

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Thème

Ordonnancement dans les réseaux cellulaires 5G basé sur l'apprentissage
par renforcement

Préparé par :

- AMAZOUZ Amel
- KAABACHE Asma

Dirigé par :

M. AZNI
M. BENMADANI

Examiné par :

Mme. MAMMERY
M. TOUNSI

Remerciement

Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé force, courage et patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous remercions vivement notre co-encadrant M. BENMADANI pour ses remarques objectives ses conseils et critiques sur le plan scientifique.

Nous tenons à remercier notre encadreur M. AZNI pour nous avoir offert les conditions nécessaires et nous avoir guidés dans l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements aux membres du jury, M. TOUNSI et Mme MAAMRI, pour avoir accepté de participer et d'examiner notre mémoire.

À tous nos amis et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Merci.

Dédicaces

C'est avec beaucoup de reconnaissance que je dédie ce travail

À mes très chers parents

À ma sœur Kahina

À mon frère Yougourtha

À mes amies Célia, Nabila, Dounia, Rania, Elisa

À tous ceux qui ont fait confiance à mes capacités pendant mon parcours.

Amel

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail

À ma tendre mère, ma force tranquille, pour ton amour qui me guide à travers les hauts et les bas. Je te suis éternellement reconnaissante pour tout ce que tu as fait et continues de faire pour moi.

À mon cher père, ma source d'inspiration infinie, pour tes conseils avisés et ton amour inconditionnel et pour toutes les fois où tu m'as dit *kemmel kan kemmel !*. Merci d'avoir été mon pilier.

À mes deux sœurs adorées, *Mina et Meriem*. Pour les innombrables fois où vous avez écouté mes préoccupations et m'avez encouragée. Je suis chanceuse de vous avoir dans ma vie.

À ma belle-sœur, *Siham*, qui a su s'intégrer harmonieusement dans notre famille. Merci de t'être jointe à notre cercle familial avec autant de douceur.

À mes deux frères exceptionnels, *Lamine et Mohamed*, pour votre présence permanente et pour toutes les fois où vous m'avez encouragée à repousser mes limites, malgré mes folies sans fin. Votre présence est un cadeau précieux que j'apprécie chaque jour.

À mes neveux et nièces *Adem, Akram, Hafssa, Assia, Aksel, Assil et Anes* bien-aimés, votre innocence m'inonde de chaleur, d'amour et de bonheur. Vous êtes mes trésors et je vous aime infiniment. Que votre joie et votre épanouissement accompagnent chacune de vos journées.

À *Chaima, Kenza, Ouarda, Ouissem, Sarah et Melissa* merci d'avoir partagé ce voyage avec moi et d'avoir été là à chaque étape.

À tous mes proches, famille et amies, même si je ne vous ai pas mentionnés individuellement, votre présence est précieuse. Merci d'exister, votre soutien restera à jamais gravé dans mon cœur.

Asma

Table des matières

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction.....	1
Chapitre 1. Introduction aux réseaux cellulaires 5G	3
1. Introduction.....	3
2. Evolution des réseaux de communications cellulaires	3
2.1. Les réseaux de première génération (1G).....	3
2.2. Les réseaux de deuxième génération (2G).....	3
2.3. Les réseaux de troisième génération (3G)	4
2.4. Les réseaux de quatrième génération (4G)	4
2.5. Les réseaux de cinquième génération (5G).....	4
3. Les réseaux de communication de 5 ^{ème} génération (5G NR).....	6
4. Numérotologies et structure de trame 5G	6
5. Système et architecture d'un réseau cellulaire 5G	8
5.1. L'Équipement Utilisateur (UE).....	8
5.2. Le réseau d'accès	9
5.3. Le réseau cœur (Mobile Core Network).....	9
5.4. La couche physique	9
6. Options de configuration d'un réseau 5G	10
6.1. La configuration SA	10
6.2. La configuration NSA	11
6.3. Vers un réseau virtualisé Cloud RAN	11
7. Spectre de fréquence.....	12
8. Technologies clés	12
8.1. Modulation OFDM et OFDMA	12
8.2. OMA et NOMA	13
8.3. MIMO massive.....	13
8.4. Beamforming	14
9. Services de la 5G.....	14

10.	Avantages et inconvénients des réseaux 5G	15
11.	Conclusion.....	16
Chapitre 2. Allocation de ressources dans les réseaux cellulaires		17
1.	Introduction.....	17
2.	Allocation de ressource radio.....	17
2.1.	Définition de l'ordonnanceur	18
3.	Facteurs influençant la décision d'ordonnancement	18
3.1.	Indicateur de qualité de canal.....	18
3.2.	Débit moyen.....	19
3.3.	État de la file d'attente au niveau du buffer	19
3.4.	Délai du paquet en tête de file D_{HOL}	19
3.5.	Indicateur de classe de qualité de service	19
4.	Mesures d'évaluations de performances.....	20
4.1.	Délai	20
4.2.	Débit	20
4.3.	Goodput	20
4.4.	Équité.....	20
4.5.	Taux de perte de paquets	21
4.6.	Efficacité spectrale	21
5.	Les algorithmes d'ordonnancement	21
5.1.	Notion de métrique	21
5.2.	Algorithmes classiques	22
5.2.1.	L'algorithme Round Robin (RR)	22
5.2.2.	L'algorithme d'allocation aléatoire (RA).....	22
5.3.	Algorithmes équitables	23
5.3.1.	L'algorithme Fair Queuing (FQ).....	23
5.3.2.	L'algorithme Max-Min Fair (MMF).....	23
5.3.3.	L'algorithme Weighted Fair Queuing (WFQ)	23
5.4.	Algorithmes opportunistes.....	24
5.4.1.	L'algorithme PF (Proportional Fairness)	24
5.4.2.	L'algorithme Modified Largest Weighted Delay First (LWDF)	25
5.4.3.	L'algorithme EXP-PF (Exponential Proportional Fair).....	25

5.4.4.	L'algorithme PSS (Priority Set Scheduler).....	26
4.4.5.	L'algorithme CQA (Channel-QoS Aware).....	26
6.	Conclusion	27
Chapitre 3. Introduction aux techniques d'apprentissage.....		28
1.	Introduction.....	28
2.	Classification des techniques d'apprentissage	28
2.1.	Apprentissage supervisé	28
2.2.	Apprentissage non supervisé.....	29
2.3.	Apprentissage par renforcement	30
2.3.1.	Processus de décision markovien.....	31
2.3.2.	Apprentissage (Définition des différents paramètres).....	32
2.3.3.	Apprentissage tabulaire Q-Learning	33
3.	Apprentissage par renforcement profond	33
3.1.	Apprentissage profond (Deep learning)	34
4.	Algorithmes en DRL	35
4.1.	Q-apprentissage profond : définition.....	35
4.2.	Gradient de politique déterministe profond (DDPG).....	36
5.	Conclusion	36
Chapitre 4. Application des techniques d'apprentissage à l'ordonnancement dans les réseaux cellulaires.....		37
1.	Introduction.....	37
2.	L'environnement de simulation <i>ns-3</i>	37
3.	Utilisation de <i>ns-3</i>	37
3.1.	Installation	37
3.2.	Prise en main.....	38
3.3.	Création de scénarios de simulation personnalisés	38
3.4.	Analyse des résultats	38
4.	Structure et organisation de <i>ns-3</i>	38
4.1.	Le module LTE	38
5.	Simulation des performances dans un réseau LTE	39
5.1.	Scénario de simulation.....	39
5.1.1.	Topologie du réseau de simulation.....	39
5.1.2.	Paramètres de simulation.....	40

5.1.3. Étapes de codage.....	40
6. Evaluation de performances.....	42
6.1. Performances de chaque Trafic.....	42
6.2. Performances de l'ensemble du système.....	44
6.2.1. Débit système.....	45
6.2.2. Equité système.....	46
6.2.3. Efficacité spectrale du système.....	47
7. Simulations dans les réseaux de 5G.....	47
7.1. Le module NR.....	48
7.2. Module AI.....	48
7.3. Architecture NR et AI.....	49
8. Conclusion.....	51
Conclusion.....	52
Bibliographie	

Liste des abréviations

1

1G : 1st Generation (Réseau de 1^{ère} Génération)

2

2G : 2nd Generation (Réseau de 2^{ème} Génération)

3

3G : 3rd Generation (Réseau de 3^{ème} Génération)

3GPP : 3rd Generation Partnership Project (Projet de partenariat de 3^{ème} génération)

5

5G : 5th Generation (Réseau de 5^{ème} Génération)

5GC : 5G Core Network (Réseau Cœur 5G)

6

6G : 6th Generation (Réseau de 6^{ème} Génération)

A

AC : Admission Control (contrôle d'admission)

AGRR : Allocation et la gestion des ressources (Allocation and Management of Resources)

AMC : Adaptive Modulation and Coding (Modulation et Codage Adaptatifs)

ANN : Artificial Neural Networks (Réseaux De Neurones Artificiels)

B

BS : Base Station (station de base)

C

CDMA : Code Division Multiple Access (Accès Multiple à division en codes)

CNN : Convolutional Neural Network (Les Réseaux De Neurones Convolutifs)

CP : Cyclic Prefix (Préfixe Cyclique)

CQA : Chanel QoS Aware (Sensibilité du Canal au QoS)

CQI : Channel Quality Indicator (Indicateur de Qualité de Canal)

CSI : Channel State Information (Information sur l'État du Canal)

D

DDPG : Deep Deterministic Policy Gradient (Gradient De Politique Déterministe Profond)

DNN : Deep Neural Network (Les Réseaux De Neurones Profonds)

DPG : Deterministic Policy Gradient (Gradient De Politique Déterministe)

DQN : Deep Q-Network (Réseau Q Profond)

DRL : Deep Reinforcement Learning (Apprentissage Par Renforcement Profond)

E

eNB : evolved NodeB (NodeB évolué)

EPC : Evolved Packet Core (Noyau de paquets évolué)

E-UTRA : Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network (Réseau à Accès radio universel terrestre évolué)

EXP-PF : Exponential Proportional Fair (Proportionnel Exponentiel Équitable)

F

FDMA : Frequency Division Multiple Access (Accès Multiple à division de fréquence)

FQ : Fair Queuing (File d'Attente Équitable)

FTP : File Transfer Protocol (Protocole de Transfert de Fichiers)

G

GSM : Global System for Mobile (système global pour les mobiles)

H

HARQ : Hybrid Automatic Repeat Request (Demande de Répétition Automatique Hybride)

I

IA : Intelligence Artificiel (Intelligence Artificielle)

IDFT : Inverse Discrete Fourier Transform (Transformée de Fourier Discrète Inverse)

IoT : Internet of Things (Internet des Objects)

IP : Internet Protocol (Protocole internet)

L

LTE : Long Term Evolution (évolution à long terme)

M

MAC : Media Access Control (Couche de Contrôle d'Accès au Médium), *Voir*

MCS : Modulation and coding schéma (Schéma de Modulation et Codage)

MIMO : Multiple-Input Multiple-Output (Entrées Multiples Sorties Multiples)

M-LWDF : Maximum Largest Weighted Delay First (Délai maximal pondéré le plus long en premier)

MMF : Max-Min Fair (Équité Max-Min)

MMS : MMS Multimedia Messaging Service (service de messagerie multimédia)

MNC : Mobile Network Core (Le cœur de réseau mobile)

N

NG-RAN : Next Generation RAN (Réseau d'accès radio de prochaine génération)

NOMA : Non Orthogonal Multiple Access (Accès Multiple Non Orthogonal)

NR : New Radio (Nouvelle Radio)

ns-3 : Network Simulator 3 (Simulateur Réseau)

O

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence)

OMA : Orthogonal Multiple Access (Accès Multiple Orthogonal)

P

PDM : Processus De Décision Markovien (MDP : Marcov Decision Process)

PDN : Packet Data Network (Réseau de données par paquet)

PF : Proportional Fairness (Équité Proportionnelle)

PGW : Packet Data Network Gateway (Passerelle de Réseau de Données en Paquets)

PS : Packet Scheduling (Ordonnancement des Paquets)

Q

QoS : Quality of Service (Qualité de Service)

R

RA : Random Access (Accès Aléatoire)

RB : Resource Block (Bloc de Ressource)

RE : Resource element (Élément de Ressource)

RL : Reinforcement Learning (Apprentissage Par Renforcement)

RLC : Radio Link Control (Contrôle de Liaison Radio)

RNN : Recurrent Neural Network (Les Réseaux De Neurones Récurents)

RR : Round Robin (Rotation circulaire)

RRC : Radio Ressource Control (Contrôle des Ressources Radio)

RRM : Radio Resource Management (Gestion des Ressources Radio)

RTCP : Real-Time Control Protocol (Protocole de contrôle en temps réel)

S

SC-FDMA : Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (Accès multiple à division de fréquence à porteuse unique)

SGW : Serving Gateway (Passerelle de Service)

SINR : Signal to interference Noise Ratio (Rapport Signal sur Bruit et Interférences)

SLA : Service Level Agreement (Accord de Niveau de Service)

SMS : Short Message Service (Service de messages courts)

T

TDD : Time Division Duplex (Duplexage à Division Temporelle)

TDMA : Time Division Multiple Access (Accès multiple à division temporelle)

TTI : Time Transmission Interval (Interval de Transmission Temporelle)

U

UE : User Equipment (L'équipement Utilisateur)

UMTS Universal Mobile telecommunications system (Système de télécommunications universel mobile)

W

W-CDMA : Wideband Code Division Multiple Access (Accès multiple par répartition en codes à large bande)

WFQ : Weighted Fair Queuing (File d'Attente Équitable Pondérée)

WiMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interfonctionnement mondial pour l'accès par micro-ondes)

Liste des figures

FIGURE 1. LA TRAME TEMPORELLE 5G-NR	7
FIGURE 2. ALIGNEMENT TEMPOREL POUR LES DIFFERENTES NUMEROLOGIES	7
FIGURE 3. ARCHITECTURE RESEAU 5G	8
FIGURE 4. OPTIONS DE CONFIGURATION 5G	10
FIGURE 5. DIFFERENTS MODES DE DEPLOIEMENT ET D'EXPLOITATION POUR LE RAN NR 5G	12
FIGURE 6. TRAME ET GRILLE DE RESSOURCES EN OFDMA	13
FIGURE 7. FONCTIONNEMENT D'UN ORDONNANCEUR DANS UNE BTS.....	18
FIGURE 8. SYSTEME D'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT.....	30
FIGURE 9. PRINCIPE DE L'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT.....	31
FIGURE 10. SYSTEME D'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT.....	33
FIGURE 11. Q-APPRENTISSAGE VS. Q-APPRENTISSAGE PROFOND	36
FIGURE 12. TOPOLOGIE DU RESEAU DE SIMULATION SUR NS-3.....	40
FIGURE 13. . ÉTAPES DE CODAGE	41
FIGURE 14. DEBIT VS TEMPS – VOIP	42
FIGURE 15. DEBIT VS TEMPS – VIDEO.....	43
FIGURE 16. DEBIT VS TEMPS – FTP	44
FIGURE 17. DEBIT GLOBAL DU SYSTEME.....	45
FIGURE 18. EQUITE DU SYSTEME.....	46
FIGURE 19. EFFICACITE SPECTRALE VS TEMPS	47
FIGURE 20. ARCHITECTURE DE LA MISE EN PALCE DE DRL	49
FIGURE 21. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE DRL	49
FIGURE 22. RESULTATS LORS DE L'EXECUTION DU DRL.....	50

Liste des tableaux

TABLEAU 1. EVOLUTION DES RESEAUX CELLULAIRES	5
TABLEAU 2. PARAMETRES DE SIMULATION.....	40

Introduction

L'arrivée de la 5G est une évolution majeure dans le domaine de la communication mobile. Cette nouvelle technologie des réseaux mobile offre une bande passante plus élevée, une faible latence, une connectivité massive et une fiabilité accrue, ce qui ouvre la voie à de nouvelles applications et services innovants. La 5G est donc considérée comme le catalyseur de la prochaine révolution numérique.

Le réseau cellulaire 5G est une technologie réseau sans fil qui va fondamentalement changer la façon dont nous interagissons avec les appareils et la manière dont ils interagissent entre eux. Contrairement à ses prédécesseurs, la 5G ne se contentera pas de faire fonctionner les téléphones portables plus rapidement. Elle permettra des technologies gourmandes en données et dont la fiabilité est essentielle, comme la réalité virtuelle, la réalité augmentée, l'intelligence artificielle, la chirurgie à distance, les véhicules autonomes, l'Internet des objets et bien d'autres, des réalités quotidiennes.

L'ordonnancement dans les réseaux cellulaires 5G est un domaine de recherche important qui vise à allouer efficacement les ressources radio aux utilisateurs pour maximiser une fonction d'utilité. Un ordonnancement efficace des flux de différentes natures permet d'utiliser au mieux les ressources radio de façon garantir une qualité de service (QoS) requise par les diverses applications tout en maximisant le débit global du système. Plusieurs algorithmes d'ordonnancement ont été développés et appliqués dans les réseaux cellulaires. Parmi ceux-ci, certains sont dédiés à l'équité entre les flux alors que d'autres sont orientés vers les applications en temps réel. Les algorithmes les plus récents tentent d'assurer un certain équilibre entre l'équité et l'efficacité. Les techniques d'apprentissage ont récemment émergé comme une approche prometteuse pour résoudre et améliorer les performances de ces algorithmes. C'est ainsi que dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'application des techniques de l'Intelligence Artificielle (IA) pour le développement d'algorithmes performants destinés à l'ordonnancement des flux dans les réseaux cellulaires 5G.

L'idée principale que nous nous proposons d'étudier dans ce mémoire est d'examiner la possibilité de choisir dynamiquement et en temps réel l'algorithme d'ordonnancement le plus approprié pour n'importe quel contexte en optimisant l'usage des ressources radio. L'algorithme est choisi parmi les algorithmes qui auront été préprogrammés. Le choix d'un tel algorithme se fait en appliquant les techniques de l'IA. Le travail à accomplir est centré sur l'utilisation du logiciel de simulation réseaux *ns-3*. Dans un premier temps, les performances des divers algorithmes sont simulées et les informations de performances sont alors utilisées comme base qui constitueront une entrée adéquate pour le module AI qui a été développé spécialement comme interface pour l'utilisation de l'IA conjointement avec le logiciel *ns-3*. Un module NR est aussi utilisé comme interface avec *ns-3* pour permettre l'utilisation des numéologies 5G dans *ns-3*. La technique IA utilisée est celle basée sur l'apprentissage par renforcement profond.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est une introduction aux réseaux cellulaires 5G, expliquant les principes de base de cette technologie de réseau sans fil et les défis associés à son déploiement.

Le deuxième chapitre est consacré à l'allocation de ressources dans les réseaux cellulaires 5G. Dans ce chapitre, nous étudions aussi les principaux algorithmes d'ordonnancement qui ont été développés et programmés dans la bibliothèque du logiciel ns-3.

Le troisième chapitre est une introduction aux techniques d'apprentissage, présentant les concepts de base de l'apprentissage automatique ainsi que la classification des techniques développées dans le domaine de l'intelligence artificielle.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation d'un réseau 5G en utilisant différents algorithmes d'ordonnancement. Nous montrons aussi comment les résultats obtenus peuvent être utilisés pour l'application des techniques par renforcement profond dans le cadre de l'ordonnancement dans les réseaux cellulaires 5G.

Nous terminons par une conclusion, suivie des références bibliographiques utilisées.

Chapitre 1

Introduction aux réseaux cellulaires 5G

1. Introduction

La 5G est une évolution majeure qui promet des performances supérieures en termes de vitesse, de capacité et de latence par rapport aux générations précédentes de réseaux cellulaires. Dans cette introduction, nous explorerons les fondements et les caractéristiques clés des réseaux cellulaires 5G, ainsi que les avantages qu'ils offrent aux utilisateurs et aux industries. Nous aborderons également les différentes techniques et considérations liées au déploiement de cette technologie révolutionnaire. Enfin, nous discuterons de ces avantages et inconvénients.

2. Evolution des réseaux de communications cellulaires

Au fil des décennies, les réseaux de communications cellulaires ont connu une évolution considérable. Depuis les premières générations de téléphonie mobile jusqu'à l'arrivée de la 5G, les améliorations ont été constantes, avec des répercussions significatives sur notre manière de communiquer et d'accéder à l'information. L'évolution des réseaux de communications cellulaires a permis de développer de nombreuses applications et services, tels que la messagerie, la voix, la vidéo, l'accès à Internet, les jeux en ligne et bien plus encore. Ces améliorations ont créé un monde de communication connecté, intelligent et rapide où les utilisateurs peuvent rester connectés en permanence, accéder à une grande variété de services et d'applications, et bénéficier d'une expérience utilisateur améliorée.

Dans ce contexte, cette section vise à explorer les différentes générations de réseaux de communications cellulaires et à comprendre leurs évolutions au fil du temps. Nous allons analyser l'évolution et les améliorations apportées à chaque génération, depuis les premières générations jusqu'à la 5G.

