

Memoire

Client : M. Theoleyre

Tuteur : M. Noel



DÉPLOIEMENT DE L'INFRASTRUCTURE D'UNE BULLE 5G PRIVÉE

Projet Ingenieur Télécom physique Strasbourg 2023-2024

Kylian Cavalier

Matthieu Ferreira-Rivier

Ethan Milon

Eddine Nasri

9 Decembre 2024

Table des matières

1 - Remerciements	3
2 - Introduction	3
3 - Contexte	4
3.1 - Introduction	5
3.2 - Historique des Générations de Réseaux Mobiles	5
3.3 - Éléments de l'Infrastructure 5G	6
3.4 - Technologies Clés de la 5G	7
3.5 - Enjeux Récents et Avancées Réglementaires	8
3.6 - Enjeux et Défis des Bulles 5G Privées	8
3.7 - Conclusion	8
4 - Description du Projet	9
4.1 - Introduction au Projet	10
4.2 - Étapes Clés du Projet	10
4.3 - Architecture Technique	12
5 - Automatisation et Accessibilité	12
5.1 - Introduction	13
5.2 - Automatisation du Déploiement	13
5.3 - Documentation et Accessibilité pour les Utilisateurs	13
6 - Supervision	14
6.1 - Objectifs de la supervision	15
6.2 - Collecte de mesures	15
6.3 - Gestion des journaux	17
6.4 - Contrôle de la connectivité - Capture et analyse du trafic NGAP	17
6.5 - Visualisation	19
7 - Perspectives d'Évolution du Projet	20
7.1 - Mise en Place Concrète du Slicing de Réseau	21
7.2 - Mobilité : Handover et Roaming	21
7.3 - Paging : Amélioration de la Gestion de la Connectivité	21
7.4 - Usage de la bulle 5G privé de l'Innovlab	21
8 - Conclusion	22

1 - Remerciements

À l'issue de ce projet de fin d'études, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance sincère envers tous ceux qui nous ont accompagnés et soutenus.

Nous débutons par remercier chaleureusement notre professeur et client, M. Theoleyre, pour son accompagnement et ses conseils éclairés tout au long de cette aventure. Son expertise et sa compréhension ont été des atouts précieux pour mener à bien notre projet.

Nos remerciements vont également à notre tuteur d'école, M. Noël, dont les retours constructifs et l'encadrement bienveillant nous ont guidés avec efficacité.

Nous tenons aussi à remercier M. Zemali, responsable de l'InnovLab, et M. Habet, responsable de notre filière Réseaux et Internet des Objets, pour leurs soutiens et leurs confiances, qui nous ont permis de travailler dans un environnement stimulant et propice à l'innovation.

Enfin, un merci spécial à nos camarades de l'autre groupe de projet : Nicolas Gresset-Bourgeois, Bastian Pennetier, Angéline Lafontaine et Claire Longour. Leurs échanges et leur collaboration ont non seulement enrichi notre projet, mais ont aussi ajouté une dimension humaine et collective à notre expérience.

Un grand merci à chacun pour votre soutien et votre engagement.

2 - Introduction

Dans un monde où la connectivité est primordiale, la cinquième génération de réseaux mobiles, communément appelée 5G, marque une révolution technologique. Caractérisée par des débits ultrarapides, une latence minimale et une capacité inégalée, la 5G répond aux exigences croissantes des environnements numériques, qu'ils soient industriels, médicaux, ou liés à l'automatisation.

Au cœur de cette révolution, les bulles privées 5G émergent comme des infrastructures dédiées, offrant une maîtrise totale des données, une sécurité renforcée, et des performances adaptées à des besoins spécifiques. Ces réseaux, encore en phase initiale, offrent une opportunité unique pour l'expérimentation, la personnalisation, et l'optimisation des usages dans des contextes variés.

Ce projet ingénieur, réalisé au sein de l'InnovLab sous la supervision de M. Noël, répond à une commande du client Icube, représenté par M. Théoleyre. L'objectif principal était la conception et le déploiement d'une bulle privée 5G fonctionnelle, tout en automatisant son déploiement et en mettant en place un système de supervision performant.

Ce mémoire vise à retracer les différentes phases de ce projet : après un contexte détaillé sur la 5G et les bulles privées, il décrit le déploiement de l'infrastructure, l'automatisation des processus, et la supervision mise en place. En conclusion, il explore les perspectives d'évolution et les opportunités futures de ces réseaux.

3 - Contexte

3.1 - Introduction

La cinquième génération de réseaux mobiles, connue sous le nom de 5G, représente une avancée technologique majeure qui promet de transformer en profondeur la manière dont nous communiquons et interagissons avec le monde numérique. Cette évolution est caractérisée par des vitesses de transmission de données significativement plus élevées, une latence réduite, et une capacité accrue à gérer une multitude d'appareils connectés simultanément. Dans ce contexte, les bulles 5G privées, qui sont des réseaux déployés par des entreprises ou organisations pour un usage spécifique, deviennent une solution attrayante. Elles offrent la possibilité de personnaliser et d'optimiser les réseaux pour répondre à des besoins spécifiques, que ce soit en termes de sécurité, de performance ou de couverture.

Cette première partie du mémoire vise à établir un contexte solide en retraçant l'évolution des générations précédentes de réseaux mobiles, en expliquant en détail l'architecture et les composantes clés de la 5G, et en présentant les opportunités et défis associés aux bulles 5G privées.

3.2 - Historique des Générations de Réseaux Mobiles

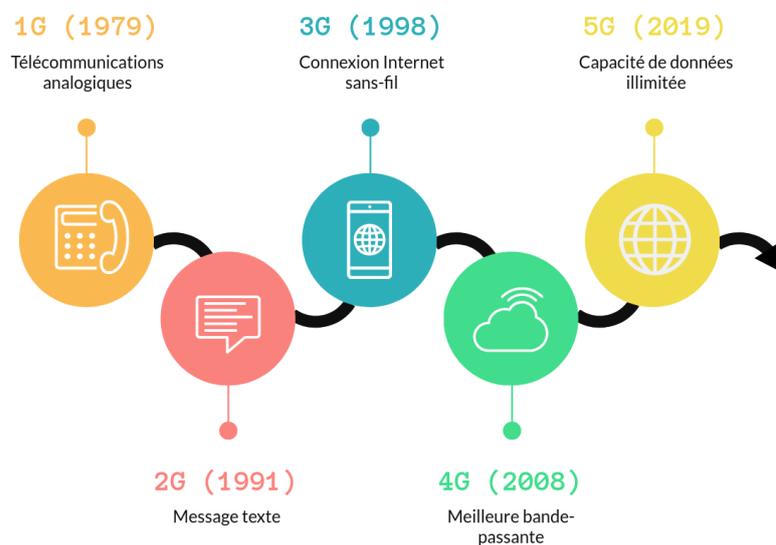


Figure 1 - Évolution des technologies de télécommunications

3.2.1 - Première Génération (1G)

La première génération de réseaux mobiles, déployée dans les années 1980, est souvent décrite comme l'ère de la voix analogique. Ces systèmes, basés sur une technologie de transmission analogique, ont permis de réaliser les premiers appels sans fil de grande ampleur, mais souffraient de plusieurs limitations : une mauvaise qualité sonore, une faible capacité réseau, et des problèmes de sécurité notable avec une absence de chiffrement des communications. Cette génération a néanmoins posé les bases des systèmes de réseaux mobiles, préparant le terrain pour des évolutions technologiques significatives.

