécurisée, comme l'automatisation industrielle, les services d'urgence et la gestion des véhicules autonomes.

Le réseau cœur 5G (5G Core) joue un rôle central dans la garantie de ces exigences strictes. L'un des défis majeurs est le placement stratégique des User Plane Functions (UPF), qui sont chargées du traitement du trafic utilisateur. Leur positionnement impacte directement la latence et la fiabilité du réseau.

Pour mieux comprendre et optimiser ce placement, une simulation du réseau 5G Core est nécessaire. Elle permet d'évaluer différents scénarios et configurations avant un déploiement réel, réduisant ainsi les risques et les coûts. Ce projet s'inscrit dans une démarche de mesure et l'analyse des performances du 5G Core, avec un accent particulier sur la simulation du nombre d'UPF, leur placement et la distance entre eux, afin d'explorer des configurations optimisées permettant de minimiser la latence et de maximiser la fiabilité des services uRLLC.

## 1.2 Présentation du projet

Ce projet vise à simuler un réseau 5G Core en mettant l'accent sur le nombre des UPF, leur placement et la distance qui les sépare afin d'optimiser les performances des services uRLLC. Pour atteindre cet objectif, nous suivrons une démarche en plusieurs étapes :

- **Analyse et sélection du simulateur 5G** : Une étude comparative sera menée afin d'identifier le simulateur le plus adapté à notre besoin, en tenant compte des contraintes et exigences liées au réseau 5G Core et aux services uRLLC.
- **Mise en place d'une topologie initiale** : Une première configuration simple du réseau sera simulée, afin d'effectuer des mesures de performance, surtout de la latence et la fiabilité.
- **Extension progressive de la topologie** : La topologie sera ensuite étendue en augmentant progressivement le nombre d'UE (utilisateurs) et d'UPF, tout en variant leur positionnement, afin d'étudier leur impact sur les performances du réseau et explorer une variété de topologies.
- **Mesure et analyse des performances** : À chaque étape, des mesures seront réalisées pour analyser l'impact des changements sur la qualité de service, dans le but de permettre aux utilisateurs d'identifier des configurations optimales adaptées aux réseaux 5G privés orientés URLLC.

L'objectif final de ce projet est de simuler plusieurs scénarios de placement des UPF, afin de réduire la latence et d'améliorer la fiabilité du réseau, et ainsi analyser leur impact sur le respect des exigences des services uRLLC dans des environnements critiques.

Le simulateur sera utilisé pour mesurer les performances (latence, fiabilité) associées à chaque configuration. L'analyse des résultats permettra d'identifier les placements les plus adaptés, afin de guider les décisions de déploiement dans des environnements réels, tout en respectant les contraintes strictes des services uRLLC.



### 1.3 Problématique

L'amélioration des performances des services uRLLC dans un réseau 5G Core repose sur plusieurs facteurs, notamment la gestion efficace du traitement du trafic utilisateur, la répartition des charges réseau et la réduction des délais de transmission. Cependant, l'adéquation entre l'emplacement des UPF, la distance qui les sépare, et la capacité du simulateur à modéliser ces contraintes demeure un défi non trivial.

Ainsi, la question centrale que ce projet vise à résoudre est :

Comment concevoir une simulation efficace du réseau 5G Core permettant d'analyser l'impact du nombre et du placement des UPF, tout en prenant en compte les contraintes de latence, de fiabilité et de distance entre ces entités ?

### 1.4 Objectifs

Ce projet vise à modéliser et analyser les paramètres influençant les performances du réseau 5G Core, en mettant l'accent sur l'impact du placement des UPF et la distance entre eux. Pour atteindre cet objectif, plusieurs axes de recherche seront explorés :

- Définition des critères de sélection du simulateur 5G en fonction des besoins spécifiques liés à l'étude des UPF et des performances réseau.
- Comparaison et évaluation de plusieurs simulateurs 5G afin d'identifier celui offrant la meilleure prise en charge des paramètres d'étude.
- Développement d'un environnement de simulation réaliste, intégrant diverses configurations de placement des UPF et modélisant leurs interactions.
- Analyse quantitative des impacts du placement des UPF sur les indicateurs de performance clés tels que la latence et la fiabilité.

L'optimisation du placement des UPF représente un défi majeur dans le déploiement des services uRLLC. Ce projet apportera une **meilleure compréhension des paramètres influençant la latence et la fiabilité**, permettant ainsi de formuler des recommandations pratiques pour la conception et l'optimisation des infrastructures 5G Core adaptées aux services critiques.

## Chapitre 2

# Fondamentaux des réseaux 5G

### 2.1 Les réseaux 5G

#### 2.1.1 Évolution des réseaux mobiles

L'évolution des réseaux cœurs mobiles a accompagné les progrès des communications sans fil, chaque génération apportant des améliorations clés en matière d'efficacité, de flexibilité et de services. Face à la demande croissante en débit, en faible latence et en fiabilité, le 5GC marque une rupture technologique majeure (voir Figure 2.2). Comprendre cette évolution permet de mieux apprécier les apports du 5GC par rapport aux générations précédentes.

#### – 2G et les réseaux à commutation de circuits

Introduits au début des années 1990, les réseaux de deuxième génération (2G) ont marqué la transition de la communication analogique vers le numérique, permettant des services comme la messagerie texte (SMS) et la transmission de données à commutation de circuits. Le cœur de réseau reposait alors sur des **connexions dédiées pour chaque session**. Bien que cette approche garantisse une communication vocale fiable, elle s'avérait peu efficiente pour la transmission de données, car les ressources restaient allouées même en l'absence de trafic, ce qui a motivé les évolutions ultérieures.

#### – 3G et les réseaux à commutation de paquets

La troisième génération (3G) a introduit la commutation de paquets, tout en maintenant l'ancienne infrastructure à commutation de circuits. Le cœur de réseau UMTS s'appuyait sur le GPRS (General Packet Radio Service)

pour fournir une connectivité de données continue et plus efficace. Cette avancée a permis un accès Internet initial sur les mobiles, posant les bases d'une utilisation plus orientée données. L'ajout du HSPA (High-Speed Packet Access) a significativement amélioré les débits, rendant les usages multimédias plus fluides. Toutefois, la montée en charge due à l'usage accru d'Internet mobile a rapidement mis en évidence les limites d'évolutivité de la 3G.

## – 4G et l'EPC

La 4G a marqué une transition fondamentale vers un réseau tout-IP, supprimant complètement les éléments à commutation de circuits et optimisant le réseau pour les services de données à haut débit. L'Evolved Packet Core (EPC), cœur du réseau LTE, a été conçu pour améliorer la latence, la bande passante et la gestion du trafic. Il intègre des éléments clés comme le SGW, le PGW et le MME (voir Figure 2.1). Cette architecture a favorisé le développement de services comme la vidéo en streaming et la VoIP. Toutefois, son organisation centralisée a engendré des goulots d'étranglement, soulignant la nécessité d'une solution plus flexible et évolutive.

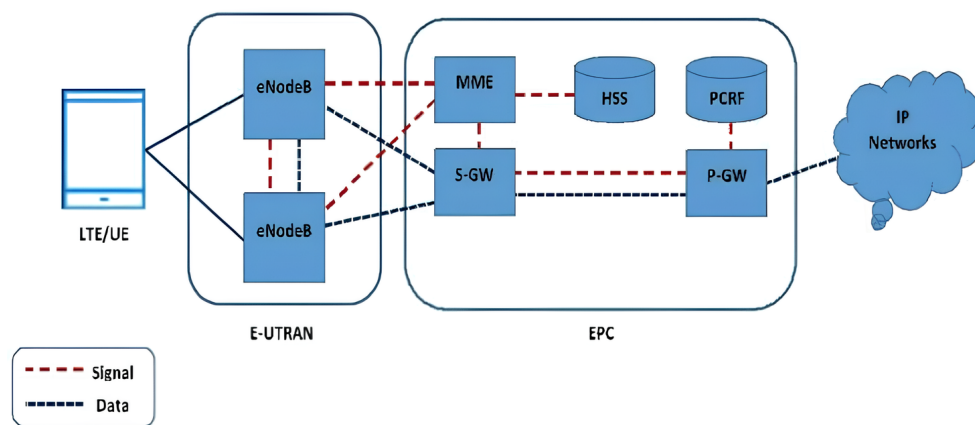


FIGURE 2.1 – Architecture 4G.

