



THESE DE DOCTORAT

Présentée par :

Mr : MAHFOUDI Mohammed

Spécialité : Télécommunications

Sujet de la thèse :

Contribution à l'amélioration de la qualité de service pour les flux voix et vidéo sur LTE (4G).

Thèse présentée et soutenue le 28 Mai 2016 devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------------|------------|---|---------------------|
| Pr. QJIDAA Hassan | Professeur | Faculté des Sciences Dhar El Mehraz. Fès. | Président |
| Pr. ELKOUCH Rachid | Professeur | Directeur adjoint de l'Institut national des postes et des télécommunications. Rabat. | Rapporteur |
| Pr. RIFI Mounir | Professeur | Directeur de l'Ecole Supérieure de Technologie. Casablanca. | Rapporteur |
| Pr. OUREMCHI Rabah | Professeur | Ecole Supérieur de Technologies. Fès | Rapporteur |
| Pr. HAQIQ Abdelkrim | Professeur | Faculté des Sciences et Techniques. Settat. | Examineur |
| Pr. ELGHAZI Mohammed | Professeur | Ecole Supérieur de Technologies. Fès. | Examineur |
| Pr. ELBEKKALI Moulhime | Professeur | Ecole Nationale des Sciences Appliquées. Fès. Vice-président de l'USMBA. Fès. | Directeurs de Thèse |
| Pr. NAJID Abdellah | Professeur | Institut national des postes et des télécommunications. Rabat | |

Etablissement :

- ✓ Ecole Supérieure de Technologie. Fès.
- ✓ Institut National des Postes et des Télécommunications. Rabat.

Laboratoire d'accueil :

- ✓ Laboratoire de Transmission et de Traitement de l'Information (LTTI). Fès.
- ✓ Laboratoire de recherche en Systèmes de Télécommunications, Réseaux et Services (STRS).Rabat.

DEDICACES

Je dédie ce travail.

A la mémoire de mon père, Que dieu ait son âme.

A ma chère mère pour son amour inestimable, sa confiance, son soutien, ses sacrifices et toutes les valeurs qu'elle a su m'inculquer.

A mes adorables frères et à ma chère sœur, vous avez toujours été pour moi d'une aide très précieuse. Je vous dédie ce travail en témoignages de ma grande affection, Qu'ALLAH vous exauce vos vœux...

A ma femme pour ses sacrifices, sa compréhension et sa présence dans ma vie.

*A ma petite princesse *Fasmine*, mon trésor et ma source d'inspiration.*

A tous les membres de ma famille et de ma belle famille pour leur soutien moral, et pour les moments de bonheur, de joie et de respect qu'ont partagé.

A mes professeurs qui ont fait preuve de patience, et m'ont fait transmettre leur connaissance, à eux je ne peux que témoigner de toute ma reconnaissance.

A tous mes amis qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail, je leur exprime tous mes sentiments d'affection et de respect.

Remerciements

Après ma gratitude à Dieu

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Messieurs Moulhime El Bekkali et Abdellah Najid mes deux professeurs et directeurs de thèse pour m'avoir fait l'honneur de diriger ma thèse. Je les remercie également pour leur aide, leur encadrement, et leurs conseils qui m'ont permis constamment de faire progresser mes recherches.

J'aimerais par ailleurs exprimer mes sincères remerciements à toute l'équipe du laboratoire de recherche LTTI, plus particulièrement à Monsieur Ali Benbassou, directeur du laboratoire et mon ex professeur à l'ENSA, Ainsi que tous mes anciens professeurs. Je voudrai également adresser des remerciements spéciaux à mes professeurs EL ghazi Mohammed et MAZER Saïd pour leurs soutiens constants, leurs conseils et leurs recommandations, je leur exprime ma profonde gratitude et mon énorme respect.

Je voudrais également remercier tous mes collègues et amis de HUAWAI technologies. Je garderai un bon souvenir de l'ambiance d'équipe dont j'ai fait partie. Plus particulièrement, je remercie Mr. Lilianhui, Mr. Brahim Benhammou, Mr. Paul et Mr. Adil El bouzrazi qui n'ont pas hésité à partager leurs expériences et à me fournir toute nouvelle information en relation avec mon sujet de recherche, et à qui je souhaite une très grande réussite personnelle. J'ai également une pensée amicale pour Mr. Khabiza EL hassan, Mr. Khadri Nabil et Mr. Redouan alaarabiou, dont je garderai l'exemple ainsi que le souvenir de nos discussions.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à tous les membres du jury, Pr. Rachid ELKOUCH, Pr. Mounir RIFI, Pr. Abdelkrim HAQIQ et Pr. Rabah Ouremchi, auxquels je suis très reconnaissant pour la spontanéité et l'amabilité avec lesquelles ils ont accepté d'évaluer mon travail.

Finalement, un grand merci est adressé à ma très chère famille et aussi à mes très chères amis et à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de cette étude doctorale.

Table des matières :

| | |
|--|----|
| Résumé..... | 8 |
| Abstract | 9 |
| Liste des figures : | 10 |
| Liste des tableaux :..... | 14 |
| Liste des abréviations..... | 15 |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 19 |
| Chapitre I : Généralité sur les réseaux radio mobiles..... | 22 |
| Introduction :..... | 22 |
| 1. Evolution des systèmes cellulaires : | 22 |
| 1.1. La première génération de téléphonie cellulaire : 1G..... | 22 |
| 1.2. La deuxième génération de téléphonie cellulaire : 2G | 24 |
| 1.3. La troisième génération de téléphonie cellulaire : 3G..... | 30 |
| 2. Evolution du secteur de Télécommunication. | 35 |
| 2.1. Croissance du nombre d’abonnés mobiles au Maroc. | 35 |
| 2.2. Croissance du nombre des Smartphones vendus :..... | 36 |
| 2.3. Evolution des services :..... | 37 |
| 2.4. Au-delà de la 3G! | 39 |
| 3. Etude de la technologie LTE. | 39 |
| 3.1. Caractéristiques et motivations pour la technologie LTE (4G)..... | 39 |
| 3.2. L’Architecture du réseau LTE..... | 41 |
| 3.3. Schéma de transmission radio sur LTE. | 44 |
| 3.4. Les mécanismes de support de la voix sur LTE. | 48 |
| 4. 2015, l’année de la 4G au Maroc : | 53 |
| Conclusion : | 54 |
| CHAPITRE II: La qualité de service et la gestion des ressources radio sur LTE..... | 55 |
| 1. La qualité de service QoS sur le réseau LTE | 55 |
| 1.1. Paramètres de QoS sur LTE. | 56 |
| 1.2. La gestion de la qualité de service..... | 58 |
| 2. Structure et gestion des ressources de l’interface radio LTE. | 59 |
| 2.1. Architecture et structure de l’interface radio sur LTE..... | 59 |
| 2.1.1. Architecture en couche de l’interface radio LTE. | 59 |
| 2.1.2. Architecture protocolaire de l’interface radio. | 61 |
| 2.1.3. Les canaux de communication de l’interface radio LTE..... | 62 |
| 2.1.4. Les informations de contrôle échangées sur l’interface radio LTE. | 64 |
| 2.2. Gestion des ressources radio (RRM)..... | 65 |
| 2.2.1. Contrôle d’admission : | 66 |
| 2.2.2. L’adaptation de lien et l’ordonnancement : | 66 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.2.3. | Équilibrage de charge : | 69 |
| 2.2.4. | La gestion d'interférences. | 70 |
| 3. | L'ordonnement en mode Downlink | 75 |
| 3.1. | Scheduling en mode downlink dans l'interface radio LTE | 75 |
| 3.1.1. | Processus de scheduling en mode downlink..... | 75 |
| 3.1.2. | Principe d'allocation des ressources..... | 76 |
| 3.1.3. | Critères de classification des algorithmes d'ordonnement..... | 78 |
| 3.2. | Stratégies d'ordonnement dans les systèmes LTE en mode downlink | 79 |
| 3.2.1. | Les algorithmes classiques | 80 |
| 3.2.2. | Les algorithmes équitables. | 81 |
| 3.2.3. | Algorithmes opportunistes..... | 83 |
| | Conclusion : | 85 |
| | CHAPITRE III : Evaluation des performances des algorithmes opportunistes. | 87 |
| 1. | Les critères d'évaluation et choix du simulateur. | 87 |
| 1.1. | Les critères d'évaluation..... | 87 |
| 1.2. | Choix du simulateur. | 90 |
| 1.3. | Présentation du simulateur LTE-SIM..... | 92 |
| 1.3.1. | Présentation générale..... | 92 |
| 1.3.2. | Fonctionnalités. | 92 |
| 1.3.3. | Structure du LTE-Sim | 93 |
| 1.3.4. | Présentation des différentes étapes de création de scénarios..... | 94 |
| 1.4. | Modèle de simulation. | 94 |
| 1.5. | Modèle du canal. | 95 |
| 2. | Evaluation des performances des ordonnanceurs radio. | 95 |
| 2.1. | Scénario de la haute mobilité. | 95 |
| 2.1.1. | Formulation et justification de problématique..... | 95 |
| 2.1.2. | Scénario d'étude et paramètres de simulation. | 96 |
| 2.1.3. | Résultats de simulation..... | 97 |
| 2.1.4. | Bilan : | 102 |
| 2.2. | Scénario de la haute congestion. | 103 |
| 2.2.1. | Formulation de problématique et justification..... | 103 |
| 2.2.2. | Scénario d'étude et paramètres de simulation. | 103 |
| 2.2.3. | Résultats de simulation..... | 105 |
| 2.2.4. | Bilan | 109 |
| 2.3. | Scénario avec des cellules femto. | 110 |
| 2.3.1. | Formulation de problématique et justification..... | 110 |
| 2.3.2. | Scénario d'étude et paramètres de simulation. | 110 |
| 2.3.3. | Résultats de simulation..... | 111 |

| | |
|---|-----|
| 2.3.4. Bilan : | 115 |
| Conclusion : | 116 |
| CHAPITRE IV : Evaluation des performances de l'algorithme proposé. | 117 |
| 1. L'algorithme d'ordonnement Proposé. | 118 |
| 1.1. Principe de fonctionnement de l'algorithme proposé..... | 118 |
| 1.2. Implémentation de la nouvelle métrique dans le simulateur LTE-SIM. | 120 |
| 1.3. Modèle du trafic et du canal de simulations. | 121 |
| 2. Présentation et interprétation des résultats de simulation. | 122 |
| 2.1. Scénario d'une mobilité normale..... | 122 |
| 2.1.1. Formulation de problématique et justification..... | 122 |
| 2.1.2. Scénario et paramètres de simulation. | 123 |
| 2.1.3. Résultats de simulation..... | 124 |
| 2.1.4. Bilan : | 128 |
| 2.2. Scénario de la haute congestion. | 128 |
| 2.2.1. Formulation de problématique et justification..... | 128 |
| 2.2.2. Scénario et paramètres de simulation. | 129 |
| 2.2.3. Résultats de simulation..... | 129 |
| 2.2.4. BILAN : | 134 |
| 2.3. Scénario de la haute mobilité. | 134 |
| 2.3.1. Formulation et justification de problématique..... | 134 |
| 2.3.2. Scénario et paramètres de simulation. | 134 |
| 2.3.3. Résultats de simulation..... | 135 |
| 2.3.4. Bilan. | 140 |
| 2.4. Scénario avec des cellules femto. | 140 |
| 2.4.1. Formulation de problématique et justification..... | 140 |
| 2.4.2. Scénario et paramètres de simulation. | 140 |
| 2.4.3. Résultats de simulation..... | 141 |
| 2.4.4. Bilan. | 146 |
| Conclusion : | 146 |
| Conclusion Générale et Perspectives | 148 |
| Liste des publications : | 151 |
| Liste des références | 152 |
| ANNEXE I..... | 157 |

Résumé

Pour tous les opérateurs et pour de nombreuses années, les appels vocaux étaient parmi les sources de bénéfice, la demande de données mobiles a été lente au départ, mais à partir de l'année 2010 et grâce à la découverte des téléphones intelligents, Les clients sont devenus assez exigeants, ils recommandent de nouveaux aspects avec une meilleure qualité de service (QoS). LTE (Long Term Evolution) a été émergé comme une solution prometteuse qui permet de répondre aux exigences des clients. La mise en œuvre du LTE est en train de se développer dans plusieurs pays à travers le monde dont le Maroc fait partie.

Une fonctionnalité clé du réseau LTE est l'adoption d'un certain nombre de procédures avancées de gestion des ressources radio en guise d'améliorer les performances du système et de subvenir les besoins des utilisateurs en termes de qualité de service surtout pour les flux temps réel à savoir la voix et la vidéo. Les mécanismes d'ordonnancement de paquets en particulier jouent un rôle fondamental du fait qu'ils sont responsables de choisir, minutieusement et dans un temps précis, comment distribuer les ressources radio entre les différentes stations en prenant en compte les conditions du canal et les exigences de QoS. Les standards du 3GPP n'ont pas encore spécifiés l'algorithme d'allocation des ressources radio du réseau d'accès. Ce qui constitue une voie de recherche pour les développeurs et les institutionnels.