3.2.2 - Deuxième Génération (2G)

L'introduction de la deuxième génération dans les années 1990 a marqué le passage à une technologie de communication numérique. Cela a permis d'améliorer considérablement la qualité des appels et d'introduire de nouveaux services tels que les messages textes (SMS) et les premières transmissions de données pour le grand public. Le GSM (Global System for Mobile Communications) est devenu le standard mondial dominant, favorisant l'interopérabilité entre différents pays et fournisseurs. Cette génération a également commencé à introduire des mesures de sécurité, telles que l'authentification et le chiffrement, fournissant ainsi un niveau de confidentialité accru pour les utilisateurs.

3.2.3 - Troisième Génération (3G)

La troisième génération, lancée au début des années 2000, a introduit des capacités de transmission de données qui ont ouvert la voie à l'Internet mobile. Avec l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) et d'autres normes similaires, la 3G a permis le streaming vidéo, les conférences en ligne et l'accès au web mobile de manière plus ou moins efficace. Cela a marqué la naissance des smartphones modernes et a contribué au développement d'applications mobiles riches en fonctionnalités.

3.2.4 - Quatrième Génération (4G)

La 4G, déployée à partir de la fin des années 2000, a largement augmenté la vitesse de transmission des données grâce à la technologie LTE (Long Term Evolution), transformant ainsi l'expérience utilisateur. Elle a permis l'essor des applications de streaming haute définition et a favorisé l'expansion de l'Internet des objets (IoT) en fournissant une bande passante suffisante pour connecter de nombreux appareils simultanément. La 4G a également introduit des améliorations significatives en matière de latence, rendant les applications en temps réel plus viables.

3.2.5 - Cinquième Génération (5G)

Avec l'avènement de la 5G, nous entrons dans une nouvelle ère de connectivité qui promet de transformer les infrastructures de communication à une échelle sans précédent. La 5G se distingue par ses capacités à fournir des vitesses de transmission ultra-rapides, une latence réduite à moins de 1 milliseconde, et sa capacité à supporter un nombre massif d'appareils connectés par unité de surface. Les technologies clés telles que le massive MIMO, le beamforming, et le network slicing sont mises à profit pour offrir une flexibilité et une efficacité énergétique accrues. Cette génération émerge non seulement comme une évolution des capacités techniques, mais aussi comme un catalyseur de croissance pour des secteurs entiers, des villes intelligentes à l'industrie 4.0, en passant par la télémédecine et le divertissement immersif.

En synthétisant ces évolutions technologiques, nous pouvons mieux comprendre le cadre dans lequel les bulles 5G privées s'intègrent et leur potentiel pour transformer des environnements spécifiques selon des besoins particuliers. Ce parcours historique éclaire les avancées significatives qui sous-tendent le projet de déploiement d'une infrastructure 5G privée et illustre les fondements sur lesquels la technologie actuelle repose.

3.3 - Éléments de l'Infrastructure 5G

L'infrastructure 5G est composée de plusieurs éléments clés qui collaborent pour fournir les améliorations de performance attendues. Comprendre ces composantes est essentiel pour appréhender les mécanismes sous-jacents au déploiement d'une bulle 5G privée.

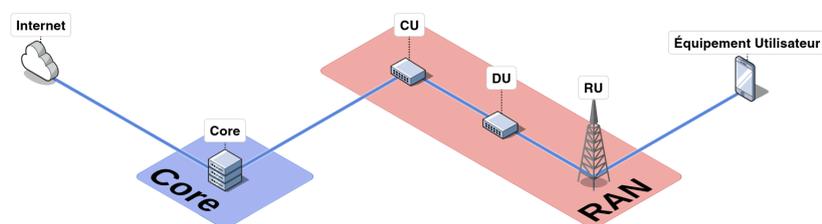


Figure 2 - Infrastructure 5G

3.3.1 - Core Network (Cœur de Réseau)

Le cœur de réseau 5G est responsable de la gestion globale des communications, incluant la connectivité, la gestion de la mobilité, et l'acheminement des données à travers le réseau. À la différence des générations précédentes, le cœur de réseau 5G repose largement sur les principes de la virtualisation

des fonctions réseau (NFV) et des réseaux définis par logiciel (SDN). Cette architecture virtualisée permet de découpler les services réseau du matériel physique, offrant ainsi une flexibilité accrue et une efficacité opérationnelle. Les services peuvent être déployés et adaptés dynamiquement en fonction des besoins réels, un atout majeur pour les réseaux privés qui exigent souvent des configurations spécifiques.

3.3.2 - Radio Access Network (RAN)

La RAN est un composant crucial qui relie les appareils de l'utilisateur final au réseau central. Dans l'architecture 5G, la RAN est décomposée en trois unités principales :

3.3.2.1 - Centralized Unit (CU)

La CU traite les fonctions de couche supérieure, notamment la signalisation et le contrôle de données utilisateur. Elle peut être centralisée pour contrôler plusieurs DU (Distributed Units), facilitant ainsi une gestion efficace des ressources réseau et une allocation optimisée de la bande passante selon les conditions dynamiques du réseau.

3.3.2.2 - Distributed Unit (DU)

La DU gère le traitement de signal à faible latence et les paquets de données qui traversent la RAN. Elle agit comme un point intermédiaire qui rend possible la désagrégation des tâches de la RAN tout en assurant une interaction parfaite entre les CUs et les RUs (Radio Units).

3.3.2.3 - Radio Unit (RU)

La RU est située à la périphérie du réseau et est responsable de la transmission et de la réception des signaux radio vers et depuis les équipements utilisateurs finaux (UEs). Ces unités sont équipées de technologies avancées, telles que le massive MIMO, qui améliorent l'efficacité spectrale et augmentent les capacités du réseau.

3.3.3 - User Equipment (UE)

Les équipements utilisateurs (UE) incluent tout appareil capable de se connecter à un réseau 5G, tels que smartphones, capteurs IoT, et systèmes embarqués. Les UEs doivent être compatibles avec la 5G pour exploiter pleinement ses avantages, notamment en termes de vitesse de téléchargement, de latence, et de connectivité multipoint. Les équipements modernes intègrent souvent des capacités avancées comme le multiplexage spatial et le beamforming, qui sont essentiels pour maximiser les bénéfices offerts par le réseau 5G.

3.4 - Technologies Clés de la 5G

La 5G repose sur un ensemble de technologies avancées qui permettent de réaliser ses promesses d'améliorations en termes de performances et de capacités.

3.4.1 - Massive MIMO

Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) est une technologie qui utilise un grand nombre d'antennes, tant pour la réception que pour l'émission, permettant au réseau de servir de nombreux utilisateurs simultanément et d'augmenter de façon significative l'efficacité spectrale. Cette technologie est essentielle à la 5G pour supporter la densité élevée des connexions et offrir des débits améliorés.

3.4.2 - Beamforming

Le beamforming est une technique qui focalise les signaux sans fil directement vers des dispositifs spécifiques plutôt que de diffuser un signal large. Cela réduit les interférences et augmente l'efficacité du réseau, permettant des communications plus rapides et plus fiables. Cette technologie est particulièrement cruciale dans les environnements denses et variés, tels que les zones urbaines ou les sites industriels complexes où une bulle 5G privée pourrait être déployée.

3.4.3 - Network Slicing

Le Network Slicing permet la création de réseaux virtuels optimisés pour différentes applications ou services, sur une même infrastructure physique de réseau. Chaque tranche peut être configurée pour avoir des capacités spécifiques en termes de bande passante, de latence, et de ressources, ce qui est idéal pour fournir des services personnalisés dans des bulles 5G privées. Cela ouvre des possibilités nouvelles pour personnaliser les performances pour des cas d'usage uniques tel que des environnements critiques de production, des événements à fort afflux, ou des secteurs nécessitant une sécurité renforcée.