## – 5GC et l'architecture SBA

Le 5GC introduit une architecture orientée services (SBA – Service-Based Architecture), rompant avec le modèle figé des générations précédentes. Contrairement aux architectures antérieures reposant sur des éléments de réseau statiques, le 5GC permet aux fonctions réseau (Network Functions

- NF) de communiquer via des interfaces orientées services (Service-Based Interfaces - SBI), améliorant ainsi la modularité, l'évolutivité et l'allocation dynamique des ressources (voir Figure 2.3).

L'une des avancées majeures du 5GC est le **network slicing** (découpage du réseau), qui permet de créer des instances virtuelles adaptées à différents besoins. Cela garantit la cohabitation de divers services — URLLC, eMBB, mMTC — sur une seule infrastructure physique sans interférence. Cette flexibilité rend le 5GC particulièrement adapté aux réseaux d'entreprise, aux villes intelligentes et aux applications industrielles de nouvelle génération.

En outre, le 5GC intègre des technologies clés telles que **la virtualisation des fonctions réseau (NFV)** et **le réseau défini par logiciel (SDN)** qui permet une orchestration dynamique, une récupération automatique en cas de panne, ainsi qu'une évolutivité améliorée. Grâce à son architecture cloud-native, le 5GC répond efficacement aux exigences croissantes en trafic de données et pose les fondations des réseaux du futur.

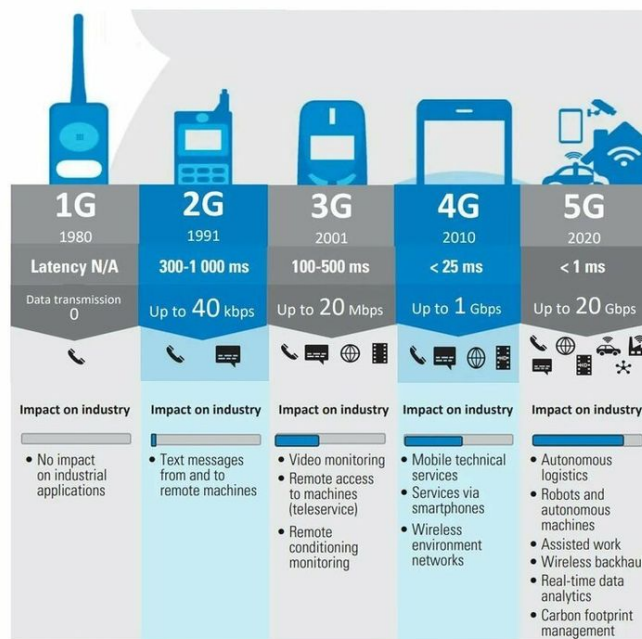


FIGURE 2.2 – Évolution des réseaux mobiles.

### 2.1.2 Architecture d'un réseau 5G Core

Le 5G Core (5GC) repose sur une architecture décomposée en deux plans principaux :

#### Plan de contrôle (CP) :

- **AMF (Access and Mobility Management Function)** : Gère l'enregistrement, la connectivité et la mobilité des terminaux.
- **SMF (Session Management Function)** : Responsable de la gestion des sessions et de l'allocation des adresses IP.
- **AUSF (Authentication Server Function)** : Fournit les services d'authentification.
- **UDM (Unified Data Management)** : Stocke et gère les données d'abonnement.
- **PCF (Policy Control Function)** : Définit les politiques de réseau et de QoS.
- **NRF (Network Repository Function)** : Agit comme un registre central pour que les NF puissent découvrir d'autres NF.
- **NSSF (Network Slice Selection Function)** : Sélectionne les instances de network slicing appropriées.
- **NEF (Network Exposure Function)** : Expose les capacités du réseau aux applications externes.

#### Plan utilisateur (UP) :

- **UPF (User Plane Function)** : Traite le trafic utilisateur et applique les règles de QoS.
- **DN (Data Network)** : Connexion aux réseaux externes (Internet, IMS, services cloud).

#### Interfaces de communication

Les interfaces connectant les fonctions du plan de contrôle sont appelées interfaces basées sur les services (SBI - Service-Based Interfaces) et sont reliées à un bus, ce qui permet la communication entre les fonctions réseau (NF) via des interfaces de programmation applicative (API) (voir Figure 2.3), chaque

interface est désignée en commençant par un « N » suivi du nom de la fonction qui l'expose, par exemple :

- **Namf** : interface exposée par l'AMF.
- **Nsmf** : interface exposée par le SMF.
- **Nnef** : interface exposée par le NEF.
- **Npcf** : interface exposée par le PCF.

Les interfaces de type "reference point" sont désignées en commençant par un « N » suivi d'un chiffre, et contrairement aux interfaces SBI, elles utilisent une connexion point-à-point :

- **N1** : connecte l'UE à l'AMF en utilisant le protocole NAS.
- **N2** : connecte le (R)AN à l'AMF en utilisant le protocole NGAP.
- **N3** : connecte le (R)AN à l'UPF en utilisant le protocole GTP.
- **N4** : : connecte le SMF à l'UPF en utilisant le protocole PFCP (Packet Forwarding Control Protocol).
- **N6** : connecte l'UPF au réseau de données (DN).
- **N9** : connecte deux UPF entre eux.

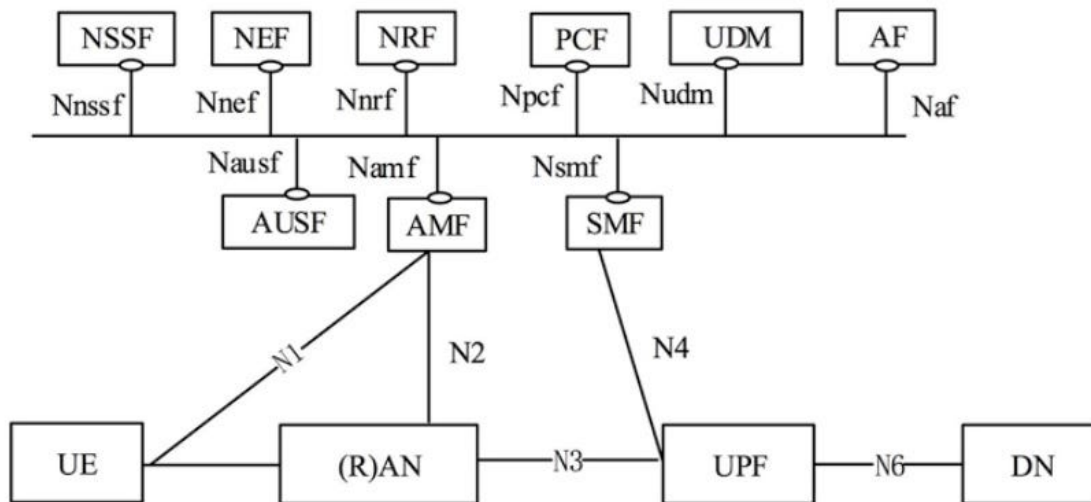


FIGURE 2.3 – Architecture core 5G.

## 2.2 User Plane Function (UPF)

Le UPF est une fonction clé du plan utilisateur dans le cœur de réseau 5G (5GC). Il est responsable de la gestion et du transport des paquets de données utilisateur à travers le réseau. Contrairement aux fonctions du plan de contrôle (comme l'AMF ou le SMF), le UPF s'occupe exclusivement du traitement du trafic de données.