2.1. Les réseaux de première génération (1G)

Les réseaux de première génération ont été les premiers réseaux cellulaires déployés à grande échelle dans les années 1980. Ils utilisaient la technologie analogique et offraient des services de téléphonie mobile de base. Les réseaux 1G étaient très limités en termes de capacité et de qualité de service, mais ils ont posé les bases pour le développement des réseaux cellulaires ultérieurs.

2.2. Les réseaux de deuxième génération (2G)

Ils ont été déployés dans les années 1990, ils sont basés sur le standard numérique appelé GSM (Global System for Mobile Communications) et ont introduit la technologie numérique. Le TDMA (Time Division Multiple Access) et le FDMA (Frequency Division Multiple Access) sont des techniques utilisées dans ces réseaux pour permettre à plusieurs utilisateurs d'être connectés aux

stations de base sans congestionner le réseau. Cette combinaison garantit une communication simultanée et sans interférences entre les utilisateurs. Les réseaux 2G ont offert des services de transmissions de voix et de données à des vitesses plus élevées que les réseaux 1G. Les autres services proposés sont l'envoi des messages (MMS et SMS) et les renvois d'appels.

2.3. Les réseaux de troisième génération (3G)

Ils ont été déployés dans les années 2000 et ont introduit la technologie de transmission de données à haut débit. Ils sont également connus sous le nom d'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), qui signifie Système de télécommunications universel mobile, et parfois sont appelés 3GSM. Contrairement au GSM, où les cellules radio adjacentes doivent utiliser des bandes de fréquences différentes, l'UMTS utilise la technique d'accès multiple W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access), qui permet de réutiliser les mêmes fréquences dans des cellules radio adjacentes grâce à une nouvelle technique de codage (utiliser la même bande de fréquences dans chaque cellule). Cela permet de supporter plus d'abonnés actifs dans chaque cellule. L'UMTS permet en particulier de transférer en temps réel des contenus multimédias tels que les images, le son, les vidéos et la navigation sur Internet. Donc il offre des vitesses de transmission de données allant jusqu'à plusieurs mégabits par seconde.

2.4. Les réseaux de quatrième génération (4G)

Les réseaux de quatrième génération ont été déployés à partir de 2010 et ont introduit la technologie de transmission de données à très haut débit. Ils sont connus aussi sous le nom de LTE. LTE est l'acronyme de "Long Term Evolution" (évolution à long terme). La technologie d'accès radio choisie pour ce système est l'OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Accès Multiple par Division de Fréquence Orthogonale) [1], dans la liaison descendante et SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access), une technique mono-porteuse, est utilisée dans la liaison montante. Ces réseaux offrent un débit de données allant jusqu'à plusieurs dizaines de Mbit/s et permettent l'accès à des services avancés tels que la réalité augmentée et la vidéo en haute définition.

2.5. Les réseaux de cinquième génération (5G)

Les réseaux de cinquième génération ont commencé à être déployés en 2019 et sont actuellement en cours de déploiement à grande échelle. Les réseaux 5G offrent des vitesses de transmission de données encore plus élevées que les réseaux LTE, allant jusqu'à plusieurs gigabits par seconde, ainsi qu'une latence très faible. Les réseaux 5G permettent également la connectivité de masse, l'Internet des objets (IoT, l'acronyme de Internet of Things) et l'utilisation de technologies avancées telles que la réalité virtuelle et augmentée, les voitures autonomes et la télémédecine.

Au-delà de la 5G, les perspectives pour les réseaux cellulaires futurs sont ambitieuses. La 6G est déjà en cours de développement. Elle devrait offrir des vitesses de transmission de données encore plus élevées que la 5G et des débits allant jusqu'à plusieurs téraoctets par seconde, avec une latence quasi nulle. Elle pourrait également permettre une connectivité plus étendue, notamment pour les objets connectés à faible consommation d'énergie et pour les satellites. Ce qui ouvrirait la

voie à de nouveaux cas d'utilisation tels que la réalité augmentée en temps réel et la communication interplanétaire.

En somme, les réseaux cellulaires ont connu une évolution remarquable au fil des décennies, passant des réseaux analogiques 1G aux réseaux ultra-rapides et ultra-fiables 5G. Avec la 6G en développement et les perspectives futuristes pour les années à venir, l'avenir des réseaux cellulaires semble très prometteur.

Le tableau 1 montre un récapitulatif de l'évolution des réseaux de communication cellulaires en termes de caractéristiques clés.

Caractéristiques	1G	2G	3G	4G	5G
Années de déploiement	1980	1990	2000	2010	2020 (en cours de déploiement)
Vitesse de transmission	2,4 kbps	14 kbps	Jusqu'à 2 Mbps	Jusqu'à 1 Gbps	Jusqu'à 10 Gbps
Services	Voix	Voix, SMS, MMS	Voix, SMS, MMS, données	Voix, SMS, MMS, données, vidéo	Services avancés (IoT, réalité virtuelle, etc.)
Qualité de service	Faible	Voix numérique de meilleure qualité	Voix et données améliorées (haut débit)	QoS améliorée pour les données	QoS optimisée pour les services avancés
Capacité de réseau	Quelques centaines d'utilisateurs par cellule	Quelques milliers d'utilisateurs par cellule	Plusieurs dizaines de milliers d'utilisateurs par cellule	Plusieurs centaines de milliers d'utilisateurs par cellule	Jusqu'à un million d'utilisateurs par km ²
Bande passante	< 10 KHz	30-200 kHz	5-20 MHz	Jusqu'à 100 MHz	Jusqu'à 800 MHz
Multiplexage	FDMA	FDMA, TDMA	CDMA, WCDMA	OFDMA/SC-FDMA	OFDMA, NOMA
Basculement	Circuit	Circuit à paquet	Circuit à paquet	Circuit à paquet	Circuit à paquet

Caractéristiques	1G	2G	3G	4G	5G
Réseau principal	RTCP	RTCP, RNIS	IP	IP	IP

Tableau 1. Evolution des réseaux cellulaires

Remarque : Il est important de noter que ces caractéristiques sont données à titre indicatif et que les normes de chaque génération de réseau peuvent varier d'un pays à l'autre.

3. Les réseaux de communication de 5^{ème} génération (5G NR)

5G est la cinquième génération de la technologie de communication sans fil, qui succède à la 4G (ou LTE) et permet des débits de données plus élevés, une latence réduite, une connectivité massive, une sécurité renforcée et de nouvelles applications telles que l'Internet des objets (IoT), la réalité virtuelle et augmentée, les véhicules autonomes, la télémédecine, etc.

5G NR (New Radio) est la spécification technique de la technologie radio utilisée pour la communication sans fil 5G. Elle a été développée par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project), un partenariat de plusieurs organismes de normalisation des télécommunications, pour définir les normes pour les réseaux mobiles. 5G NR est conçu pour être compatible avec les réseaux existants, mais il introduit de nouvelles fonctionnalités telles que l'utilisation de bandes de fréquences plus élevées, la technologie de beamforming (voir page 14), les antennes massives, la modulation de phase, etc. Pour fournir des débits de données plus rapides, une capacité accrue, une couverture plus étendue, une faible latence et une consommation d'énergie réduite.

En résumé, 5G est la nouvelle génération de technologie de communication sans fil, tandis que 5G NR est la spécification technique de la technologie radio utilisée pour la communication sans fil 5G.

4. Numérolgies et structure de trame 5G

Le terme numérolgie fait référence à la configuration des paramètres de forme d'onde, et différentes numérolgies sont considérées comme des sous trames basées sur OFDM ayant différents paramètres tels que l'espacement des sous-porteuses, la durée du symbole, la taille du préfixe cyclique (CP). Autrement dit une numérolgie est définie par l'espacement des sous-porteuses et l'entête du CP. Plusieurs espacements de sous-porteuses peuvent être calculés en mettant à l'échelle un espacement de base de sous-porteuses par un entier N. La numérolgie utilisée peut être sélectionnée dépendamment de la bande de fréquence, mais il est supposé que cet espacement soit très faible pour des fréquences de porteuse très élevées. En bref, on retrouve dans la NR le principe de numérolgie qui repose sur une multiplication de l'espacement des sous porteuses. En effet, en augmentant la largeur d'une sous porteuse par multiplication par un facteur de deux de cette sous-porteuse, on arrive à augmenter la largeur de la bande totale et par conséquent

on arrive à augmenter le débit de transmission. La structure de trame pour les différentes numérolgies est montrée par la figure 1.

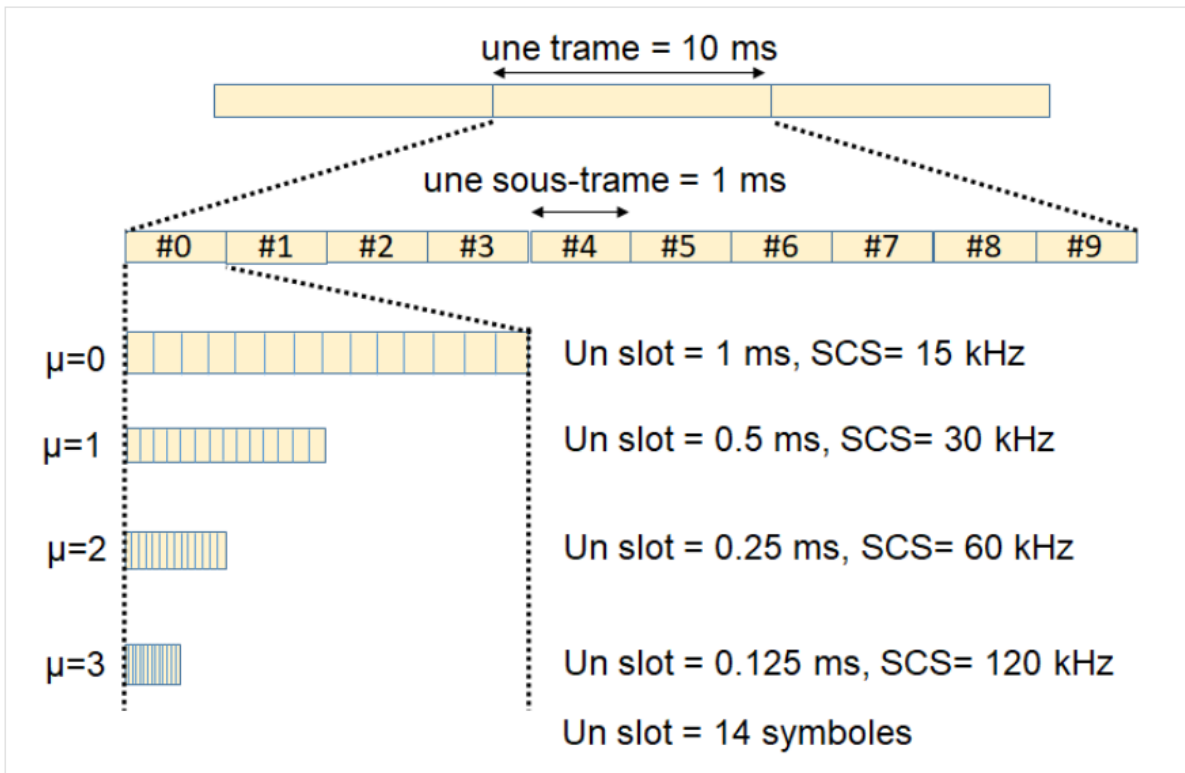


Figure 1. La trame temporelle 5G-NR

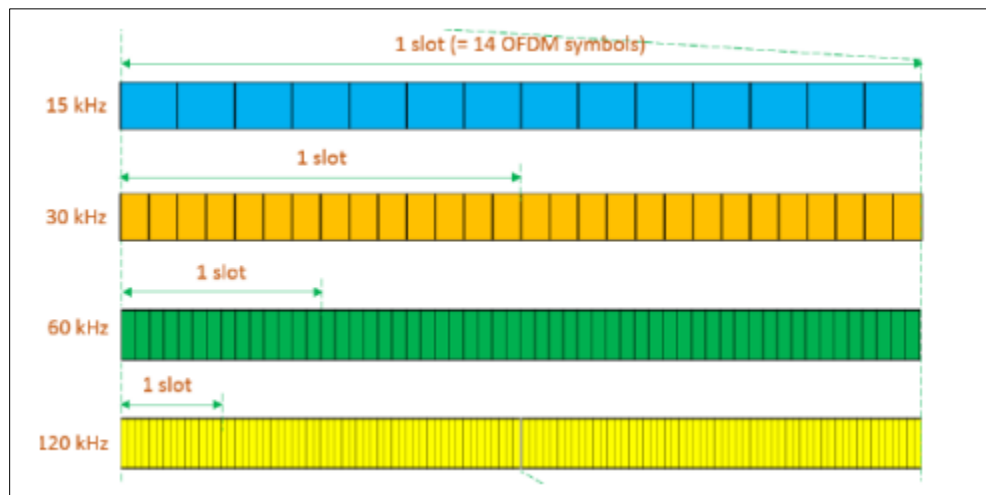


Figure 2. Alignement temporel pour les différentes numérolgies

La figure 2 illustre les symboles OFDM et les emplacements pour différentes numérolgies: 15 KHz, 30 KHz, 60 KHz et 120 KHz. Nous observons qu'un nombre entier d'emplacements d'une numérolgie (avec un espacement de sous-porteuses plus large) s'inscrit dans un slot d'une autre

numérologie (avec un espacement de sous-porteuses plus étroit). Cet alignement temporel des slots est important pour les réseaux TDD afin de permettre des périodes de transmission de liaison montante et de liaison descendante alignées dans le temps.

5. Système et architecture d'un réseau cellulaire 5G

Le réseau cellulaire connecte les terminaux mobiles au réseau Internet Protocol (IP) (c'est-à-dire le réseau de données par paquets ou PDN). Tant pour les réseaux LTE que pour les réseaux 5G, il se compose de deux parties.

- Le réseau d'accès radio RAN (Radio Access Network): E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) pour LTE, et NG-RAN (New Generation-RAN), le réseau d'accès radio de nouvelle génération pour la 5G.
- Le cœur de réseau mobile MNC (Mobile Network Code): EPC le cœur de paquets évolué pour LTE, et 5GC (5G Core) pour la 5G. Comme montré par la figure 3.

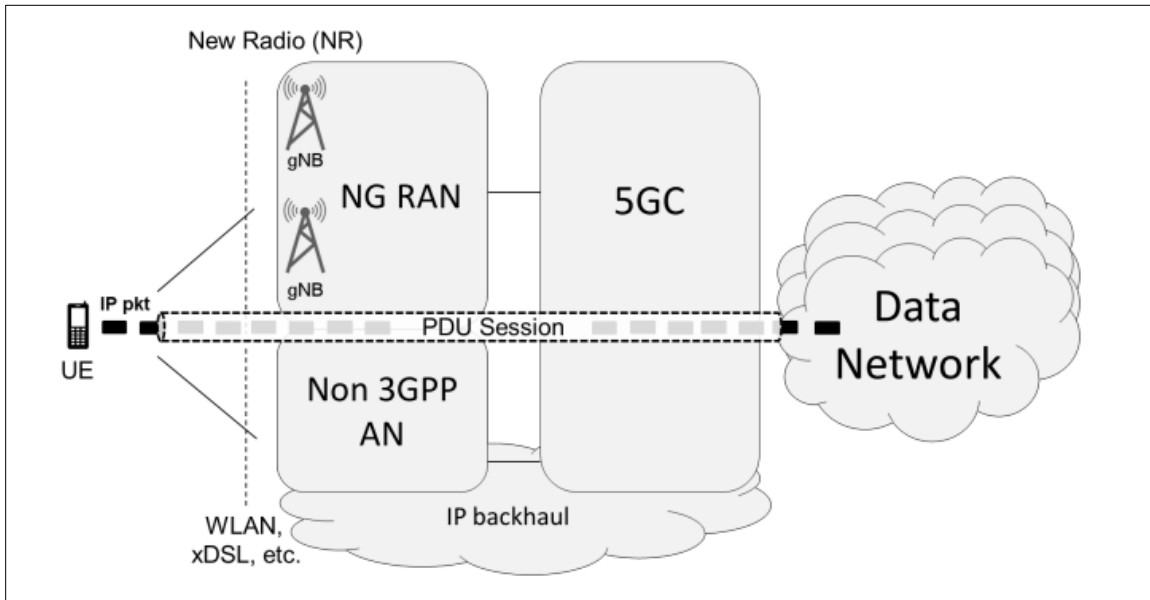


Figure 3. Architecture réseau 5G

5.1. L'Équipement Utilisateur (UE)

Le terminal mobile UE (User Equipment) utilisé dans le réseau 5G possède la même définition que dans les réseaux 3G et 4G. Il peut s'agir d'un smartphone, d'une tablette, d'un ordinateur portable ou d'un autre type d'appareil mobile. Il joue un rôle central dans la communication entre l'utilisateur et le réseau. Chaque UE ou abonné est identifié par un SUPI (SUBscription Permanent Identifier), qui est une extension de l'IMSI (International Mobile Subscriber Identity) utilisé dans la 3G. L'UE est également identifié temporairement par GUTI (Globally Unique Temporary UE Identity) attribué localement par le réseau visité. Les équipements utilisateurs (UE_s) se connectent au réseau 5G via le nouveau réseau d'accès radio 5G au cœur du réseau 5G, puis aux réseaux de données (Data Network), comme l'internet [2](#).

Lorsqu'une connexion 5G est établie, l'UE se connecte simultanément aux réseaux 5G. Le réseau est utilisé pour la signalisation de base, tandis que le réseau 5G est utilisé pour la transmission des données. Cette Double connectivité 5G-LTE permet à l'UE de bénéficier des fonctionnalités des deux réseaux pour assurer une expérience de communication optimale.

5.2. Le réseau d'accès

Le réseau d'accès radio (RAN) se compose de cellules desservies par une ou plusieurs stations de base BS (Base Station) et des UE_s. La zone couverte par une cellule dépend de la densité des UE_s, de la géographie de la région, de la puissance de l'antenne et de la fréquence utilisée. Les BS fournissent des fonctionnalités radio (radiofréquence, amplification de puissance, formation de faisceaux, etc.), un traitement de la bande de base (codage des données, modulation, mappage des ressources radio, etc.) et des protocoles de liaison radio couche 2 (contrôle d'accès au support (MAC), contrôle de liaison radio (RLC), protocole de convergence des données en paquets (PDCP), protocole de contrôle des ressources radio (RRC)). Les BS sont connectées entre elles par une interface X₂ (X_n dans la 5G) pour gérer la mobilité d'un utilisateur entre les cellules avec une procédure de transfert (c'est-à-dire la migration du contexte utilisateur et des données d'une cellule à une autre). Les BS coopèrent pour offrir le meilleur débit et une efficacité énergétique optimale (par exemple, en répartissant les UE_s connectées entre les BS pour partager la charge du trafic). De plus, la 5G est conçue pour fonctionner avec le réseau LTE [2]. C'est nécessaire dans le cas de la 5G en mode NSA (non-autonome) car la gestion est assurée par l'eNB et l'EPC.

5.3. Le réseau cœur (Mobile Core Network)

Le cœur de réseau mobile, avec un accent sur le plan utilisateur, est l'endroit où les supports radio se terminent. Les flux de trafic du plan de contrôle et du plan utilisateur sont acheminés respectivement par la passerelle de service (SGW) vers les fonctions du réseau et par la passerelle de paquets (PGW). Le trafic du plan utilisateur est ensuite dirigé vers la PGW, qui sert de passerelle IP pour l'EPC. La PGW agit comme un proxy qui attribue des adresses IP aux utilisateurs et les connecte au PDN. L'architecture du 5GC a été repensée pour être plus flexible et plus ouverte, avec une stratégie "native cloud". Le principe est le même : la fonction de plan utilisateur UPF (User Plan Fonction) joue le rôle de la PGW et assure la connectivité du trafic utilisateur vers Internet, tandis que la fonction de gestion de l'accès et de la mobilité (AMF) joue le rôle de la SGW en termes de gestion de la mobilité et de l'accès. La nouvelle architecture du cœur 5G est conçue pour gérer les flux de bout en bout dans le réseau mobile conformément au nouveau cadre de qualité de service (QoS).

5.4. La couche physique

La couche physique contient les fonctions de traitement de signal numérique et analogique utilisées par les appareils mobiles et les stations de base pour envoyer et recevoir des informations. Elle est basée sur l'OFDMA, avec un espacement adaptatif des porteuses ou une numérotation (15, 30, 60, 120, 240 kHz) et un schéma adaptatif de modulation/codage. Elle permet également des transmissions à faible latence et le déploiement de la technologie massive MIMO.

La flexibilité est la caractéristique clé de la couche physique de la NR. La norme a été conçue pour offrir un cadre technologique général qui peut répondre aux différentes exigences de la 5G, même lorsqu'elles sont contradictoires. De plus, la NR est conçue pour être compatible avec les futures évolutions, ce qui lui permet de prendre en charge les applications et les cas d'utilisation à venir.