3.5 - Enjeux Récents et Avancées Réglementaires

3.5.1 - Ouverture de la Bande de Fréquence 2.6GHz TDD par l'ARCEP

Récemment, l'Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes (ARCEP) a ouvert la bande de fréquence 2.6 GHz TDD pour des applications industrielles privées à un coût de licence réduit. Cette initiative a pour objectif de favoriser l'innovation et l'adoption de la 5G dans des secteurs clés, en permettant à un plus large éventail d'entreprises d'accéder à la technologie 5G sans les investissements massifs traditionnellement requis pour l'acquisition de spectre.

3.5.2 - Opportunités Créées par cette Réforme

Cette réforme de l'allocation spectrale offre des opportunités significatives pour les entreprises et les industries souhaitant déployer des infrastructures de bulle 5G privée. Cela facilite notamment le développement de solutions sur mesure pour l'industrie 4.0, les réseaux d'usines intelligentes, les campus universitaires, et d'autres environnements nécessitant des exigences spécifiques en termes de connectivité.

3.6 - Enjeux et Défis des Bulles 5G Privées

3.6.1 - Sécurité et Confidentialité

Les bulles 5G privées doivent répondre à des exigences strictes en matière de sécurité et de confidentialité, compte tenu de la sensibilité des données qui pourraient transiter sur ces réseaux. Il est crucial de mettre en œuvre des mesures de sécurité robustes, telles que le chiffrement de bout en bout, l'authentification renforcée, et la segmentation réseau pour protéger les données sensibles.

3.6.2 - Gestion du Spectre et Interférence

Les bulles 5G privées peuvent rencontrer des défis liés à la gestion du spectre et des interférences, en particulier dans des environnements denses où plusieurs réseaux peuvent coexister. Les stratégies d'atténuation de l'interférence, comme l'allocation dynamique de fréquences et l'utilisation de techniques de beamforming, sont essentielles pour garantir une performance optimale.

3.6.3 - Intégration avec les Infrastructures Existantes

Enfin, l'intégration des infrastructures 5G avec des technologies existantes présente ses propres défis. Les entreprises doivent naviguer les questions de compatibilité et de transition, en veillant à ce que les réseaux nouvellement déployés s'harmonisent sans heurts avec les composants architecturaux antérieurs.

3.7 - Conclusion

Cette première partie a fourni une vue d'ensemble complète du contexte technologique et réglementaire dans lequel s'inscrit le projet de déploiement d'une infrastructure de bulle 5G privée. Les points abordés, allant de l'historique des générations de réseaux mobiles jusqu'aux technologies clés et aux réformes récentes, posent les bases nécessaires pour une compréhension approfondie des bénéfices et des défis de cette nouvelle ère des communications. La prochaine section du mémoire explorera

les aspects techniques et pratiques du déploiement d'une bulle 5G privée, capitalisant sur les éléments contextualisés dans cet aperçu.

4 - Description du Projet

4.1 - Introduction au Projet

Le déploiement d'une infrastructure de bulle 5G privée représente un projet ambitieux et pertinent dans le contexte actuel de prolifération des technologies de communications avancées. Ce projet vise non seulement à explorer les capacités de la 5G en tant que réseau autonome mais également à fournir une plateforme testable et adaptable pour des environnements à haute exigence technologique tel que les campus universitaires, les sites industriels, et les zones à grande densité de dispositifs IoT. L'objectif principal est d'atteindre une compréhension solide et éprouvée des architectures 5G, tout en fournissant une infrastructure qui peut être facilement déployée et manipulée par d'autres acteurs intéressés par les applications de réseaux privés.

4.2 - Étapes Clés du Projet

4.2.1 - Première Connexion Réussie avec OpenAirInterface

Dans les phases initiales du projet, nous avons opté pour OpenAirInterface (OAI) en tant que pile logicielle, grâce à sa maturité, sa vaste communauté, et sa présence notable dans la littérature académique. OpenAirInterface est largement utilisé pour le prototypage et les tests de réseaux mobiles, ce qui en fait un choix stratégique pour notre déploiement initial.

La configuration initiale du cœur de réseau a permis de gérer la gestion des sessions et la signalisation, permettant ainsi d'assurer les fonctionnalités de base pour la communication entre les utilisateurs. Simultanément, la mise en œuvre du réseau d'accès radio (RAN) a été réalisée à l'aide de l'USRP N310, un choix motivé par sa flexibilité et sa capacité à gérer une large gamme de fréquences, répondant aux exigences de la 5G.

Malgré la complexité inhérente à la configuration d'une pile 5G d'OpenAirInterface, une courbe d'apprentissage abrupte a été franchie avec succès. Finalement, la réussite de la première connexion a permis de valider la chaîne fonctionnelle du réseau, confirmant le bon fonctionnement synchronisé des principaux éléments du cœur et du RAN.

4.2.2 - Résultats Obtenus avec la Première Connexion

Suite à la l'implémentation et à la configuration initiale avec OpenAirInterface, des tests de performances ont été effectués pour évaluer les capacités réelles du réseau en termes de débit et de latence. Pour réaliser ces tests, la méthode de test bien établie basée sur l'outil iPerf, qui est couramment utilisé pour mesurer les débits de bande passante des réseaux.

Un serveur iPerf a été déployé sur l'hôte du cœur de réseau, ayant pour rôle de recevoir et d'envoyer des paquets de données afin de mesurer les capacités du réseau. En parallèle, un client iPerf a été installé sur l'équipement utilisateur (UE) connecté, ce qui permettait de simuler le trafic réel de données tout en recevant les flux envoyés par le serveur.

Durant le test, le client iPerf sur l'UE a initié une session de mesure vers le serveur iPerf situé sur l'hôte du cœur. Ainsi, il a été mesuré 10 Mbps en upload, 8 Mbps en download et une latence de 30 ms ont été collectées. Bien que ces chiffres traduisent une connectivité fonctionnelle, ils sont sensiblement inférieurs aux capacités théoriques prévues par les spécifications de la 5G, qui permettent d'atteindre jusqu'à 85 en download et 91 Mb/s en upload.

Cette disparité s'explique par plusieurs facteurs potentiellement limitants. D'une part, l'environnement de test incluant des facteurs d'interférence radio et la configuration matérielle disponible pouvait ne pas être optimisé pour les performances maximales attendues. D'autre part, l'ajustement des paramètres de configuration d'OpenAirInterface et la courbe d'apprentissage associée ont également pu contribuer à ces résultats initiaux.

4.2.3 - Transition vers open5GS et srsRAN

Suite à la phase initiale, une réévaluation stratégique nous a conduits à remplacer OpenAirInterface par open5GS pour le réseau cœur et srsRAN pour le réseau d'accès radio. Ce changement a été motivé par la nécessité d'une performance accrue et d'une gestion simplifiée.

Open5GS a été choisi pour sa modularité et sa simplicité de configuration, notamment grâce à une interface graphique facilitant la gestion des utilisateurs. De son côté, srsRAN offre une interface plus intuitive et des performances radio optimisées. La migration nécessita une réinitialisation complète des systèmes pour minimiser les interférences avec les nouvelles configurations et simplifier le processus d'automatisation.

Les tests réalisés après la migration ont révélé une nette amélioration de la stabilité et de l'efficacité opérationnelle, avec une interface d'administration simplifiée pour le cœur et une meilleure visualisation des ressources radio.

4.2.4 - Améliorations Post-Transition

	Mesures OAI	Mesures Open5Gs/srsRAN	Limite théorique
Débit en amont	8 Mb/s	57,8 Mb/s	85,0 Mb/s
Débit en aval	10 Mb/s	70,5 Mb/s	91,0 Mb/s
Latence	30 ms	17 ms	N.A.