La principale contribution de ce travail de thèse s'étale sur deux parties, la première a pour but de prouver lequel des algorithmes, les plus connus dans les réseaux radio mobiles, justifie de bonnes performances pour chaque type de flux temps réel, notamment pour les flux VoIP et Vidéo, et pour des cas de scénarios extrêmes, alors que pour la deuxième partie, l'objectif est de développer puis d'évaluer les performances d'un nouvel algorithme d'ordonnancement, dont nous comparons les performances avec celles d'algorithmes bien connus, déjà implémentés dans les stations de base eNodeB et qui ont été choisis comme étalons grâce à leurs performances dans les réseaux radio mobiles. Notre évaluation des performances est menée en considérant différents cas de scénarios d'étude, dans un environnement de simulation, au moyen du simulateur LTE-Sim. Les critères de performance choisis sont le délai de transmission de paquets, le taux de perte de paquets (PLR), le débit de paquets et l'efficacité spectrale.

Mots clés :

LTE, QOS, gestion de ressources radio, ordonnancement, optimisation, VoLTE.

Abstract

For all operators and for many years ago, voice calls were among the sources of revenue, the demand for mobile data was slow initially but starting from 2010 and due to the discovery of Smartphones, customers have become quite demanding; they recommend new features with high quality of service (QoS). LTE (Long Term Evolution) has been emerged as a promising solution that meets customer requirements. The implementation of LTE is being developed in several countries around the world, to which Morocco is belonging.

A key feature of LTE is the adoption of an advanced radio resource management procedures to improve system performance and to meet user needs in terms of quality of service, especially for real-time streams namely voice and video. The particular packet scheduling mechanisms play a key role because they are responsible for selecting, thoroughly and in a specific time, how to distribute radio resources among different stations taking into account channel conditions and QoS requirements. The 3GPP standards have not yet specified the scheduling algorithms. Which constitute a research line for developers and institutional.

The main contribution of this thesis is spread over two parts, the purpose of the first part is to prove which of the well known algorithms in mobile radio networks warrants good performance for each type of stream, especially for VoIP and Video streams, while the second part aims to develop and to evaluate the performance of the new scheduling algorithm by comparing it's performances with the same well known algorithms, which are implemented at the eNodeBs and which have been selected as standard algorithms due to their performances in mobile radio networks. The performance evaluation is conducted by considering different scenarios in a simulation environment, using LTE-SIM simulator. The selected performance criteria's are packet transmission delay, packet loss ratio (PLR), packet throughput and spectral efficiency.

Key-Words:

LTE, QOS, radio resource management (RRM), scheduling, optimization, VoLTE.

Liste des figures :

| | |
|---|----|
| Figure I. 1: Le Motorola Dynatac 8000x..... | 23 |
| Figure I. 2: Radiocom 2000..... | 24 |
| Figure I. 3: L'architecture du réseau GSM. | 26 |
| Figure I. 4: L'architecture réseau GPRS. | 28 |
| Figure I. 5: L'architecture du réseau EDGE. | 29 |
| Figure I. 6: L'architecture du réseau UMTS..... | 31 |
| Figure I. 7: Evolution des standards de l'UMTS vers LTE..... | 33 |
| Figure I. 8: Évolution du nombre d'abonnement mobile au Maroc..... | 36 |
| Figure I. 9: Parts de marché du parc des abonnés au service mobile (Septembre 2015)..... | 36 |
| Figure I. 10: Le taux d'accès aux sites web entre [Jan.-2015] et [Déc.-2015]. | 37 |
| Figure I. 11: L'architecture du réseau 4G/LTE..... | 41 |
| Figure I. 12: Architecture du réseau d'accès LTE..... | 42 |
| Figure I. 13: L'architecture du réseau cœur EPC..... | 43 |
| Figure I. 14: Représentation fréquentielle-temporelle d'un signal OFDM. | 45 |
| Figure I. 15: La structure de la trame FDD. | 45 |
| Figure I. 16: La structure du bloc de ressource (BR). | 46 |
| Figure I. 17: L'OFDM vis-à-vis l'OFDMA. | 47 |
| Figure I. 18: La solution CSFB (Circuit Switched Fallback)..... | 48 |
| Figure I. 19: La solution SVLTE (Simultaneous Voice and LTE)..... | 49 |
| Figure I. 20: La solution VoLGA (Voice Over LTE via Generic Access)..... | 50 |
| Figure I. 21: Architecture réseau dans le cas de déploiement de VoLTE. | 51 |
| Figure I. 22: La solution basée commutation de paquets. | 52 |
| Figure I. 23: La solution SRVCC (Single radio Voice Call Continuity)..... | 52 |
| | |
| Figure II. 1: Les différents types de bearer..... | 55 |
| Figure II. 2: Classification des Bearers EPS. | 56 |
| Figure II. 3: Architecture en couche de l'interface radio de système LTE. | 59 |
| Figure II. 4: L'architecture protocolaire du deux plans usager et contrôle du réseau LTE. | 61 |
| Figure II. 5: Les canaux de communication de l'interface radio LTE sur la voie descendante. | 63 |
| Figure II. 6: Les canaux de communication de l'interface radio LTE sur la voie montante. | 63 |
| Figure II. 7: Le schéma de synoptique du contrôle de puissance en boucle ouverte..... | 68 |
| Figure II. 8 : Le schéma de synoptique du contrôle de puissance en boucle Fermée..... | 68 |
| Figure II. 9: L'influence de la position de l'UE dans la cellule sur son débit..... | 70 |
| Figure II. 10: Les interférences entre symboles dues au multi-trajet. | 71 |
| Figure II. 11: Principe d'insertion du Préfixe cyclique..... | 72 |
| Figure II. 12: Exemple d'interférences en sens montant et descendant. | 73 |
| Figure II. 13: Le schéma de réutilisation HFR (Hard Frequency Reuse)..... | 73 |
| Figure II. 14: Le schéma de réutilisation FFR (Fractional Frequency Reuse). | 74 |
| Figure II. 15: Le schéma de réutilisation SFR (Soft Frequency Reuse)..... | 74 |
| Figure II. 16: Le principe de fonctionnement d'un ordonnanceur. | 77 |
| Figure II. 17: Principe de fonctionnement du Round Robin. | 80 |
| Figure II. 18: Le débit en fonction de la distance des utilisateurs depuis la station de base. | 81 |

| | |
|--|-----|
| Figure II. 19: Principe d'allocation pour l'algorithme Max-Min Fair..... | 82 |
| Figure II. 20: Le principe de maximisation du débit via l'allocation MaxSNR..... | 83 |
| Figure II. 21: Le principe de fonctionnement de l'algorithme PF. | 84 |
| | |
| Figure III. 1: Environnement de simulation pour le scénario de la haute mobilité. | 96 |
| Figure III. 2: Evolution du délai de paquets en fonction du nombre d'UEs pour le flux VoIP dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 98 |
| Figure III. 3: Evolution du délai de paquets en fonction du nombre d'UEs pour le flux Vidéo, dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 98 |
| Figure III. 4: Evolution du PLR en fonction du nombre d'UEs pour le flux VoIP, dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 99 |
| Figure III. 5: Evolution du taux de perte de paquets en fonction du nombre d'UEs actifs pour le flux vidéo, dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 100 |
| Figure III. 6: Evolution du débit moyen en fonction du nombre d'UEs pour le flux VoIP, dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 101 |
| Figure III. 7: Evolution du débit moyen en fonction du nombre d'UEs pour le flux Vidéo, dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 101 |
| Figure III. 8: Evolution de l'efficacité spectrale en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur..... | 102 |
| Figure III. 9: Environnement réseau d'étude de la haute congestion du trafic réseau. La cellule centrale constitue la zone de couverture radio d'étude. Les deux cellules périphériques représentent la source d'interférences pour la cellule centrale..... | 104 |
| Figure III. 10: Evolution du délai de paquet pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion réseau. | 105 |
| Figure III. 11: Evolution du délai de paquet pour le flux vidéo en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion réseau. | 106 |
| Figure III. 12: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion réseau. | 106 |
| Figure III. 13: Evolution du PLR pour le flux vidéo, en fonction du nombre d'UEs, en période de haute congestion du trafic réseau. | 107 |
| Figure III. 14: Evolution du débit moyen pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs et en période de forte congestion du trafic réseau..... | 108 |
| Figure III. 15: Evolution du débit, pour le flux vidéo, en fonction du nombre d'UEs et en période de haute congestion du trafic réseau. | 108 |
| Figure III. 16: Evolution de l'efficacité spectrale en fonction du nombre d'utilisateurs en période de forte affluence dans la zone de couverture de la cellule..... | 109 |
| Figure III. 17: Environnement de simulation avec des cellules Femto. | 110 |
| Figure III. 18: Evolution du délai pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UE. | 112 |
| Figure III. 19: Evolution du délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs. | 112 |
| Figure III. 20: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs..... | 113 |
| Figure III. 21: Evolution du PLR pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs..... | 113 |
| Figure III. 22: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs. | 114 |
| Figure III. 23: Evolution du débit pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs. | 115 |
| Figure III. 24: Evolution de l'efficacité spectrale en fonction du nombre d'utilisateurs..... | 115 |

Liste des figures :

| | |
|---|-----|
| Figure IV. 1: Evolution du délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs. Pour le cas d'une mobilité normale..... | 124 |
| Figure IV. 2: Evolution du délai pour le flux vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale..... | 125 |
| Figure IV. 3: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale..... | 125 |
| Figure IV. 4: Evolution du PLR pour le flux vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale..... | 126 |
| Figure IV. 5: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale..... | 127 |
| Figure IV. 6: Evolution du débit pour le flux vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale..... | 127 |
| Figure IV. 7: Evolution de l'efficacité spectrale de la cellule en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale. | 128 |
| Figure IV. 8: Evolution du délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau. | 130 |
| Figure IV. 9: Evolution du délai pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau. | 130 |
| Figure IV. 10: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau. | 131 |
| Figure IV. 11: Evolution du PLR pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau. | 132 |
| Figure IV. 12: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau. | 132 |
| Figure IV. 13: Evolution de l'efficacité spectrale de la cellule en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau..... | 133 |
| Figure IV. 14: Evolution du débit pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau. | 133 |
| Figure IV. 15: Evolution du délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 136 |
| Figure IV. 16: Evolution du délai pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 136 |
| Figure IV. 17: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 137 |
| Figure IV. 18: Evolution du PLR pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 138 |
| Figure IV. 19: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 138 |
| Figure IV. 20: Evolution du débit pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 139 |
| Figure IV. 21: Evolution de l'efficacité spectrale de la cellule en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur. | 139 |
| Figure IV. 22: Evolution de délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto. | 142 |
| Figure IV. 23: Evolution de délai pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto. | 142 |

Liste des figures :

| | |
|--|-----|
| Figure IV. 24: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto. | 143 |
| Figure IV. 25: Evolution du PLR pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto. | 143 |
| Figure IV. 26: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto. | 144 |
| Figure IV. 27: Evolution du débit pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto. | 145 |
| Figure IV. 28: Evolution de l'efficacité spectrale de la cellule en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto. | 145 |

Liste des tableaux :

| | |
|---|-----|
| Tableau I. 1: Schéma de codage du réseau GPRS..... | 28 |
| Tableau I. 2: Les schémas de codage et de modulation utilisé dans le réseau EDGE..... | 30 |
| Tableau I. 3: Comparaison des technologies GSM, UMTS Release 99, HSPA, et HSPA+..... | 35 |
| Tableau I. 4: Les 5 meilleurs vendeurs du Smartphone au monde pour T3-2015..... | 37 |
| Tableau I. 5: Le nombre de bloc de ressources pour chaque bande..... | 46 |
| | |
| Tableau II. 1: Paramètres QCI (QOS Class Identifier)..... | 57 |
| Tableau II. 2: La correspondance entre les valeurs CQI et les types de modulation..... | 78 |
| Tableau II. 3: Comparaison de performances des algorithmes d'ordonnements..... | 86 |
| | |
| Tableau III. 1: Les critères de performances du réseau LTE, IMT-advanced et LTE-advanced..... | 89 |
| Tableau III. 2: Paramètres de simulation pour le scenario de la haute mobilité..... | 97 |
| Tableau III. 3: Paramètres de simulation pour le scénario de la haute congestion..... | 104 |
| Tableau III. 4: Paramètres de simulation pour le scénario des cellules Femto..... | 111 |
| | |
| Tableau IV. 1: Paramètres de simulation pour le scénario d'une mobilité normale..... | 123 |
| Tableau IV. 2: Paramètres de simulation pour le cas de la haute congestion..... | 129 |
| Tableau IV. 3: Paramètres de simulation dans le cas de la haute mobilité..... | 135 |
| Tableau IV. 4: Paramètres de simulation pour le scénario des cellules Femto..... | 141 |
| Tableau IV. 5: Comparaison des performances entre l'algorithme proposé et celui du MLWDF..... | 146 |

Liste des abbreviations

A

AMBR: Aggregate Maximum Bit Rate
AMC: Adaptive Modulation and Coding
A-MPR: Additional Maximum Power Reduction
API: Application Programming Interface
APN: Access Point Name
APN-AMBR: Access Point Name–Aggregate Maximum Bit Rate
ARP: Allocation and Retention Priority
ARQ: Automatic Repeat Request