6. Options de configuration d'un réseau 5G

La figure 4 [3] montre les options de configuration NSA et SA. En réalité, le 3GPP spécifie sept options de configuration, même si les options NSA (Non-Standalone) et SA (Standalone) sont les plus populaires [2].

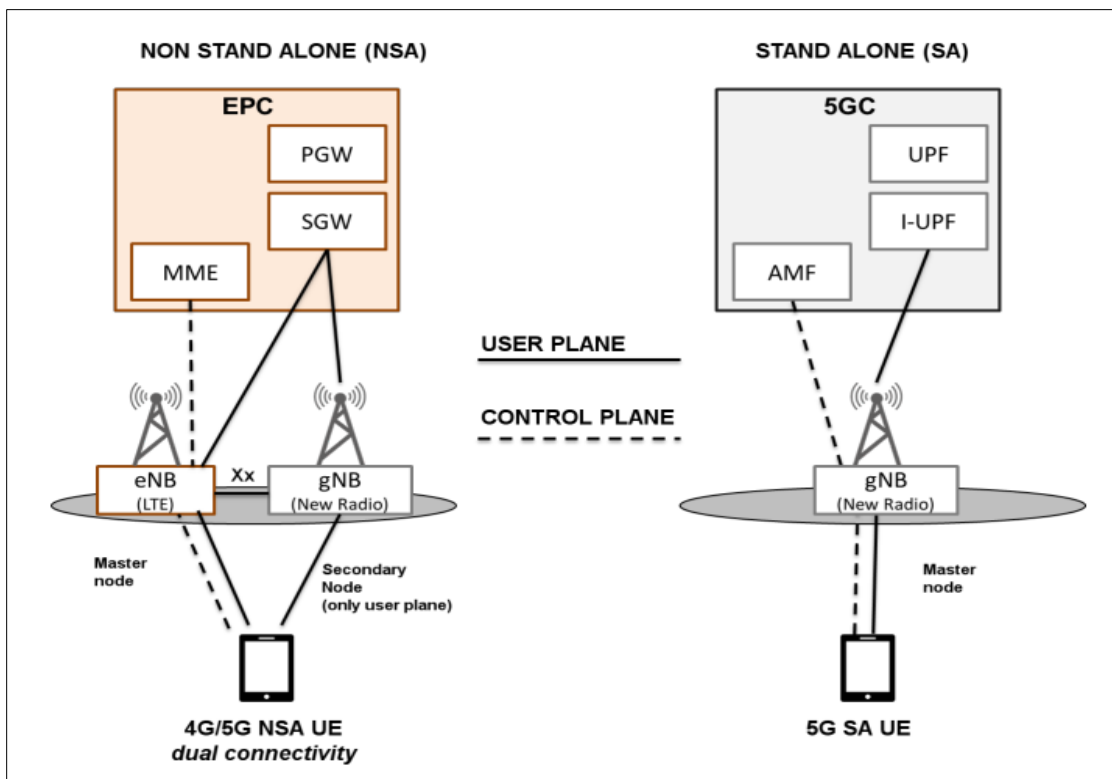


Figure 4. Options de configuration 5G.

6.1. La configuration SA

La configuration finale Standalone (SA), dans laquelle la NR 5G est connectée au cœur 5G, simplifie l'architecture et améliore son efficacité en permettant l'utilisation des technologies cloud. Cela réduit les coûts et améliore progressivement les performances en termes de débit jusqu'au cœur du réseau, tout en soutenant le développement de nouveaux cas d'utilisation mobiles nécessitant un positionnement spécifique des fonctions réseau, par exemple pour réduire la latence [3].

6.2. La configuration NSA

La configuration NSA nécessite des UE_s prenant en charge la connectivité double : LTE et 5G NR. Tout le signal de contrôle est géré par la radio LTE et le cœur EPC, tandis que les paquets du plan utilisateur peuvent passer par la radio LTE et/ou la NR 5G. L'eNB joue le rôle de nœud maître et planifie l'utilisation des ressources en liaison montante et descendante pour les interfaces radio et 5G [3].

Nous soulignons qu'avec la configuration NSA, de nombreux avantages offerts par le cœur du réseau 5G, tels que le découpage en tranches (Slicing) et la sécurité 5G, ne peuvent pas être utilisés. Cependant, les fonctionnalités de la NR 5G, telles que l'exploitation optimale de la bande passante radio avec la numérotation OFDM et les transmissions à faible latence, peuvent être exploitées immédiatement [3].

6.3. Vers un réseau virtualisé Cloud RAN

La conception de la NR pour la 5G a été axée sur la flexibilité afin de répondre aux différents cas d'utilisation. Cela a conduit à l'émergence de deux tendances technologiques : la désagrégation et le CRAN (Cloud Radio Access Network), ainsi que la virtualisation. Dans les réseaux LTE, les équipements et serveurs sont déployés de manière autonome, mais avec la NR, le gNodeB peut être divisé en unités physiques distinctes : le DU (Distributed Unit), qui contient les couches inférieures de la pile de protocoles et est déployé sur le terrain, et le CU (Centralized Unit), qui intègre les fonctionnalités complètes de la pile de protocoles et peut être co-localisé avec le DU ou hébergé dans un centre de données selon le paradigme CRAN.

Cela permet aux opérateurs de réseau de déployer la 5G en fonction des cas d'utilisation souhaités, tels qu'un déploiement ultra-dense de petites cellules avec une faible utilisation mais un débit crête élevé, ou un déploiement rural à faible densité pour prendre en charge les applications IoT [3].

La NR introduit des options de déploiement flexibles avec la désagrégation du gNodeB en DU et CU, ainsi que la possibilité de relier la NR à l'infrastructure LTE et EPC existante. Cela permet aux opérateurs de réseau de personnaliser leur déploiement en fonction des besoins spécifiques des cas d'utilisation de la 5G. comme c'est illustré par la figure 5.

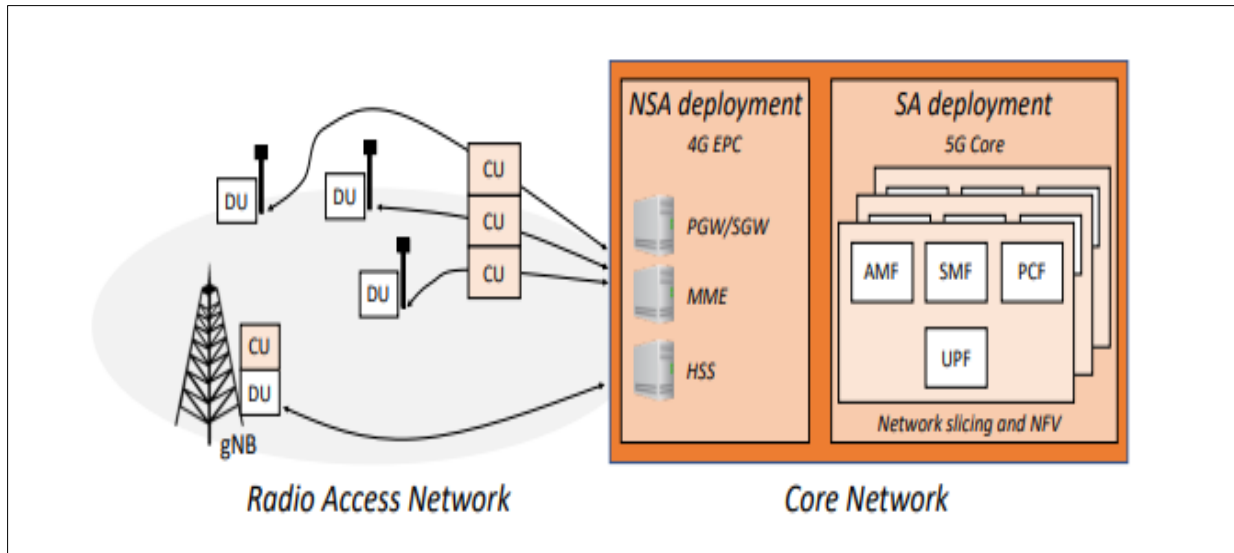


Figure 5. Différents modes de déploiement et d'exploitation pour le RAN NR 5G

7. Spectre de fréquence

Le spectre a été au cœur de toute l'évolution technologique de la 1G à la 5G et de la demande qui exige que le spectre soit utilisé efficacement et que des processus efficaces de gestion du spectre et des systèmes informatisés soient mis en œuvre pour faciliter le déploiement des systèmes radioélectriques et assurer un minimum d'interférence.

Le spectre de la 5G peut être largement divisé en trois :

- **1GHz** : couverture haut débit IoT.
- **1-6 GHz** : application de couverture et de capacité.
- **> 6 GHz** : haut débit mobile à très haut débit.

8. Technologies clés

8.1. Modulation OFDM et OFDMA

L'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de modulation multi-porteuses à base de transformée de Fourier rapide. L'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) est basée sur la technologie OFDM qui subdivise la bande passante disponible en une multitude de sous-porteuses mutuellement orthogonales plus étroites, qui peuvent transporter des flux d'informations indépendants. L'OFDMA peut assigner une sous-porteuse à plusieurs utilisateurs à des intervalles de temps différents avec des caractéristiques variables.

Le bloc de ressource (RB) est le plus petit élément qui constitue les ressources physiques en LTE et 5G, c'est une grille, composée d'éléments de ressource (RE). Dans le domaine des fréquences, comme le montre la figure 6, la largeur de bande du système OFDMA est de 180 kHz et comprend 12 sous-porteuses de 15 kHz dans chaque RB. L'espace est effectué de telle sorte que les sous-porteuses restent orthogonales et n'interfèrent pas l'une avec l'autre. Dans le domaine temporel, le temps de transmission est divisé en trames d'une longueur de 10 millisecondes (ms), chaque trame est divisée en 10 sous-trames de longueur égale de 1 ms. Chaque sous-trame, correspondant à un intervalle de temps de transmission (TTI) est divisée en deux tranches de temps de taille égale de 0,5 ms, chacune d'elles se compose de sept symboles OFDM en fonction du choix du préfixe cyclique, comme le montre la figure 6 [4].

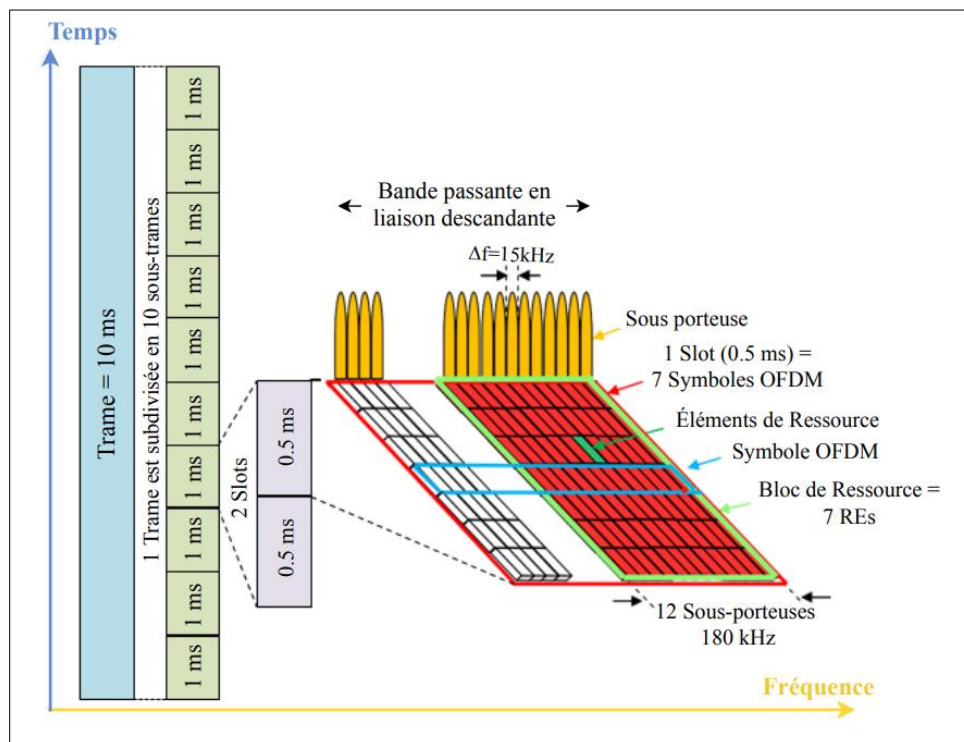


Figure 6. Trame et grille de ressources en OFDMA

8.2. OMA et NOMA

OMA (Orthogonal Multiple Access) est un système classique d'accès multiple orthogonal dont on attribue à des utilisateurs des ressources radios qui sont orthogonales dans le domaine du temps, des fréquences ou des codes. Dans l'OMA, en raison de l'attribution orthogonale des ressources, il n'y a pas d'interférences entre les utilisateurs multiples de sorte qu'une simple détection à utilisateur unique peut être utilisée pour séparer les signaux des différents utilisateurs. L'OMA à répartition orthogonale de la fréquence, combine les domaines temporel et fréquentiel et a été intégrée à la LTE [5].

Pour la 5G NR, l'adoption d'une OMA basée sur le multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM) implique des différences significatives liées, entre autres, au fait que la NR

prend en charge différentes numérations en fonction de l'espacement des sous-porteuses sélectionnées. Récemment, le NOMA (Non Orthogonal Multiple Access) a été étudié pour traiter les problèmes de l'OMA. NOMA est une technique d'accès non orthogonale qui est basée sur le multiplexage en puissance, son principe se résume à servir plusieurs utilisateurs au sein de la même ressource (temps, fréquence, espace ou code) et qui permet de contrôler les interférences et l'amélioration de l'efficacité spectrale [6].

8.3. MIMO massive

Cette technologie se caractérise par l'utilisation d'un nombre élevé de micro antennes « intelligentes » sur un seul équipement (de 8 à 128 actuellement) [7]. Ces antennes permettent de former des faisceaux très directifs vers les terminaux, qu'ils soient fixes ou en mouvement. Les antennes Massive MIMO permettent d'atteindre un débit et une capacité de transmission de données inaccessibles aujourd'hui. En effet, cette technologie permet à la fois d'augmenter la portée des stations de base et d'améliorer l'efficacité énergétique.

8.4. Beamforming

Le beamforming est une technique utilisée dans les systèmes de communication sans fil pour améliorer le rapport signal sur bruit des signaux reçus, éliminer les sources d'interférences indésirables et focaliser les signaux transmis vers des emplacements spécifiques. Dans la 5G NR, le beamforming est utilisé pour améliorer la qualité de la connexion en focalisant les faisceaux plus étroitement vers des équipements d'utilisateur individuels (UE), permettant des densités de connexion plus élevées et minimisant les interférences. Le beamforming est central pour les systèmes avec des réseaux de capteurs, y compris les systèmes de communication sans fil MIMO tels que 5G, LTE et WLAN (Wireless Local Area Network). Il existe différents types de techniques de beamforming, notamment le beamforming analogique, le beamforming numérique et le beamforming hybride. Le beamforming numérique est utilisé dans la 5G NR pour améliorer la capacité cellulaire, tandis que le beamforming analogique est considéré comme obligatoire pour la plage de fréquences mmWave de la 5G NR. Le beamforming hybride combine les techniques de beamforming analogique et numérique [8].

9. Services de la 5G

La 5G est la première génération de téléphonie mobile à être conçue pour des cas d'usage autres que la voix et la donnée. Les cas d'usage de la 5G se définissent selon les trois catégories suivantes :

- **L'eMBB** pour enhanced Mobile Broad Band, c'est-à-dire les communications mobiles ultra-hautes débit. Cet usage se trouve dans la continuité des précédentes générations de téléphonie mobile et permet de répondre à l'augmentation exponentielle de l'utilisation des données mobiles. Les applications de cette catégorie sont typiquement des flux vidéo de qualité de plus en plus grande et aussi des applications de réalité virtuelle et augmentée. L'objectif est donc de pouvoir répondre à une demande toujours plus grande en termes de quantité de données et de vitesse de transfert.

- **Le mMTC** pour massive Machine Time Communication, c'est-à-dire les communications entre objets. L'internet des objets rentre dans cette catégorie. Il s'agit dans cette catégorie de pouvoir gérer un nombre très important de connexions (jusqu'à un million par kilomètre carré). La quantité de données à transmettre par communication est en général limitée et la rapidité de transfert peu contraignante. Un domaine d'application typique est la ville intelligente avec des réseaux de capteurs pour gérer différents services.
- **L'uRLLC** pour ultra Reliable Low latency Communication, c'est-à-dire les communications dites critiques, pour lesquelles la fiabilité et le temps de réponse sont primordiaux. L'application phare de cette catégorie est le véhicule autonome mais les communications des services de sécurité et d'urgence sont également concernées. Il ne doit pas y avoir d'échec ou de coupure de communication et la transmission doit être la plus rapide possible.

10. Avantages et inconvénients des réseaux 5G

Ce nouveau réseau mobile 5G présente des avantages, à savoir :

- Du point de vue de la vitesse de transmission, la technologie 5G confèrera une importance croissante : des débits actuels de 100 Mb/s atteignant les sommets vertigineux de 10 Gbit/s. En termes de réduction de la latence, augmenter la réactivité en divisant la latence par dix.
- En parlant de connexions de masse, de nombreux utilisateurs pourront se connecter simultanément (simultanément), en maintenant une bonne connexion.
- En ce qui concerne les objets communicants, tous les objets couramment utilisés peuvent être facilement connectés au réseau à moindre coût.
- Consommation d'énergie, la 5G est plus efficace en termes de performances tout en consommant moins d'énergie.

Inconvénients

- L'impact des antennes-relais sur la santé et l'environnement fait encore débat, la perspective de leur augmentation massive suscite déjà l'inquiétude.
- Beaucoup d'anciens appareils ne seraient pas adaptés pour la 5G.
- Le développement de l'infrastructure nécessite des coûts élevés.
- La sécurité et de la protection de la vie privée n'a pas encore été résolue.

11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un bref aperçu de l'évolution des cinq générations en commençant de la 1G à la 5G des réseaux de communications cellulaires. Nous avons aussi abordé la technologie de sixième génération. Par la suite, nous avons également abordé la 5G NR (New Radio), son architecture radio, son déploiement ainsi que les différents types d'interférences présentes dans les réseaux cellulaires. Pour conclure, la 5G sera une révolution industrielle, prête à venir bouleverser notre quotidien.

Chapitre 2

Allocation de ressources dans les réseaux cellulaires

1. Introduction

L'efficacité et la performance des systèmes de communication sans fil dépendent en grande partie de la manière dont les ressources radio sont allouées et ordonnancées. Dans ce chapitre, nous explorons les différents algorithmes d'ordonnancement utilisés pour optimiser l'utilisation des ressources radio et améliorer les performances des réseaux sans fil. Nous examinerons également les principes fondamentaux de l'allocation des ressources radio et les facteurs qui influencent les décisions d'ordonnancement, en comprenant les mécanismes et les techniques de chaque algorithme.

2. Allocation de ressource radio

L'allocation et la gestion des ressources radio (AGRR) constituent un défi essentiel dans les réseaux de communication sans fil modernes. Cette tâche complexe est réalisée dans l'eNB et nécessite de prendre en compte plusieurs facteurs simultanément, en temps réel. Les algorithmes d'allocation des ressources radio visent à améliorer l'efficacité spectrale et l'équité dans le réseau. Il est donc crucial de trouver un compromis entre l'efficacité, en augmentant le débit, et l'équité entre les utilisateurs [9].

L'architecture des réseaux LTE repose sur l'eNodeB, dont la présence est essentielle pour le RRM (Radio Resource Management). Le RRM a pour objectif d'optimiser la répartition des ressources radio entre les équipements utilisateurs (UE) en gérant les demandes de connexion au réseau. Composé du contrôle d'admission (AC) et de l'ordonnancement des paquets, nous nous concentrons ici sur ce dernier. L'ordonnancement des paquets, ou Packet Scheduling (PS) alloue efficacement les ressources radio dans les deux directions, à savoir sur la voie montante (Uplink) et la voie descendante (Downlink).

Dans les réseaux cellulaires, l'ordonnanceur détermine l'accès au canal en se basant sur les informations du CQI. Cette information, liées au gain de canal et affectées par les pertes de trajets, l'effet de masque et l'évanouissement par trajets multiples, est connue par la station mobile et la station de base. L'allocation des sous-porteuses est gérée par la station de base, et les utilisateurs sont informés des sous-porteuses qui leur sont assignées, comme c'est illustré par la figure 7 [11].

Dans le but d'améliorer les performances du système, les algorithmes d'allocation des ressources radio se concentrent sur l'efficacité spectrale et l'équité dans le réseau. Ils doivent trouver un équilibre entre l'efficacité, c'est-à-dire l'augmentation du débit, et l'équité entre les utilisateurs. La littérature propose différentes familles ou catégories d'algorithmes regroupant ceux qui partagent des caractéristiques similaires. Les algorithmes opportunistes, tels que PF (Proportional

Fair), EXPPF (Exponential Proportional Fair) et M-LWDF (Maximum Largest Weighted Delay First) [10].