Table 1 - Mesures de nos différents déploiement (bande 3, 20MHz, 15kHz scs)

Après la transition vers open5GS pour le cœur de réseau et srsRAN pour le réseau d'accès radio, nous avons observé des améliorations notables en termes de stabilité et de performance. En utilisant la même bande n3 avec une largeur de bande de 20 MHz et un espacement de sous-porteuses de 15 kHz, nous avons pu augmenter significativement les débits et réduire la latence par rapport aux configurations précédentes.

L'une des améliorations clés réside dans le matériel utilisé pour les tests. Contrairement à la configuration initiale où un USRP N300 était employé comme Équipement Utilisateur (UE), un COTS UE (Common Off-The-Shelf User Equipment) (i.e. un Google pixel 7A) a été utilisé pour réaliser les mesures de performances. Cela a permis de mieux refléter l'environnement réel d'utilisation de la 5G, car les équipements COTS sont plus représentatifs des appareils finaux utilisés par les utilisateurs.

Les résultats obtenus ont montré un débit en upload de 57,8 Mbps et un débit en download de 70,5 Mbps, avec une latence réduite à 17 ms. Ces chiffres indiquent une amélioration significative par rapport aux valeurs initiales mesurées avec OpenAirInterface.

De plus, l'usage d'un COTS UE a non seulement contribué à améliorer les performances mesurées, mais a également simplifié le processus de test et de validation des performances du réseau. Les équipements SDR (Software Defined Radio) comme le USRP, qui, bien qu'extrêmement flexibles, peuvent introduire leur propre complexité dans les mesures de performances (e.g. ajustement manuelle des gains).

Cette transition a renforcé la capacité de notre bulle 5G privée à offrir des services plus proches des attentes placées dans les réseaux 5G modernes, prouvant ainsi l'efficacité des choix technologiques et méthodologiques adoptés pour ce projet.

4.3 - Architecture Technique

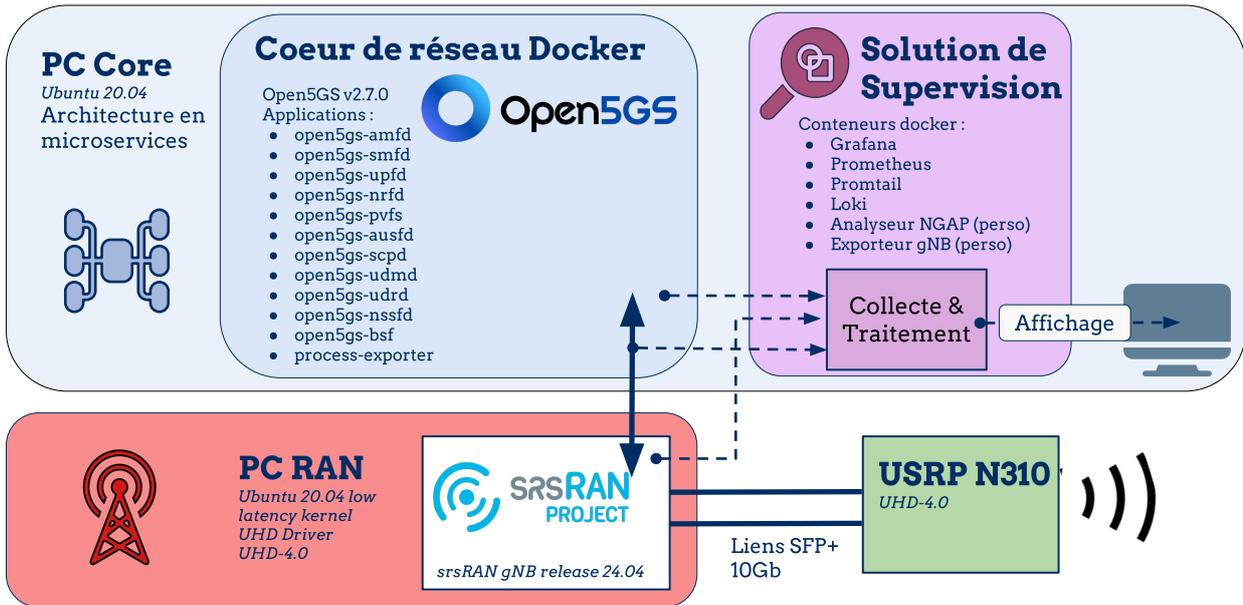


Figure 3 - Infrastructure general

Pour notre bulle 5G privée, nous avons structuré l’infrastructure autour de choix technologiques précis et efficaces :

- **Cœur de Réseau avec open5GS :** Open5GS a été sélectionné pour sa modularité et sa compatibilité avec les normes 5G. Il intègre des fonctions essentielles comme :
 - **AMF (Access and Mobility Management Function) :** Gère les connexions et la mobilité.
 - **SMF (Session Management Function) :** S’occupe des sessions IP et de la gestion de la qualité de service.
 - **UPF (User Plane Function) :** Assure le transfert des données.
 - **NRF (Network Repository Function) :** Facilite l’enregistrement et la découverte des services.
- **Accès Radio avec srsRAN :** srsRAN a été choisi pour son efficacité et sa flexibilité dans la gestion du spectre. Il s’intègre parfaitement avec open5GS pour exploiter les fonctionnalités avancées de la 5G, ainsi qu’avec des USRP.
- **USRP N310 pour le RAN :** Ce système SDR gère les solutions radio de notre réseau 5G, il offre un flexibilité en supportant une large gamme de fréquences.

5 - Automatisation et Accessibilité

5.1 - Introduction

Dans cette section, nous explorons comment l'automatisation et l'accessibilité ont été intégrées au projet pour faciliter sa répliquabilité et son adoption par d'autres étudiants ou professionnels dans le domaine. Ces efforts permettent de réduire les obstacles techniques et de simplifier le processus de déploiement pour des utilisateurs futurs.

5.2 - Automatisation du Déploiement

5.2.1 - Outils et Technologies Utilisés

Grâce à l'utilisation d'outils d'automatisation comme Ansible, nous avons pu systématiser le processus d'installation et de configuration de notre infrastructure 5G

5.2.2 - Mise en place et Configuration Automatisées

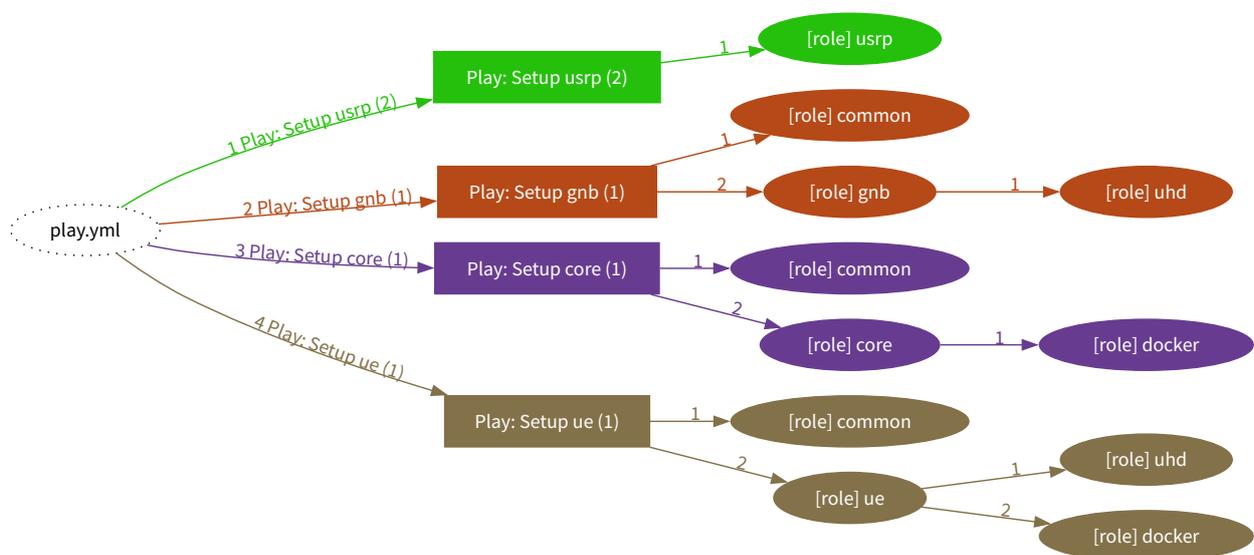


Figure 4 - Graphe de dépendances des rôles Ansible

Les tâches ont été séparées en une série de *rôle* pour une meilleure lisibilité des scripts d'automatisation.