B

BCCH: Broadcast Control Channel
BCH: Broadcast Channel
BER: Bit Error Ratio
BE: Best Effort
BLER: Block Error Ratio
BPSK: Binary Phase-Shift Keying
BS: Bearer Service
BSC: Base Station Controller
BTS: Base Transceiver Station
BW: Bandwidth

C

CA: Carrier Aggregation
CBR: Constant Bit Rate
CCCH: Common Control Channel
CDMA: Code Division Multiple Access
CINR: Carrier to Interference Plus Noise Ratio
CP: Cyclic Prefix
CQI: Channel Quality Indicator
CRC: Cyclic Redundancy Check
CRS: Cell Reference Symbol
CS: Circuit Switched
CSFB: Circuit Switched Fall Back
CSI: Channel State Information

D

DCCH: Dedicated Control Channel
DCI: Downlink Control Information
DL-MIMO: Downlink Multiple Input Multiple Output
DL-SCH: Downlink Shared Channel
DPCCH: Downlink Physical Control Channel
DRB: Data Radio Bearer
DRX: Discontinuous Reception
DSP: Digital Signal Processing
DTCH: Dedicated Traffic Channel
DTX: Discontinuous Transmission
DwPTS: Downlink Pilot Time Slot

E

EDGE: Enhanced Data rates for GSM Evolution
eICIC: Enhanced Inter-Cell Interference Coordination

EIR: Equipment Identity Register
EMM: EPS Mobility Management
eNB: Evolved Node B
EPC: Evolved Packet Core
ePDG: Evolved Packet Data Gateway
EPS: Evolved Packet System
ETSI: European Telecommunications Standards Institute
E-UTRA: Evolved Universal Terrestrial Radio Access
E-UTRAN: Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network

EXP/PF: Exponential Proportional Fairness
EXP-RULE: Exponential-RULE

F

FACH Forward Access Channel
FDD Frequency Division Duplex
FDMA Frequency Division Multiple Access
FEC Forward Error Correction
FFR Fractional Frequency Reuse
FRF Frequency Reuse Factor
FRM Frequency Reuse Mechanisms

G

GBR: Guaranteed Bit Rate
GERAN: GSM Enhanced Radio Access Network
GGSN: Gateway GPRS Support Node
GP: Guard Period
GPRS: General Packet Radio Service
GSM: Global System for Mobile Communication
GSMA: GSM Association
GTP: GPRS Tunneling Protocol
GTP-C: GTP Control
GTP-U: GTP User
GW: Gateway

H

HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request
HDR: High Data Rate
HeNB: Home eNB
HI: HARQ Indicator
HII: High Interference Indicator
HOL: Head Of Line
HLR: Home Location Register
HSDPA: High Speed Downlink Packet Access
HSPA: High Speed Packet Access
HSS: Home Subscriber Server
HSUPA: High Speed Uplink Packet Access

I

ICI: Inter-Carrier Interference
ICIC: Inter-Cell Interference Coordination
IMEI: International Mobile Equipment Identity

Liste des abbreviations

IMS: IP Multimedia Subsystem
IMSI: International Mobile Subscriber Identity
IMT: International Mobile Telecommunications
Inter-RAT: Inter-Radio Access Technology
ISI: Inter Symbol Interference
ITU: International Telecommunications Union

K

KPI Key Performance Indicator

L

LOS: Line of Sight
LTE: Long Term Evolution
LOG-RULE: Logarithmic RULE

M

M2M: Machine to Machine
MAC: Medium Access Control
MBMS: Multimedia Broadcast and Multicast Service
Mbps: Megabits per second
MBR: Maximum Bit Rate
MCCH: Multicast Control Channel
MCH: Multicast Channel
MCS: Modulation and Coding Scheme
MIB: Master Information Block
MIMO: Multiple Input Multiple Output
M-LWDF: Modified-Largest Weighted Delay First
MME: Mobility Management Entity
MMF: Max-Min Fair
MMS: Multimedia Service
MPR: Maximum Power Reduction
M-RNTI: MBMS-RNTI
MSC: Mobile Switching Center
MTC: Machine-Type Communication
MTCH: Multicast Traffic Channel
MU-MIMO: Multi-User MIMO

N

NACK: Negative Acknowledgement
NAS: Non-Access Stratum
NB: Node B
NDS: Network Domain Security
NGBR: non-Guaranteed Bit-Rate
NLOS: Non-Line of Sight
NS: Network Signaling
NW: Network
NRT: Non-Real Time

O

O&M: Operations and Maintenance
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OI: Overload Indicator
OMC: Operation and Maintenance Center

P

PAPR: Peak-to-Average Power Ratio
PBCH: Physical Broadcast Channel
PBR: Prioritized Bit Rate
PCCH: Paging Control Channel
PCCPCH: Primary Common Control Physical Channel
PCEF: Policy and Charging Enforcement Function
PCFICH: Physical Control Format Indicator Channel
PCH: Paging Channel
PCRF: Policy and Charging Rules Function
PCM: Power Control based Mechanisms
PDCCH: Physical Downlink Control Channel
PDCP: Packet Data Convergence Protocol
PDN: Packet Data Network
PDN-GW: Packet Data Network Gateway (P-GW)
PDSCH: Physical Downlink Shared Channel
PDU: Protocol Data Unit
PECF: Policy Enforcement and Charging Function
P-GW: Packet Data Network Gateway.
PF: Proportional Fairness.
PHICH: Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PHY: Physical layer
PI: Paging Information
PLMN: Public Land Mobile Network
PLR: Packet Loss Ratio
PMCH: Physical Multicast Channel
PMCH: Physical Multicast Channel
PMI: Precoding Matrix Indicator
P-MPR: Power Management MPR
PRACH: Physical Random Access Channel
PRB: Physical Resource Block
P-RNTI: Paging Radio Network Temporary Identity
PS: Packet Scheduler
PSS: Primary Synchronization Signal
PUCCH: Physical Uplink Control Channel
PUSCH: Physical Uplink Shared Channel

Q

QAM: Quadrature Amplitude Modulation
QCI: QoS Class Identifier
QoE: Quality of Experience
QoS: Quality of Service
QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying

R

RAB: Radio Access Bearer
RACH: Random Access Channel
RAN: Radio Access Network
RA-RNTI: Random Access Radio Network Temporary Identity

Liste des abbreviations

RAT: Radio Access Technology
RB: Resource Block
RE: Resource Element
RF: Radio Frequency
RI: Rank Indication
RLC: Radio Link Control
RMC: Reference Measurement Channel
RNC: Radio Network Controller
RNTI: Radio Network Temporary Identifier
RNTP: Relative Narrowband Transmit Power
RoHC: Robust Header Compression
RR: Round Robin
RRC: Radio Resource Control
RRM: Radio Resource Management
RS: Reference Signal
RSCP: Received Signal Code Power
RSRP: Reference Signal Received Power
RSRQ: Reference Signal Received Quality
RSSI: Received Signal Strength Indicator
RSTD: Reference Signal Time Difference
RT: Real Time
RTT: Radio Transmission Technology
RX: Receiver

S

SAE: System Architecture Evolution
SC-FDMA: Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCH: Synchronization Channel
SDF: Service Data Flow
SDU: Service Data Unit
SGSN: Serving GPRS Support Node
S-GW: Serving Gateway
SIB: System Information Block
SIMO: Single Input Multiple Output
SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio
SIP: Session Initiation Protocol
SI-RNTI: System Information Radio Network Temporary Identity
SISO: Single Input Single Output
SMS: Short Message Service
SNR: Signal-to-Noise Ratio
SPID: Subscriber Profile ID
SPS: Semi-Persistent Scheduling

SR: Scheduling Request
SRB: Signaling Radio Bearer
SRS: Sounding Reference Signal
SRVCC: Single Radio Voice Call Continuity
SU-MIMO: Single User MIMO
TEI: Terminal Endpoint Identifier
TEID: Tunnel Endpoint Identifier
TDMA: Time Division Multiple Access
TD-SCDMA: Time Division Synchronous Code Division

T

TCP: Transmission Control Protocol
TDD: Time Division Duplex Multiple Access
TF: Transport Format
TFT: Traffic Flow Template
TP: Transmit Power
TPC: Transmit Power Control
TTI: Transmission Time Interval

U

UDP: User Datagram Protocol
UE: User Equipment
UE-AMBR: UE Aggregate Maximum Bit Rate
UL: Uplink
UL-MIMO: Uplink Multiple Input Multiple Output
UL-SCH: Uplink Shared Channel
UMB: Ultra-Mobile Broadband
UMTS: Universal Mobile Telecommunications System
UPE: User Plane Entity
UpPTS: Uplink Pilot Time Slot
URA: UTRAN Registration Area
USIM: Universal Subscriber Identity Module
UTRA: Universal Terrestrial Radio Access
UTRAN: Universal Terrestrial Radio Access Network

V

VLR: Visitor Location Register
VoIP: Voice over Internet Protocol
VoLGA: Voice over LTE Generic Access
VoLTE: Voice over LTE
VRB: Virtual Resource Block
VRC: Variable Reference Channel

W

W-CDMA: Wideband Code Division Multiple Access

INTRODUCTION GENERALE

Le trafic dans les réseaux de téléphonie mobile a connu cette dernière décennie une évolution spectaculaire et accélérée grâce à l'augmentation et à la diversité de services large bande ainsi qu'à la découverte d'équipements intelligents dits de nouvelle génération tels que les Smartphones, Tablettes et/ou d'autres équipements semblables. Cette évolution a mis les anciens réseaux 3G sous pression en raison de leur incapacité à pouvoir répondre aux exigences des clients en matière de débit et de qualité de service QoS pour les différents types de flux (voix, vidéo et données). Pour faire face à cette situation, le développement d'une nouvelle génération de standards de la téléphonie mobile s'avère nécessaire. Cette nouvelle génération est nommée Quatrième Génération '4G'.

Le LTE (Long Term Evolution) est mené par l'organisme de standardisation 3GPP (3rd Generation Partnership Project) comme étant son premier candidat pour les réseaux de la quatrième génération de la téléphonie mobile. Le LTE vise à améliorer la capacité totale du système via l'introduction de nouvelles architectures du réseau et par l'emploi de nouvelles techniques d'accès multiple comme l'OFDMA pour le sens descendant et la SC-FDMA pour le sens montant, de plus le concept des systèmes multi-antennes a été adopté (MIMO). Malgré ces performances, le réseau LTE, considéré comme un réseau 3.9 G, n'a pas réussi à répondre à toutes les exigences des réseaux 4G comme spécifié par l'ITU (International Telecommunication Union). Actuellement, le réseau LTE a été choisi par la plupart des opérateurs de téléphonie mobile dans le monde, y compris ceux du Maroc, comme la technologie de passage vers les vrais réseaux 4G.

Dans le contexte de l'arrivée de la 4G, le consortium 3GPP n'a pas normalisé les mécanismes de gestion des ressources radio (RRM) ce qui fait donc l'objet d'une implémentation propriétaire par les opérateurs télécoms. Les mécanismes d'ordonnancement de paquets (Packet Scheduling) jouent un rôle fondamental dans la gestion des ressources radio des réseaux cellulaires dans la mesure où ils visent à optimiser, selon des critères spécifiques, l'accès aux ressources temporelles et fréquentielles. Ces mécanismes permettent l'allocation des ressources radio en prenant en considération certains paramètres relatifs à l'état du canal de transmission et aux exigences des utilisateurs en termes de qualité de service (QoS) surtout pour les flux temps réel à savoir le flux Voix sur IP et le flux Vidéo. En conséquence, la gestion des ressources radio constitue un important sujet dans le domaine de la recherche scientifique sur les réseaux radio mobiles de quatrième génération où plusieurs travaux de recherche, portant sur l'élaboration de mécanismes d'ordonnancement, sont proposés. C'est précisément dans ce contexte scientifique que se situe notre travail de thèse.

Ce rapport de Thèse est constitué de quatre chapitres décrits comme suit :

Le premier chapitre décrit dans un premier temps l'évolution des réseaux radio mobiles. Il présente ensuite des statistiques techniques sur l'évolution du secteur des télécommunications au Maroc ainsi qu'une présentation de la technologie LTE, de son architecture réseau, de ses caractéristiques et de ses méthodes d'accès. Ce chapitre se termine par l'examen des différentes solutions envisagées pour supporter la voix sur LTE.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'étude de l'architecture protocolaire de l'interface radio et sur la description des paramètres qui garantissent la qualité de service dans le réseau LTE. Les différentes fonctionnalités du mécanisme de gestion des ressources radio RRM, dont l'ordonnancement fait partie, sont ensuite présentées et les principales informations de contrôle échangées entre l'UE et l'eNodeB sont rappelées. Les concepts relatifs au processus d'ordonnancement (Scheduling), responsable de l'allocation des ressources radio aux UEs, et plus particulièrement celui de l'allocation du canal PDSCH sont ensuite explicités. Le chapitre se termine par une présentation d'une panoplie d'ordonnanceurs existants, qui se basent sur la notion de métrique pour allouer les ressources radio aux utilisateurs.