### 2.2.1 Interfaces du UPF et protocoles associés

- **L'interface N3** : entre le gNB et le UPF, utilise le protocole **GTP-U** (GPRS Tunneling Protocol - User Plane) pour transporter les paquets utilisateur encapsulés depuis la station de base vers le cœur de réseau. Ce tunnel garantit la continuité de session lors des déplacements de l'utilisateur.
- **L'interface N4** relie le SMF au UPF via le protocole **PFCP** (Packet Forwarding Control Protocol), permettant au SMF de configurer dynamiquement le traitement des flux de données (routage, QoS, redirection, filtrage). Elle constitue le lien de contrôle du plan utilisateur.
- **L'interface N6** connecte le UPF aux réseaux de données externes (DN), tels qu'Internet, les services en périphérie (MEC), ou encore des réseaux privés d'entreprise en utilisant principalement IP (IPv4 ou IPv6), ou SRv6 (Segment Routing over IPv6) pour un routage avancé. Elle permet la sortie du trafic utilisateur vers sa destination finale.
- **L'interface N9**, utilisée entre deux UPF, repose sur GTP-U ou SRv6 selon l'architecture. Elle est utilisée dans les architectures distribuées où un UPF local traite une partie du trafic (par exemple pour des services à faible latence) avant de rediriger le reste vers un UPF centralisé.

Plusieurs protocoles de transport et de sécurité peuvent compléter ces interfaces selon les exigences du réseau. Le protocole UDP est utilisé comme couche de transport sous-jacente pour GTP-U et PFCP, car il permet une transmission rapide avec peu de surcharge. Pour renforcer la sécurité, des tunnels IPsec peuvent être mis en place sur les interfaces N3, N6 ou N9, garantissant la confidentialité et l'intégrité des données utilisateur.

## 2.2.2 Impact du placement des UPF sur les performances du réseau

Le placement du UPF (User Plane Function) dans l'architecture 5G a un impact direct sur les performances du réseau, notamment en termes de latence, de débit et de gestion du trafic. Un placement proche de l'utilisateur, c'est-à-dire en périphérie du réseau (edge), permet de réduire considérablement la latence de bout en bout, ce qui est crucial pour les services exigeant une très faible latence comme l'URLLC. De plus, cette approche diminue le trafic traversant le cœur de réseau, réduisant ainsi la congestion du backhaul et les coûts associés. Plusieurs études montrent que des implémentations légères et distribuées du UPF, utilisant des technologies comme Docker, DPDK ou P4, permettent d'atteindre de hautes performances tout en restant adaptées aux environnements contraints (par exemple sur drones ou micro-nœuds). Toutefois, la reconfiguration dynamique du placement du UPF, nécessaire pour s'adapter aux variations de charge et à la mobilité des utilisateurs, peut engendrer des coûts non négligeables liés aux migrations de fonctions réseau et à la re-localisation des sessions. Bien que l'optimisation du placement vise souvent à minimiser la latence ou les coûts de déploiement, de nombreuses approches ignorent encore des contraintes essentielles comme la capacité des UPF, les exigences précises de QoS, ou la continuité des chemins de service (SFC). Ainsi, le choix du placement du UPF constitue un compromis entre performance, coût, flexibilité et complexité de gestion.

## 2.3 Virtualisation des Fonctionnalités Réseau (NFV) dans la 5G

### 2.3.1 Concept de virtualisation des fonctions réseau (NFV)

Les fonctions réseau, comme les pare-feu, les routeurs ou les équilibrateurs de charge, sont des services essentiels au sein d'un réseau. Traditionnellement, elles sont mises en place à l'aide de matériel dédié, chaque fonction nécessitant un équipement spécifique.

La virtualisation des fonctions réseau (NFV) révolutionne cette approche en dissociant ces fonctions du matériel physique. Cela en les exécutant sous forme de machines virtuelles sur des serveurs standardisés, indépendamment du matériel sous-jacent. Elle repose sur la virtualisation et l'orchestration des



ressources pour rendre les réseaux plus flexibles et évolutifs.

Une architecture NFV se compose de trois éléments :

- **Infrastructure de virtualisation des fonctions réseau (NFVI-Network Functions Virtualization Infrastructure)** : Comprend les serveurs, le stockage, les commutateurs et les ressources informatiques nécessaires pour créer des environnements NFV. Basée sur un hyperviseur, elle abstrait les ressources de calcul, de stockage et de réseau.
- **Fonctions réseau virtualisées (VNF-Virtualized Network Functions)** : Elles remplacent les équipements matériels traditionnels et assurent les différentes fonctions réseau sous forme de services virtualisés.
- **Gestion, automatisation et orchestration réseau (MANO– management, automation and network orchestration)** : sert à gérer le déploiement, l’approvisionnement, la surveillance et la performance des fonctions réseau virtualisées.

### 2.3.2 Concept de virtualisation des fonctions réseau (NFV)

Dans les réseaux 5G, la NFV est largement utilisée pour virtualiser les fonctions réseau, permettant ainsi une plus grande flexibilité et une réduction des coûts d’infrastructure. Cette virtualisation est également un élément clé pour la mise en œuvre du **network slicing**.

Le **network slicing** est un composant essentiel des réseaux 5G, permettant de diviser dynamiquement l’infrastructure physique en plusieurs réseaux virtuels indépendants, configurés à la demande selon les besoins spécifiques d’applications, de services ou de clients. Grâce à la NFV des tranches logiques isolées peuvent être créées, chacune offrant des performances comparables à un réseau dédié. Chaque slice regroupe des ressources dédiées (calcul, réseau, VNF/CNF-Virtualized Network Functions/Cloud Native Functions-), peut couvrir plusieurs zones géographiques, et est géré selon des politiques précises et des accords de niveau de service (SLA) garantissant la qualité et la fiabilité attendues.

### 2.3.3 Avantages et défis de NFV

#### Avantages :

- **Réduction des coûts** : Permet d'exécuter les fonctions réseau sur des serveurs standards bien moins coûteux que le matériel propriétaire.
- **Simplification de la gestion et de la configuration** : Un réseau virtualisé est plus facile à configurer et à administrer que les infrastructures matérielles traditionnelles.
- **Flexibilité et évolutivité** : les fonctionnalités réseau peuvent être modifiées ou ajoutées à la demande grâce à la virtualisation.
- **Gain de temps** : accélère le déploiement des services et réduit le temps nécessaire pour configurer et connecter de nouveaux équipements.
- **Meilleure réactivité** : rend le réseau plus agile et capable de s'adapter rapidement aux besoins changeants des services.

#### Défis et risques :

- **Sécurité physique moins efficace** : les composants virtualisés sont plus vulnérables aux attaques que les équipements physiques protégés en data-center.
- **Propagation des malwares** : les logiciels malveillants peuvent plus facilement se déplacer entre les composants virtualisés partageant une même machine.
- **Moins de visibilité sur le trafic réseau** : les outils de surveillance traditionnels peinent à détecter les anomalies dans le trafic entre machines virtuelles.
- **Complexité de la sécurité** : la virtualisation introduit plusieurs couches nécessitant des solutions de sécurité spécifiques et adaptées à chaque niveau.

## 2.4 Réseaux 5G privés

### 2.4.1 Définition et caractéristiques des réseaux 5G privés

Un réseau 5G privé est une infrastructure mobile dédiée à une organisation spécifique (entreprise, usine, hôpital, campus, etc.), offrant une connectivité sans

fil haut débit avec un contrôle total sur la gestion, la sécurité et la performance du réseau. Il utilise des fréquences sous licence, partagées ou sans licence, et permet une personnalisation en fonction des besoins spécifiques de l'organisation.