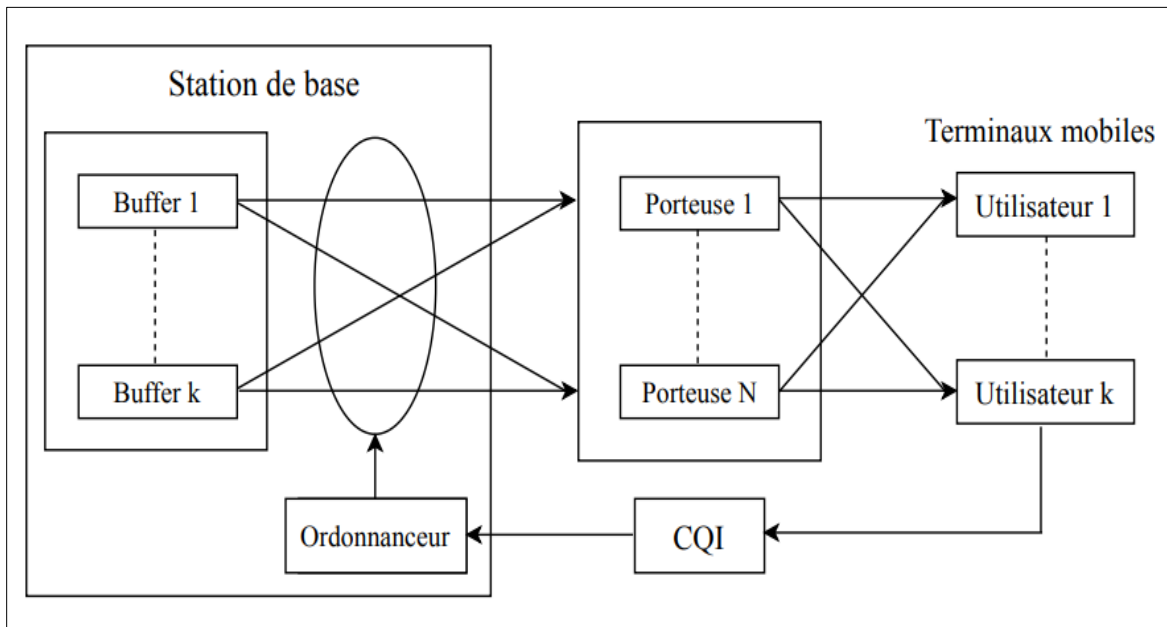


Figure 7. Fonctionnement d'un ordonnanceur dans une BTS.

2.1. Définition de l'ordonnanceur

D'après Pinedo [12], l'ordonnancement est défini comme: "L'ordonnancement concerne l'affectation de ressources limitées aux tâches dans le temps, c'est un processus de prise de décision dont le but est d'optimiser un ou plusieurs objectifs".

Dans notre cas les logiciels d'ordonnancement peuvent analyser les données et organiser les tâches en fonction des contraintes et des ressources disponibles (temps et bande de fréquence) c'est-à-dire en bloc de ressource [13].

3. Facteurs influençant la décision d'ordonnancement

Les décisions de l'ordonnanceur dans le réseau reposent souvent sur les rapports CSI (Channel State Information) fournis par les appareils. L'algorithme d'ordonnancement collecte différentes mesures à partir des rapports fournis par l'équipement utilisateur afin de générer une métrique qui détermine quand l'utilisateur peut utiliser le canal. Cette sous-section examine en détail les entrées de l'ordonnanceur et met en évidence l'influence de ces paramètres sur les résultats des algorithmes de l'ordonnanceur [13].

3.1. Indicateur de qualité de canal

L'indicateur de qualité de canal est un entier codé sur 4 bits, ce qui signifie que sa valeur peut varier de 0 à 15. 0 indique une mauvaise condition de canal, tandis que 15 représente le meilleur cas possible. Les valeurs de CQI rapportées sont essentielles pour les décisions d'allocation de

ressources, car les utilisateurs bénéficiant de conditions de canal appropriées obtiennent de meilleures performances. Le module AMC (Adaptive Modulation and Coding) sélectionne le schéma de modulation et de codage (MCS) adapté correspondant à la valeur de CQI pour déterminer le nombre de bits par élément de ressource (RE). Ainsi, le CQI affecte le débit activé. Autrement dit, une valeur de CQI élevée permet d'obtenir des débits de données élevés.

3.2. Débit moyen

Le débit moyen de l'utilisateur U_i dans le précédent intervalle de temps de transmission (TTI) fournit des informations sur l'historique de l'allocation des ressources, ce qui contribue à améliorer l'équité du partage des ressources en donnant une priorité plus élevée aux utilisateurs ayant obtenu les débits les plus faibles par le passé. Le débit moyen instantané réalisé $R_i(t)$ est mis à jour à chaque TTI en utilisant le débit de données réalisé précédent $R_i(t - 1)$ et le débit de transmission actuel réalisable $r_i(t)$. Cette mise à jour tient compte de la valeur CQI actuelle de l'utilisateur i .

3.3. État de la file d'attente au niveau du buffer

Les paramètres d'état de la file d'attente et de niveau de buffer fournissent des informations sur la quantité de données à transférer, respectivement, lors de la liaison descendante et de la liaison montante. Ces paramètres permettent une allocation flexible des ressources radio en prenant en compte le flux de données présent dans le buffer ou la file de transmission de chaque utilisateur. Par conséquent, l'état de la file d'attente et du buffer influence la décision d'allocation des ressources en accordant plus de ressources aux utilisateurs ayant une grande quantité de données à transférer. Cela permet de réduire la latence et d'améliorer la fiabilité du système

3.4. Délai du paquet en tête de file D_{HOL}

Le paramètre D_{HOL} (Délai du paquet en tête de file) mesure le temps qu'un paquet passe dans le buffer avant d'être envoyé. L'équation (1) permet de calculer le D_{HOL} à l'instant t , où t_0 représente le moment auquel le paquet entre dans le buffer de l'eNodeB. Cette métrique vise à maximiser le temps d'attente en tête de file de l'utilisateur afin de garantir une livraison des paquets avec un délai minimal.

$$D_{HOL} = t - t_0 \quad (1)$$

3.5. Indicateur de classe de qualité de service

L'identificateur de classe de qualité de canal (QCI), fait référence aux exigences de qualité de service pour différents cas d'utilisation et applications. Le QCI est une donnée essentielle pour les ordonnanceurs prenant en compte la QoS, car il spécifie le niveau de priorité, le type de flux, le délai de transmission toléré et les limites de perte de paquets pour chaque application. Le QCI influence la décision d'allocation des ressources en accordant la priorité aux utilisateurs ayant un délai de transmission court ou un niveau de priorité élevé. De plus, il conditionne les retransmissions HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) pour répondre aux limites de perte de paquets de certains services. Par ailleurs, d'autres paramètres configurables peuvent également influencer la décision de l'ordonnanceur, tels que le contrôle du canal RRC de la couche 3, le SINR

(rapport signal sur interférence plus bruit) et les paramètres d'adaptation de liaison fournis par la couche physique.

4. Mesures d'évaluations de performances

L'évaluation des performances des algorithmes d'ordonnancement dans les réseaux cellulaires 5G est essentielle pour garantir une utilisation efficace des ressources et une expérience de qualité pour les utilisateurs. Ces mesures d'évaluation permettent de quantifier et d'analyser la performance des algorithmes en termes d'efficacité spectrale, d'équité entre les utilisateurs, de latence et de fiabilité des communications.

4.1. Délai

Le délai mesure le temps écoulé entre l'envoi et la réception d'un paquet par l'utilisateur final. Cette métrique de performance évalue le délai perçu pour recevoir avec succès les paquets. L'expression (2) détaille son calcul :

$$\text{Délai} = T_{rx} - T_{tx} \quad (2)$$

Où T_{rx} correspond à l'instant d'arrivée des données et T_{tx} est le moment de la transmission.

4.2. Débit

Un débit élevé est l'objectif principal en termes de performance des réseaux mobiles, quelle que soit leur génération. L'équation (3) montre que le débit correspond au pourcentage de transfert de données par rapport au temps d'envoi.

$$\text{débit} = \frac{\sum \text{taille de paquet Rx}}{\text{délai de livraison}} \quad (3)$$

4.3. Goodput

Le goodput est un indicateur essentiel de performance qui permet de classer les ordonnanceurs en fonction de leur débit de données réel. Il est calculé en divisant les bits de charge utiles transmis avec succès à l'utilisateur par le temps de transfert. La différence entre le débit et le goodput réside dans les bits qui sont effectivement livrés avec succès, car le goodput ne prend pas en compte les bits de contrôle de l'en-tête ni les paquets retransmis. Il est important de noter que ni le goodput ni le débit ne tiennent compte des paquets perdus.

Le goodput est exprimé par l'équation (4)

$$\text{goodput} = \frac{\text{données original}}{\text{temps}} \quad (4)$$

4.4. Équité

La métrique d'équité évalue la capacité du réseau à répartir équitablement les ressources radio disponibles entre les utilisateurs. Les calculs d'équité varient d'un article à l'autre. L'indice le plus fréquemment utilisé est l'indice de Jain [5], qui est calculé selon l'équation (5).

$$\text{indice d'équité} = \frac{(\sum x_i)^2}{n \times \sum x_i^2} \quad (5)$$

Dans cette équation, x_i représente le débit de l'utilisateur i , et n est le nombre total d'appareils.

4.5. Taux de perte de paquets

Le taux de perte de paquets est une mesure essentielle dans les réseaux mobiles de cinquième génération, en particulier pour les services de communication ultra-fiables et critiques. Cette métrique permet de calculer la proportion de paquets qui ont été reçus avec succès par rapport au nombre total de paquets envoyés, comme décrit dans l'équation (6).

$$\text{TPP} = \frac{\text{paquets envoyés} - \text{paquets reçus}}{\text{paquets envoyés}} \quad (6)$$

4.6. Efficacité spectrale

En raison des ressources radio limitées, une utilisation efficace du spectre est nécessaire pour améliorer la qualité de service (QoS). La métrique de l'efficacité spectrale calcule le rapport du débit de données moyen à la largeur de bande (bits par seconde par Hertz) à l'aide de l'expression suivante (7) afin d'évaluer l'efficacité du réseau dans la gestion des ressources radio.

$$\eta = \frac{R}{B} \quad (7)$$

Avec, R représente le débit binaire moyen et B représente la largeur de bande nécessaire pour la transmission.

5. Les algorithmes d'ordonnement

Les algorithmes d'allocation de ressources radio visent à améliorer les performances du système en augmentant l'efficacité spectrale et l'équité dans le réseau. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre l'efficacité (augmentation du débit) et l'équité entre les utilisateurs. La littérature propose plusieurs familles ou catégories d'algorithmes, où chaque famille regroupe un ensemble d'algorithmes ayant des caractéristiques communes.

5.1. Notion de métrique

Les algorithmes d'ordonnement sont basés sur un certain nombre de métriques pour performer des décisions d'allocation de ressources radio. L'allocation des ressources radio en termes de RB_s aux UE_s actifs est généralement basée sur le principe suivant [14]:

Soient N le nombre d'utilisateurs et K le nombre de RB_s qui sont disponible dans un TTI donné. Désignons par $W_{i,k}$ la métrique d'ordonnement de l'UE d'indice i (UE_i) correspondant au $k^{\text{ème}}$ RB (RB_k). Ce dernier est alloué à l' $i^{\text{ème}}$ utilisateur si la métrique de ce dernier est la plus grande parmi les métriques de tous les autres utilisateurs.

$$W_{i,k} = \max W_{j,k} \quad (1 \leq j \leq N) \quad (8)$$

Avec N étant le nombre de UE_s actifs.

Ces métriques expriment une priorité de transmission de chaque utilisateur dans un RB spécifique. Elles sont évaluées à partir des informations relatives à chaque flux et quantifient des exigences de performances généralement établies dans des SLA (Service Level Agreement). La métrique est déterminée en tenant compte de l'équité, de l'efficacité spectrale et de la QoS.

5.2. Algorithmes classiques

Plusieurs algorithmes d'allocation de ressource utilisés dans les réseaux filaires sont adoptés en environnement sans fil. Notamment, l'allocation aléatoire et l'algorithme Round Robin sont les deux plus connus, leur implémentation est très facile et ils servent régulièrement de référence en comparaison avec les ordonnanceurs modernes.

5.2.1. L'algorithme Round Robin (RR)

Est une stratégie classique d'allocation des ressources radio. Cette méthode alloue la même quantité de ressources à tous les utilisateurs en partageant le temps de manière équitable. Chaque utilisateur accède aux ressources à tour de rôle, en recevant une quantité fixe d'unités de ressources à chaque fois. Cela permet à chaque utilisateur d'accéder régulièrement au canal de communication, assurant ainsi un certain niveau d'équité. La métrique RR, exprimée par l'intervalle de temps ($t - T_{UE_i}$) mesure la période de temps écoulée depuis le dernier accès de l'utilisateur UE_i aux ressources radio (RB_s) jusqu'à l'instant courant t . Il est important de noter que cette mesure augmente proportionnellement avec le temps. En d'autres termes, $W_{i,k}$ (RR) représente l'intervalle de temps écoulé depuis la demande d'allocation du RB_k par l'utilisateur UE_i (T_{UE_i}) jusqu'à l'instant courant t . Cette mesure permet d'évaluer la priorité de l'utilisateur en termes de temps écoulé depuis sa dernière allocation de ressources.

5.2.2. L'algorithme d'allocation aléatoire (RA)

Également connu sous le nom de Random Access (RA), est une autre technique largement utilisée pour l'allocation des ressources. Cette méthode d'ordonnement est simple à mettre en œuvre et donc couramment utilisée. Elle consiste tout simplement à allouer les ressources radio de manière aléatoire entre les utilisateurs. Chaque utilisateur a statistiquement la même chance d'accéder au canal de communication, ce qui signifie qu'ils recevront, à moyen et long terme, un nombre égal d'unités de ressources, indépendamment de leurs besoins spécifiques. L'allocation aléatoire permet donc de distribuer les ressources de manière homogène sur le moyen et long terme, et cela conduit à des performances réseau similaires à celles obtenues avec le Round Robin. En d'autres termes, cette méthode assure une équité globale en garantissant que chaque utilisateur a une probabilité égale d'accéder aux ressources, ce qui se traduit par une répartition équitable des performances réseau.

5.3. Algorithmes équitables

Plusieurs travaux de recherches ont visé l'équité entre les utilisateurs dans les réseaux cellulaires, ces algorithmes apportent des améliorations et tentent de corriger les défauts des précédents ordonnanceurs. Plus complexes, ils permettent une meilleure efficacité.

5.3.1. L'algorithme Fair Queuing (FQ)

Le FQ est un algorithme qui vise à distribuer équitablement le débit entre tous les utilisateurs. Son fonctionnement repose sur l'idée de fournir à chaque utilisateur un débit égal, c'est-à-dire que pour K utilisateurs et un lien supportant un débit D , chaque utilisateur reçoit un débit de D/K . Bien que le Fair Queuing améliore l'équité, il présente les mêmes inconvénients que les algorithmes classiques, car il néglige toujours les besoins spécifiques des utilisateurs. Ainsi, les utilisateurs ayant besoin d'un débit plus élevé sont toujours pénalisés par rapport aux autres, ce qui entraîne une absence de qualité de service.

5.3.2. L'algorithme Max-Min Fair (MMF)

Le MMF est conçu pour distribuer les ressources entre les utilisateurs de manière successive, en vue d'augmenter le débit global de chaque utilisateur à long terme. Il fonctionne en allouant les ressources demandées par un utilisateur jusqu'à ce que son débit souhaité soit atteint, puis passe à l'utilisateur suivant. Ce processus se répète cycliquement jusqu'à ce que tous les utilisateurs soient satisfaits et que les ressources soient épuisées. L'algorithme MMF vise à répondre aux besoins des utilisateurs ayant des demandes de débit plus faibles, car leur débit souhaité est généralement disponible. En revanche, les utilisateurs ayant des demandes de débit plus élevées se partagent équitablement les ressources restantes, mais celles-ci sont souvent insuffisantes pour satisfaire pleinement leurs besoins. Il convient de noter que si tous les utilisateurs ont des besoins identiques, l'algorithme MMF équivaudrait à un ordonnancement Round Robin. Certains membres de la communauté scientifique considèrent que la qualité de service obtenue avec l'algorithme MMF est satisfaisante. Cependant, il est important de souligner que l'algorithme MMF n'est pas opportuniste, ce qui signifie qu'il offre par nature des débits plus faibles.

En résumé, l'algorithme Max-Min Fair vise à équilibrer la distribution des ressources entre les utilisateurs, privilégiant ceux ayant des besoins de débit plus faibles. Cela peut conduire à une répartition équitable, mais avec des débits relativement faibles pour les utilisateurs ayant des demandes plus élevées.

5.3.3. L'algorithme Weighted Fair Queuing (WFQ)

C'est une amélioration de l'algorithme FQ qui permet une différenciation des services en accordant une priorité aux utilisateurs ayant besoin d'un débit plus élevé. Cet algorithme utilise un système de marquage, également appelé pondération, pour donner plus de bande passante à certains flux. Cette approche permet de contrôler la qualité de service en favorisant certains flux par rapport à d'autres.

Le WFQ utilise la métrique $W_{i,k}$ (RR) de l'algorithme Round Robin (RR) pour déterminer l'accès aux ressources. Cependant, il introduit un facteur de pondération W_i , qui reflète la priorité attribuée

à chaque flux. Ce facteur de pondération est une constante comprise entre 0 et 1. Plus le W_i est élevé, plus le flux est considéré comme prioritaire dans l'allocation des ressources. La métrique $W_{i,k}$ (WFQ) utilisée dans le WFQ est calculée en multipliant la pondération W_i par la métrique $W_{i,k}$ (RR) de l'UE_i. Ainsi, l'accès aux ressources dépend à la fois de la priorité attribuée par la pondération et de la métrique RR de l'UE_i, qui mesure l'intervalle de temps depuis le dernier accès aux ressources.

En utilisant le WFQ, il est possible de garantir différents débits entre les utilisateurs en fonction de leurs priorités et de leurs besoins. Cela permet de maintenir une certaine équité en termes de satisfaction des contraintes de qualité de service, en accordant davantage de ressources aux flux prioritaires.

5.4. Algorithmes opportunistes

Des recherches ont montré que les algorithmes existants ne parviennent pas à exploiter pleinement la bande passante disponible ni à atteindre les limites théoriques du débit global. Pour résoudre ce problème, les ordonnanceurs opportunistes ont été développés. Ces derniers sont basés sur cette approche, utilisent des files d'attente infinies et cherchent à maximiser le débit global du système en exploitant les opportunités offertes par le canal radio. Ils tirent parti des moments où le canal présente de meilleures conditions pour transmettre des données, permettant ainsi d'atteindre des débits plus élevés. En résumé, les ordonnanceurs opportunistes sont des algorithmes efficaces pour optimiser l'utilisation des ressources radio et maximiser le débit global du système.

5.4.1. L'algorithme PF (Proportional Fairness)

C'est un ordonnanceur qui attribue les ressources radio en prenant en compte à la fois la qualité du canal et le débit utilisé par chaque utilisateur dans les intervalles de temps (TTI) précédents. Son objectif est de maximiser le débit global du système en augmentant simultanément le débit de chaque utilisateur, tout en garantissant l'équité entre les utilisateurs ou les flux. Pour mesurer cette équité, l'algorithme utilise une métrique définie comme le rapport entre le débit instantané disponible pour le flux i ($r_{i,j}$) et le débit moyen R_i (calculé à l'instant $k-1$) du flux i .

$$W_{i,j} = r_{i,j} / R_i \quad (9)$$

La valeur de $r_{i,j}$ est calculée par le module AMC en fonction de la valeur du CQI sur le sous-canal j , envoyé par l'UE auquel le flux i est destiné.

Grâce à cette stratégie d'allocation, seuls les appareils mobiles bénéficiant de conditions radio exceptionnellement bonnes sont sélectionnés, ce qui leur permet de tirer le meilleur parti des ressources en termes de débit. Cela permet d'atteindre une efficacité spectrale très élevée. De plus, à une échelle de temps courte, les variations de l'état des liens causées par l'affaiblissement de propagation sont négligeables, car chaque utilisateur peut être considéré comme statique. Les variations du signal et du débit sont donc principalement causées par les perturbations multi-trajets. Étant donné que ces perturbations sont statistiquement similaires pour tous les utilisateurs, le PF attribue finalement une part égale de la bande passante à tous les appareils mobiles, tout comme le ferait le RR (Round Robin), mais avec un débit beaucoup plus élevé. Ainsi, une quantité

équivalente d'unités de ressource est allouée à tous les utilisateurs, quelles que soient leurs positions.