Afin de montrer lequel des algorithmes d'ordonnancement, les plus connues dans les réseaux radio mobiles, justifie de bonnes performances pour chaque type de flux et pour chaque cas de scénario, le troisième chapitre est consacré à différentes études comparatives, par simulation, portant sur les performances des algorithmes d'ordonnancement opportunistes les plus implémentés sur le réseau LTE. Ainsi, et afin de justifier la proposition et l'élaboration d'un nouvel algorithme d'ordonnancement plus performant que les algorithmes existants, ces études ont pour objets de préciser les limites de performances de ces algorithmes vis-à-vis des flux VoIP et vidéo, en termes de débit moyen fourni, de taux de perte de paquets (PLR), de délai de paquets et d'efficacité spectrale.

Dans le but d'améliorer les performances du réseau LTE, le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'élaboration d'un nouvel algorithme d'ordonnancement dont les performances sont comparées à celles de plusieurs algorithmes d'ordonnancement dont ceux évalués et comparés entre eux au chapitre III. L'étude par simulation des performances du nouvel algorithme est considérée dans un environnement monocellulaire avec des interférences. Le but de cette étude est de confirmer puis de valider les hautes performances du nouvel algorithme proposé en matière de QoS pour les flux VoIP et vidéo sur LTE. L'objectif principal de ce nouvel algorithme est d'améliorer la métrique d'allocation des ressources radio en considérant les utilisateurs se trouvant dans les mauvaises conditions de canal. L'étude comparative effectuée est menée dans différents cas de scénarios.

En conclusion, le bilan est fait sur les différents travaux réalisés et les perspectives de recherche associées sont présentées.

Chapitre I : Généralité sur les réseaux radio mobiles

Introduction :

Les réseaux de communication cellulaires ont connu une évolution rapide, les réseaux de première génération sont venus en premier lieu, ils se basaient uniquement sur l'utilisation de modulation analogique [1]. Ensuite, les réseaux de deuxième génération basés sur la commutation de circuit ont remplacé les réseaux de première génération grâce à l'implémentation de nouvelles techniques numériques d'accès multiple. Ces réseaux de deuxième génération GSM/GPRS ont connu un succès important, mais face à l'évolution étonnante et continue du nombre d'abonnés mobile et de services nécessitant du haut débit, ils ont montré leurs limitations [2].

La troisième génération a eu naissance pour faire face à la demande croissante d'échange de données. Cette génération a été définie par l'IMT2000 (International Mobile Télécommunication - 2000), elle a marqué l'avènement à haut débit pour servir les meilleures applications multimédia [1]. Au cours des dernières années, il y a eu une énorme évolution du trafic dans les réseaux radio mobile, et ce grâce à l'augmentation et à la diversité des services large bande et à la découverte des équipements à caractère intelligent à savoir les Smartphones, les tablettes, etc. Les opérateurs de télécommunication sont mis alors sous pression. Pour dépasser cette dernière, une définition d'une quatrième génération des standards de réseau radio-mobiles étant une urgente nécessité.

L'union internationale de télécommunication (UIT) a spécifié les exigences nécessaires des réseaux 4G. En réponse à cette spécification, de nombreux organismes ont commencé le développement du meilleur réseau comme candidat pour la quatrième génération, parmi ces organismes, le groupe 3GPP (3rd Generation Partnership Project) a défini le réseau LTE (Long Term Evolution) comme étant son premier candidat pour les réseaux 4G. Ce dernier candidat n'a pas pu répondre à toutes les exigences spécifiées par l'UIT, alors qu'il a été considéré comme étant un réseau de 3.9 G, c'est son alternatif LTE-Advanced qui a été considéré comme un vrai candidat pour le réseau 4G [11]. La majorité des pays, à savoir le Maroc, ont déjà commencé à déployer le réseau LTE comme étant un réseau de 4^{ème} génération.

1. Evolution des systèmes cellulaires :

1.1. La première génération de téléphonie cellulaire : 1G

Dans les années 70, Le laboratoire Bell Labs (Bell Laboratories) a introduit un nouvel concept appelé cellulaire. Une cellule est une zone géographique couverte par une antenne de transmission nommée station de base. Les systèmes cellulaires ont été conçus pour supporter la mobilité des terminaux. Le passage pour un utilisateur d'une cellule à une autre sans coupure de communication est réalisé via l'utilisation d'une procédure appelée « Handover ». À cette fin, le terminal doit être équipé de tous les composants nécessaires à la gestion de la communication. Le Motorola Dynatac 8000x est un exemple de terminal commercialisé pour

3 995 \$, il dispose d'une autonomie d'une heure, la recharge en prenant pas moins de dix heures.



Figure I. 1: Le Motorola Dynatac 8000x.

Les systèmes mobiles de première génération utilisaient des techniques de codage et de modulation purement analogique, ils reposaient sur une transmission de la voix analogique avec une modulation de fréquence dans les bandes 450 MHz et 900 MHz, ils utilisaient une technique d'accès multiple permettant d'allouer une fréquence à chaque utilisateur, ce qui réduit le nombre de communications simultanées possibles par cellule, cette technique est appelée FDMA (Frequency Division Multiple Access). Les systèmes 1G ont été lancés au début des années 80. Il s'agissait principalement des standards suivants [1] :

- ✓ **NMT** (Nordic Mobile Telephon), il est déployé aux pays scandinaves. C'est une norme de téléphonie mobile spécifiée par les administrations des télécommunications nordiques à partir de 1970. Elle a été mise en service en 1981 en réponse à la congestion des réseaux de téléphonie mobiles existants à cette époque. Ce réseau de première génération a été ouvert dans des pays tels que la Suède, le Danemark, la Norvège, d'où le nom de « Nordic » dans son appellation. Cette norme est basée sur une technologie de téléphonie analogique sans-fil. Sa technologie de modulation radio est similaire à celle utilisée par les stations radio FM.
- ✓ **AMPS** (Advanced Mobile Phone System), apparu en 1976 aux Etats-Unis, constitue le premier standard de réseau cellulaire. Utilisé principalement en Russie et en Asie, ce réseau analogique de première génération possédait de faibles mécanismes de sécurité rendant possible le piratage de lignes téléphoniques.
- ✓ **TACS** (Total Access Communication System) est la version européenne du modèle AMPS. Utilisant la bande de fréquence de 900 MHz, ce système fut notamment largement utilisé en Angleterre, puis en Asie (Hong-Kong et Japon).
- ✓ **ETACS** (Extended Total Access Communication System) est une version améliorée du standard TACS développé au Royaume-Uni utilisant un nombre plus important de canaux de communication.
- ✓ **Radiocom 2000**, c'est le premier réseau de téléphonie mobile mis en place par France Télécom à destination des professionnels. Ce premier réseau français de téléphonie mobile est créé en 1986. La figure suivante montre un terminal Radiocom 2000.



Figure I. 2: Radiocom 2000.

Ces systèmes analogiques sont incompatibles entre eux, ils laissaient vite apparaître leurs faiblesses. Les téléphones étaient onéreux et lourds, et le coût de communications était élevé. De fait, seuls les professionnels et les riches pouvaient s'abonner au réseau 1G. En plus, les réseaux d'une restreintes capacités ne permettent pas d'avoir un véritable service grand public. Par les générations suivantes, Autant de lacunes ont été comblées.

1.2. La deuxième génération de téléphonie cellulaire : 2G

Le passage de l'analogique vers le numérique dans les technologies radio mobile fut l'élément clé qui permet le net accroissement de la capacité des réseaux, ce passage a provoqué une rupture entre la seconde génération des réseaux mobiles (2G) et celle de la première génération de téléphones cellulaires. Les techniques cellulaires numériques présentent de nombreux avantages par rapport aux techniques analogiques, le principal atout étant une capacité accrue grâce à une utilisation plus efficace du spectre radioélectrique. Autre facteur positif, la transmission numérique permet d'acheminer non seulement la voix mais aussi des données à travers le spectre des fréquences radioélectriques, prenant en charge des applications telles que le service de mini messagerie (SMS, Short Message Service) [2]. La téléphonie numérique améliore également la sécurité des transmissions de la voix et des données.

Les principaux standards de téléphonie mobile 2G sont les suivants :

- **GSM** (Global System for Mobile communication), a été le premier système cellulaire numérique commercialement exploité. Le GSM a été mis au point dans les années 80 dans le but de promouvoir l'harmonisation régionale des réseaux cellulaires, il a été le système le plus utilisé en Europe à la fin du 20^e siècle. Ce standard utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz en Europe. Aux Etats-Unis la bande de fréquence utilisée est la bande 1900 MHz.
- **CDMA** (Code Division Multiple Access), utilisant une technique d'étalement de spectre permettant de diffuser un signal radio sur une grande gamme de fréquences.
- **TDMA** (Time Division Multiple Access), utilisant une technique de découpage temporelle des canaux de communication, afin d'augmenter le volume de données transmis simultanément. La technologie TDMA est principalement utilisée sur le continent américain, en Nouvelle Zélande et en Asie Pacifique.
- **GPRS** (General Packet Radio Service) est une norme pour la téléphonie mobile dérivée du GSM permettant un débit de données plus élevé. On le qualifie souvent de 2,5G. Le G est l'abréviation de génération et le 2,5 indique que c'est une technologie à mi-chemin entre le GSM (2^e génération) et l'UMTS (3^e génération).

- **EDGE** (Enhanced Data Rates for GPRS Evolution) est une norme de téléphonie mobile, une évolution du GPRS.

Nous présenterons par la suite, les principales technologies 2G (GSM) et 2G+ (GPRS et EDGE).

1.2.1. Le standard GSM.

1.2.1.1. Présentation du standard GSM.

En 1982, la CEPT (Conférence Européenne des Poste et de Télécommunications) a décidé de constituer le Groupe Spécial Mobile (GSM), dont le but est de développer un nouvel standard paneuropéen permettant aux utilisateurs d'utiliser leurs terminaux ailleurs que leurs réseaux d'origines. Le réseau GSM (Global System for Mobile communications) constitue alors le premier système standardisé qui utilise une technique de transmission numérique pour le canal radio. Il s'agit d'un standard de téléphonie dit « de seconde génération » (2G). Le GSM se caractérise non seulement par sa technologie radio, mais aussi par la répartition des fréquences, la largeur des canaux, l'architecture du réseau, les interfaces, les protocoles et autres spécifications techniques très précisément décrites et normalisées dès le départ [2].

Toutefois, d'une région à une autre, d'un continent à un autre, l'allocation des ressources spectrales diffère, en dépit, le GSM n'emploie pas forcément les mêmes bandes de fréquences partout. Ainsi, En Europe, seules les versions GSM 900 MHz et 1 800 MHz sont employées par le standard GSM. Aux Etats-Unis, la bande de fréquence utilisée est la bande 1900 MHz. les téléphones GSM ne fonctionnent pas alors sur tous les réseaux GSM du monde, car ils ne sont pas capables à dialoguer sur toutes les bandes de fréquences. Ainsi, on qualifie de tri-bande, les téléphones portables pouvant fonctionner dans les trois bandes de fréquence (900 MHz, 1800 MHz et 1900 MHz), et de bi-bande ceux fonctionnant uniquement en Europe (900 MHz et 1800 MHz). Grâce à son débit maximal de 9,6 kbps, La norme GSM permet de transmettre la voix ainsi que des données numériques de faible volume, le cas des messages textes courts (SMS, pour Short Message Service) ou des messages multimédias (MMS, pour Multimedia Message Service) [8].

Les utilisateurs connectés à une même station de base doivent partager les ressources radio disponibles en se basant sur une technologie d'accès multiple à répartition fréquentielle (FDMA) et temporelle (TDMA). Outre la transmission des communications voix et données sur des circuits dédiés, l'infrastructure est également utilisée pour véhiculer toutes les informations nécessaires aussi bien au dialogue entre les éléments du réseau qu'à l'établissement et au maintien des communications entre les stations de base et les terminaux mobiles [3].

1.2.1.2. Architecture du réseau GSM

Dans un réseau GSM, on désigne par station mobile MS (Mobile Station), le terminal mobile de l'utilisateur. Une MS est composée de l'appareil de l'utilisateur et d'une carte SIM (Subscriber Identity Module) qui permet d'identifier chaque utilisateur, indépendamment du terminal utilisé lors de la communication avec une station de base. Les terminaux mobiles sont identifiés par un numéro d'identification unique de 15 chiffres appelé IMEI (International Mobile Equipment Identity). Chaque carte SIM possède également un numéro d'identification unique appelé IMSI (International Mobile Subscriber Identity). La communication entre une station mobile et la station de base se fait par l'intermédiaire d'un lien radio, généralement appelé interface air (ou plus rarement interface Um) [3].