### 2.4.2 Cas d'utilisation dans divers secteurs

- **Industrie et fabrication** : Automatisation des lignes de production, contrôle à distance des machines, robots connectés et maintenance prédictive.
- **Logistique et entrepôts** : Gestion en temps réel des stocks, optimisation des flux de marchandises et véhicules autonomes pour le transport interne.
- **Secteur médical et hôpitaux** : Téléchirurgie assistée par robot, suivi en temps réel des équipements médicaux, dossiers patients sécurisés et optimisation des flux hospitaliers.
- **Éducation et recherche** : Laboratoires connectés, expériences collaboratives en réalité augmentée (AR/VR) et optimisation des campus intelligents.
- **Énergie et environnement** : Surveillance des infrastructures critiques (centrales électriques, barrages), gestion optimisée des réseaux électriques et détection avancée des anomalies.
- **Agriculture connectée** : Suivi des cultures via drones, irrigation intelligente et automatisation des machines agricoles pour une meilleure gestion des ressources.

## Chapitre 3

# Critères de comparaison des simulateurs.

Les simulateurs 5G jouent un rôle essentiel dans la comparaison, le test et l'analyse des réseaux avant leur déploiement. Ils permettent aux chercheurs, aux étudiants et aux ingénieurs d'explorer différentes topologies, de tester divers scénarios et d'identifier les configurations optimales sans avoir à déployer physiquement un réseau coûteux.

Cependant, tous les simulateurs ne se valent pas. Il est donc crucial de les comparer en fonction des exigences du projet. Cette évaluation repose sur deux catégories de critères : techniques et pratiques.

### 3.1 Critères techniques

- **Support des protocoles 5G Core et 5G NR :**

Un critère fondamental dans le choix du simulateur est sa capacité à prendre en charge la simulation du réseau 5G Core ainsi que de l'accès radio 5G NR. Si un simulateur ne supporte pas directement la 5G NR, il doit au moins être compatible avec un module externe capable de la simuler, afin d'assurer une analyse cohérente des interactions entre l'accès radio et le cœur du réseau, et donc une évaluation complète des performances réseau.

- **Capacité à simuler différentes topologies et scénarios :**

Un simulateur doit être capable de tester plusieurs topologies réseau en ajustant différents paramètres. Il doit également offrir une flexibilité suffisante pour modéliser une variété de scénarios réalistes, incluant le positionnement et le nombre d'UPFs, la densité des utilisateurs (UEs), les défaillances de nœuds, ainsi que d'autres dynamiques réseau. Cette capacité est essentielle pour explorer différentes configurations.

- **Génération de métriques de QoS (latence, fiabilité) :**

La mesure de la QoS (Qualité de service) est essentielle pour l'évaluation des performances d'un réseau 5G. Pour les communications URLLC, le simulateur doit être capable d'estimer la latence et le taux de perte des paquets, afin de mieux analyser l'effet du placement des UPFs sur la fiabilité et l'efficacité globale du réseau.

- **Scalabilité :**

Il est essentiel d'évaluer la capacité du simulateur à modéliser la scalabilité dans le contexte spécifique des réseaux 5G privés destinés aux services uRLLC. Cela inclut la possibilité d'ajouter progressivement de nouveaux utilisateurs (UE) et fonctions UPF, tout en observant l'impact sur la latence et la fiabilité. Même si le nombre d'UE reste limité dans les environnements critiques, il est important de garantir que les performances du réseau restent stables à mesure que la topologie s'étend.

## 3.2 Critères techniques

- **Facilité d'installation et configuration :** Un bon simulateur doit être simple à installer et à configurer pour permettre aux utilisateurs de se concentrer seulement sur l'expérimentation et le test des différentes topologies plutôt que de perdre du temps à corriger les erreurs complexes de configuration.
- **Documentation et ressources d'apprentissage :** Une bonne documentation, claire et structurée, est essentielle pour comprendre le fonctionnement du simulateur et éviter les erreurs d'utilisation. La disponibilité de tutoriels, d'exemples pratiques et de guides d'apprentissage permet de mieux maîtriser l'outil. De plus, une communauté active représente un avantage important, car elle offre un soutien précieux en cas de difficulté et permet de partager des retours d'expérience.
- **Possibilités d'extension et personnalisation :** Le simulateur doit être conçu de manière modulaire et extensible, afin de pouvoir s'adapter aux besoins spécifiques et évoluer en fonction des nouveaux cas d'usage. Cette extensibilité est essentielle pour permettre l'ajout de nouveaux modules, fonctionnalités ou scénarios si nécessaire.
- **Interface utilisateur et visualisation des résultats :** Bien qu'elle

ne soit pas indispensable, une interface graphique intuitive représente un véritable atout. Elle facilite la configuration des paramètres, la visualisation des topologies réseau et l'interprétation des résultats, améliorant ainsi l'expérience utilisateur et rendant le simulateur plus accessible.

.

## Chapitre 4

# Étude comparative des simulateurs 5G

### 4.1 Présentation des simulateurs

#### 4.1.1 OMNeT++ simulation framework

##### Présentation

OMNET++ est un framework de simulation d'événements discrets utilisé pour modéliser divers types de réseaux (filaire, sans fil, capteurs, etc.). Il propose un environnement de développement intégré (IDE) basé sur Eclipse pour faciliter le débogage, l'animation des flux de messages et l'analyse des simulations.

INET est une bibliothèque open-source pour OMNET++, utilisée pour simuler et tester des réseaux de communication. Elle fournit des modèles de protocoles (TCP, UDP, IPv4, IPv6, OSPF, BGP, etc.), des interfaces filaires et sans fil (Ethernet, IEEE 802.11), ainsi que des fonctionnalités comme la mobilité et la signalisation MPLS.

Simu5G est une bibliothèque de simulation basée sur OMNET++ permettant d'évaluer les performances des réseaux 5G NR et LTE/LTE-A de bout en bout. Il modélise les entités réseau comme les eNodeB, gNodeB et UEs, et implémente une pile protocolaire complète pour LTE et NR. Simu5G permet aussi la simulation du réseau en prenant en charge les modes FDD et TDD.

##### Architecture

OMNeT++ repose sur une architecture modulaire permettant de modéliser divers types de réseaux via des composants simples (implémentant la logique via des gestionnaires d'événements) et composés (agrégeant hiérarchiquement

d'autres modules), communiquant exclusivement par des portes (gates) selon des connexions définies en NED.

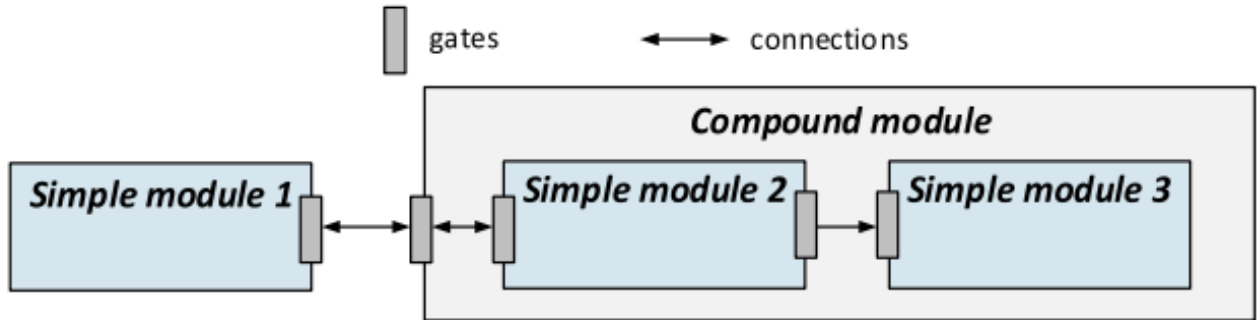


FIGURE 4.1 – OMNeT module connection.