Cependant, un inconvénient majeur demeure : les utilisateurs éloignés du point d'accès ont en moyenne une efficacité spectrale plus faible que les utilisateurs plus proches, ce qui signifie que tous les appareils mobiles ne bénéficient pas du même débit. Par conséquent, l'équité n'est pas totalement atteinte. De plus, l'algorithme PF ne prend pas en compte les contraintes de délai maximum à respecter pour les applications ni les débits souhaités, etc. Étant donné qu'il ne gère pas la différenciation de services, il est impossible de traiter les appareils mobiles avec des flux hétérogènes, des débits variables et des contraintes de qualité de service spécifiques. Par conséquent, le PF n'est pas adapté à la gestion des services multimédia.

En résumé, l'algorithme PF est considéré comme la meilleure stratégie actuelle d'allocation des ressources pour les réseaux sans fil, car il maximise le débit global du système tout en maintenant une certaine équité entre les utilisateurs. Cependant, il présente des limites en termes d'équité et ne prend pas en compte les contraintes spécifiques des différentes applications et services.

5.4.2. L'algorithme Modified Largest Weighted Delay First (LWDF)

Prend en charge les utilisateurs qui demandent plusieurs services avec des exigences de qualité de service (QoS) différentes. Pour les flux temps réel, l'ordonnanceur considère le délai maximal (Γ_i) et définit une probabilité (δ_i) comme la probabilité maximale que le délai du premier paquet de la file d'attente $D_{HOL,i}$ dépasse le délai maximal fixé. Dans le but de donner la priorité aux flux temps réel ayant le plus grand délai (délai du premier paquet de la file d'attente) et les meilleures conditions de propagation sur le canal radio, l'ordonnanceur utilise une métrique définie comme suit:

$$W_{i,j} = \alpha_i D_{HOL,i} \times [r_{i,j} / R_i] \quad (10)$$

α_i Est calculé comme $\alpha_i = -\log(\delta_i) / \Gamma_i$

R_i Représente le débit maximum pris en charge par le bloc de ressources (RB).

$r_{i,j}$ Correspond au débit associé au CQI de l'utilisateur U_i .

Pour le trafic non temps réel, la priorité est calculée de la même manière que pour l'algorithme (PF). L'objectif de cet algorithme est de favoriser le trafic temps réel afin de garantir une certaine qualité de service minimale tout en assurant une certaine équité entre les utilisateurs.

5.4.3. L'algorithme EXP-PF (Exponential Proportional Fair)

EXP-PF a été développé pour améliorer la priorité des flux temps réel tout en offrant une certaine satisfaction aux trafics non temps réel. Les flux temps réel ont des exigences de délai très proches du délai maximal. Pour ces flux, la métrique est calculée en utilisant les équations suivantes:

$$W_{i,j} = e^{(\alpha_i D_{HOL,i} - x / (1 + \sqrt{x})) r_{i,j} / R_i} \quad (11)$$

Les symboles ont la même signification que précédemment, et la valeur de x est donnée par

$$x = 1 / N_{rt} \sum \alpha_i / N_{rt_i} = 1 / D_{HOL,i} \quad (12)$$

Où N_{rt} est le nombre de flux temps réel actifs dans le sens descendant (DL). Par ailleurs, les métriques des trafics non temps réel sont calculées selon la métrique de l'algorithme PF. Dans l'algorithme EXP-PF, les paramètres $D_{HOL,i}$ et α_i définissent le niveau de qualité de service (QoS) requis par le flux.

Ces paramètres tentent de donner plus d'importance aux applications ayant un niveau de QoS plus élevé. Lorsque la partie exponentielle de la formule est égale à un, on retrouve la formule de l'algorithme PF. Cela se produit lorsque les flux ont des délais pratiquement identiques pour différents utilisateurs. Dans le cas de l'algorithme EXP-PF, les paquets temps réel dont le délai dépasse le délai maximal autorisé avant la transmission sont supprimés de la file d'attente au niveau de la couche MAC.

En résumé, l'algorithme EXP-PF vise à améliorer la priorité des flux temps réel tout en accordant une certaine satisfaction aux trafics non temps réel. Il utilise une formule exponentielle pour calculer la métrique des flux temps réel, en prenant en compte les paramètres de délai et de QoS spécifiques à chaque flux. L'algorithme EXP-PF permet ainsi de mieux adapter l'allocation des ressources aux besoins des différents types de trafic.

5.4.4. L'algorithme PSS (Priority Set Scheduler)

Le Priority Set Scheduler (PSS) est un ordonnanceur qui combine les fonctionnalités de FD (Frequency Distribution) et de TD (Time Division) dans le but de diviser les tâches en ensembles de priorité, appelés "ensembles de priorité". Chaque ensemble de priorité est associé à une période d'échéance, qui est le délai maximal dans lequel toutes les tâches de cet ensemble doivent être terminées. Les tâches dans chaque ensemble de priorité sont planifiées en fonction de leur ordre de priorité dans cet ensemble.

Les UEs avec la mesure de priorité la plus élevée sont ensuite transmises à l'ordonnanceur FD. Ensuite, les ressources radio pour chaque UE sont allouées en utilisant l'ordonnanceur PF (Proportional Fair) pour calculer la mesure de priorité. Dans le cas d'un nombre minimal d'UEs, l'ordonnanceur FD fournit une mesure de pondération pour contrôler l'équité.

4.4.5. L'algorithme CQA (Channel-QoS Aware)

Le CQA fonctionne en prenant en compte le délai D_{HOL} , la qualité du canal et le paramètre GBR (Guaranteed Bit Rate). Le CQA utilise également un ordonnanceur TD (Time Division) et FD (Frequency Division) qui alloue des ressources en fonction de la qualité du canal et des exigences de QoS. Cela permet d'atteindre une plus grande efficacité spectrale tout en satisfaisant les exigences de délai du trafic. De manière similaire au PSS, l'ordonnanceur CQA divise les utilisateurs selon leur priorité dans l'ordonnanceur TD. Le CQA regroupe ensuite les utilisateurs en flux et veille à ce que l'ordonnanceur FD alloue des ressources en commençant par les flux

ayant la plus haute métrique calculée. Cette métrique est calculée en utilisant le délai D_{HOL} , la qualité du canal et le GBR [15].

6. Conclusion

En somme, ce chapitre nous a permis de comprendre l'importance des algorithmes d'ordonnement dans la gestion des ressources radio dans un réseau cellulaire. En acquérant une connaissance approfondie de ces techniques. Néanmoins la comparaison entre les différents algorithmes n'est pas évidente car tout dépend du cas d'application de ces derniers.

Chapitre 3

Introduction aux techniques d'apprentissage

1. Introduction

Au cours des dernières années, l'Intelligence Artificielle (IA) est devenue omniprésente dans la vie quotidienne de chacun, offrant des fonctionnalités avancées et une automatisation intelligente. Ce chapitre présente les techniques d'apprentissage, un domaine essentiel de l'intelligence artificielle (IA). L'apprentissage automatique permet aux machines d'acquérir des connaissances à partir des données. On explore différentes techniques d'apprentissage, notamment l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement. De plus, on met l'accent sur l'apprentissage par renforcement profond (DRL), qui combine l'apprentissage par renforcement (RL) avec le Deep Learning (DL). Les algorithmes clés tels que le Q-apprentissage profond et le Gradient de politique déterministe profond (DDPG) sont également présentés. Ce chapitre invite à comprendre le rôle essentiel des techniques d'apprentissage dans le développement de l'IA.

2. Classification des techniques d'apprentissage

Les techniques d'apprentissage peuvent être classées en différentes catégories en fonction de leur objectif ou de leur méthode. Voici une classification selon leurs méthodes.

2.1. Apprentissage supervisé

Le concept d'apprentissage supervisé est basé sur un algorithme tiré de l'ensemble de données de formation (training set), qui peut être considéré comme un enseignant supervisant le processus d'apprentissage. Connaissant les réponses correctes, l'algorithme effectue des prédictions itératives sur les données d'apprentissage et est corrigé par le superviseur. L'apprentissage s'arrête lorsque l'algorithme atteint un niveau de performance acceptable. En d'autres termes, l'apprentissage supervisé consiste, en des variables d'entrée (X) et une variable de sortie (Y) [16].

$$Y = f(X) \quad (13)$$

L'apprentissage supervisé est généralement effectué dans le contexte de la classification et de la régression.

- **Classification**

Les problèmes de classification consistent à demander à l'algorithme de prédire une valeur unique qui permet d'identifier les données d'entrée comme appartenant à une classe ou à un groupe spécifique. Exemples :

- Classification d'image.
- Diagnostique.

- Détection de fraude d'identité.
- Détection de courrier électronique indésirable (spam, pas spam).

Par exemple, pour la première classification, en utilisant un jeu de données de photos d'animaux, chaque photo est associée à une étiquette indiquant s'il s'agit d'un oiseau, d'un chat, d'un chien, etc. L'objectif de l'algorithme est alors de classer de nouvelles images dans l'une de ces catégories prédéfinies.

- **Régression**

Un problème de régression se pose lorsque la variable de sortie est une valeur réelle et continue. Exemples :

- Prévision météo
- Prévision de marché
- Prédire le prix de l'immobilier
- Prédire le cours de bourse

Par exemple, dans le cas de la prédiction du prix d'un terrain dans une ville, en fonction de facteurs tels que la superficie et l'emplacement, l'entrée est utilisée par l'algorithme pour prédire le prix en se basant sur des exemples passés. L'objectif de l'algorithme est alors de déterminer une fonction qui établit une correspondance entre les paires de données. Si les résultats ne sont pas précis, la propagation arrière est utilisée pour ajuster la fonction dans le but d'obtenir des résultats satisfaisants.

2.2. Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé est un type d'apprentissage auto-organisé qui aide à trouver des modèles inconnus auparavant dans l'ensemble de données sans étiquettes préexistantes. En d'autres termes l'apprentissage non supervisé consiste à ne disposer que de données d'entrée (X) et pas de variables de sortie correspondantes [16]. L'apprentissage non supervisé est généralement effectué dans le contexte de regroupement et de la réduction de la dimensionnalité.

- **Regroupement (Clustering)**

La mise en clusters implique la séparation ou la division d'un ensemble de données en plusieurs groupes, de manière à ce que les données appartenant au même groupe se ressemblent plus que celles des autres groupes. En d'autres termes, l'objectif est de séparer les groupes qui présentent des caractéristiques similaires et de les regrouper en clusters distincts.

Exemples :

- Signalisation de la clientèle
- Système de recommandation

- **Réduction de la dimensionnalité (Association)**

L'association consiste à découvrir des relations significatives entre des variables dans de vastes bases de données. L'objectif est de déterminer la probabilité de co-occurrence d'éléments au sein d'une collection de données.

Exemples :

- Compression significatif
- Découverte de structure

En résumé, le clustering est une technique qui regroupe des points de données en fonction de leurs similitudes, tandis que l'association identifie les relations entre les attributs de ces points de données.

2.3. Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement, appelé Reinforcement Learning (RL), en anglais, est une méthode qui se concentre sur la prise de décision. Depuis l'état s (comme state) de l'environnement, l'agent utilise une politique π pour choisir une action a . L'apprentissage par renforcement vise à optimiser la politique d'action π de l'agent grâce à un jeu de récompenses positives et négatives. [17]

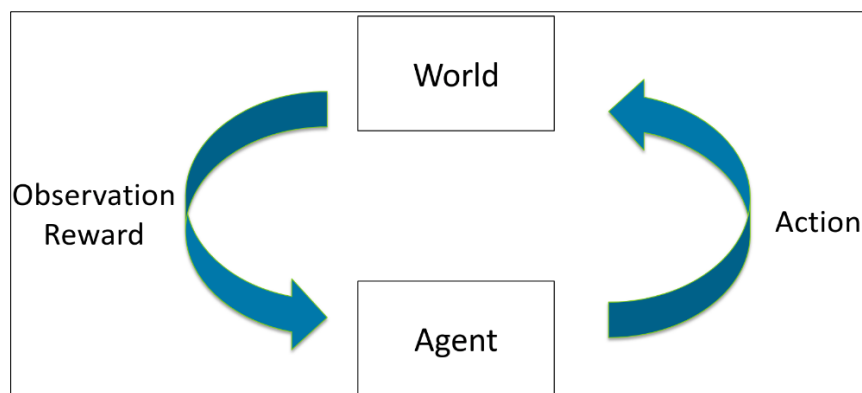


Figure 8. Système d'apprentissage par renforcement

La figure 8 présente un scénario RL typique, et nous allons maintenant clarifier quelques termes importants utilisés dans ce contexte.

- **Agent** : est une entité (algorithme/robot/joueur, etc.) qui interagit avec un environnement donné (problème/espace intelligent/jeu, etc.) en réalisant des actions, et reçoit un retour (pénalités/récompense) de la part de l'environnement après toute action sélectionnée comme illustré dans la Figure 8.
- **Récompense (Reward)** : est le mécanisme qui permet à l'agent de comprendre si l'action choisie a produit un effet positif ou négatif par rapport au but final.
- **Politique** : est une stratégie qui indique à l'agent quelle action sélectionner dans chaque état de l'environnement. L'agent doit apprendre la politique optimale, c'est-à-dire celle qui maximise la récompense cumulée sur le long terme.

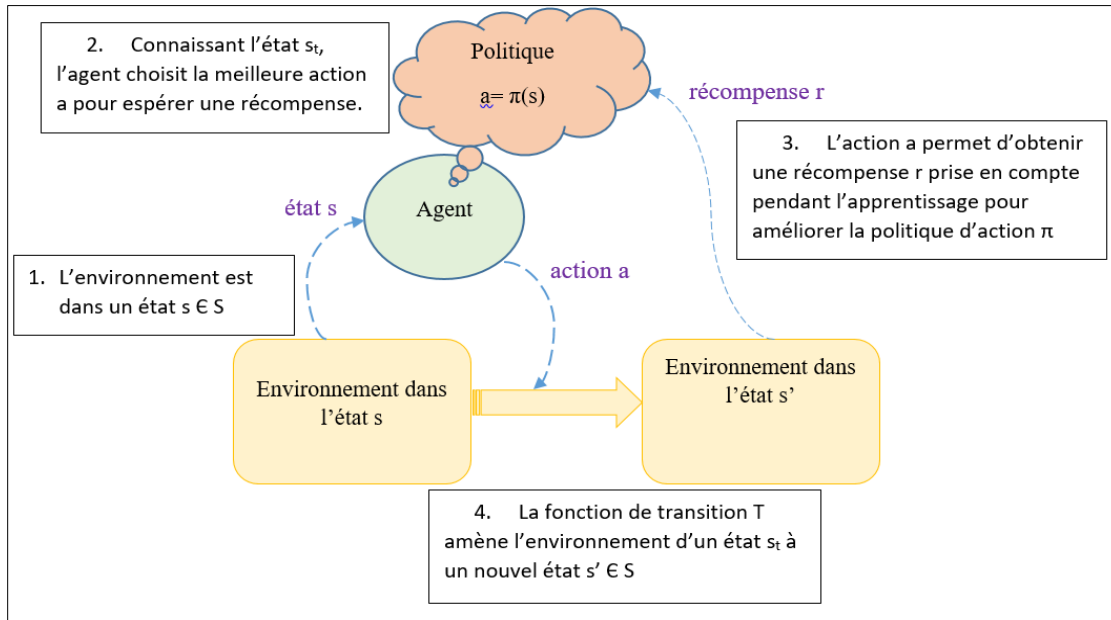


Figure 9. Principe de l'apprentissage par renforcement

Comme décrit auparavant, le RL s'appuie sur l'interaction entre l'agent et son environnement, en se référant à la Figure 9, on peut résumer le principe de cette technique de la manière suivante:

- **L'environnement** est d'abord dans un état s_t .
- **L'agent** effectue **une action** a_t qui va avoir un impact sur l'environnement.
- L'état de l'environnement est alors modifié (ou pas), il en résulte un nouvel état s_{t+1} ainsi qu'une **récompense** r_t qui permettra d'évaluer la pertinence de l'action choisie.
- La fonction qui établit le passage de l'environnement de l'état s_t à l'état s_{t+1} sous l'effet de l'action a_t est nommée **fonction de transition**.
- L'optimisation de la politique ne se fait que pendant les périodes d'apprentissage. Une fois cet apprentissage jugé correct, il est possible d'utiliser **la politique** π pour agir sur l'environnement, sans chercher à l'améliorer [17].

2.3.1. Processus de décision markovien

Le processus de décision de Markov qui pourra être noté PDM ou Markov Decision Process (MDP) est un modèle stochastique qui peut être considéré comme une chaîne de Markov contrôlée, c'est à dire à laquelle on ajoute une composante décisionnelle. C'est un outil mathématique qui permet de formaliser l'apprentissage par renforcement. Un MDP vérifie la propriété de Markov qui peut être résumée ainsi : prédire le futur à partir du présent est tout aussi efficace que de le prédire en possédant des informations concernant le passé [18].

Ainsi, le processus est modélisé par le quadruplet $\{S, A, T, R\}$

- **Un ensemble d'états S** : ensemble (continu ou discret) des états de l'environnement que perçoit l'agent ;
- **Un ensemble d'actions A** : discret ou continu ;

- **Une fonction de transition $T(s, a, s')$** : représentant la probabilité de se retrouver dans l'état s' en effectuant l'action a depuis l'état s ;
- **Une fonction de récompense $R(s, a, s')$** : indiquant la récompense obtenue lors du passage de s à s' en effectuant l'action a .

2.3.2. Apprentissage (Définition des différents paramètres)

Une fois créé l'environnement $\{S, A, T, R\}$ respectant les propriétés des procédures de Markov, il s'agit de mettre en place l'apprentissage par l'agent de sa politique π d'action, en essayant d'approcher le plus possible de la politique optimale notée π^* .

L'apprentissage en RL se déroule en fonction de certains paramètres plus essentiellement :

α : est le taux d'apprentissage utilisé comme outil pour déterminer la quantité d'informations à conserver sur la valeur Q précédemment calculée pour la paire état-action donnée par rapport à la nouvelle valeur Q calculée pour la même paire état-action à un pas de temps ultérieur.

γ : est le taux d'actualisation qui est utilisé pour la convergence et qui démontre que les valeurs des choses dans le présent sont supérieures à leurs valeurs dans le futur.

ϵ_0 ou ϵ -greedy : qui est utilisé pour déterminer si l'agent choisira l'exploration ou l'exploitation à chaque pas de temps, d'où un nombre aléatoire entre 0 et 1 est généré. Si ce nombre est supérieur à epsilon, alors l'agent choisira sa prochaine action via l'exploitation, c'est-à-dire qu'il choisira l'action avec la valeur Q la plus élevée pour son état actuel dans la Q -table. Sinon, sa prochaine action sera choisie par exploration, c'est-à-dire qu'il choisira son action au hasard et explorera ce qui se passe dans l'environnement [19].

Fonction de valeur d'état : Étant donnée une politique π , pour tout état $s \in S$, la fonction de valeur d'état V_π est définie telle que [20]:

$$V_\pi(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} \lim E_\pi \left\{ \sum_{t=1}^{\infty} \gamma^{t-1} r_t^\pi \mid s_t = s \right\} \quad (14)$$

Avec E est l'espérance sous la politique π et r_t^π est la récompense obtenue à l'itération t après être parti de l'état s et en suivant la politique " π ".

Fonction action valeur : cette fonction notée Q_π , n'évalue plus seulement la pertinence d'un état, mais d'un couple état-action. Étant donnée une politique π , pour tout couple $(s, a) \in S \times A$, la fonction action-valeur $Q_\pi(s, a)$ est définie telle que [20].

$$Q_\pi(s, a) = E_\pi \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \mid s_t = s, a_t = a \right\} \quad (15)$$

Dont E est l'espérance sous la politique π , γ et s_t le paramètre du facteur d'actualisation et t est un pas de temps quelconque. La relation entre ces deux fonctions est comme suit:

$$V_\pi(s) = \max_a Q_\pi(s, a) \quad (16)$$

Les valeurs d'états et d'actions changent selon la façon dont on choisit nos états et nos actions, et la meilleure action est celle qui va maximiser notre valeur d'état [19].

2.3.3. Apprentissage tabulaire Q-Learning

L'apprentissage Q (Q-learning) est un algorithme d'apprentissage par renforcement hors politique qui cherche à trouver la meilleure action à entreprendre compte tenu de l'état actuel. Il est considéré comme non conforme à la politique, car la fonction de Q-Learning apprend des actions qui sont en dehors de la politique actuelle, comme prendre des mesures aléatoires, et par conséquent, une politique n'est pas nécessaire. Plus précisément, le Q-Learning cherche à apprendre une politique qui maximise la récompense totale [18].