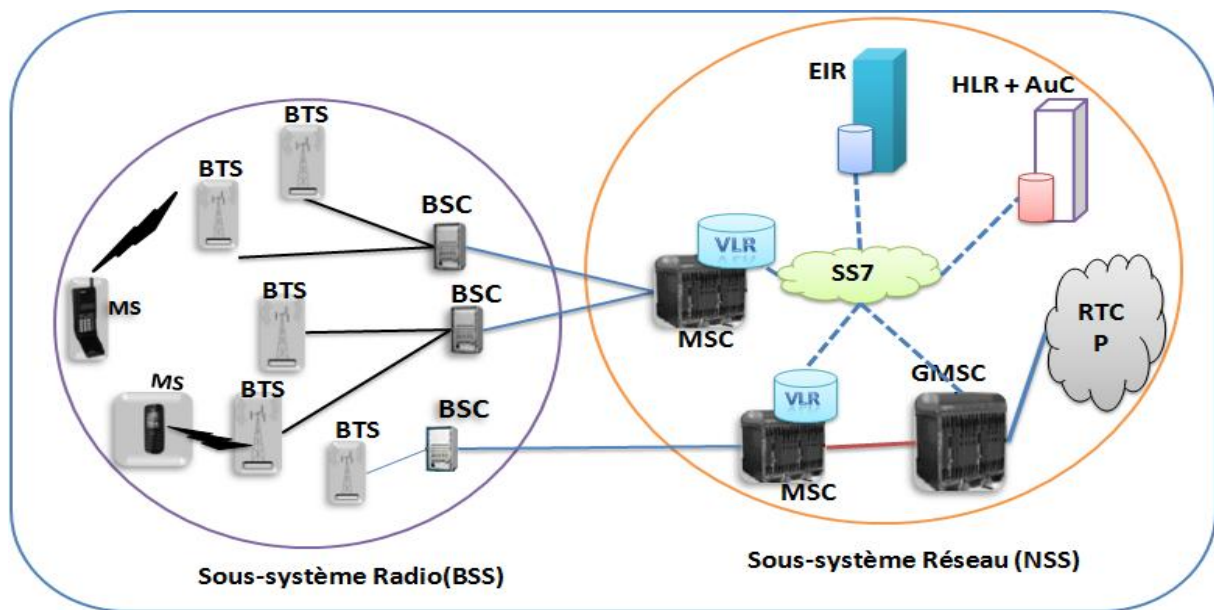


Figure I. 3: L'architecture du réseau GSM.

La figure I.3 présente l'architecture du réseau GSM, elle est constituée de deux sous-systèmes :

- ✓ Un sous système radio **BSS** (Base station Sub-System) qui assure les transmissions radio électriques et gère la ressource radio, il est composé des stations de base dite BTS (Base Station) et de contrôleurs de station de base appelé BSC (Base Station Controller), plusieurs BTS sont contrôlés par un BSC.
- ✓ Un sous système réseau **NSS** (Network Sub-system) qui assure les fonctions de commutations et de routage. C'est donc lui qui permet l'accès au réseau public RTCP ou RNIS, la gestion de mobilité, la sécurité et la confidentialité des données utilisateur. Parmi les nœuds constituant le sous-système NSS on trouve :
 - Le nœud de commutation du réseau MSC (Mobile-services Switching Center) qui fait partie des nœuds composants le sous-réseau NSS, il est chargé de gérer les identités des utilisateurs, leur localisation et l'établissement de la communication avec les autres abonnés. Un MSC regroupe plusieurs BSC, et comprend une base de données des utilisateurs visiteurs VLR (Visitor Location Register) dont la fonction est de localiser l'abonné dans une zone géographique donnée (LA : Location Area). Le MSC est également en relation avec des passerelles permettant de véhiculer les messages vers le réseau téléphonique commuté RTC ou vers Internet.
 - Pour enregistrer un abonné une base de donnée centrale est utilisée appelé HLR (Home Location Register), une HLR contient le numéro du dernier VLR (Visitor Location Register) où l'abonné a été repéré.
 - AUC (AUthentication Centre) est une base de données permettant l'authentification de l'abonné.

Le passage d'une cellule à une autre est supporté dans le réseau cellulaire grâce à la gestion du handover. Enfin, les réseaux GSM supportent également la notion d'itinérance (en anglais roaming), c'est-à-dire le passage du réseau d'un opérateur à un autre.

Devant le succès du réseau GSM, Le GSM présente aussi des limites. De nouveaux services sont apparus, il a fallu donc proposer de nouvelles fréquences aux opérateurs pour acheminer toutes les communications. En plus, le réseau GSM utilise un réseau cœur à commutation de circuit ce qui rend l'accès aux services de donnée pénible. Le débit de 9.6 kbps proposé par le GSM est alors insuffisant. Afin d'accroître la capacité du réseau GSM, une solution a été proposée, elle consiste à interconnecter le réseau d'accès GSM avec un réseau à commutation de paquet appelé GPRS (General Packet Radio service).

1.2.2. Technologie GPRS

1.2.2.1. Présentation du standard GPRS

Nommé parfois GSM++, le standard GPRS (General Packet Radio Service) est une évolution de la norme GSM, on parle généralement de 2.5G pour classer le standard GPRS. Le réseau GPRS venant ajouter un certain nombre de modules sur le réseau GSM sans changer le réseau existant. Ainsi son but est de conserver l'ensemble des modules de l'architecture GSM afin d'autoriser le transfert de données par paquets, avec des débits théoriques maximums de l'ordre de 171,2 kbit/s (en pratique jusqu'à 114 kbit/s) [4].

La mise en place d'un réseau GPRS va permettre à un opérateur de proposer de nouveaux services de type "Donnée" à ses clients. Le GPRS fonctionne en mode paquets. Grâce à ce mode de transfert, les transmissions de données n'utilisent le réseau que lorsqu'il est nécessaire. Le standard GPRS permet donc de facturer l'utilisateur au volume échangé plutôt qu'à la durée de connexion, ce qui signifie notamment qu'il peut rester connecté sans surcoût. Ainsi, le standard GPRS utilise l'architecture du réseau GSM pour le transport de la voix, et propose d'accéder à des réseaux de données utilisant le protocole IP ou le protocole X.25.

Le GPRS permet de nouveaux usages que ne permettait pas la norme GSM, généralement catégorisés par les classes de services à savoir, les services point à point (PTP) et les services point à multipoint (PTMP), GPRS permet aussi d'initier l'Internet mobile et la notion de Qualité de Service (QOS) qui explique la capacité à adapter le service aux besoins des applications.

1.2.2.2. Architecture GPRS

L'intégration du GPRS dans une architecture GSM nécessite l'adjonction de nouveaux nœuds réseau appelés GSN (GPRS Support Nodes) :

❖ Le Nœud de service GPRS nommé SGSN (Serving GPRS Support Node), joue un rôle de routeur permettant de gérer les terminaux GPRS présents dans sa zone et de réaliser l'interface de transit des paquets avec la passerelle GGSN. Il est en connexion avec l'ensemble des éléments qui assurent et gèrent les transmissions radio : BTS, BSC, HLR .etc [5].

❖ Le nœud de passerelle dans le GPRS est appelé GGSN (Gateway GPRS Support Node), c'est une passerelle s'interfaçant avec les autres réseaux de données (internet, autre réseau GPRS). il est chargé de fournir une adresse IP aux terminaux mobiles pendant toute la durée de la connexion et de gérer la transmission des paquets venants d'un réseau externe en les acheminant vers le SGSN du destinataire, et les paquets émanant d'un destinataire interne du réseau vers un réseau externe [7].

❖ Les recommandations introduisent le concept de BG (Border Gateway) qui permet de connecter les réseaux GPRS via un réseau fédérateur et qui assure les fonctions de sécurité pour la connexion entre ces réseaux. Ces BG ne sont néanmoins pas spécifiés par les recommandations mais elles jouent le rôle d'interface avec les autres PLMN (Public Land Mobile Network) permettant ainsi de gérer les niveaux de sécurité entre les réseaux (par exemple entre deux réseaux de deux opérateurs concurrents) [6].

Un module logiciel est toutefois ajouté au BSC : PCU (Packet Control Unit) qui fait la différence entre les données "circuit" de GSM et les données "paquet" de GPRS. Comme l'illustre la figure I.4 :

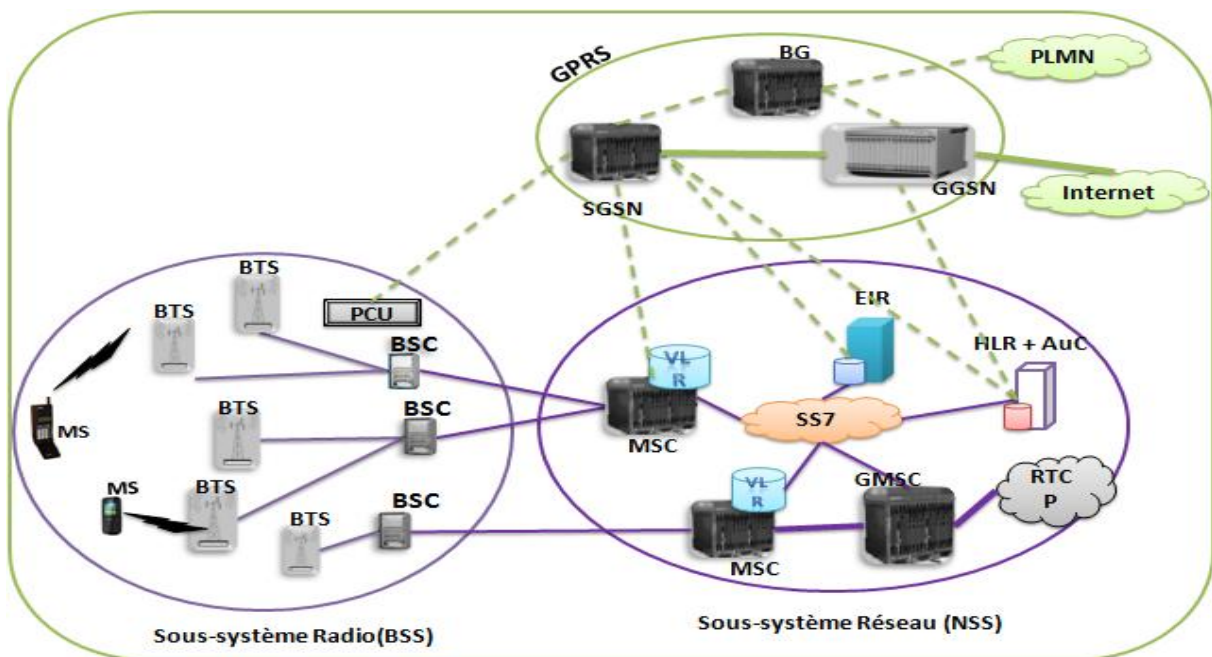


Figure I. 4: L'architecture réseau GPRS.

En GPRS, Il existe quatre schémas de codage, appelés CS-1, CS-2, CS-3 et CS-4 — CS (Coding-Schemes). Ces schémas offrent des protections plus ou moins efficaces, au prix toutefois d'une diminution du débit utilisateur plus ou moins importante [8].

Tableau I. 1: Schéma de codage du réseau GPRS.

| Schéma de codage | CS1 | CS2 | CS3 | CS4 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Débit possible | 9,05 Kbit/s | 13,4 Kbit/s | 15,6 Kbit/s | 21,4 Kbit/s |

1.2.3. Technologie EDGE

1.2.3.1. Présentation du standard EDGE

Le standard EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) n'est qu'une évolution des infrastructures GSM/GPRS déjà existantes, ce qui lui permet de fonctionner aussi bien en mode circuit du GSM qu'en mode paquets du GPRS. Les débits atteignables par l'EDGE étaient donc en théorie de 384 kbit/s pour les stations fixes et de 144 kbit/s pour les stations mobiles [8].

L'EDGE utilise une modulation différente de la modulation utilisée par GSM, il s'agit de la modulation 8-PSK, ce qui rend la modification des stations de base et des terminaux mobiles une nécessité. Pour désigner le standard EDGE on parle de la 2.75 génération comme transition vers la troisième génération de téléphonie mobile (3G). Les opérateurs ayant déjà une licence 2G, et désirant faire évoluer leurs réseaux GSM vers l'EDGE, n'auront pas besoin de nouvelles autorisations d'exploitation du spectre car le standard EDGE fonctionne sur les mêmes bandes de fréquences que les réseaux GSM/GPRS [4].

1.2.3.2. L'Architecture du standard EDGE

Afin de permettre une augmentation du débit, le standard EDGE peut être introduit dans les deux réseaux existant que sa soit GSM ou GPRS, au niveau du réseau cœur, l'implémentation de l'EDGE ne nécessite aucune modification physique, par contre au niveau du réseau d'accès, une modification matérielle est nécessaire au niveau de l'émetteur- récepteur (TRU) de la BTS pour pouvoir supporter les débits offerts par l'EDGE. Au niveau de la BSC une mise à jour au niveau d'unité de contrôle de paquets (PCU) demeure essentielle. La figure I.5 présente l'architecture du réseau EDGE [26].