Simu5G étend cette architecture pour la 5G en s'appuyant sur la pile protocolaire d'INET (TCP/IP, couche liaison) et en introduisant des modules spécialisés. Les gNodeB et UE deviennent des modules composés intégrant la pile protocolaire 5G NR, tandis que deux modules centraux, binder et carrierAggregation, maintiennent l'état global du réseau. Un autre module, X2Manager, gère l'interface inter-cellules. Parmi les modules du cœur de réseau, on trouve également ceux dédiés à l'UPF et au MEC.

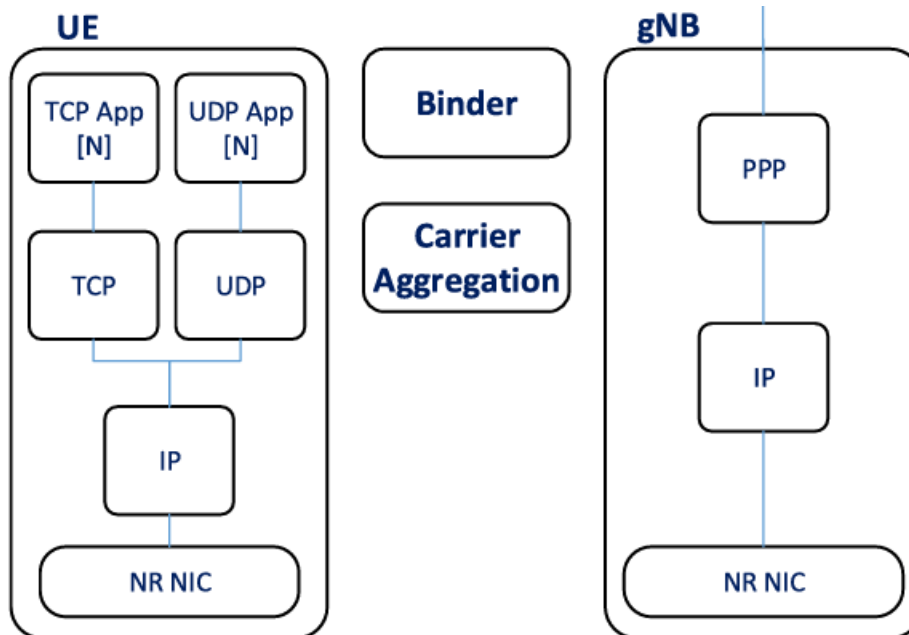


FIGURE 4.2 – Principaux modules de la bibliothèque de modèles Simu5G



## fonctionnalités et avantages

- **Simulation complète de la pile protocolaire 5G NG :** La simulation de la pile protocolaire 5G NR, incluant les couches RAN (PDCP, RLC, MAC et PHY) et une implémentation simplifiée du réseau coeur, prend en charge l'évaluation de bout en bout du transport IP via son intégration avec INET.
- **Automatisation des scénarios paramétriques :** Simu5G intègre un moteur d'automatisation puissant permettant la génération systématique de scénarios via des fichiers INI paramétrables. Cette fonctionnalité permet une exploration exhaustive de l'espace de configuration (bande passante, politiques de scheduling ...). Cette fonctionnalité facilite l'analyse comparative et l'optimisation des performances réseau. Elle réduit le temps de configuration et minimise les erreurs liées aux ajustements manuels.
- **Supporte les simulations multi-cœurs et l'émulation temps réel :** grâce au support du calcul multi-cœurs, Simu5G optimise l'exécution des simulations complexes en répartissant la charge de travail. Il permet également l'émulation en temps réel, offrant la possibilité d'interagir avec des équipements physiques et permettant la connexion entre machines.
- **Communauté et support d'OMNeT++ :** OMNeT++ bénéficie d'une communauté académique active qui organise chaque année OMNeT++ Community Summit pour partager ses avancées. Une documentation et des modèles open source (INET, SimuLTE) facilitent son adoption. Les utilisateurs échangent aussi via des forums dédiés et des dépôts GitHub.

## Limitations

Malgré leurs nombreuses capacités, omnet++ avec Simu5G présentent certaines limites :

- **Pas de support complet du cœur de réseau 5G :** Seule la fonction UPF (User Plane Function) est simulée, tandis que d'autres composants essentiels comme l'AMF (Access and Mobility Management Function) et le SMF (Session Management Function) ne sont pas pris en charge.
- **Scalabilité limitée :** La scalabilité de Simu5G est limitée par la simulation complète de la pile protocolaire 5G NG sur chaque nœud, entraînant une

complexité computationnelle élevée. L'augmentation du nombre d'UE et de gNodeB sature rapidement les ressources CPU et mémoire, ralentissant l'exécution. Le mode "gNodeB light-cell" réduit cette charge en simplifiant la simulation des stations de base secondaires, mais ne modélise pas intégralement les protocoles NG, introduisant ainsi des biais dans l'évaluation des performances radio. Cette simplification peut altérer la gestion des interférences et fausser les résultats de simulation.

- **L'évaluation de la mobilité, de la latence et de la fiabilité** : Simu5G permet une évaluation préliminaire de la mobilité, de la latence et de la fiabilité, mais avec des limitations critiques. L'absence de handovers complets fausse l'analyse de la mobilité, tandis que la latence mesurée exclut les délais de signalisation. La fiabilité est évaluée sans modèles radio réalistes, une intégration avec d'autres simulateurs est nécessaire dans ce cas.

### 4.1.2 ns-3

#### Présentation

ns-3 est un simulateur réseau à événements discrets, libre et open-source, largement utilisé dans les milieux académiques et industriels pour la modélisation et l'analyse des réseaux informatiques. Développé principalement en C++, il offre des liaisons optionnelles en Python, permettant une flexibilité accrue dans la création de scripts de simulation. ns-3 est conçu pour étudier et analyser les performances des réseaux ou surveiller le fonctionnement des protocoles dans divers environnements contrôlables et évolutifs.

#### Architecture

L'architecture de **ns-3** est modulaire et repose sur une approche en couches pour la simulation des réseaux. Elle comprend les composants suivants :

- **Nœuds et Dispositifs Réseau (NetDevice)** : Les nœuds représentent les équipements du réseau (routeurs, terminaux, etc.), et les NetDevices sont les interfaces qui leur permettent de communiquer via différents types de liaisons (filaire, sans fil, etc.).
- **Canaux (Channel)** : Ils interconnectent les NetDevices et modélisent les liens de communication en fonction du type de réseau simulé.

- **Pile de Protocoles (Protocol Stack) :** ns-3 implémente une pile complète de protocoles, dont TCP/IP, qui gère le transport et le routage des paquets entre les nœuds.
- **Applications :** Des modules applicatifs peuvent être ajoutés aux nœuds pour générer ou recevoir du trafic via une API similaire aux sockets réseau.
- **Gestion des Événements :** Le simulateur repose sur une gestion d'événements discrets, où chaque action (envoi, réception, transmission) est planifiée dans le temps pour assurer une simulation précise.

L'architecture de ns-3 permet une grande flexibilité grâce à son modèle modulaire, facilitant l'ajout de nouveaux protocoles et technologies.