3. Apprentissage par renforcement profond

L'apprentissage par renforcement profond DRL (Deep Reinforcement Learning, en anglais) est un sous-domaine de l'apprentissage automatique qui combine l'apprentissage par renforcement et l'apprentissage profond. Le RL considère le problème d'un agent informatique qui apprend à prendre des décisions par essais et erreurs. Le DRL intègre le DL dans la résolution, permettant aux agents de prendre des décisions à partir de données d'entrée non structurées sans intervention manuelle sur l'espace des états. Les algorithmes de DRL sont capables de prendre en compte de très grandes quantités de données et de décider des actions à effectuer pour optimiser un objectif. Il est possible d'intégrer des contraintes de stabilité dans les algorithmes et modèles de Deep-RL. L'apprentissage par renforcement profond peut être utilisé pour optimiser les dialogues axés sur les questions et pour améliorer l'expérience et renforcer l'immersion lors des réseaux 5G. Les applications de l'apprentissage par renforcement profond incluent la conduite autonome, la gestion d'entreprise, la vision par ordinateur, la robotique, la santé, les jeux vidéo, la reconnaissance de la parole et la classification précoce de séquences temporelles.

Le DRL intègre le DL dans la résolution comme le montre la figure 10 [21].

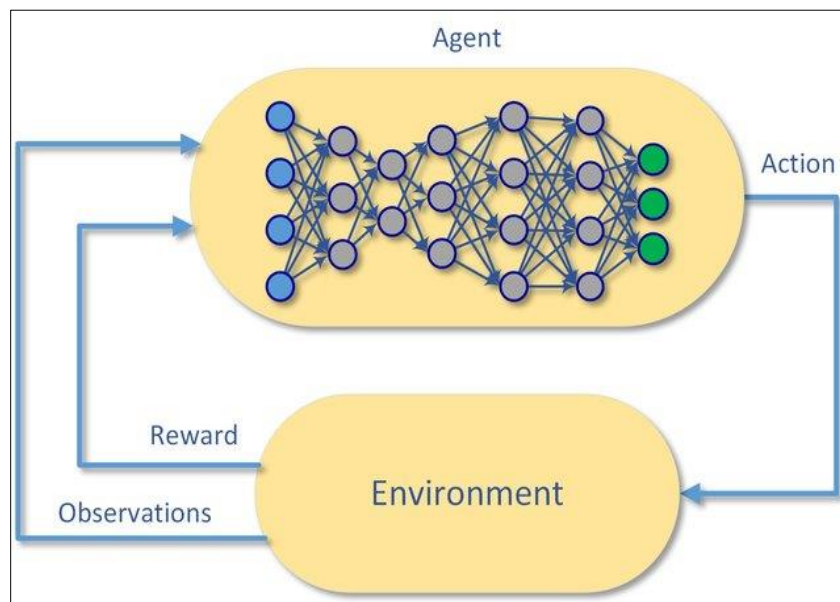


Figure 10. Système d'apprentissage par renforcement.

3.1. Apprentissage profond (Deep learning)

L'apprentissage profond DL est un sous-domaine de l'apprentissage automatique qui utilise des réseaux de neurones artificiels (avec plusieurs couches cachées) pour effectuer des tâches complexes, telles que la reconnaissance d'images, la traduction de langues, la génération de textes, entre autres. DL a révolutionné de nombreux domaines de recherche grâce à sa capacité à apprendre de meilleurs modèles à partir d'énormes volumes de données [22]. Cette technologie repose sur une nouvelle génération de réseaux de neurones artificiels (ANN) appelés réseaux de neurones profonds (DNN).

Cette sous-section présente un bref aperçu des techniques DL avant d'aborder la section de Deep-RL. Nous commençons cette sous-section en discutant de certaines des architectures DL les plus utilisées.

- **Réseaux de neurones profond (Deep Neural Network)**

On commence d'abord par définir le réseau de neurone.

Un réseau de neurones est un ensemble d'algorithmes inspirés par le cerveau humain. Le but de cette technologie est de simuler l'activité cérébrale, et plus spécifiquement la reconnaissance de motifs et la transmission d'informations entre les différentes couches de connexions neuronales.

Un Deep Neural Network (DNN), se distingue par sa structure composée d'au moins deux couches, couche d'entrée et de sortie et au moins d'une intermédiaire, plus le nombre de ces couches intermédiaires est élevé, plus le réseau est considéré comme "profond". Ceci lui permet de traiter les données de manière complexe, en employant des modèles mathématiques avancés.

Ses utilités:

- L'un des principaux cas d'usage de ces réseaux de neurones avancés est le traitement des données non structurées. Les DNN peuvent regrouper et classer les données stockées sur une base de données. Ceci s'avère très utile pour organiser les données sans étiquettes ni structure.
- Ils automatisent des tâches telles que la reconnaissance faciale et la conduite autonome.

- **Les réseaux de neurones convolutionnels**

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN ou Convolutional Neural Network) sont un type de DNN avec un nombre beaucoup plus élevé de couches et de nœuds. Ils sont généralement adoptés pour la classification des images et de vidéos. Les CNN utilisent un processus appelé convolution pour extraire des caractéristiques des images et des vidéos, leur permettant de reconnaître des motifs et des objets.

- **Les réseaux de neurones récurrents**

Les réseaux de neurones récurrents ou Recurrent Neural Network (RNN) sont un type de réseau de neurones artificiels puissants, capables de traiter les informations dans les deux sens (ils utilisent les sorties précédentes comme entrées supplémentaires). Les RNN sont adaptés pour des données d'entrée de taille variable et sont utilisés en reconnaissance automatique de la parole ou de l'écriture

manuscrite, en reconnaissance de formes, en traduction automatique, en traitement automatique du langage naturel. Ces réseaux permettent aux machines de se souvenir des informations passées et de les utiliser pour prendre des décisions en temps réel [23].

Les RNN sont largement utilisés dans le domaine de l'apprentissage en profondeur (Deep Learning) et sont parfaitement adaptés au traitement de données séquentielles.

4. Algorithmes en DRL

4.1. Q-apprentissage profond : définition

Pour la plupart des problèmes ayant un environnement possédant un nombre limité d'actions et d'états possibles, le Q-apprentissage « tabulaire » permet d'afficher la Q-fonction sous forme de table. Pour des problèmes possédant un très large nombre d'actions et d'états possibles, il est bien plus coûteux informatiquement, voire impossible, de représenter la Q-fonction dans une table. En effet, dans un environnement comportant n_s états et n_a actions, la table comporte ainsi $n_s * n_a$ cellules ce qui peut, pour des valeurs n_s et/ou n_a élevées, entraîner des coûts computationnels élevés. Ces coûts sont divisés en deux parties, la première étant la quantité de mémoire nécessaire pour sauvegarder et mettre à jour la table qui augmenterait avec le nombre d'états, la deuxième étant le temps nécessaire à l'exploration de chaque état pour créer la Q-table requise.

Au lieu de représenter la fonction Q par une table, il est possible de la représenter par une fonction continue. Cette fonction servira d'approximation. N'importe quel type de fonction peut fonctionner : des polynômes, des arbres de décisions... Les réseaux de neurones sont également de bons candidats. Il a ainsi été proposé d'approximer la Q-fonction par le biais de réseaux de neurones comportant des paramètres W (W représente l'ensemble des poids et biais du réseau de neurones).

Soit :

$$Q(s, a; W) \approx Q^*(s, a) \quad (17)$$

Tel que : Q^* correspondant à la Q-fonction optimale.

Un tel réseau de neurones est appelé Q-réseau et prend en entrée l'état et retourne en sortie la valeur de Q de toutes les actions possibles, comme illustré dans la Figure 11 [24].

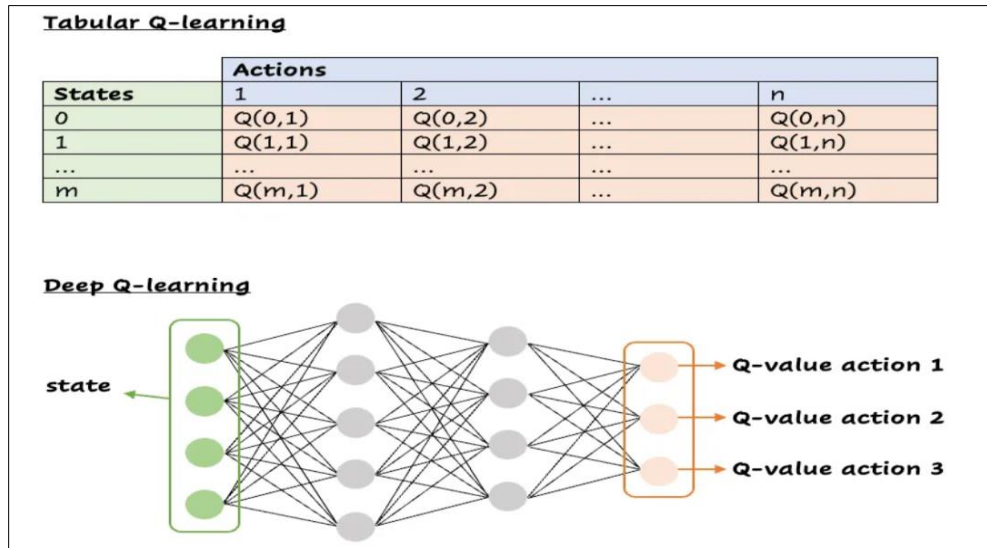


Figure 11. Q-apprentissage vs. Q-apprentissage profond.

4.2. Gradient de politique déterministe profond (DDPG)

Les méthodes de policy gradient sont largement utilisées dans les problèmes avec des espaces d'action continus. L'idée de base est de représenter la politique par une distribution de probabilité paramétrique stochastique $\pi_{\theta}(a|s)$. Cependant, en 2014, un algorithme de gradient de politique déterministe (DPG) a été introduit, qui considère plutôt des politiques déterministes $a = \mu_{\theta}(s)$ [25]. Cet algorithme appartient à la famille des méthodes acteur-critique et utilise une approche hors-politique qui utilise une politique comportementale pour apprendre une politique cible déterministe. De plus, en 2016, un algorithme appelé Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) [26], a été développé, qui est une extension des algorithmes DQN et DPG. Comme dans DPG, DDPG utilise une approche acteur-critique et évite l'optimisation de la fonction de valeur d'action à chaque étape. Il rend également l'apprentissage stable et robuste en utilisant la relecture d'expériences et une idée similaire au réseau cible utilisé dans DQN.

En résumé, DDPG est un algorithme de gradient de politique déterministe profond qui permet d'apprendre une politique déterministe dans des espaces d'action continus. Il utilise une approche acteur-critique et des techniques telles que la relecture d'expériences pour améliorer la stabilité de l'apprentissage.

5. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a introduit les techniques d'apprentissage, en mettant l'accent sur l'apprentissage supervisé, non supervisé et par renforcement. Nous avons exploré l'apprentissage par renforcement profond et examiné des algorithmes clés utilisés dans ce domaine. Ces techniques jouent un rôle crucial dans le développement de l'intelligence artificielle. Étant donné que l'apprentissage automatique est un domaine en constante innovation, il est important de garder à l'esprit que les algorithmes, les méthodes et les approches continueront de changer.

Chapitre 4

Application des techniques d'apprentissage à l'ordonnancement dans les réseaux cellulaires

1. Introduction

Dans ce chapitre nous aborderons l'environnement de simulation dans lequel nous avons créé notre scénario. Cela comprendra en premier lieu le simulateur utilisé et ses composants les plus importants, la configuration du réseau cellulaire utilisé, la topologie du réseau, les paramètres de simulation (le nombre des utilisateurs, le nombre de ressources radio disponibles, le débit des applications... etc.), et les résultats obtenus. En deuxième, nous aborderons l'implémentation du module d'intelligence artificielle (IA) et décrirons son fonctionnement ainsi que son rôle dans l'application de l'apprentissage par renforcement à ce scénario.

2. L'environnement de simulation *ns-3*

ns-3 (Network Simulator version 3) est un logiciel libre et open source destiné à la simulation des réseaux de communication. Il est largement utilisé dans le domaine de la recherche en réseaux pour évaluer et analyser les performances de différents protocoles de communication dans des scénarios variés. Le simulateur *ns-3* est un simulateur de réseau à événements discrets destiné principalement à la recherche et à l'enseignement. Il a été lancé en 2006. *ns-3* est téléchargeable librement à partir du site officiel de *ns-3* (<https://www.nsnam.org/>). Dans ce mémoire, nous utilisons la version *ns-3-dev* sous Ubuntu 20.04.

En utilisant *ns-3*, nous pouvons effectuer des simulations de réseaux pour évaluer les performances de différents protocoles de communication, concevoir et tester de nouveaux protocoles de communication, et évaluer la performance de réseaux à grande échelle dans différents scénarios.

Puis nous avons pu lui ajouter les deux modules NR et AI en les téléchargeant tout en suivant les étapes fournies sur (<https://github.com/>).

3. Utilisation de *ns-3*

3.1. Installation

Des instructions détaillées pour l'installation sur différentes plateformes et systèmes d'exploitation, y compris Linux, Mac OS X et Windows sont disponibles sur le site officiel de *ns-3* (voir: <https://www.nsnam.org/wiki/Installation>).

3.2. Prise en main

Une fois *ns-3* installé, on peut se familiariser avec les fonctionnalités de base en suivant les tutoriels et exemples fournis sur le site officiel de *ns-3*. Les exemples incluent des scénarios de simulation simples et complexes pour différents types de réseaux, tels que des réseaux filaires, sans fil et mobiles.

3.3. Création de scénarios de simulation personnalisés

Une fois que les bases de *ns-3* nous soient familières, nous pouvons créer nos propres scénarios de simulation personnalisés. Cela implique la création d'un script de simulation en utilisant la langue de script de *ns-3* (C++ ou Python), la définition des paramètres de simulation tels que les types de nœuds et de canaux, les protocoles de communication et les données à générer, puis l'exécution de la simulation.

3.4. Analyse des résultats

Après avoir exécuté une simulation, *ns-3* génère des fichiers de sortie qui contiennent des données sur les performances du réseau simulé. On peut analyser ces données en utilisant des outils d'analyse de données tels que Gnuplot ou Octave pour évaluer les performances du réseau en fonction des différents paramètres de simulation.

4. Structure et organisation de *ns-3*

ns-3 est structuré en plusieurs modules, chacun destiné à l'étude d'un aspect spécifique des réseaux. Le module principal et qui est indispensable à toutes les simulations est le module *core* qui fournit les fonctionnalités de base nécessaires à la création, la gestion et l'exécution de scénarios de simulation dans le simulateur *ns-3*. Nous pouvons aussi citer : le module *Internet* qui sert à la modélisation des protocoles, des couches et des fonctionnalités liées à Internet, le module *Flow Monitor* qui permet de surveiller, mesurer et collecter des statistiques sur les flux de données dans un réseau simulé, le module *Application* qui permet de modéliser et de simuler le comportement des applications de communication dans un réseau. Le module *Common* permet de gérer les actions liées à l'émission et la réception des paquets, le module *Simulator* Permet de gérer la simulation des événements, il prévoit explicitement la possibilité de planifier ces derniers à des moments différents et ensuite de les exécuter.

Le module spécifique qui est d'un intérêt fondamental pour notre travail est le module *Lte* que nous développons ci-dessous.

4.1. Le module LTE

Le module LTE de *ns-3* est une bibliothèque logicielle qui permet la simulation de réseaux LTE, éventuellement incluant le cœur de paquets évolué (EPC). Il fournit une implémentation de base des dispositifs LTE, y compris les modèles de propagation et les couches PHY et MAC. Les fonctionnalités les plus importantes du modèle *ns-3* LTE sont les suivantes :

Les dispositifs LTE ont été conçus comme des conteneurs de plusieurs entités telles que MAC, RRC, RLC, etc. Pour chacune de ces entités, une classe dédiée a été développée. Toutes les fonctionnalités communes des dispositifs de réseau LTE ont été définies dans la classe `ns3::LteNetDevice`.

5. Simulation des performances dans un réseau LTE

La version de base de *ns-3* a été conçue pour un usage exclusivement avec la technologie LTE. C'est-à-dire, *ns-3* ne prend pas en charge la nouvelle technologie 5G NR. De plus, l'intégration des techniques d'intelligence artificielle dans *ns-3* nécessite l'ajout d'un module d'interface externe (en l'occurrence le module AI).

Dans cette section, nous allons nous intéresser à l'étude des performances des algorithmes d'ordonnancement les plus utilisés, où nous nous limiterons à la technologie LTE. Les résultats obtenus serviront alors de référence pour développer une structure où les modules externes 5G NR et AI peuvent être utilisés conjointement avec *ns-3* pour simuler des scénarios utilisant la technologie 5G et les techniques modernes d'intelligence artificielle.

5.1. Scénario de simulation

Le scénario consiste à surveiller les performances des algorithmes d'ordonnancement d'un réseau cellulaire LTE avec une seule ENodeB et 50 UEs. Dans un premier temps les débits sont analysés pour trois applications, appliquées simultanément aux UEs (Video avec 20 UEs, VoIP avec 20 UEs et FTP avec 10 UEs). Les tests sont effectués en actionnant divers algorithmes d'ordonnancement qui ont été implémentés dans *ns-3*. Puis nous évaluerons les performances de ces algorithmes pour le réseau entier, en analysant trois paramètres : le débit global, l'équité et l'efficacité spectrale.

5.1.1. Topologie du réseau de simulation

La figure 12 montre le scénario de simulation. Au niveau du réseau d'accès, il comprend une seule station de base qui peut servir plusieurs équipements mobiles. Le réseau cœur est composé d'une passerelle qui est connectée à trois serveurs dont le premier servira pour la VoIP, le second pour les services vidéo et le troisième pour le transfert de fichiers.

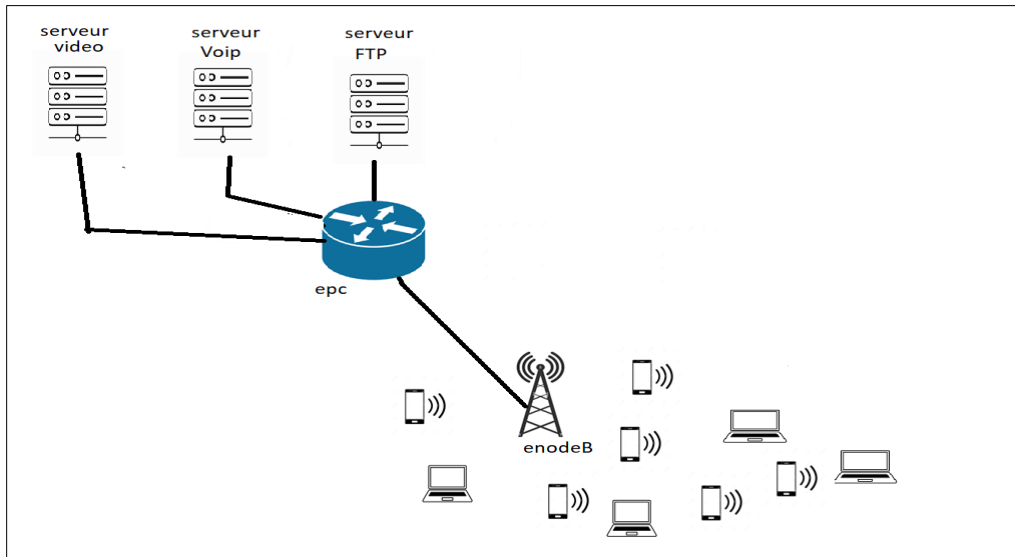


Figure 12. Topologie du réseau de simulation sur *ns-3*.

5.1.2. Paramètres de simulation

Le tableau 2 montre les paramètres de simulation que nous avons choisi:

Paramètres	Valeurs
Nombre d'équipement	50
Temps de simulation	20ms
TTI	1ms
Largeur de la Bande passante	50 BR (10 Mhz)
Débit vidéo	2Mbit/s
Débit VoIP	64kbit/s
Débit FTP	100kbit/s
Utilisateur vidéo	20
Utilisateur VoIP	20
Utilisateur FTP	10
Les algorithmes	PF
	PSS
	CQA

Tableau 2. Paramètres de simulation.

5.1.3. Étapes de la construction du code

Les démarches de codage afin de simuler sont représentées dans la figure 13.