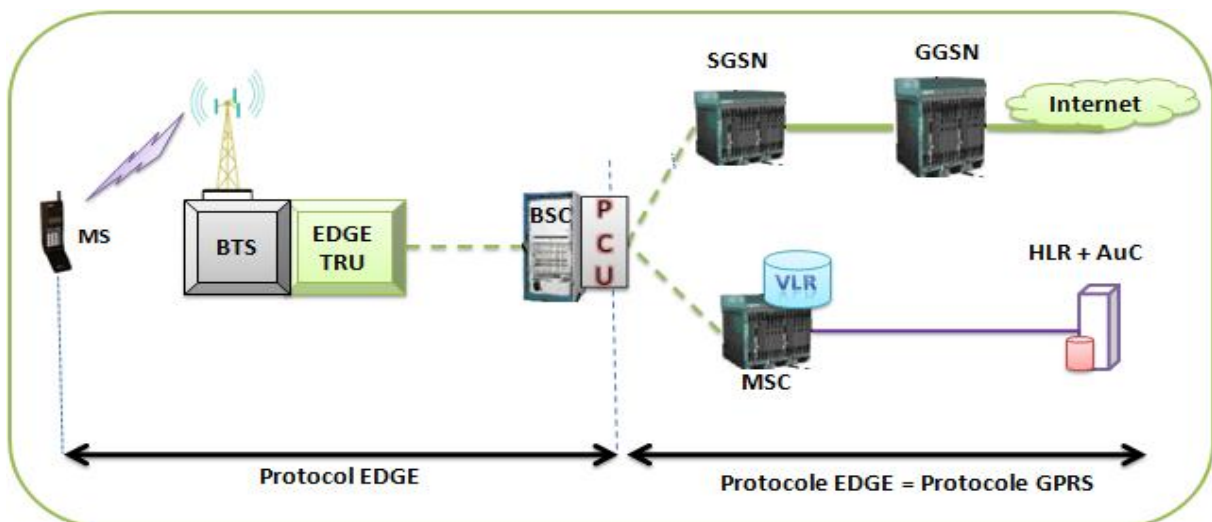


Figure I. 5: L'architecture du réseau EDGE.

En regard de la qualité de service requise sur la liaison, EDGE est quatre fois plus efficace que le GPRS. GPRS utilise quatre méthodes de codage (CS-1 à 4) quand à l'EDGE, il introduit de nouveaux schémas de modulation et de codage (du MCS1 à MCS9) [8].

Tableau I. 2: Les schémas de codage et de modulation utilisé dans le réseau EDGE.

| Schéma de modulation et de codage (MCS) | MCS-1 | MCS-2 | MCS-3 | MCS-4 | MCS-5 | MCS-6 | MCS-7 | MCS-8 | MCS-9 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Débit (kbit/s/slot) | 8,80 | 11,2 | 14,8 | 17,6 | 22,4 | 29,6 | 44,8 | 54,4 | 59,2 |
| La modulation | GMSK | GMSK | GMSK | GMSK | 8-PSK | 8-PSK | 8-PSK | 8-PSK | 8-PSK |

1.3. La troisième génération de téléphonie cellulaire : 3G

La troisième génération de téléphonie cellulaire 3G a été définie dans le cadre d'une initiative adoptée par l'UIT (Union Internationale des télécommunications) appelée IMT-2000 (International Mobile Telecommunications pour l'année 2000), cette initiative a comme objectif d'établir une compatibilité mondiale des normes relatives au spectre des fréquences et aux interfaces radioélectriques, ce qui permettra aux utilisateurs une continuité de service même en se déplaçant hors pays [11].

En vue de proposer des services plus innovants dans les domaines de télécommunications tels que, visioconférence, visiophonie, internet haut débit, jeu en ligne, il devient primordial de mettre en place une nouvelle architecture capable de rendre les terminaux mobiles plus sophistiqués [10]. La technologie 3G est venue pour répondre aux besoins accrus de données, à fin d'obtenir des débits de transmission plus élevés, elle devra représenter une avance technologique des systèmes de télécommunications.

Le réseau 3G apparaît avec une variante de technologies, il comprend plusieurs technologies d'accès cellulaire, à savoir W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) qui a abouti à la norme UMTS en Europe et aux Etats Unis, TD-SCDMA (Time-division synchrone code-division multiple access) le propre standard utilisé en chine, et aussi le CDMAone basé sur la méthode d'accès CDMA (Code Division Multiple Access), il porte aussi le nom de CDMA2000 [19].

Dans ce qui suit, nous nous concentrons sur l'UMTS, car c'est cette famille de technologies qui va donner naissance au réseau LTE.

1.3.1. Le Standard UMTS.

1.3.1.1. Présentation du standard UMTS.

Avec l'apparition de la 3G, une nouvelle gamme de services multimédia a été lancée. UMTS exploite les nouvelles bandes de fréquences situées entre 1900 - 2200 MHz pour offrir des avantages qui s'appliquent aux domaines à commutation de circuit et de paquet. Cette technologie exploite une bande de fréquences plus large qui permet l'augmentation du nombre d'appels simultanés ainsi que le développement de nouveaux services. L'UMTS exploite le protocole de communication W-CDMA qui utilise une technique d'étalement de spectre par séquence directe. Pour cela, chaque bit à transmettre est multiplié via l'opérateur logique, OU exclusif, par un code pseudo aléatoire PN propre à chaque utilisateur. La séquence du code (de N chips) est unique pour cet utilisateur, et présente ainsi la clé de codage. Cette méthode permet une bande de fréquences N fois plus étendue et améliorée [14].

1.3.1.2. Architecture du réseau UMTS.

La structure de base de l'UMTS peut être globalement divisée en deux éléments principaux, le réseau d'accès UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) et le réseau cœur CN (Core Network) [10].

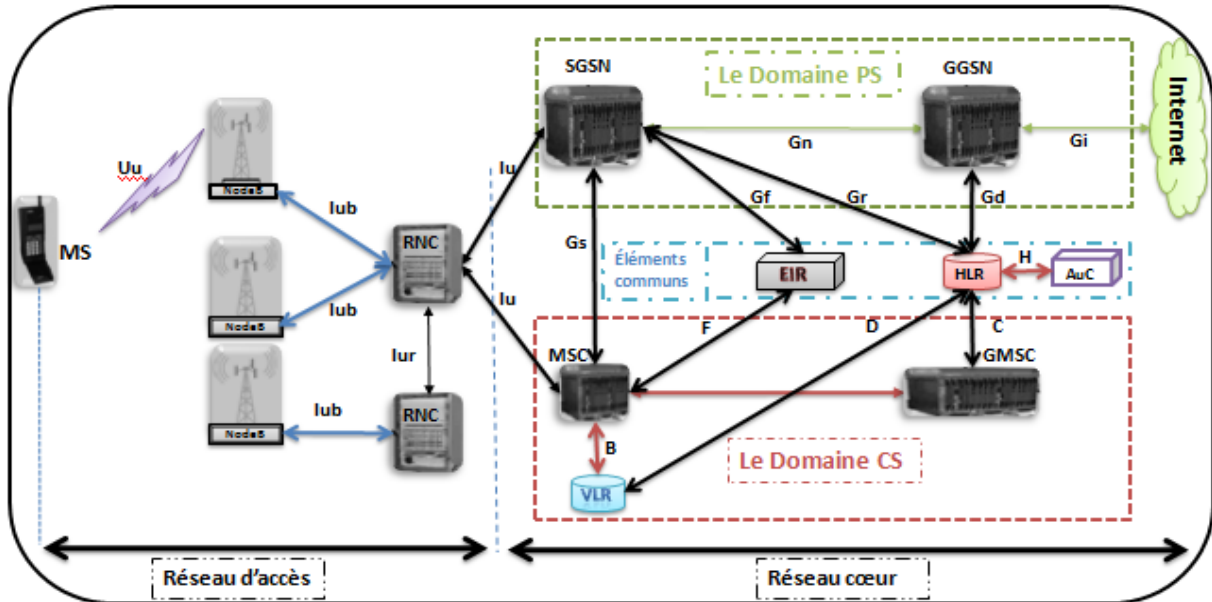


Figure I. 6: L'architecture du réseau UMTS.

- Réseau d'accès UTRAN

Le réseau d'accès UTRAN est doté de plusieurs fonctionnalités, sa fonction principale est de transférer les données générées par l'utilisateur. Il constitue une passerelle entre l'équipement usager et le réseau cœur à travers les interfaces Uu et Iu. Cependant, il est responsable de plusieurs services à savoir, la sécurité des informations échangées par l'interface radio grâce à l'utilisation des algorithmes de chiffrement et d'intégrité, la mobilité des utilisateurs, la gestion des ressources radio.etc [9].

Le réseau d'accès UTRAN est composé de plusieurs Nœuds : une ou plusieurs stations de base appelées NodeB, des contrôleurs des stations de base appelés RNC (Radio Network Controller) et des interfaces de communication entre les différents éléments du réseau UMTS [12].

- ✓ **NodeB:** Le rôle principal du NodeB est d'assurer les fonctions de réception et de transmission radio pour une ou plusieurs cellules du réseau d'accès de l'UMTS avec un équipement usager. Le NodeB fonctionne au niveau de la couche physique du modèle OSI, il se charge des opérations de codage et de décodage.
- ✓ **RNC :** Le rôle principal du RNC est de router les communications entre les NodeB's et le réseau cœur de l'UMTS. Il travaille au niveau des couches liaison et réseau du modèle OSI, il a comme but, le contrôle de puissance et l'allocation de codes. Le RNC constitue le point d'accès pour l'ensemble des services vis-à-vis du réseau cœur.
- ✓ Plusieurs **interfaces** de communication existent au sein du réseau UMTS, pour se communiquer entre les équipements usager et le réseau d'accès UTRAN, on doit passer à travers l'interface Uu en utilisant la technologie CDMA. La communication entre les contrôleurs radio RNC et le SGSN

est assurée via l'interface Iu, de même, l'interface Iur est utilisée pour se communiquer entre deux RNC, ainsi que pour qu'une station de base NodeB peut communiquer avec un contrôleur radio RNC, l'utilisation de l'interface Iub demeure essentielle [15-17].

- Réseau cœur (CN).

Le réseau cœur de l'UMTS est constitué de deux domaines, celui à commutation de circuits (CS) qui est utilisé pour véhiculer le service téléphonique, et le domaine à commutation de paquets (PS) qui permet quand à lui l'acheminement des services multimédias. Entre ces deux domaines, des éléments en communs existent permettant aux équipements usagers de pouvoir gérer simultanément une communication paquets et circuits.

Le domaine à commutation de circuits (CS)

Le domaine CS est composé de plusieurs Nœuds à savoir, le MSC (Mobile-services Switching Center) qui est chargé d'établir la communication avec l'équipement usager, il a aussi pour rôle de commuter les données. Le GMSC (Gateway MSC) fait aussi partie du domaine CS, c'est une passerelle entre le réseau UMTS et le réseau téléphonique commuté PSTN (Public Switched Telephone Network). Le VLR (Visitor Location Register) quand à lui appartient à ce domaine, il s'agit d'une base de donnée similaire à celle du HLR (Home Location Register), cette base de donnée peut être attachée à un ou plusieurs MSC. La principale fonction du VLR est de garder en mémoire l'identité temporaire de l'équipement usager. Le VLR enregistre les usagers dans une zone géographique LA (Location Area) déterminée [11].

Le domaine à commutation de Paquets (PS)

Le domaine PS est composé de deux modules principaux, celui qui est chargé d'enregistrer les usagers d'une zone géographique dans la zone de routage RA (Routing Area), appelé SGSN (Serving GPRS Support Node) [6]. Et celui qui constitue une passerelle vers les réseaux à commutation de paquets extérieurs tels que l'Internet, appelé GGSN (Gateway GPRS Support Node) [7].

Eléments communs entre les domaines PS et CS.

Le HLR (Home Location Register) constitue un élément commun entre les deux domaines CS et PS, c'est une base de données contenant des informations relatives aux usagers à savoir, l'identité de l'équipement usager, le numéro d'appel de l'utilisateur et des informations relatives à l'abonnement souscrit par l'utilisateur. L'AuC (Authentication Center) fait partie de ces éléments communs, il est responsable de l'authentification de l'abonné, ainsi que du chiffrement de la communication. L'AuC fait appel au HLR pour récupérer les informations relatives à l'utilisateur afin de créer une clé d'identification. L'EIR (Equipment Identity Register) représente le dernier élément commun, il se charge de la gestion des vols des équipements usagers. Il garde en mémoire l'IMEI (International Mobile station Equipment Identity), l'identifiant unique propres à chaque équipement usager [11].

1.4. Évolution UMTS vers LTE.

En se basant sur les règles tracées par l'Union Internationale de Télécommunications. L'UMTS connaît comme illustré dans la figure I.7, deux évolutions majeures avant de passer vers LTE [13], il s'agit du :

- Le HSPA (High Speed Packet Access);
- Le HSPA+ (High Speed Packet Access +).