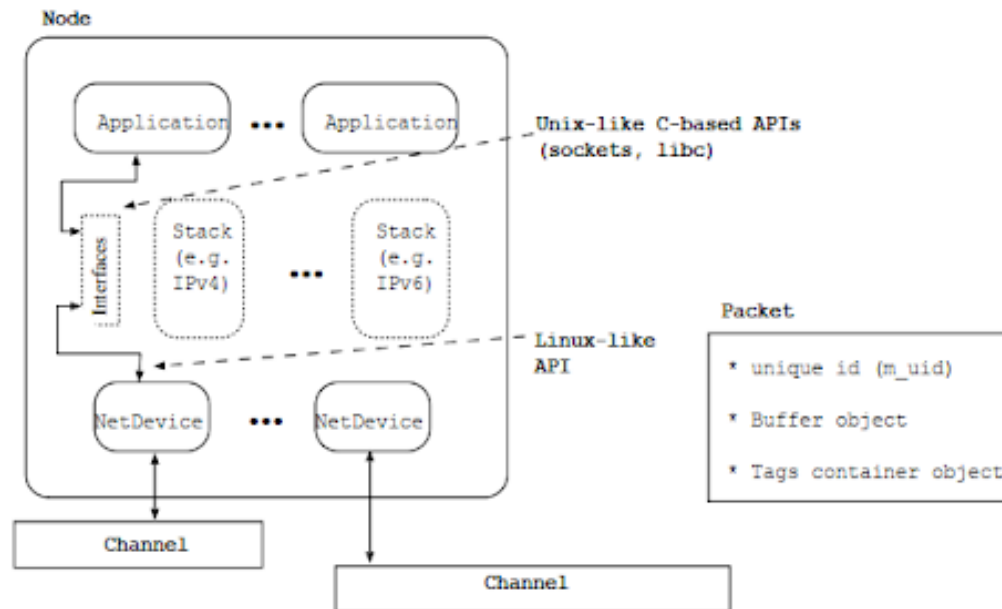


FIGURE 4.3 – Architecture d'un nœud dans ns-3 et son interaction avec le réseau

## fonctionnalités et avantages

- **Modularité et Flexibilité :** L'architecture modulaire de ns-3 permet aux utilisateurs d'ajouter ou de modifier des modules spécifiques

pour répondre à des besoins particuliers, facilitant ainsi la simulation de divers protocoles et scénarios réseau.

- **Support de Technologies Avancées** : Le simulateur intègre des modules pour des technologies modernes telles que Wi-Fi, LTE et 5G RAN, notamment grâce à l'ajout du module 5G-LENA, conforme aux spécifications 3GPP Release-15 et ultérieures.
- **Communauté Active et Ressources Abondantes** : ns-3 bénéficie d'une communauté dynamique qui contribue régulièrement à son développement, offrant une documentation exhaustive, des tutoriels et des exemples pour faciliter son utilisation.

## Limites

- **Courbe d'Apprentissage Abrupte** : La complexité de ns-3 peut représenter un défi pour les nouveaux utilisateurs, nécessitant une compréhension approfondie de la programmation en C++ et des concepts réseau pour une utilisation efficace.
- **Absence d'implémentation du cœur de réseau 5G (5GC)** : ns-3 ne propose pas de simulation des protocoles du cœur de réseau 5G, ce qui limite l'étude de fonctions critiques comme : **AMF** qui gère la mobilité des utilisateurs, **UPF** qui gère le transport des données utilisateur et **SMF** qui contrôle des sessions et de l'attribution des ressources.
- **Pas de virtualisation ni de support des architectures cloud-native** : ns-3 ne permet pas de modéliser la virtualisation des fonctions réseau (NFV) ni les concepts d'architecture conteneurisée (Kubernetes, microservices) utilisés dans les déploiements 5G réels.
- **Manque de réalisme** : en utilisant ns-3, les résultats obtenus peuvent ne pas refléter fidèlement le comportement d'un réseau 5G réel en conditions opérationnelles.
- **Documentation Inégale** : Bien que la documentation soit abondante, sa qualité peut varier selon les modules, rendant parfois difficile la compréhension ou la mise en œuvre de certaines fonctionnalités spécifiques.

### 4.1.3 Free5GC

#### Présentation

Free5GC est une implémentation open source du cœur de réseau 5G (5G Core Network) conforme aux spécifications 3GPP Release 15 et au-delà. Développé principalement par l'équipe du Network Convergence Laboratory de l'Université nationale de Chiao Tung à Taiwan, ce projet a été lancé pour fournir une plateforme ouverte permettant aux chercheurs, développeurs et entreprises d'expérimenter, de tester et de déployer des solutions 5G sans dépendre des équipements propriétaires coûteux des fournisseurs traditionnels.

Le projet vise à implémenter toutes les fonctionnalités essentielles d'un cœur de réseau 5G, y compris la gestion des sessions, l'authentification, l'enregistrement des abonnés, et la connectivité aux réseaux externes. Free5GC est écrit principalement en Go (Golang), un choix qui facilite le développement modulaire et offre de bonnes performances dans un environnement de réseau distribué.

#### Architecture

L'architecture de Free5GC suit le modèle défini par les spécifications du 3GPP pour le cœur de réseau 5G, basé sur une architecture orientée services (Service-Based Architecture – SBA). Cette architecture se compose de plusieurs fonctions réseau (Network Functions – NF) qui communiquent entre elles via des interfaces de type REST API. Comme illustré dans la Figure 4.4, Free5GC intègre les principales fonctions réseau du cœur 5G.

Ces composants sont généralement déployés comme des microservices dans un environnement conteneurisé (souvent avec Docker et Kubernetes), ce qui permet une scalabilité et une flexibilité accrues.

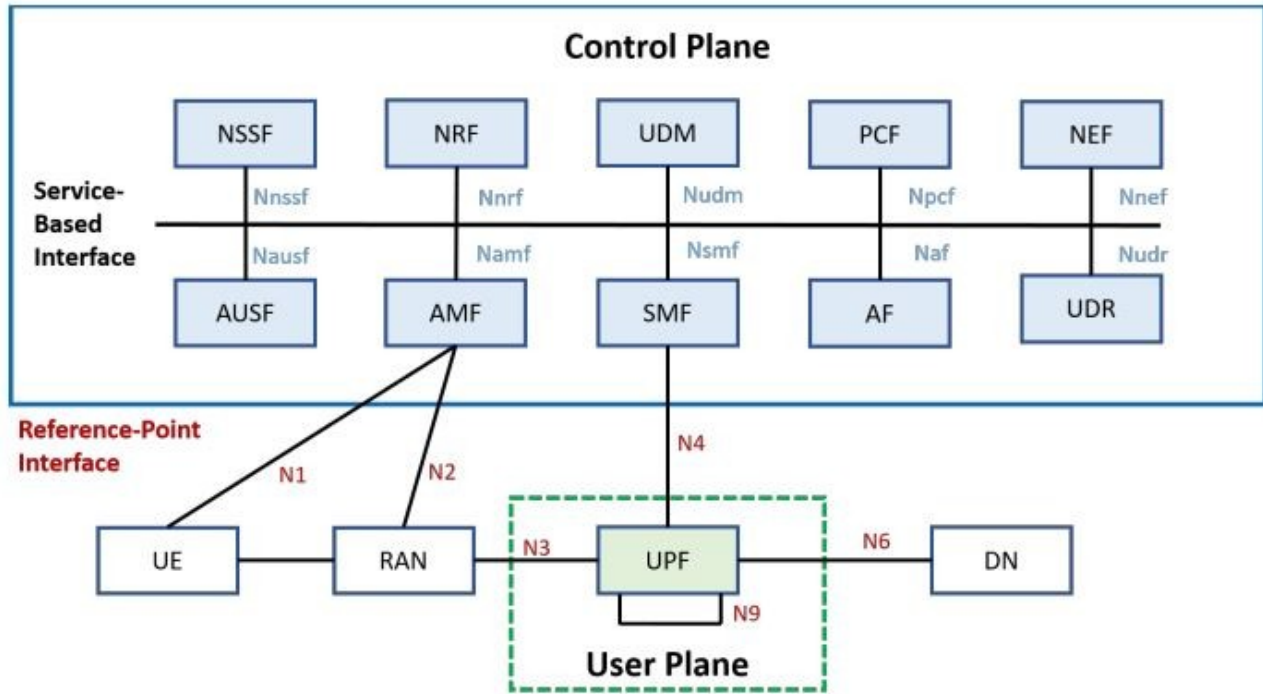


FIGURE 4.4 – Free5GC Architecture

### fonctionnalités et avantages

- **Modularité et flexibilité :** L'architecture basée sur des microservices permet de déployer uniquement les composants nécessaires et de les faire évoluer indépendamment, ce qui est idéal pour des environnements de test ou des cas d'utilisation spécifiques.
- **Conformité aux standards 3GPP :** Free5GC implémente les spécifications 3GPP en incluant toutes les fonctions du cœur de réseau, assurant ainsi une compatibilité avec d'autres équipements conformes.
- **Open Source :** Étant un logiciel libre sous licence Apache 2.0, il offre une transparence totale et une personnalisation selon les besoins spécifiques.
- **Interopérabilité :** Free5GC peut fonctionner avec différentes solutions de RAN (Radio Access Network), UERANSIM étant un exemple.