- **Rôle usrp:** Configuration des interfaces réseau spécifiques pour les SFP (Small Form-Factor Pluggable)
- **Rôle common :** Installation et configuration de paquets utiles (e.g. vim, wireshark, etc.)
- **Rôle uhd :** Installation et configuration de l'hôte en mode low latency, compilation et installation d'UHD et préparation des interfaces réseau pour communiquer avec le matériel USRP.
- **Rôle gnb:** Compilation et installation de srsRAN.
- **Rôle ue:** Compilation et installation de srsUE.
- **Rôle docker:** Installation de docker ainsi que de docker compose.
- **Rôle core:** Configuration de docker-compose.

Pour permettre de facilement ajuster le déploiement, des paramètres sont modifiables tels que le gain émis ou reçu, les adresses IP, les versions, etc.

5.3 - Documentation et Accessibilité pour les Utilisateurs

La création de scripts d'automatisation n'est que la première étape vers la facilitation de la répliquabilité et de l'adoption de notre projet. Pour maximiser l'accessibilité, une documentation détaillée et conviviale a été mise en place. Voici les éléments clés de cette documentation :

5.3.1 - Manuel d'Installation

Le manuel d'installation a été élaboré pour guider les utilisateurs de manière claire et progressive à travers chaque étape du processus de déploiement, depuis la préparation de l'environnement jusqu'à la mise en service de l'infrastructure. Chaque étape comprend :

- Les prérequis matériels et logiciels nécessaires.
- Les instructions détaillées pour cloner le dépôt et lancer les scripts Ansible.
- Les configurations post-installation pour vérifier que tous les composants fonctionnent comme prévu.

5.3.2 - FAQ et Résolution de Problèmes

Une section dédiée aux questions fréquemment posées (FAQ) et à la résolution des problèmes a été ajoutée pour aborder les problèmes courants auxquels un utilisateur pourrait être confronté. Cela inclut des conseils pour :

- Résoudre les problèmes de connectivité entre les différentes composantes du réseau.
- Dépanner les erreurs courantes qui peuvent survenir lors de l'utilisation des outils de virtualisation ou des équipements radio.
- Ajuster les paramètres de configuration pour améliorer les performances réseau en fonction des environnements et des besoins spécifiques.

5.3.3 - Accessibilité du Code

Le code et les scripts d'automatisation, ainsi que la documentation, ont été hébergés sur une plateforme de gestion de versions ouverte, telle que GitHub, pour garantir un accès facile et collaboratif à tous les utilisateurs intéressés. Cela facilite les contributions de la communauté, les retours d'expérience, et les mises à jour ultérieures pour améliorer continuellement le projet.

6 - Supervision

6.1 - Objectifs de la supervision

La supervision d'un cœur de réseau 5G et d'un RAN est cruciale pour maintenir une qualité de service élevée et optimiser l'utilisation des ressources réseau. Cette supervision se concentre principalement sur trois axes : la gestion de la performance, la gestion des ressources, et la détection d'anomalies.

La gestion de la performance joue un rôle essentiel dans le suivi continu des indicateurs clés tels que l'état du plan de contrôle, les débits de données, la qualité du canal radio, le taux de d'erreur et l'utilisation des ressources réseau. Cette surveillance permet de détecter et de résoudre rapidement les problèmes tels que la congestion, les pannes, ou toute dégradation de service.

La gestion des ressources est essentielle, concentrée sur l'optimisation de la bande passante et l'utilisation des fréquences radio. Le dimensionnement approprié des ressources en fonction de la demande anticipée et des conditions du réseau permet de maximiser l'efficacité des infrastructures.

La maintenance et le dépannage, constituant un axe majeur de la supervision réseau dans ce projet, se concentrent principalement sur la détection et l'analyse approfondie des anomalies dans un environnement de banc d'essai. Cette approche permet d'identifier les sources précises des problèmes techniques, facilitant ainsi leur compréhension et leur résolution. En décelant ces dysfonctionnements de manière détaillée, il devient possible de peaufiner le système pour améliorer sa robustesse et sa fiabilité, tout en réduisant potentiellement les incidents futurs et en affinant les processus de test et de validation du réseau.

En résumé la gestion efficace de ces trois aspects est cruciale pour optimiser le fonctionnement et la durabilité du réseau 5G. Cette approche garantit non seulement une performance de réseau robuste adaptée aux exigences de tests rigoureux, mais contribue également à une mise en œuvre efficace des solutions réseau, essentielle à l'évaluation précise des capacités et à l'amélioration continue des technologies impliquées.

6.2 - Collecte de mesures

La collecte de mesures dans un environnement de réseau 5G est essentielle pour garantir une gestion optimale et une surveillance efficace de l'infrastructure réseau. Ce processus est critique, surtout dans le contexte d'architecture complexes, où chaque composant doit fonctionner de manière synchronisée et efficace. Voici une description détaillée de la façon dont la collecte des mesures est mise en œuvre.

6.2.1 - Architecture et Déploiement

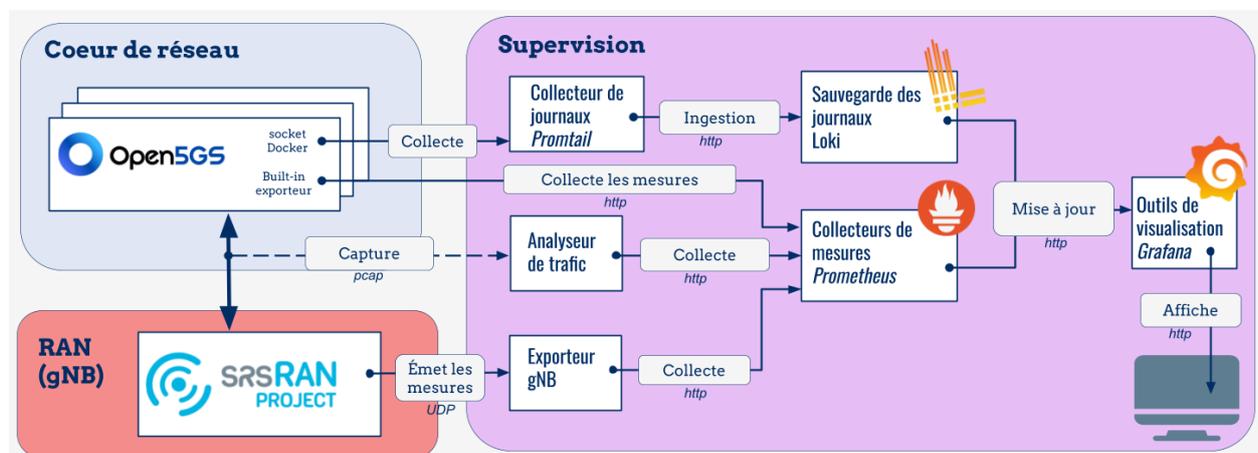


Figure 5 - Infrastructure de la solution de supervision

L'infrastructure de collecte des mesures est structurée autour d'un système d'exporteurs et d'un nœud de collecte centralisé Figure 5. Les exporteurs sont des composants essentiels intégrés directement dans les applications et fonctions du cœur de réseau Open5GS ou faisant l'objet d'applications développées pour ce projet. Ces exporteurs ont pour rôle de rassembler les mesures opérationnelles produites par les composantes de l'architecture, gNB, analyseur NGAP et les divers services du cœur de réseau, tels que l'AMF, le SMF, l'UPF, et le PCF. Chaque exporteur recueille des informations spécifiques à son service, incluant des métriques telles que la performance, l'utilisation des ressources, et d'autres données de diagnostic.