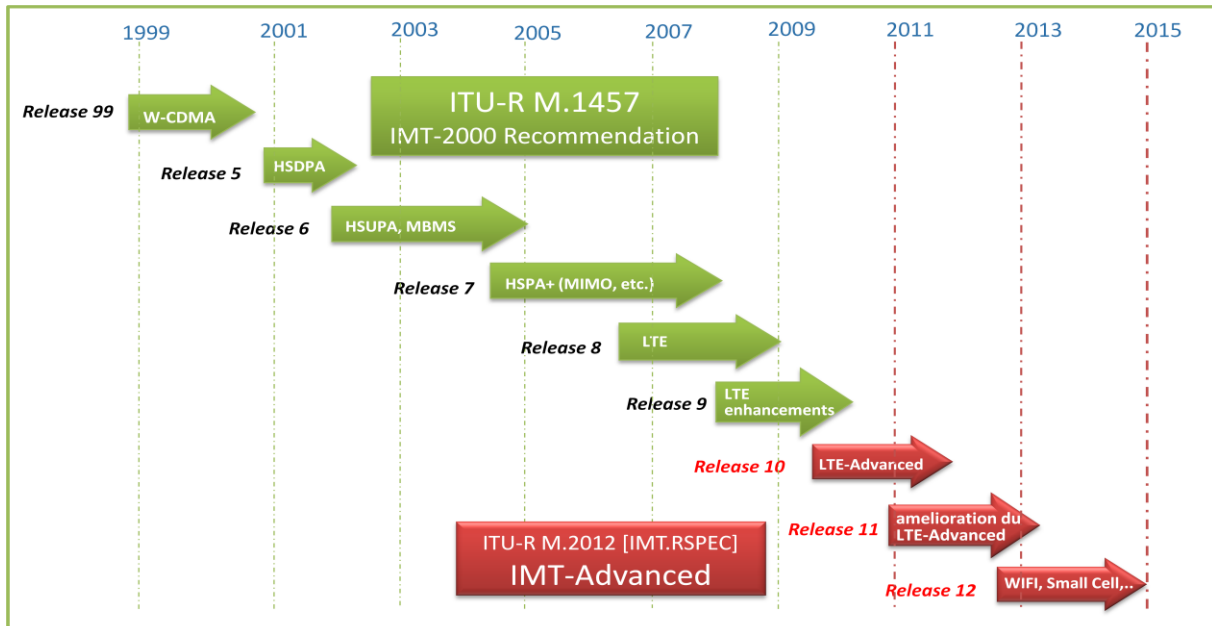


Figure I. 7: Evolution des standards de l'UMTS vers LTE.

1.4.1. La technologie HSPA

Afin d'accroître le débit possible et de réduire la latence du système, 3GPP a défini une évolution de la technologie UMTS respectivement en Release 5 (2002) et Release 6 (2005). Cette évolution est le HSPA (High Speed Packet Access) connue commercialement sous le nom 3.5G ou 3G+, il s'agit pour la voie descendante du HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), et pour la voie montante du HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) [13].

1.4.1.1. La technologie HSDPA

La technologie HSDPA a été proposée dans la version 5, elle offre des performances dix fois supérieures à l'UMTS. Les débits instantanés fournis par cette évolution sont accrus, pouvant atteindre 14,4 Mbps, et ce grâce à l'introduction de nouvelles techniques, à savoir l'utilisation de la modulation 16QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation) pour la voie descendante en complément de la modulation QPSK (Quadrature Phase Shift Keying). Une autre modification est menée au niveau du TTI (Transmission Time Interval) qui a été réduit de 10 ms à 2ms. Et afin de s'adapter aux conditions radio de l'UE, la modulation et le codage sont rendus adaptatifs [14].

Sur l'interface radio, le passage d'une commutation de circuit, où des ressources radio sont réservées à chaque UE pendant la durée de l'appel, à une commutation par paquets, où la station de base décide dynamiquement du partage des ressources entre les UE actifs, constitue l'élément clé de l'évolution HSPA. L'allocation dynamique des ressources est effectuée par une fonction d'ordonnancement (scheduling). En revanche, l'inconvénient de l'évolution HSDPA est le débit montant Uplink qui reste inchangé 384 Kbit/s [18].

1.4.1.2. La technologie HSUPA

Avec l'apparition du HSUPA, le problème de la liaison montante est résolu grâce à l'introduction de nouveaux mécanismes à savoir, la modulation QPSK qui est utilisée pour la voie montante en complément de la modulation BPSK (Binary Phase Shift Keying), aussi afin de réduire la latence du système en cas de perte de paquets, le mécanisme de retransmission rapide des paquets erronés, appelé HARQ (Hybrid Automatic Response reQuest), est défini entre l'UE et la station de base, et finalement afin de réduire la latence du système, l'Allocation des ressources radio est gérée cette fois-ci par le NodeB [19].

Les évolutions HSPA offrent aux utilisateurs des débits maximaux de 14,4 Mbit/s en voie descendante et de 5,8 Mbit/s en voie montante, ainsi qu'une latence réduite.

1.4.2. La technologie de HSPA+.

L'introduction de nouveaux terminaux attractifs dans le marché comme les Smartphones, ainsi que l'introduction de nouveaux services nécessitant une connexion quasi-continue sont des facteurs qui ont mené à une évolution très rapide des usages et du trafic à écouler par les réseaux. La technologie UMTS et ses évolutions HSPA ont commencé alors à montrer leurs limitations en termes de capacité. La qualité de service fournie aux clients commence alors à se dégrader, ce qui a posé un véritable problème aux opérateurs de télécommunications. Pour mener à bien les demandes des clients en qualité de service, 3GPP a définie une évolution du HSPA appelé HSPA+ [20].

HSPA+ est un terme qui regroupe plusieurs évolutions techniques visant principalement à améliorer :

- les débits fournis aux utilisateurs et la capacité du système.
- la gestion des utilisateurs toujours connectés (always-on).

La technologie HSPA+ a été normalisée par le 3GPP au cours des Releases 7 (2007) et 8 (2008). elle vient avec beaucoup d'amélioration à savoir, une maximisation du débit en voie descendante, une gestion plus efficace des ressources spectrales, et une réduction de la latence du système, tous ca est mené via l'adoption de la modulation 64QAM en complément de la modulation 16QAM, ainsi via l'implémentation de la fonctionnalité DC-HSDPA (Dual Carrier – HSDPA) qui élargit le spectre supportant la transmission à 10 MHz au lieu de 5 MHz, la fonctionnalité MIMO (Multiple Input Multiple Output) a été également introduite. Pour les utilisateurs toujours connectés, ils sont mieux pris en compte via l'ajout de nouvelles fonctionnalités regroupées sous le terme CPC (Continuous Packet Connectivity). Le HSPA+ intègre enfin une option d'architecture qui réduit la latence du système via la suppression du contrôleur de stations de base pour les services de données. Le tableau I.3 présente une comparaison des caractéristiques des technologies 2G/3G [8].

Tableau I. 3: Comparaison des technologies GSM, UMTS Release 99, HSPA, et HSPA+.

| | GSM/GPRS/EDGE | UMTS Release 99 | HSPA | HSPA+ Release 8 |
|--|----------------------|------------------------|---------------------------|---|
| Débit maximal UL | 118 kbit/s | 384 kbit/s | 5.8 Mbit/s | 11.5 Mbit/s |
| Débit maximal DL | 236 Kbit/s | 384 Kbit/s | 14.4 Mbit/s | 42 Mbit/s |
| Latence | 300 ms | 250 ms | 70 ms | 30 ms |
| Largueur de canal | 200 KHz | 5 MHz | 5MHz | 5MHz, possibilité de deux canaux simultanés |
| Technique d'accès multiple | FDMA/TDMA | CDMA | CDMA/TDMA | CDMA/TDMA |
| Modulation DL Modulation UL | GMSK 8PSK | QPSK BPSK | QPSK, 16QAM BPSK, QPSK | QPSK, 16QAM, 64QAM BPSK, QPSK, 16QAM |
| Bandes de fréquences usuelles (MHz) | 900/1800 | 900/2100 | 900/2100 | 900/2100 |

L'UMTS et son évolution HSPA sont aujourd'hui largement déployés sur tous les continents. Ils ont rencontré un succès commercial croissant en lien avec le développement de nouveaux usages (Internet mobile, TV, vidéo, applications mobiles...) mais aussi grâce à l'arrivée de nouveaux terminaux favorisant ces usages (Smartphones, clés 3G+, modules intégrés aux ordinateurs portables).

2. Evolution du secteur de Télécommunication.

2.1. Croissance du nombre d'abonnés mobiles au Maroc.

Selon l'Agence nationale de réglementation des télécommunications (ANRT), les Marocains confirment d'année en année leur engouement pour les nouvelles technologies. Comme montré dans la figure I.8, le parc de la téléphonie mobile a atteint 44,11 millions d'abonnements à fin 2014, contre 42,42 à fin 2013, soit une hausse de 4%. Le taux de pénétration de la téléphonie mobile a quant à lui gagné près de 4 points sur la même période, passant de 129,13% à 132,96%. A fin septembre 2015, le nombre d'abonnés mobiles au Maroc s'élevait à près de 44,45 millions, ramenant le taux de pénétration d'un peu plus de 131,32 %, soit une hausse trimestrielle de 3,34 % et annuelle de 0,43 %. Soit, un Marocain dispose en moyenne de plus d'un téléphone portable [21].

La figure I.9 présente les parts de marché du parc des abonnés au service mobile pour les opérateurs de télécom marocain, A fin septembre 2015, et en termes de part de marché, l'opérateur historique Itissalat Al-Maghrib détient 41,8% du parc de la téléphonie mobile suivi de Médi Telecom avec 31,72% et de Wana Corporate avec 26,48% [22].

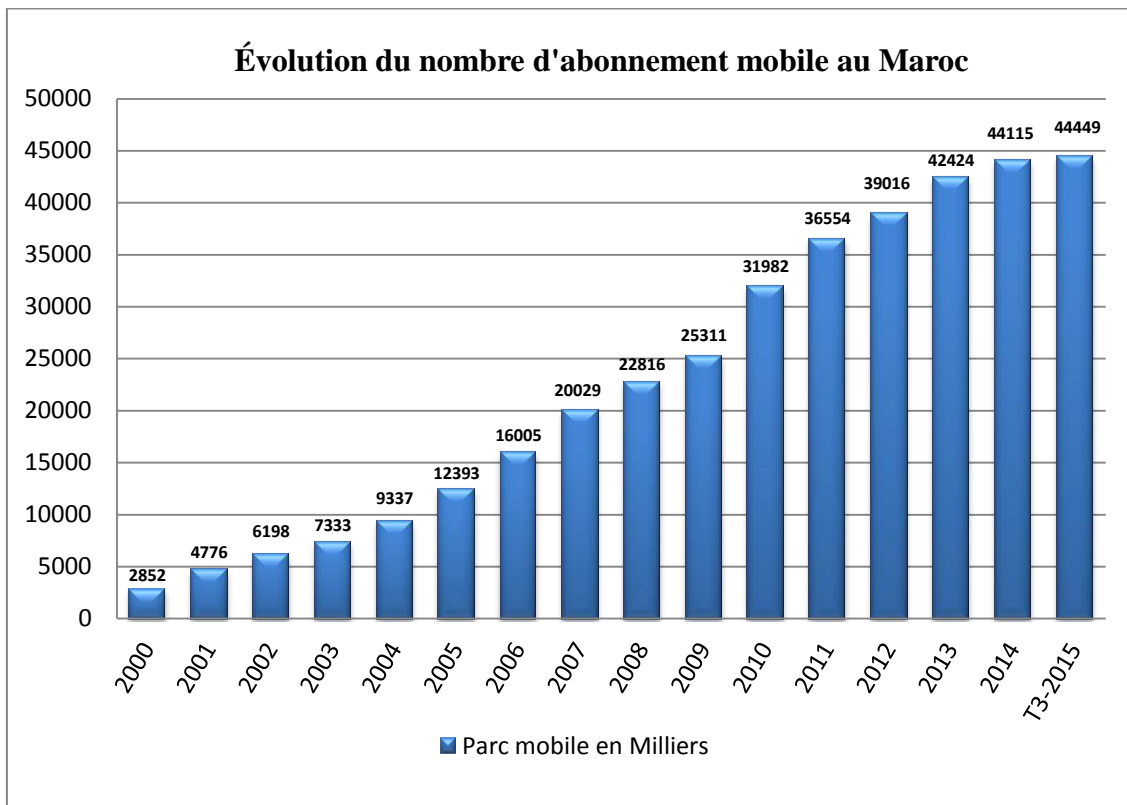


Figure I. 8: Évolution du nombre d'abonnement mobile au Maroc.

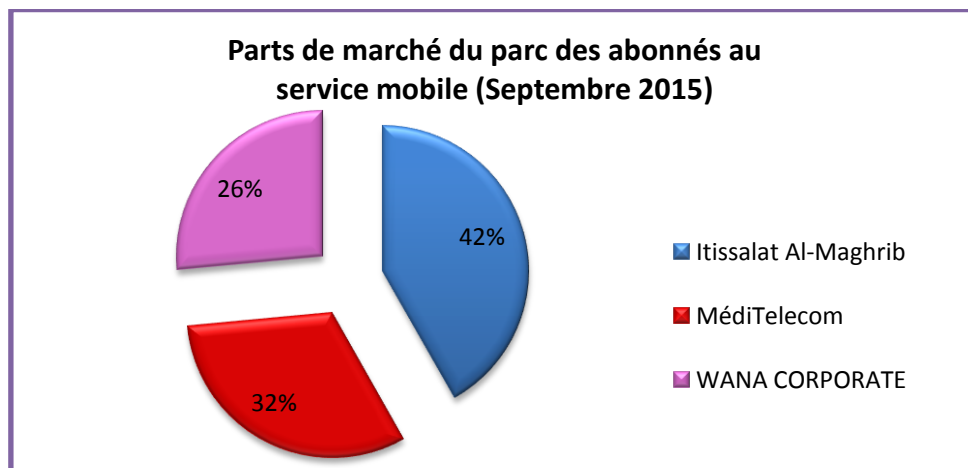


Figure I. 9: Parts de marché du parc des abonnés au service mobile (Septembre 2015).