### Limites

- **Performances limitées** : En tant que solution logicielle, Free5GC peut ne pas offrir les mêmes performances qu’une solution matérielle dédiée, en particulier pour des charges de travail élevées ou des environnements de production.
- **Gestion statique de la topologie réseau** : Dans sa configuration standard, Free5GC ne propose pas de mécanisme dynamique automatique de gestion topologique du réseau. La sélection des **User Plane Functions (UPF)** et la mise à l’échelle des ressources réseau sont principalement statiques et reposent sur une configuration manuelle prédéfinie. Les décisions de routage et d’allocation des ressources sont établies lors de la configuration initiale, sans capacité intégrée d’adaptation en temps réel en fonction de la charge du réseau ou du nombre **d’User Equipment (UE)** connectés. Pour obtenir une topologie réseau dynamique, des développements personnalisés, des scripts de surveillance externes ou l’utilisation d’orchestrateurs comme **Kubernetes** seraient nécessaires.
- **Dépendance à la communauté** : En tant que projet open-source, Free5GC dépend fortement de sa communauté pour les mises à jour et le support. Cela peut entraîner des retards dans la correction des bugs ou l’ajout de nouvelles fonctionnalités.

#### 4.1.4 Open5GS

##### Présentation

Open5GS est une implémentation open-source du cœur de réseau mobile prenant en charge la 4G (EPC - Evolved Packet Core) et la 5G (5GC - 5G Core) conformément aux spécifications du 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Ce simulateur est utilisé pour la recherche, le test et le développement de solutions réseau, notamment pour les réseaux mobiles privés et l’expérimentation de nouvelles fonctionnalités 5G.

Écrit en langage C, Open5GS suit une architecture modulaire, où chaque composant du cœur de réseau est implémenté sous forme de processus indépendant, facilitant ainsi le déploiement et la configuration.

Pour simuler un réseau 5G complet, Open5GS est souvent utilisé avec UERANSIM, un simulateur d’accès radio permettant d’émuler le compor-

tement des équipements utilisateurs (UE) et des stations de base (gNB).

## Architecture

L'architecture d'Open5GS repose sur la séparation entre **le plan de contrôle (Control Plane - CP)** et le plan utilisateur (User Plane - UP), conformément au principe CUPS (Control/User Plane Separation). En mode 5G Standalone (SA), Open5GS adopte **une architecture SBA (Service-Based Architecture)**, où les différentes fonctions réseau interagissent via des interfaces HTTP/2 et JSON.

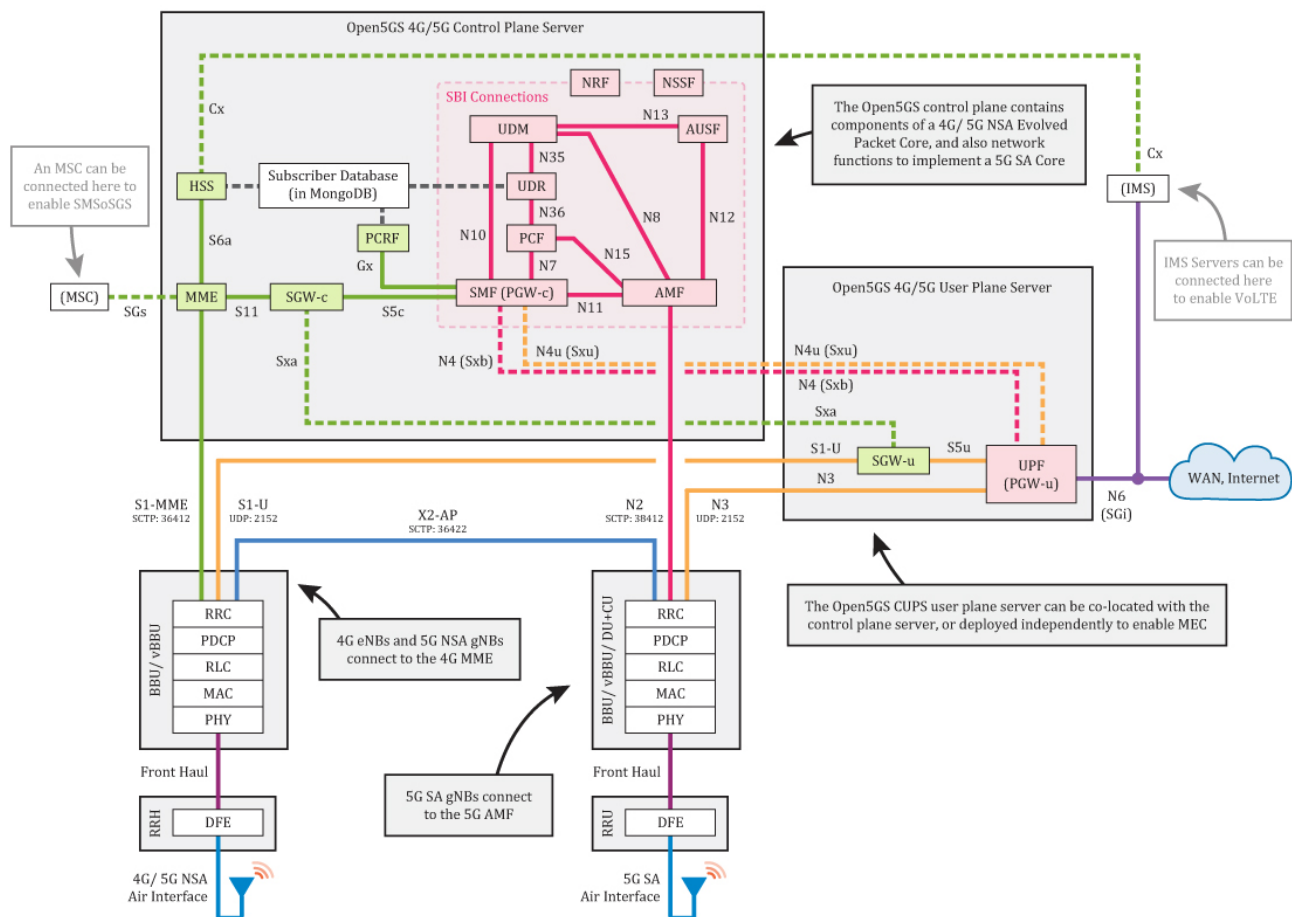


FIGURE 4.5 – Architecture Open5GC

fonctionnalités et avantages



- **Conception spécifique pour les réseaux 5G** : Open5GS est conçu pour être entièrement compatible avec l’architecture 5G SA (Standalone). Il intègre toutes les fonctions essentielles du cœur de réseau (5GC), notamment l’AMF, le SMF, l’UPF et d’autres modules comme le NRF, l’UDM et le PCF. Cette conception modulaire permet de simuler un environnement réseau conforme aux spécifications 3GPP.
- **Personnalisation** : Grâce à son code open-source, Open5GS permet une personnalisation avancée pour adapter le réseau aux besoins spécifiques. Cela en ajoutant ou modifiant des fonctionnalités.
- **Différents scénarios de simulation** : Open5GS peut être déployé dans plusieurs configurations, allant d’une simple installation sur une seule machine à une architecture distribuée sur plusieurs serveurs. Il permet ainsi de tester différentes topologies réseau, incluant des scénarios multi-UPF, des architectures centralisées ou distribuées, et des réseaux hybrides intégrant des éléments matériels.
- **Intégration avec outils de mesure de performance** : Open5GS est compatible avec plusieurs outils d’analyse et de surveillance réseau, facilitant l’évaluation des performances. Il peut être utilisé avec Wireshark pour analyser les protocoles 5G, avec Prometheus et Grafana pour visualiser les métriques réseau, et avec iperf3 pour mesurer le débit et la latence des flux de données. Ces intégrations permettent d’obtenir une vue du comportement du réseau.