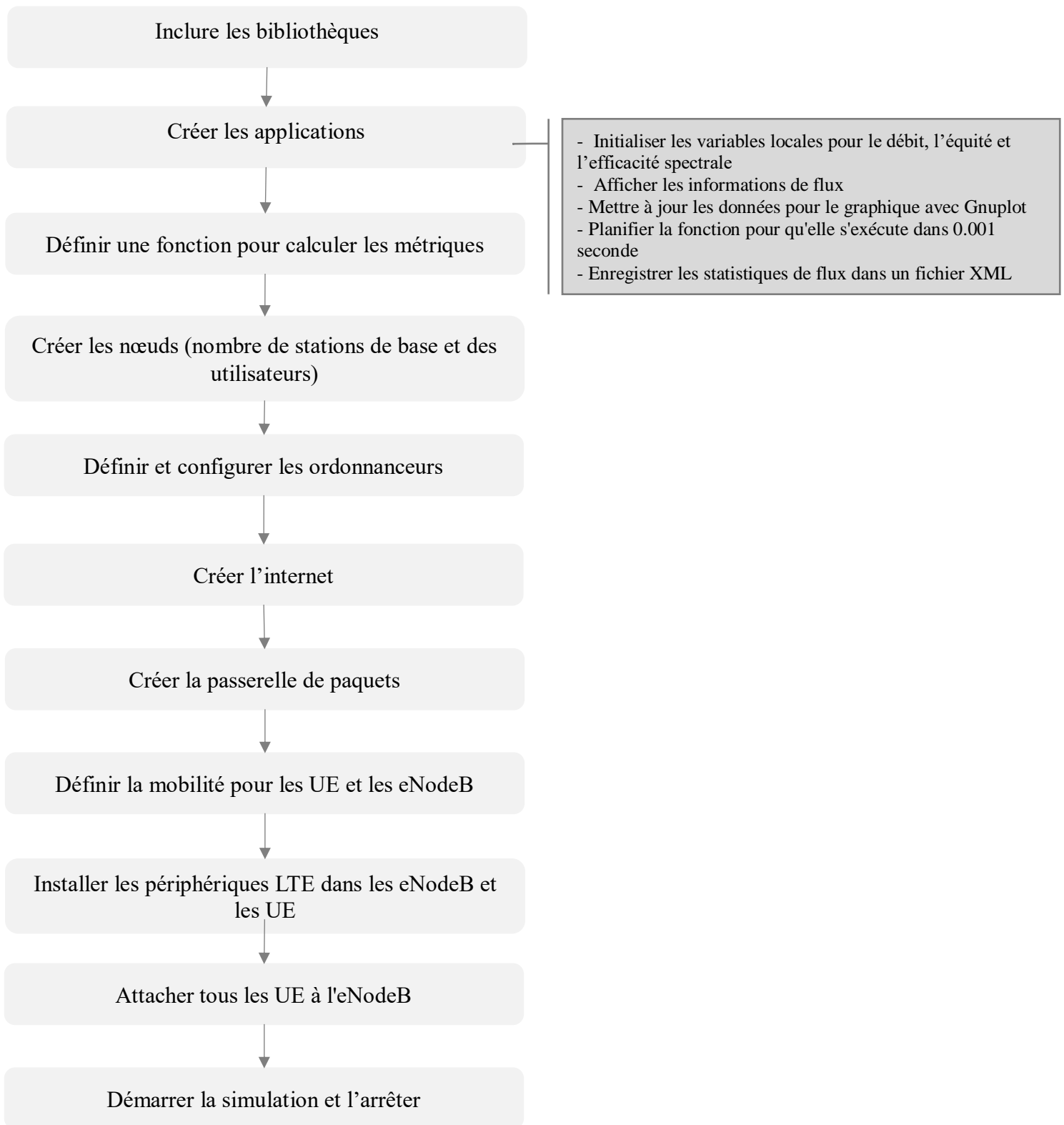


Figure 13. Étapes de codage.

6. Evaluation de performances

6.1. Performances de chaque Trafic

Les résultats de simulation suivants montrent les performances des algorithmes CQA, PSS et PF pour trois types de trafic différents (VoIP, vidéo et FTP) avec différents nombres d'utilisateurs.

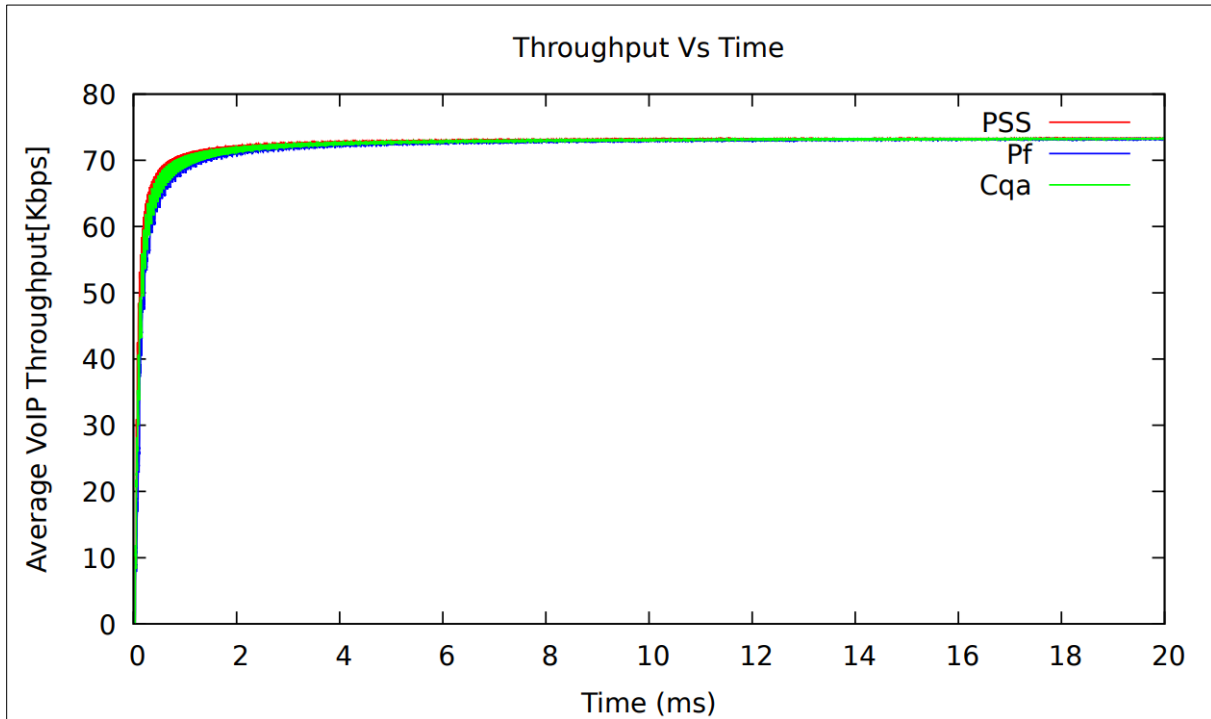


Figure 14. Débit VS temps –VoIP

La figure 14 présente les résultats du débit en fonction du temps, obtenus pour le trafic VoIP. Selon ce graphe, les trois algorithmes fournissent le même résultat, atteignant le même débit qui vaut environ 72 kbps, mais avec des délais légèrement différents (0,9 ms pour CQA, 0,8 ms pour PSS et 1 ms pour PF). Cela suggère que les algorithmes sont tout aussi efficaces pour gérer le trafic VoIP, mais avec de légères différences en termes de délais.

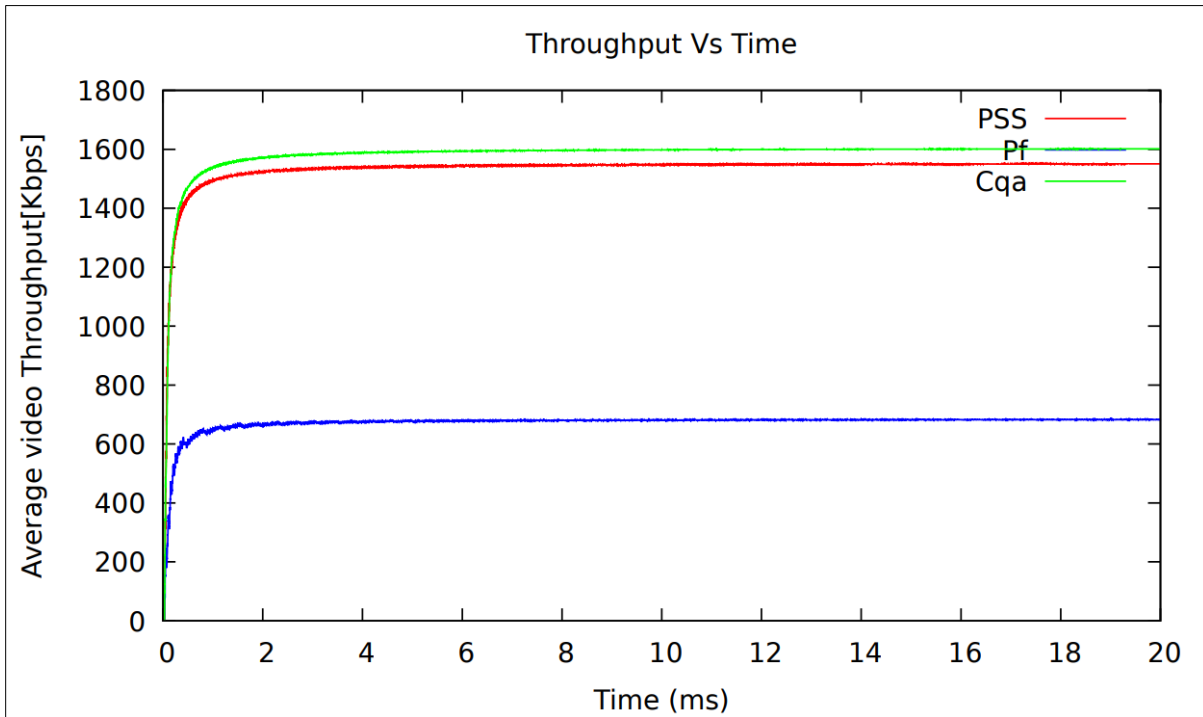


Figure 15. Débit vs temps – Vidéo

La figure 15 présente les résultats du débit en fonction du temps, obtenus pour le trafic Vidéo. On remarque que l'algorithme CQA fournit le débit le plus élevé de 1 600 kbit/s, suivi du PSS avec presque 1 550 kbit/s et du PF avec environ 650 kbit/s. CQA semble allouer plus de ressources aux utilisateurs vidéo que les autres algorithmes, car il favorise ce type de trafic (temps réel).

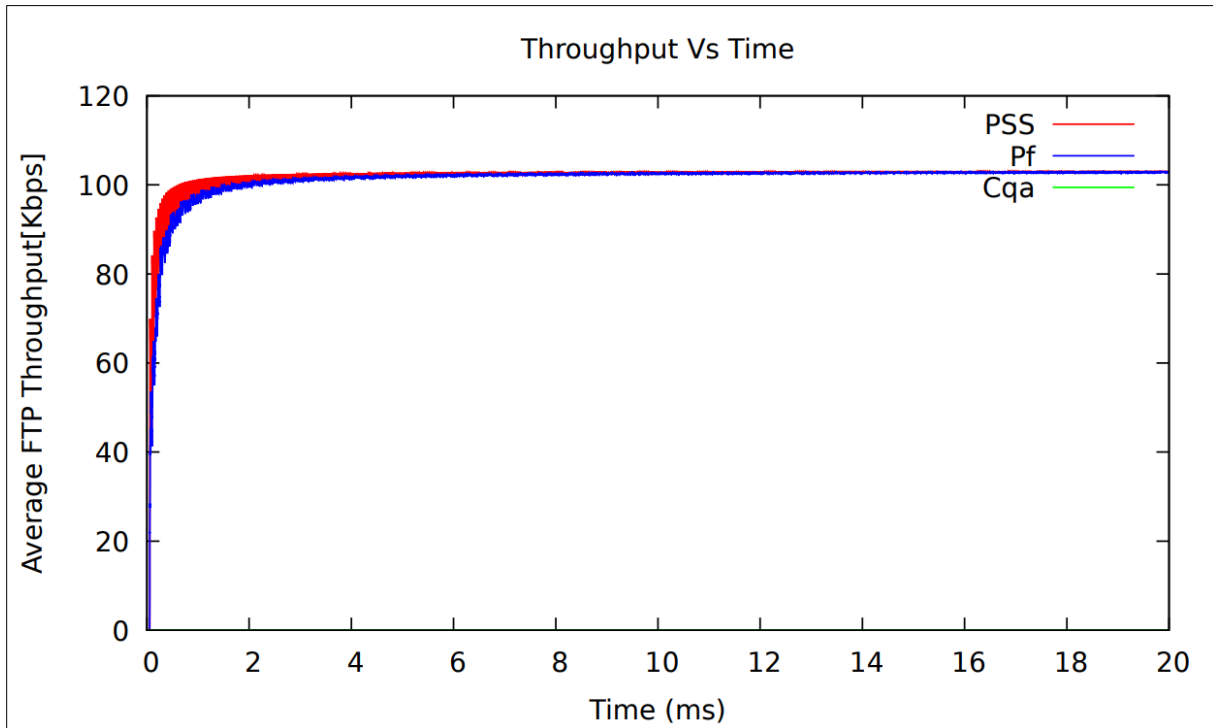


Figure 16. Débit vs temps – FTP

La figure 16 présente les résultats du débit en fonction du temps, obtenus pour le trafic FTP. On observe que l'algorithme CQA ne fournit aucun débit, tandis que l'algorithme PF et PSS fournissent un débit de 100 kbps. Ceci suggère que les algorithmes PF et PSS sont les plus efficaces pour gérer le trafic FTP, alors que l'algorithme CQA n'est pas du tout efficace, en d'autres termes, le CQA n'alloue aucune bande passante au trafic FTP, ce qui signifie que les ressources sont entièrement utilisées par les autres types de trafic.

6.2. Performances de l'ensemble du système

Dans ce qui précède nous avons comparé les performances des différents algorithmes pour chaque application sachant qu'elles sont appliquées simultanément. Dans cette section nous allons discuter les résultats de performance du réseau entier.

6.2.1. Débit système

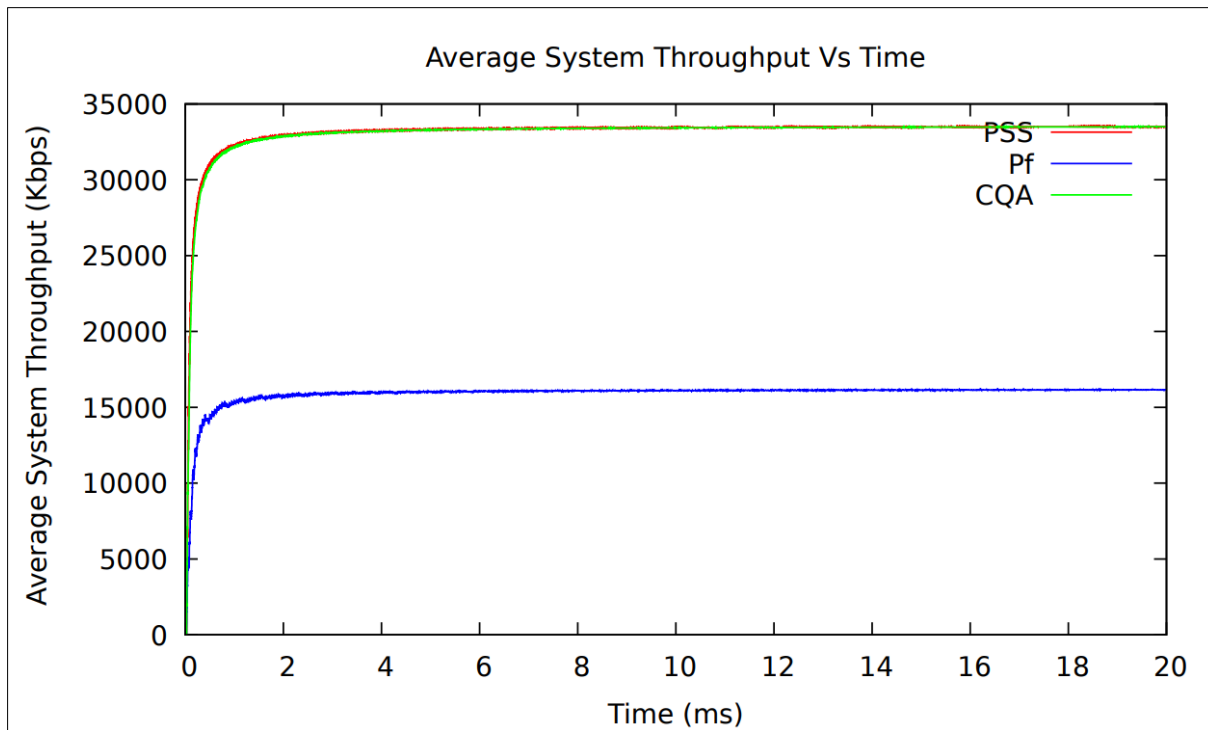


Figure 17. Débit global du système

La figure 17 présente les résultats du débit global du système en fonction du temps, obtenus pour les trois algorithmes. Les deux algorithmes d'ordonnancement CQA et PSS permettent d'atteindre un débit système similaire de 34000 Kbps, tandis que pour le PSS, le débit global est inférieur de 16000 Kbps. Cela indique que les algorithmes CQA et PSS parviennent à allouer les ressources de manière à obtenir un débit global élevé.

6.2.2. Equité système

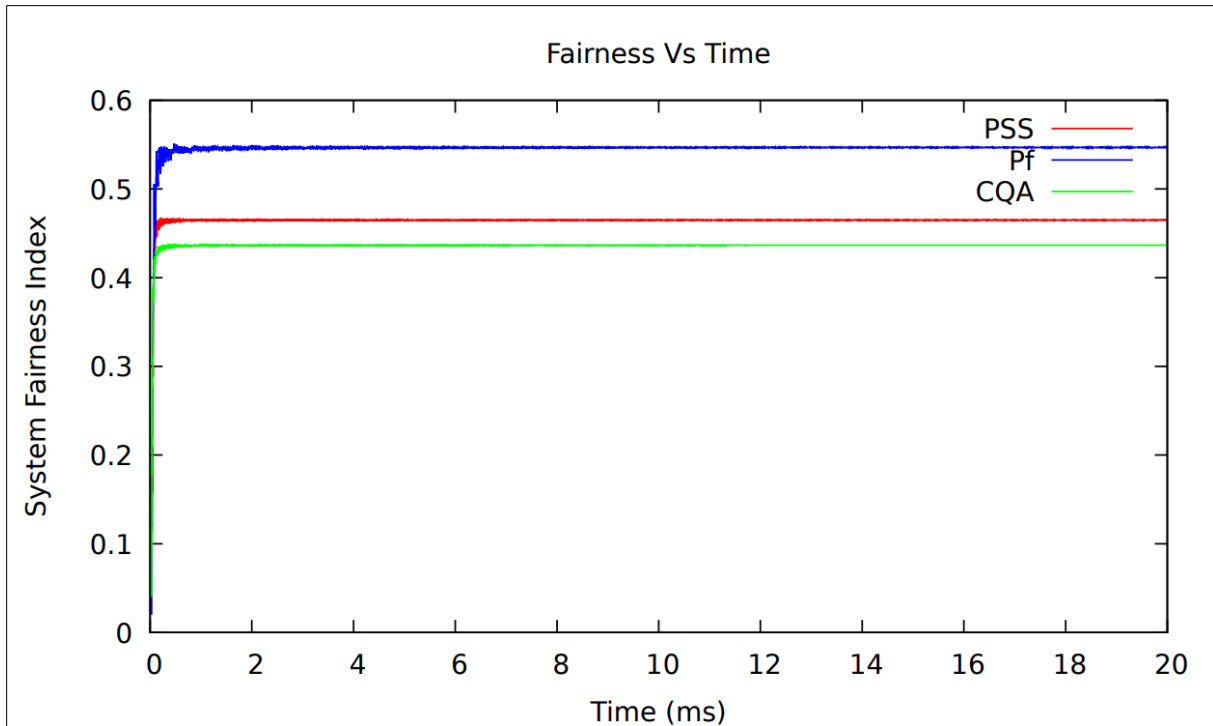


Figure 18. Equité du système

La figure 18 illustre les performances du réseau en matière d'équité selon le temps pour les trois algorithmes et on remarque que le PF atteint le meilleur indice de ce système de 0.55 tandis que PSS nous donne la valeur de 0.45 et CQA parvient à 0.42. Mais cela reste toujours de valeurs insuffisantes mais logique pour ces applications.