Les exporteurs transmettent les données collectées à un nœud de collecte centralisé, Prometheus. Chaque application du réseau dispose d'un serveur HTTP configurable, permettant l'exportation des mesures que Prometheus est configuré pour récupérer à travers un mécanisme de collecte HTTP régulier. Ce système rassemble ainsi des données précieuses sur la performance et l'état de chaque composant du réseau et les stocke dans une base de données de séries temporelles.

La sélection de Prometheus pour la supervision est motivée par sa compatibilité native avec les environnements modernes et sa facilité d'intégration avec les applications existantes, particulièrement celle d'Open5GS. Cette configuration centralisée offre une vue d'ensemble et un accès simplifié à toutes les mesures du réseau, facilitant l'analyse et la surveillance en temps réel de l'état du réseau. Ce cadre assure ainsi une gestion efficace des données de surveillance, permettant une réponse rapide aux événements du réseau et une amélioration continue de la performance du système.

6.2.2 - Réseau de Communication

Pour faciliter l'interconnexion entre Prometheus et les services du core, un réseau de type bridge est configuré. Ce réseau sert de canal de communication dans lequel les données peuvent être facilement transférées et collectées sans interférences externes, garantissant l'intégrité et la sécurité des données.

6.2.3 - Collecte de Mesures par process-exporteur

En plus des serveurs HTTP intégrés dans chaque application, une application spécifique nommée process-exporteur est utilisée pour exporter des mesures supplémentaires. Celle-ci est capable de surveiller et de rapporter des informations détaillées sur l'utilisation des ressources par chaque processus i.e. chaque fonction du cœur de réseau, telles que l'utilisation du CPU, de la mémoire et des threads. Ces données sont cruciales pour analyser la performance du système et identifier les goulots d'étranglement potentiels.

6.2.4 - Mesures du gNB

Une des raisons ayant motivé le choix de prendre srsRAN, a été la possibilité de récupérer des mesures envoyer sous forme de json en UDP à une IP. Cette approche permet de récupérer des mesures auprès du gNodeB sans avoir a devoir mettre en place un RIC et un xApp. Pour pourvoir ensuite récupérer ses données avec prometheus, un module Python a été développé pour collecter les mesures et être capable de se faire scraper par Prometheus. Cela permet de recueillir un éventail de mesures allant des performance du réseaux à la qualité du signal reçue par l'utilisateur. exporteur Voici un aperçu exporteur de ces différentes mesures :

- *Channel Quality Indicator* reporté par l'UE, cette mesure aide à évaluer la qualité du canal de communication entre le gNB et l'UE.
- *Modulation and coding scheme* indique la robustesse de la transmission des données.
- *Bitrate*: reflète la vitesse à laquelle les données sont transmises dans le réseau.
- Le Nombre de paquets qui ont été envoyés avec succès. Et le nombre de paquets qui ont été rejetés ou perdus Ainsi que Pourcentage de paquets perdus par rapport au total des paquets envoyés, un indicateur crucial de la performance du réseau.

- *Downlink Buffer Status* indiquant la quantité de données en attente de transmission signalée par le gNB.
- *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*, important pour évaluer la qualité de la liaison montante.
- *Reference Signal Received Power*, une mesure clé pour évaluer la qualité de la couverture réseau par l'UE.
- *Timing Advance*, qui aide à synchroniser le timing des transmissions entre l'UE et le gNB.
- *Power Headroom* reportée par l'UE, essentielle pour la gestion de la puissance de transmission et pour éviter les interférences.

Ce dispositif de collecte de mesures enrichit considérablement la capacité de surveillance et d'analyse du réseau, permettant une réaction rapide et précise aux changements dans les conditions du réseau et améliorant ainsi la gestion globale et la qualité de service offerte aux utilisateurs.

6.3 - Gestion des journaux

Ce projet met en œuvre une solution pour la gestion centralisée des journaux (logs) en utilisant nœud de sauvegarde centraliser : Loki et un nœud de collecte : Promtail (Fig.3). Cette solution vise à optimiser la surveillance, la sauvegarde, et l'accès aux données de journaux, ce qui est crucial pour le diagnostic rapide et efficace des problèmes réseau.

L'agent de collecte, Promtail, est configuré spécifiquement pour scanner la socket Docker. L'ensemble des applications et fonctions sont déployer sous la forme de conteneur Docker. Ainsi la lecture de la socket permet de capturer les journaux générés par les divers conteneurs et services du réseau. Les conteneurs sont marqués par un label spécifique permettant de réaliser un filtrage et donc de ne sauvegarder uniquement les journaux des applications de l'infrastructure. Les journaux collectés sont ensuite envoyés au nœud de sauvegarde, qui centralise et gère ces données. Cette centralisation est essentielle pour simplifier le suivi et l'analyse des événements à travers l'ensemble de l'infrastructure.

Le nœud de sauvegarde, Loki, joue un rôle crucial dans le stockage sécurisé et l'indexation efficace des journaux. En adoptant une approche d'indexation légère, il assure une utilisation optimale de l'espace de stockage tout en garantissant un accès rapide aux journaux archivés. Cette fonctionnalité est particulièrement importante pour maintenir la performance du système de surveillance. L'intégration de Loki avec l'outil de visualisation Grafana offre une plateforme puissante pour l'accès et la visualisation des journaux. Les utilisateurs peuvent exploiter des tableaux de bord personnalisés pour filtrer, rechercher et analyser les journaux en fonction de critères spécifiques. Cette capacité de visualisation enrichit la compréhension des dynamiques du réseau et améliore significativement la gestion des incidents et la résolution des problèmes.

6.4 - Contrôle de la connectivité - Capture et analyse du trafic NGAP

Dans le cadre du déploiement du cœur de réseau 5G et du gNB, un outil en Python a été développé spécifiquement pour la capture et l'analyse du trafic de contrôle entre le gNB et le cœur de réseau. Cet outil se concentre sur la surveillance et l'analyse des messages NGAP (NG Application Protocol), la détection des messages d'enregistrement du gNB, de gestion du contexte UE ainsi que les créations de sessions PDU. Son développement est motivé par les capacités de dépannage qu'il offre. Le suivi des messages peut permettre de détecter les points de défaillances, notamment en cas d'absence de message ou de réponse négative.