## Limites

- **Fiabilité difficile à tester** : Open5GS manque de failover et basculement automatique. Toute défaillance doit être gérée manuellement, ce qui ne reflète pas fidèlement le comportement d’un réseau 5G entièrement opérationnel. Cela rend difficile l’évaluation de la tolérance aux pannes dans des scénarios multi-UPF.
- **Test du placement des UPFs peu flexible** : Open5GS ne permet pas une sélection dynamique des UPFs en fonction de la latence, de la charge réseau ou de la distance géographique des UEs. Le SMF choisit l’UPF de manière statique selon la configuration définie, sans tenir compte des conditions réseau en temps réel.

## 4.2 Tableau comparatif

Le tableau suivant présente une comparaison des simulateurs OMNeT++/ Simu5G, ns-3, Free5GC, et Open5GS en fonction des critères techniques et pratiques définis dans la section 3.1. Les évaluations sont basées sur les fonctionnalités documentées, les limites identifiées, et leur adéquation aux objectifs du projet.

OMNeT++ / Simu5G a un support limité du cœur 5G. Il se concentre principalement sur la couche radio (5G NR), ce qui le rend insuffisant pour des scénarios complets incluant les fonctions du Core.

ns-3 permet une simulation fine de la couche radio avec l'extension 5G-LENA, mais ne couvre pas entièrement le cœur 5G.

Open5GS offre un cœur 5G complet, mais il est surtout conçu pour des environnements de déploiement réel plutôt que pour la simulation académique.

Free5GC, en revanche, propose une implémentation complète du 5G Core, avec une architecture modulaire permettant la personnalisation. Il s'intègre facilement avec UERANSIM pour la simulation de l'accès radio, et permet de mesurer la latence et la fiabilité, ce qui est essentiel dans le cadre des services uRLLC.

Sa forte modularité et son architecture microservices peuvent entraîner une dégradation des performances et une complexité accrue dans la configuration de chaque module. Cependant, cela reste un avantage pour l'expérimentation en milieu académique, car cela permet de tester chaque fonction réseau séparément.

→ Grâce à sa modularité et sa complétude fonctionnelle, Free5GC est choisi comme base pour les simulations menées dans ce projet.

| Critères   | OMNeT++/Si muSG  | ns-3   | Free5GC   | Open5GS  |
|--|--|--|---|--|
| Support des protocoles 5G NR et 5G Core              | Limité<br>Modules 5G NR et une partie du 5G Core (UPF)                     | Non<br>Support via 5G-LENA dans le support de core                         | Oui<br>Implémente toutes les fonctions du 5G Core, avec l'intégration d'autres outils (UERANSIM) pour la partie radio | Oui<br>Implémente toutes les fonctions du 5G Core avec support LTE, UERANSIM pour la partie radio  |
| Capacité à simuler des topologies variées            | Oui<br>Supporte les simulations multi-cœurs et les scénarios paramétriques | Oui<br>Supporte les simulations multi-cœurs et les scénarios paramétriques | Oui<br>Focalisé sur 5G Core   | Oui<br>+ simulation scénarios variés   |
| Génération de métriques de performance               | Oui  | Oui  | Oui   | Oui  |
| Scalabilité  | Limité<br>Simulation coûteuse en ressources pour des dizaines de nœuds     | Oui  | Oui   | Oui<br>adapté aux réseaux 5G privés de petite à moyenne échelle                                    |
| Facilité d'installation                              | Oui  | Oui  | Oui   | Oui  |
| Documentation et communauté                          | Oui<br>Documentation détaillée et communauté active (OMNeT++ Summit)       | Oui<br>Une communauté large  | Limité<br>Documentation technique communauté plus restreinte  | Limité<br>Bonne documentation, mais moins de support communautaire (par rapport à ns-3 et omnet++) |
| Extensibilité et personnalisation                    | Oui<br>Code source modulaire, possibilité d'ajouter de nouveaux modules    | Oui<br>architecture modulaire et extensible API                            | Oui<br>Modularité et Supporte la conteneurisation   | Oui,<br>Modularité et adaptation du cœur de réseau   |
| Interface utilisateur et visualisation des résultats | Oui<br>Interface graphique intégrée (IDE Eclipse) avec visualisation       | Non<br>Pas d'interface native, simulation en ligne de commande             | Non<br>Pas d'interface utilisateur native, en ligne de commande   | Non<br>Similaire à Free5GC   |

TABLE 4.1 – Comparaison des simulateurs 5G

# Conclusion

La simulation de réseau reste un outil puissant, à faible coût et sans risque, pour évaluer les performances des architectures réseau, surtout face à une complexité croissante. Dans cette étude, nous avons exploré l’impact du placement des fonctions UPF (User Plane Function) au sein du cœur de réseau 5G, dans le but d’améliorer les performances des services URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications).

Nous avons mené une analyse comparative de quatre simulateurs 5G : OM-NeT++/Simu5G, ns-3, Open5GS et Free5GC. Chacun a été évalué selon des critères techniques (support du 5G Core, génération de métriques QoS, scalabilité...) et pratiques (facilité d’installation, documentation, extensibilité...). À l’issue de cette étude, Free5GC s’est révélé être le simulateur le plus adapté à notre cas. Son implémentation complète du cœur 5G, sa modularité ainsi que sa compatibilité avec UERANSIM en font une base solide pour examiner divers scénarios de déploiement, tout en assurant la flexibilité requise dans un contexte académique.

La prochaine étape de notre travail consistera à mettre en œuvre le simulateur choisi dans un environnement en conteneur. Une configuration via Docker Compose sera utilisée pour orchestrer l’ensemble des fonctions réseau de Free5GC avec UERANSIM, ce qui permettra de simuler des topologies réalistes et de mesurer l’impact de diverses configurations de placement des UPF. Cette approche permettra de développer des stratégies d’optimisation plus ciblées pour les futurs déploiements de réseaux 5G privés orientés l’URLLC.

# Références

- [Qu'est-ce que la virtualisation des fonctions réseau \(NFV\) ? | IBM](#)
- [What is Network Functions Virtualization \(NFV\)?](#)
- [Network Function Virtualization in 5G](#)
- [What is Private 5G Network? - Cisco](#)
- [La 5G privée, qu'est-ce que c'est ?](#)
- [Simu5G—An OMNeT++ Library for End-to-End Performance Evaluation of 5G Networks](#)
- [Simu5g official github](#)
- [Documentation | Open5GS](#)
- [Free5gc | Documentation officielle.](#)
- [Comparative Performance Analysis of free5GC and Open5GS Core Networks Using UERANSIM Integration: HOSSEINISHAMOUSHAKI, SEYEDALI](#)
- [Implementation of a virtualized 5G network: Magalhães, Tiago](#)
- [5G Network Architecture](#)
- [Avantages de 5G](#)
- [Qu' est ce que c'est l'architecture 5G?](#)
- [5G Network Study](#)
- [Migrer vers un coeur de réseau 5G](#)
- [Documentation | ns3](#)