6.2.3. Efficacité spectrale du système

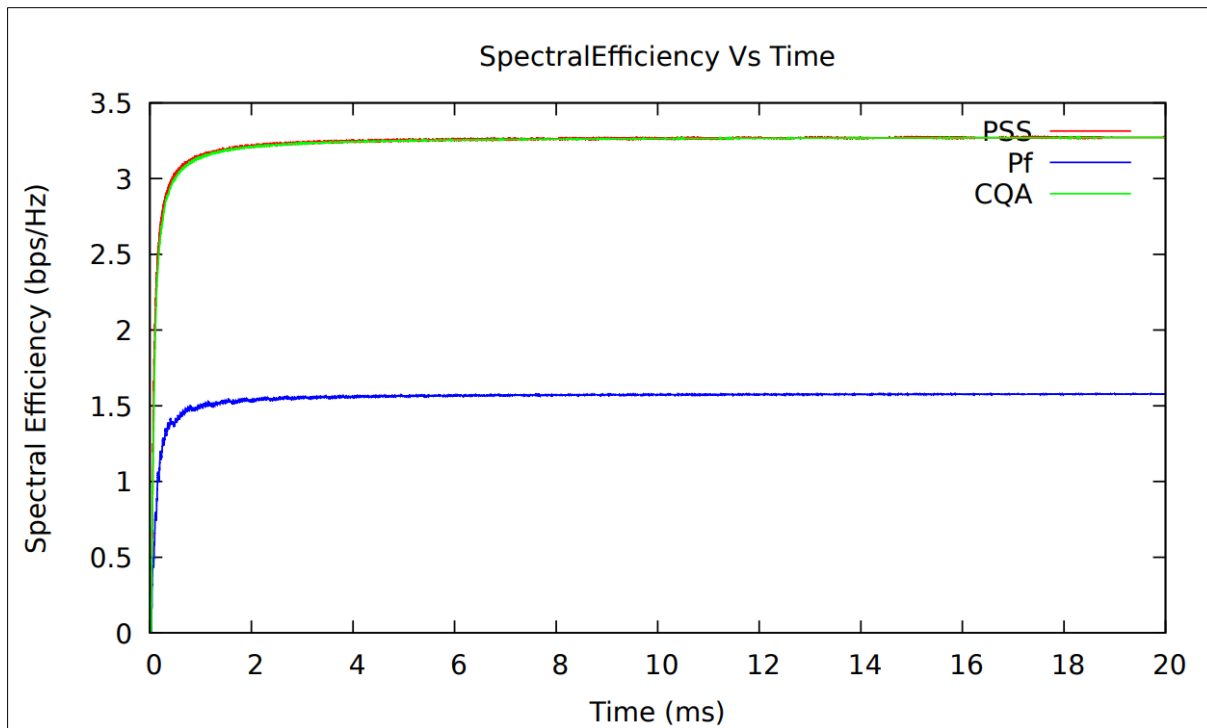


Figure 19. Efficacité spectrale vs temps

La figure 19 présente les résultats de l'efficacité spectrale du système en fonction du temps, obtenus pour les mêmes trois algorithmes. On constate que l'efficacité spectrale est similaire pour les algorithmes CQA et PSS, avec une valeur de 3,3 bps/Hz. Cela indique une utilisation efficace de la bande passante disponible pour transmettre les données. L'algorithme PF présente une efficacité spectrale inférieure, de 1,55 bps/Hz, ce qui peut être attribué à sa priorisation des services et à une répartition différente des ressources pour atteindre une meilleure équité.

7. Simulations dans les réseaux de 5G

Comme nous l'avons décrit précédemment, le simulateur *ns-3* a été conçu exclusivement pour la technologie LTE et donc ne prend pas en charge la nouvelle technologie 5G. De plus, *ns-3* ne possède pas de mécanisme d'intégration des techniques de l'intelligence artificielle. Il existe toutefois, une façon d'intégrer ces deux concepts dans la simulateur en lui adjoignant deux modules d'interface; il s'agit des modules NR qui prend en charge les numéologies 5G et AI qui est capable de prendre en charge l'usage des techniques de l'intelligence artificielle. Dans la suite de cette section, nous discutons de ces deux aspects.

7.1. Le module NR

Le module NR (New Radio) est un module enfichable pour *ns-3* qui peut être utilisé pour simuler des réseaux cellulaires 5G New Radio (NR). Le simulateur est l'évolution naturelle de LENA, le simulateur de réseau LTE/EPC, mais son développement a commencé à partir du module mmWave car il était plus avancé en termes de formation de faisceaux, TDD, modèle de canal 3GPP. Il intègre des fonctionnalités PHY-MAC NR fondamentales alignées sur la version 15 de la norme 3GPP NR. Le module NR peut être branché dans *ns-3-dev*, à partir de la version 3.31, et prend en charge les fonctionnalités suivantes :

- Architecture NSA-RAN 5G et EPC 4G.
- Configuration flexible et automatique de la structure de trame NR à travers plusieurs numérotations.
- Modèles de canal 3GPP pour les bandes de fréquences sub-6 GHz et mmWave.
- Modèles de propagation pour les bandes de fréquences sub-6 GHz et mmWave. Modèles de couche physique et de couche MAC NR.
- Modèles de couche supérieure NR pour les services de données et de signalisation.
- Extension NR-U pour la communication directe entre utilisateurs.
- Extension NR V2X pour la communication véhicule à tout (V2X).

Le module NR de *ns-3* est développé par le projet 5G-LENA et est documenté dans la documentation de *ns-3*. Le module NR de *ns-3* peut être utilisé pour simuler des réseaux 5G NR et pour évaluer les performances de différents protocoles et algorithmes dans des scénarios de réseau variés.

7.2. Module AI

Le module AI (Intelligence Artificielle) pour *ns-3* permet l'interaction de données entre *ns-3* et d'autres frameworks d'IA basés sur Python. Ce module ne fournit pas d'algorithmes d'IA ou ne dépend d'aucun framework, mais fournit plutôt un module Python qui permet l'interconnexion de l'IA, de sorte que le framework d'IA doit être installé séparément. Le module AI pour *ns-3* fournit une solution haute efficacité pour permettre l'interaction de données entre *ns-3* et d'autres frameworks d'IA basés sur Python en utilisant une mémoire partagée. La mémoire partagée peut être accédée par les deux côtés et est principalement contrôlée dans *ns-3*.

Le module AI pour *ns-3* fournit une interface de haut niveau pour différents algorithmes d'IA et est facile à intégrer avec d'autres frameworks d'IA. Le module AI pour *ns-3* est disponible en téléchargement sur GitHub et peut être installé dans *ns-3-dev* ou d'autres codes *ns-3*. Le module AI pour *ns-3* a été conçu pour permettre l'application de l'IA à la simulation de réseau dans *ns-3*.

7.3. Architecture NR et AI

Dans ce qui précède nous avons simulé un réseau où nous avons pu étudier un réseau LTE ses performances globales et ceci est pour chaque service, c'est là où nous avons défini l'environnement où l'agent de l'apprentissage par renforcement profond (DRL) pourra s'entraîner. Nous allons expliquer à l'aide des deux schémas suivants le fonctionnement de cette procédure.

La figure 20 représente l'architecture simplifiée de la mise en place d'un environnement d'apprentissage par renforcement profond : tout d'abord nous commençons par intégrer les deux modules NR et AI dans l'environnement *ns-3* qui seront inclus dans notre script, là où nous configurerons notre réseau avec les différents paramètres précédant et nous lancerons la simulation. Une fois les trois résultats obtenus (Débit, équité, efficacité spectrale), ils seront envoyés vers le framework via le module AI, à fin de prendre la décision pour la prochaine exécution.

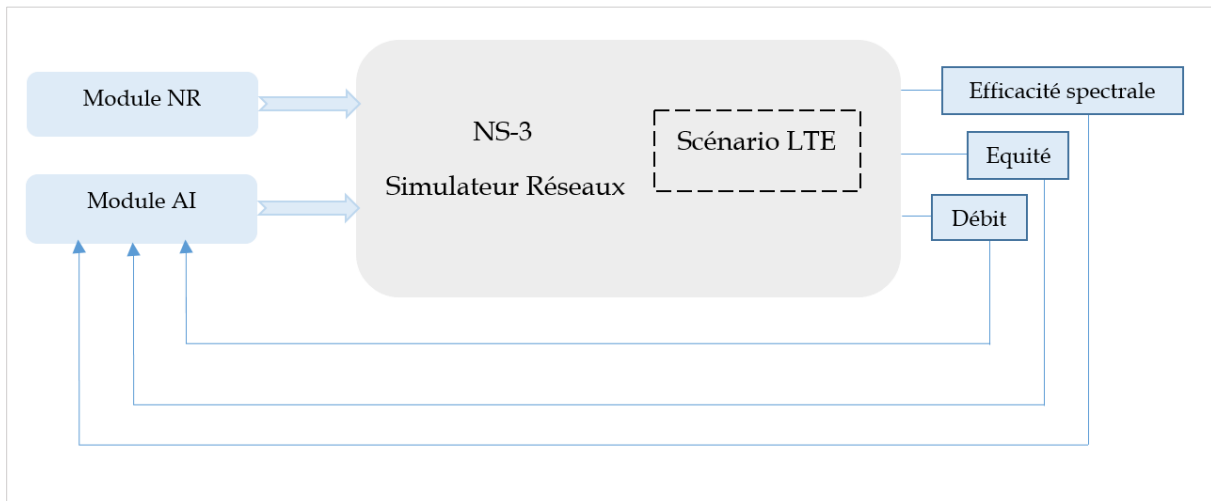


Figure 20. Architecture de la mise en palce de DRL

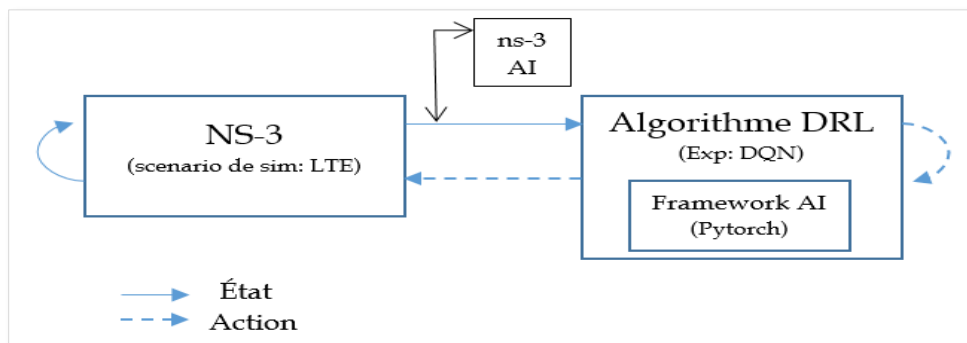


Figure 21. Principe de fonctionnement de DRL.

Pour utiliser un algorithme de Deep Reinforcement Learning (DRL) pour l'ordonnancement dans *ns-3*, il est nécessaire de définir l'architecture de manière cohérente. Cette architecture comprend trois éléments clés comme montrés sur la figure 21. L'agent représente l'algorithme DRL. Il apprend à sélectionner des actions qui améliorent les mesures de performance en tenant compte des informations sur les états et les récompenses de l'interaction avec l'environnement (les algorithmes qui peuvent être utilisés comme par exemple: Asynchronous Advantage Actor-Critic (A3C) ou Deep Q-Network (DQN)). L'environnement représente le scénario de réseau simulé dans *ns-3* (il inclut la topologie du réseau, les services planifiés et les ressources disponibles). L'environnement fournit à l'agent des informations sur l'état actuel du réseau et les récompenses pour chaque action entreprise par l'agent. Enfin l'apprentissage c'est que l'agent apprend à l'aide d'un ensemble de données de ces scénarios de réseau, il apprend ensuite à sélectionner des actions qui maximisent les métriques de performance définies.

```

Chosen scheduler type: Cqa
Training Process
.....
TTI : 1988
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1989
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1990
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1991
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1992
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1993
Chosen scheduler type: Cqa
Training Process
.....
TTI : 1994
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1995
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1996
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1997
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 1998
Chosen scheduler type: Cqa
Training Process
.....
TTI : 1999
Chosen scheduler type: Pf
Training Process
.....
TTI : 2000
cleaning

```

Figure 22. Résultats lors de l'exécution du DRL.

La figure 21 nous montre le résultat obtenu après l'exécution d'un exemple en DRL en utilisant un réseau de neurones qui est composé de deux données en entrées (débit et équité) et nous donne deux sorties (PF et CQA)

On remarque que l'algorithme DRL arrive à basculer entre ces deux algorithmes en fonction des informations fournies sur l'état actuel et cela en chaque TTI.

8. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre en premiers temps les performances des trois algorithmes d'ordonnements (PF, PSS et CQA) et nous avons constaté que CQA est le plus adapté pour les trafics les plus gourmands en débit et des contraintes de temps (délai) car il leur donne un débit supérieure afin de les satisfaire et délaisse les trafics qui n'ont pas de contrainte de temps, alors que le PSS répond aux deux trafics de façon à satisfaire les trafics à temps réel comme la VoIP d'abord, puis répondre aux autres flux de manière plus ou moins équitable. Ce qui rend ces deux algorithmes plus performants en termes de débit global et d'efficacité spectrale. Tandis que PF répond mal au trafics qui demandent un grand débit avec des contraintes de temps, mais du point de vue du système global il reste le plus équitable.

Dans un deuxième temps nous avons expliqué les différentes étapes de mise en place d'un IA DRL dans notre scénario pour l'entraîner afin d'arriver à prendre une décision d'algorithme d'ordonnement à appliquer (PF ou CQA) tout en répondant aux exigences de débit et équité.

Conclusion

En conclusion, ce projet de fin d'études s'est concentré sur la simulation d'un réseau LTE en le considérant comme une infrastructure de la technologie 5G, en utilisant le simulateur *ns-3*. Notre objectif principal était de varier l'algorithme d'ordonnancement pour améliorer les performances du réseau.

Grâce à nos observations et à l'analyse des résultats obtenus, nous avons pu constater des variations significatives dans les performances du réseau LTE simulé selon les applications utilisées. Les variations des algorithmes d'ordonnancement ont permis d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles, d'améliorer le débit global du système, son efficacité spectrale et son équité. Ces résultats logiques attestent de l'impact des différents algorithmes d'ordonnancement sur les performances du réseau.

Cependant, en raison de contraintes de temps, nous n'avons malheureusement pas pu mettre en œuvre le module d'apprentissage par renforcement basé sur l'intelligence artificielle (IA). Cela aurait été une étape passionnante pour exploiter pleinement le potentiel de l'IA dans l'optimisation des performances du réseau. Néanmoins, nous avons expliqué en détail le concept de l'apprentissage par renforcement dans le cadre de notre étude.

Ce projet de recherche a permis d'approfondir notre compréhension des réseaux cellulaires LTE et 5G NR et des défis associés à l'amélioration de leurs performances. Nous avons acquis une expérience précieuse dans l'utilisation du simulateur *ns-3* et dans l'évaluation des différents algorithmes d'ordonnancement. Bien que nous n'ayons pas pu appliquer directement l'IA à notre étude, nous avons identifié des opportunités intéressantes pour de futures recherches, notamment en intégrant des techniques d'apprentissage par renforcement pour améliorer davantage les performances du réseau.

En somme, ce projet a été une étape cruciale dans notre parcours académique, nous permettant de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises et de nous familiariser avec les défis réels de l'optimisation la gestion des ressources radio dans les réseaux cellulaires. Nous espérons que les résultats et les conclusions de cette étude seront utiles pour d'autres étudiants et serviront de base à de futures recherches visant à améliorer les performances des réseaux cellulaires.

Bibliographie

- [1] M. SAUTER, «*From GSM to LTE-advanced Pro and 5G : An introduction to mobile*».
- [2] Samsung, «*4G-5G Interworking*» June 2017.
- [3] M. N. B. M. ., B. S. P. Marco Ajmone, *The 5G Italy Book 2019: a Multiperspective View of 5G*, 43124 Parma (PR) – ITALY.: Raffaele Bolla University of Genova and CNIT Giovanni Schembra University of Catania, 2019.
- [4] D. B. S. ALKAMA, mémoire: *Nouvelle approche pour l'optimisation de l'allocation des ressources dans les réseaux cellulaires*, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa.
- [5] I. Y. ABDELFETTAH Yasmine, mémoire: *allocation de ressources dans un réseau 5G het-net en utilisant l'algorithme «Decentralized Q-Learning »*, Université de Béjaïa, 2022.
- [6] B. D. e. B. K. M. VAN VEEN, *Beamforming : A versatile approach to spatial filtering*, Vols. %1 sur %25, no 2, IEEE assp magazine , 1988, pp. 4-24.
- [7] Arcep, «*Les enjeux de la 5G*», Rapport technique, Autorité de régulation des communications électronique et des postes., Mars, 2019.
- [8] «"How Beamforming Works in 5G NR", 5G World Pro,» [En ligne],[lien ici](#)
- [9] B. MAAZ, *Allocation des ressources radio dans les réseaux sans fil de la 5 G*, 2017.
- [10] A.Mamane, «*Etude de l'impact de différents algorithmes d'ordonnancement pour les femto-cellules pour des trafics temps réel dans le réseau 5G*», 2018.
- [11] z. sylvia, thèse: *Allocation de Ressources dans une Cellule 5G Tri-sectorielle*, 2020.
- [12] M. Pinedo, *Scheduling : Theory, algorithms and systems*, 1995.
- [13] A. MAMANE, *Scheduling Algorithms for 5G Networks and Beyond: Classification and Survey.*, 2022.
- [14] K. M. S. Allouche, *Algorithmes de scheduling dans le système LTE : analyse et programmation*, 2016.
- [15] K. W. E. M. A. M. F. Adi S.M.Y, *Performance Study of Channel-QoS Aware Scheduler in LTE Downlink Using NS3*, Multimedia University.
- [16] «*ANALYTICS & INSIGHTS*» [En ligne],[lien ici](#).
- [17] "*Introduction à l'apprentissage par renforcement*", Eduscol - Éducol - Ministère de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports, 2021.

- [18] A. MOUSSAID, *Appariement intelligent des appareils D2D sous-jacents aux réseaux cellulaires et activés pour le cache*, 2020.
- [19] F. B. B. C. C. a. WILHELMI, *Implications of decentralized Q-learning resource allocation in wireless networks*. In: 2017 IEEE 28th annual international symposium on personal, indoor, and mobile radio communications (PIMRC). IEEE, 2017.
- [20] M. ZIMMER, *Apprentissage par renforcement développemental*, université de Lorraine, 2018.
- [21] A. A.-F. Mehdi Mohammadi, *Enabling Cognitive Smart Cities Using Big Data and Machine Learning: Approaches and Challenges*, 2018.
- [22] S. I.H, «Deep Learning: A Comprehensive Overview on Techniques, Taxonomy, Applications and Research Directions» *SN Comput. Sci*, vol. 2, p. 420, 2021.
- [23] «Réseaux de neurones récurrents, LeMagIT» [En ligne], [lien ici](#).
- [24] «Techniques to Improve the Performance of a DQN Agent", Towards Data Science» [En ligne], [lien ici](#).
- [25] N. L. T. H. D. D. M. W. M. R. G. Silver, *"Deterministic policy gradient algorithms"*, PMLR, Éd., 2014.
- [26] J. J. H. A. P. N. H. T. E. Y. T. D. S. D. W. T. P. Lillicrap, *"Continuous control with deep reinforcement learning"*.
- [27] A. M. J. F. e. M. P. (OSSEIRAN, 5G mobile and wireless communications technology, Cambridge University Press) 2016.
- [28] H. Ghraieb, *"le Couplage de l'Apprentissage par Renforcement Profond et de la Mécanique des Fluides Numérique"*, 2022.
- [29] B. M. N. M. S. e. NSIRI. *Modeling and Performane Evaluation of Novel Scheduling Algorithm for Downlink LTE Cellular network*. Wireless Personal Communications, pp. vol. 83, no 3 2303-2316, 2015.
- [30] «TechnoPediaSite. 5G KPI (Key Performance Indicator). [En ligne], valable: [ici](#).
- [32] D. C. W. H. R. Jain. *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems*, Hudson, Digit. Equip. Corp, 1998.

Résumé

L'objectif de ce projet de fin d'études est d'étudier les algorithmes d'ordonnancement dans un réseau LTE/5G puis de choisir dynamiquement l'algorithme approprié à appliquer au cours de chaque intervalle de transmission. Le choix de l'algorithme approprié est déterminé par un algorithme basé sur les techniques d'apprentissage par renforcement. Les simulations ont été effectuées en utilisant le logiciel open source de simulations réseaux ns-3. Le choix de l'algorithme d'ordonnancement se fait parmi les algorithmes que sont PF, PSS et CQA et qui sont déjà implémentés su ns-3. En effet, un choix judicieux permet d'optimiser l'utilisation des ressources, d'améliorer le débit global, l'efficacité spectrale et l'équité du système. Pour réaliser les simulations souhaitées, nous montrons aussi dans ce mémoire comment le module AI, un module développé séparément de ns-3, peut interagir avec ns-3 et ainsi pouvoir tester les techniques d'apprentissage par renforcement.

Mots clé : LTE, 5G NR, *ns-3*, algorithme d'ordonnancement, DRL.

Abstract

The objective of this project is to study the scheduling algorithms in an LTE/5G network and then to dynamically choose the appropriate algorithm to apply during each transmission time interval. The choice of the appropriate algorithm is determined by an algorithm based on reinforcement learning techniques. The simulations were performed using the open source ns-3 network simulation software. The choice of the scheduling algorithm is made among the algorithms that are PF, PSS and CQA and which are already implemented in ns-3. Indeed, a judicious choice of the scheduling algorithm makes it possible to optimize the use of resources, to improve the overall throughput, the spectral efficiency and the fairness of the system. To achieve the desired simulations, we also show in this dissertation how the AI module, a module developed separately from ns-3, can interact with ns-3 and thus be able to test reinforcement learning techniques.

Keywords : LTE, 5G NR, *ns-3*, scheduling algorithms, DRL.