6.4.1 - NG-Application Protocol

Le NG-Application Protocol joue un rôle crucial dans l'architecture des réseaux 5G, facilitant la communication entre le gNB et les fonctions du cœur de réseau. NGAP supporte une multitude de procédures nécessaires au fonctionnement efficace du réseau, notamment la gestion des connexions, la

mobilité des utilisateurs, les alertes d'urgence, et la configuration des paramètres de contrôle du trafic. Ce protocole est essentiel pour l'initialisation, la modification et la libération des sessions de l'utilisateur final, et gère également les différents aspects de la sécurité et des capacités de routage. Utilisant SCTP (Stream Control Transmission Protocol) comme couche de transport, NGAP assure la fiabilité, le contrôle de flux, et l'ordre des messages, des caractéristiques indispensables pour le maintien de la qualité de service dans les réseaux modernes de télécommunication. En résumé, NGAP est au cœur des opérations de gestion et de contrôle du réseau 5G, permettant une coordination et une communication efficaces entre le gNB et les composantes du cœur de réseau.

Analyser NGAP permet donc de surveiller directement les opérations clés et de détecter d'éventuels problèmes ou anomalies dans la gestion du réseau. En comprenant et en contrôlant le flux de messages NGAP, il est possible d'effectuer des ajustements précis pour améliorer la gestion du trafic et la répartition des ressources, tout en garantissant une connectivité de bout en bout de haute qualité. Cette surveillance proactive contribue fortement aux tests et à la validation des performances et de la stabilité du réseau.

6.4.2 - Capture du trafic

La bibliothèque Scapy est employée pour la capture (librairie pcap) et la gestion des paquets SCTP. En temps réel, l'application surveille les paquets SCTP sur le lien physique gNB - cœur et identifie le type de message NGAP, extrayant des informations clés pour distinguer les procédures d'enregistrement et d'établissement de session PDU. Un mécanisme de déclenchement d'actions externes est associé à la détection en temps réel des messages, basé sur l'analyse des champs des messages NGAP.

6.4.3 - Décodage des message

Un décodeur ASN.1 (Abstract Syntax Notation One), généré à partir des définitions au format ASN.1 du protocole NGAP, est utilisé pour décomposer les messages NGAP en données structurées. Cela permet de simplifier l'accès aux différents champs des messages. L'analyse porte sur la détection de messages spécifiques tels que l'enregistrement du gNB, la gestion du contexte UE ou les créations de sessions PDU; et déclenche les actions correspondantes. Cela permet de suivre en temps réel le nombre total de requêtes, de réponses positives ou négatives et le nombre de requêtes encore en attente.

L'ASN.1 est un standard utilisé pour décrire la structure des données de manière abstraite et indépendante de l'implémentation. Employé dans divers domaines tels qu'entre autres les télécommunications, l'ASN.1 permet de définir les données de manière précise pour faciliter leur traitement par les machines, sans se soucier des spécificités des plateformes ou des langages de programmation. Ce langage de description de données offre une notation versatile et puissante, capable de représenter des structures complexes de données de manière simple et claire. L'ASN.1 est notamment utilisé pour encoder, décoder et transmettre les données de manière sécurisée et efficace sur le réseau. Il supporte différents types de codages tels que BER (Basic Encoding Rules), DER (Distinguished Encoding Rules) et PER (Packed Encoding Rules), chacun adapté à des besoins spécifiques de performance et de compacité. Dans le contexte des réseaux 5G, l'ASN.1 est crucial pour définir les structures des messages échangés via des protocoles comme NGAP, facilitant ainsi l'interopérabilité entre les équipements et les systèmes de différents fabricants. En simplifiant la manière dont les informations sont structurées et échangées, l'ASN.1 contribue à l'efficacité et à la fiabilité des communications dans les infrastructures de télécommunication modernes.

Le choix d'un décodeur basé sur une description du protocole NGAP en ASN.1 garantit donc un meilleur alignement et une meilleure exhaustivité vis-à-vis du standard. Les risques de mauvais décodage, dus à une mauvaise compréhension ou à une omission d'une partie du standard, sont fortement réduits.

6.4.4 - Intégration et Exportation des Métriques

L'application embarque un exporteur Prometheus, ce qui permet d'intégrer l'analyse du trafic au système de supervision. Activé lors de la détection de messages spécifiques, cet exporteur, configuré pour opérer via HTTP sur un port spécifié. Il recense différentes métriques telles que le nombre de requêtes d'enregistrement gNB et de créations de sessions PDU capturées, mise à jour à chaque interception de message pertinent. Cet exporteur tient à jour les requêtes en attente jusqu'à la capture de la réponse positive ou négative correspondante.

L'outil est conçu pour offrir de la flexibilité, permettant de spécifier le port et l'interface réseau pour la capture des paquets via des arguments en ligne de commande. Cette conception assure une intégration facile dans divers environnements de déploiement et garantit une adaptation aux besoins spécifiques du réseau.

En conclusion, cet outil améliore significativement la capacité de surveiller et d'analyser avec précision le trafic de contrôle dans les réseaux 5G, fournissant une visibilité essentielle sur les opérations de réseau et contribuant à valider et à maintenir l'état du système.

6.5 - Visualisation

Grafana a été choisi comme solution de visualisation, intégrant des tableaux de bord sophistiqués pour une analyse en temps réel et détaillée des performances du réseau. La visualisation se fait via une interface web. Dans le cadre de ce projet, cette interface est accessible depuis l'ensemble des postes au sein du LAN de l'Innovlab.

6.5.1 - Fonctionnalités et Intégration

L'outil de visualisation, Grafana, est intégré de manière à exploiter sa capacité à se connecter à diverses sources de données, utilisées pour la collecte de métriques de réseau. Cette intégration facilite la visualisation intuitive et accessible des données collectées, aidant à l'interprétation des métriques clés telles que le trafic, les performances et l'état du plan de contrôle.

Grafana récupère les mesures de performance, d'utilisation et d'autres statistiques importantes directement depuis le nœud de collecte Prometheus. Ce dernier collecte et stocke des métriques de divers composants du réseau 5G. Grafana interroge Prometheus à l'aide de requêtes spécifiques pour afficher ces données sous forme de graphiques et de tableaux de bord interactifs. Cette intégration permet aux utilisateurs de visualiser les tendances au fil du temps, de comparer les performances actuelles avec des historiques et de détecter rapidement les anomalies.

Pour la gestion des journaux, Grafana se connecte au nœud de sauvegarde Loki. Celui-ci fournit un moyen efficace de centraliser les journaux issus des applications et des services du réseau 5G. Dans Grafana, les utilisateurs peuvent consulter ces journaux pour un aperçu détaillé des événements et des comportements du système. L'interface de Grafana permet de filtrer et de rechercher dans les journaux, facilitant ainsi le diagnostic et l'analyse des problèmes.

6.5.2 - Personnalisation des Tableaux de Bord

Les tableaux de bord de Grafana sont conçus pour offrir une vue complète des aspects critiques du réseau. Ils sont personnalisés pour afficher des informations spécifiques, telles que les taux de réussite de connexion, les erreurs de transmission, et l'utilisation des ressources, permettant une surveillance efficace de l'état du réseau et une réponse rapide aux incidents. La flexibilité de Grafana pour filtrer et affiner les données en temps réel améliore la gestion opérationnelle et la prise de décision. Elles permettent de créer et de modifier les tableaux de bord selon les besoins sans interventions complexes. De plus, Grafana supporte des alertes configurables qui peuvent être déclenchées par des seuils prédéfinis, garantissant une alerte immédiate en cas de détection d'anomalies ou de dépassement de capacités.

En somme, l'utilisation de Grafana pour la visualisation dans l'infrastructure de test 5G enrichit la capacité de surveillance et d'analyse, contribuant à une compréhension approfondie et à une gestion proactive du réseau. Cette mise en œuvre non seulement améliore la surveillance des performances, mais aussi l'efficacité globale du processus de tests, assurant la préparation du réseau pour répondre aux exigences avant un déploiement à plus grande échelle.

7 - Perspectives d'Évolution du Projet

Après avoir réussi l'automatisation d'un déploiement initial et la mise en place d'un système de supervision efficace, le projet présente de nombreuses perspectives d'évolution. Ces évolutions visent à enrichir les fonctionnalités du réseau, répondre aux besoins croissants de flexibilité, de mobilité et d'efficacité, tout en exploitant les avancées technologiques du domaine. Voici quelques axes majeurs de développement futur :

7.1 - Mise en Place Concrète du Slicing de Réseau

Le slicing de réseau est une fonctionnalité clé de la 5G permettant de diviser un réseau physique unique en plusieurs réseaux virtuels (tranche). Chaque tranche est capable de fournir une connectivité et des services réseau adaptés aux exigences spécifiques de différentes applications ou segments de clients. La mise en œuvre concrète du slicing avec plusieurs tranches opérant simultanément ouvre la voie à une personnalisation accrue des services, à une meilleure allocation des ressources et à une isolation améliorée entre les différents services. Cela permettrait non seulement de maximiser l'utilisation des infrastructures mais aussi d'offrir des services différenciés tels que des réseaux ultra-fiables et à faible latence pour les applications industrielles, ou des réseaux à large bande pour les services multi-médias. Ce qui permettrait d'élargir les cas d'expérimentation au sein de l'Innovlab.

Pour cela, il est nécessaire de configurer le cœur de réseau pour qu'il prenne en charge les tranches ainsi que de configurer chacune des tranches. Il faut également spécifier les tranches supportés au gNB. De même, l'UE doit être configuré pour n'émettre que sur un tranche spécifique. Et la tranche que chaque UE utilise doit être renseignée au niveau du cœur de réseau. À cela s'ajoutent, bien sûr, les tests, le débogue et les étapes de validation.

7.2 - Mobilité : Handover et Roaming

L'intégration de fonctionnalités de mobilité telles que le handover (passage de relais) et le roaming (itinérance) est essentielle pour soutenir une expérience utilisateur ininterrompue. Le handover assure une continuité de service sans faille lorsque les utilisateurs se déplacent d'un site à un autre au sein de la même bulle réseau ou entre différentes bulles. Cela est particulièrement crucial dans les environnements où les utilisateurs ou les machines sont mobiles, comme les campus universitaires ou les zones industrielles. De même, le roaming permet aux utilisateurs de maintenir leur connectivité et l'accès aux services lorsqu'ils passent d'un réseau à un autre, ce qui est fondamental pour les applications globales ou les utilisateurs voyageant fréquemment.

Pour cela, il est nécessaire de mettre en place un second gNB (dans le cadre du handover) et un second réseau 5G au complet (dans le cadre du roaming). Et également de configurer et de tester ces fonctions de mobilité.

7.3 - Paging : Amélioration de la Gestion de la Connectivité

Le paging, ou la gestion des appels d'un utilisateur, est une autre fonctionnalité critique pour les réseaux de grande envergure, particulièrement dans les contextes où les appareils doivent économiser la batterie tout en restant joignables. Le développement de méthodes de paging efficaces et économiques en énergie peut réduire considérablement la consommation d'énergie des appareils finaux tout en maintenant une haute disponibilité et réactivité du réseau. Cela est crucial pour les dispositifs IoT déployés dans des applications de ville intelligente, de surveillance environnementale, ou de gestion de flottes.

7.4 - Usage de la bulle 5G privé de l'Innovlab

Le déploiement de cette infrastructure 5G privée à l'InnovLab permet aux étudiants de se plonger dans un environnement de recherche appliquée, offrant ainsi une formation pratique et approfondie

sur les technologies 5G. Cela leur permet d'expérimenter des cas d'usage réels et de se familiariser avec les concepts clés de cette technologie, qui fait partie des évolutions majeures du secteur des télécommunications et du numérique.

La bulle 5G peut également servir de support à d'autres expérimentations au sein de l'Innovlab. L'infrastructure 5G privée permet aux étudiants de tester des applications nécessitant des performances spécifiques, des communications machine à machine (M2M) ou des réseaux d'objets connectés (IoT). Cette approche pratique leur permettrait de développer des compétences en gestion de réseau et en optimisation des performances, tout en apprenant à résoudre les défis techniques liés à ces technologies.

8 - Conclusion

Le travail de mise en place et d'amélioration d'une bulle 5G privée s'est révélé être un processus itératif et exigeant, couvrant un large spectre de compétences et de technologies. Après une première phase d'expérimentation avec OpenAirInterface, l'adoption conjointe d'open5GS pour le cœur de réseau et de srsRAN pour le RAN a permis de renforcer la stabilité, la performance et la simplicité de l'architecture. La mise en place d'outils d'automatisation, au moyen d'Ansible, a facilité le déploiement répliquable de l'infrastructure, rendant plus aisée son appropriation par d'autres étudiants ou ingénieurs.

Parallèlement, la couche de supervision basée sur Prometheus, Loki et Grafana offre une visibilité détaillée sur l'état du réseau, depuis les performances radio jusqu'à l'analyse fine du trafic de contrôle NGAP. Cet écosystème de monitoring favorise l'optimisation continue, la détection précoce d'anomalies et une maintenance réactive. L'utilisation de modules exportateurs spécifiques, associés à des analyses protocolaires profondes, soutient une compréhension granulaire des opérations internes du réseau.

Ces travaux, inscrits dans un cadre formateur, ouvrent la voie à des évolutions futures. La mise en place de fonctions plus avancées comme le slicing, la prise en compte de la mobilité (handover, roaming) et l'intégration de mécanismes de paging témoigne du potentiel d'enrichissement de cette infrastructure 5G. Enfin, l'usage effectif de cette bulle privée dans un environnement de recherche et d'enseignement, tel que l'InnovLab, permettra de tester des scénarios complexes, d'accélérer l'innovation et de répondre aux besoins spécifiques de diverses applications émergentes, notamment dans le domaine de l'IoT et des services à forte criticité.

Ainsi, le déploiement de cette bulle 5G privée constitue non seulement une preuve de concept aboutie, mais aussi une base technique robuste pour de futurs développements et expérimentations. Ce projet aura rempli son objectif de démontrer la faisabilité et la pertinence de l'infrastructure, tout en ouvrant de nouvelles perspectives d'évolution.

Table des acronymes

AMF:	Access and Mobility Management Function
ASN.1:	Abstract Syntax Notation One
COTS:	Commercial Off-The-Shelf
CU:	Central Unit
DU:	Distributed Unit
FDD:	Frequency Division Duplex
FPGA:	Field-Programmable Gate Array
IoT:	Internet of Things
LAN:	Local Area Network
LTE:	Long-Term Evolution
MIMO:	Multiple Input Multiple Output
NFV:	Network Functions Virtualization
NGAP:	Next Generation Application Protocol
NRF:	Network Repository Function
OAI:	Open Air Interface
PCF:	Policy Control Function
PDU:	Packet Data Unit
RAN:	Radio Access Network
RIC:	RAN Intelligent Controller
RU:	Radio Unit
SCTP:	Stream Control Transmission Protocol
SDN:	Software Defined Networking
SDR:	Software Defined Radio
SFP:	small form-factor pluggable
SMF:	Session Management Function
TDD:	Time Division Duplex
UE:	User Equipment
UPF:	User Plane Function
USRP:	Universal Software Radio Peripheral
gNB:	Next Generation NodeB

Table des figures

Figure 1: Évolution des technologies de télécommunications	5
Figure 2: Infrastructure 5G	6
Figure 3: Infrastructure general	12
Figure 4: Graphe de dépendances des roles Ansible	13
Figure 5: Infrastructure de la solution de supervision	15