2.2. Croissance du nombre des Smartphones vendus :

Les ventes de Smartphones ont montré une forte croissance dans le monde entier. En troisième trimestre de 2015, 355.2 millions d'unités ont été vendus contre 332.6 millions en troisième trimestre de l'année 2014 soit une hausse de 6.8%, selon des statistiques faite par **Strategy Analytics** et **IDC** (28 octobre 2015) [23].

Tableau I. 4: Les 5 meilleurs vendeurs du Smartphone au monde pour T3-2015.

| Vendeurs | Le Volume de vente pour T3-2015 (En millions) | La part du marché pour T3-2015 | Le Volume de vente pour T3-2014 (En millions) | La part du marché pour T3-2014 | Taux de croissance |
|----------------|---|--------------------------------|---|--------------------------------|--------------------|
| Samsung | 84.5 | 23.8% | 79.6 | 23.9% | 6.1% |
| Apple | 48.0 | 13.5% | 39.3 | 11.8% | 22.2% |
| Huawei | 26.5 | 7.5% | 16.5 | 5.0% | 60.9% |
| Lenovo | 18.8 | 5.3% | 16.9 | 5.1% | 11.1% |
| Xiaomi | 18.3 | 5.2% | 17.3 | 5.2% | 5.6% |
| Autres | 159.1 | 44.8% | 163.0 | 49.0% | -2.4% |
| Total | 355.2 | 100% | 332.6 | 100% | 6.8% |

Selon les prévisions estimées par L'IDC (International Data Corporation) les livraisons de Smartphones devraient croître de 10,4% en 2015 jusqu'à avoir un nombre de 1,44 milliards d'unités vendues.

2.3. Evolution des services :

Pendant de nombreuses années, les réseaux des opérateurs télécoms étaient utilisés principalement pour véhiculer les appels vocaux. La demande de données multimédia mobiles a été lente au départ, mais durant ces deux dernières décennies et grâce au débit et au qualité de service qu'offre les nouvelles technologies de télécommunication mobile 3G et post 3G, les clients sont devenus très exigeants alors que les services ont connu une grande diversité et une innovation continue qui touche plusieurs domaines à savoir :

➤ **Le WEB Mobile : Au Maroc**, pour la période entre décembre 2014 et décembre 2015, 34.4 % des sites web visités sont consultés depuis des terminaux mobiles ou des tablettes [24].

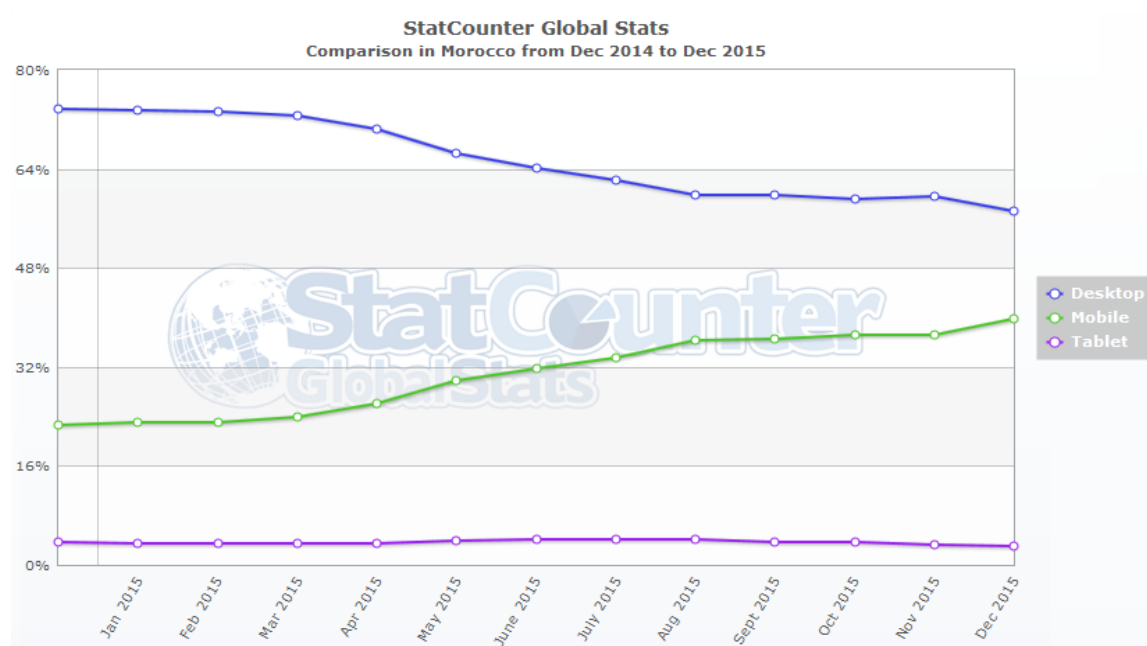


Figure I. 10: Le taux d'accès aux sites web entre [Jan.-2015] et [Déc.-2015].

- **Les services Multimédia** : Vidéos en streaming, TV, VOD (vidéo à la demande), Visiophonie, Jeux à la demande.etc.
- **Reportage ou séquences vidéo en 'live'** : Beaucoup de métiers sont concernés par ce service, à commencer par celui des médias-chaîne TV ou sites d'information en ligne, il est possible de transmettre des séquences vidéo en direct et de bonne qualité à partir d'un smartphone, d'une tablette ou d'une mini-caméra portable. là encore, on peut imaginer beaucoup de métiers capables d'en tirer parti en particulier les professionnels des secours, pompiers, gendarmerie ou Protection civile.
- **La Vidéo surveillance et la supervision** : est le service le plus demandé par les exploitants. Il autorise la visualisation de l'intérieur d'un véhicule en cas d'incident. Actuellement, il est possible de transmettre jusqu'à deux flux vidéo HD en temps réel dans des conditions d'exploitation. Ce service permet aussi la gestion du trafic, la protection des biens et le contrôle total instantané.
- **La santé, Télémedecine et télédiagnostic** : Des applications mobiles permettent de suivre et de contrôler les soins à domicile et à distance. (Electronic Health Record (EHR), Electronic Medical Record (EMR)). De même pour éviter de déplacer les passions vers les blocs opératoires, il est souvent nécessaire de consulter certains spécialistes à distance dans le domaine de la médecine, par exemple, il pourra être très utile de pouvoir leur pousser des images, documents de scanners, photos ou vidéos HD afin d'obtenir leur avis. La mise en relation de plusieurs experts et leur échange instantané pourra conduire à une meilleure décision.
- **L'archivage** : la gestion des archives et la sécurisation de données multimédia personnelles comme le principe d'iCloud, ...etc.
- **Le SAE ou Système d'Aide à l'Exploitation** permet de géolocaliser les véhicules et d'assurer une bonne exploitation grâce au calcul des avances/retards. les outils associés peuvent être personnalisés aux utilisateurs et permettent de bénéficier de plusieurs services surtout pour le secteur de transport.
- **Les informations réseau et commerciales** pourront être transmises à la volée, y compris sous forme de vidéo.
- **Les statistiques temps réels** pour l'exploitation et la maintenance seront disponibles pour chaque véhicule connecté, avec la possibilité de réaliser des diagnostics à distance.
- **Les applications multi-modales** : ils pourront informer l'utilisateur des dernières informations du réseau, en particulier en cas de correspondance ou d'incident. Le trajet d'un usager pourra automatiquement être mis-à-jour de manière dynamique. Ce service s'inscrit naturellement dans le cadre d'une politique Open Data.
- **Pilotage à distance, help-desk mobile**: La possibilité de mettre en marche une caméra pourra s'étendre à toutes machines ou systèmes, qu'il s'agisse de robots sur roues, voire d'appareils volants, tels les drones. On peut également imaginer des déclinaisons de l'application Team Viewer sur iPhone et iPad, permettant le télé-monitoring d'un ordinateur à distance. Ce qui

signifie la possibilité d'un dépannage ou d'une assistance à distance par un responsable de 'help-desk'.

2.4. Au-delà de la 3G!

En face à cette multitude et évolution de service, les réseaux de 3^{ème} génération ont fait apparaître leurs limitations en termes de capacité du système à supporter l'ensemble des abonnés mobiles, ainsi qu'en terme de satisfaction de la qualité de service demandée par les clients. L'arrivée de la quatrième génération de téléphonie mobile a fait marquer l'événement, elle est dotée de nouvelles techniques et mécanismes pour pouvoir répondre aux besoins évolutifs des clients, en offrant des débits beaucoup plus élevés que ceux de la 3G. Il existe deux principales technologies candidate à la validation 4G, par l'organisation internationale 3GPP : IEEE 802.16e (WiMAX) évolue également vers la 4G –il s'agit de la norme 802.16m et la LTE (Long Term Evolution). En théorie, ces dernières technologies doivent permettre des débits pouvant aller jusqu'à 100 mégabits par seconde [25], soit pour les usagers des connexions trois ou quatre fois plus rapides que celles de la 3G ou 3G+.

3. Etude de la technologie LTE.

Afin de répondre à la demande accrue des clients en terme de capacité et d'innovation de services, l'organisme de standardisation 3GPP a désigné un projet nommé LTE comme étant un candidat pour les réseaux de 4^{ème} génération, il s'agit d'une évolution du précédent standard UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) qui peut offrir des services mobiles, de très haut débit. LTE bénéficie d'une flexibilité dans l'usage de différentes bandes de fréquences, ce qui permet une meilleure efficacité, une faible latence et une gestion efficace des ressources radio comparé avec les réseaux de troisième génération [29].

L'architecture du réseau LTE est dite tout IP du fait qu'elle est constituée d'un réseau d'accès évolué appelé l'E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) et d'un réseau cœur véhiculant que des paquets de données appelé EPC (Evolved Packet Core), d'où le nom Système de Paquets Evolué, EPS (Evolved Packet System) [34]. Pour les opérateurs, le déploiement du LTE implique la modification du réseau cœur ainsi que des stations de base. Les terminaux mobiles doivent aussi être adaptés à la technologie LTE.

3.1. Caractéristiques et motivations pour la technologie LTE (4G)

Le passage du réseau de 3^{ème} génération vers celui du LTE constitue une étape primordiale pour les opérateurs de télécommunication afin de répondre aux besoins accrus des utilisateurs ainsi que pour satisfaire leur demande en termes de qualité de service. L'organisme de standardisation 3GPP a défini les exigences que la technologie LTE devait satisfaire. Parmi les objectifs majeurs du LTE, on peut citer l'amélioration du support des services de données via une capacité accrue, l'augmentation des débits et la réduction de la latence. En complément de ces exigences de performance, le 3GPP a aussi défini des prérequis fonctionnels tels que la flexibilité spectrale et la coexistence avec les autres technologies 3GPP [36].

a- Le débit.

La technologie LTE permet d'atteindre des débits plus supérieurs à ceux offerts par les réseaux de 3^{ème} génération, pour une largeur de bande allouée de 20 MHz et pour un utilisateur de référence comprenant deux antennes en réception et une antenne en émission, LTE peut offrir un débit de 100 Mbit/s en voie descendante et 50 Mbit/s en voie montante, partagé entre les utilisateurs d'une même cellule, et ce grâce l'introduction de nouvelles techniques et mécanismes bien avancés, à savoir la technique d'accès OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour la voie descendante, la technique d'accès SC-FDMA (Single carrier Frequency Division Multiple Access) pour la voie montante[28], ainsi que la technique MIMO (Multi Input Multi Output) [50].

b- La latence.

La technologie LTE permet aussi une interactivité plus rapide que celle de la 3^{ème} génération, que sa soit dans le plan usager aussi bien que dans le plan de contrôle [30]:

- **La latence pour le plan de contrôle :**

La latence du plan de contrôle représente le temps nécessaire pour établir une connexion et accéder au service. L'objectif du LTE est de réduire le temps de transition pour être inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif.

- **La latence pour le plan usager :**

Une fois la connexion est établie, le délai de transmission d'un paquet au sein du réseau LTE doit être inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets IP de petite taille.

c- La mobilité.

La mobilité est l'une des fonctionnalités clé des réseaux radio mobile. La technologie LTE quand à elle vise à optimiser le fonctionnement pour des vitesses faibles de l'utilisateur (entre 0 et 15 km/h), tout en maintenant le service pour des vitesses hautes comprises entre 120 et 350 km/h. Pour les services temps réel, L'effet de la mobilité entre deux cellules du réseau LTE sur la qualité de service doit être moins faible ou équivalent au 3G. LTE a mis en jeu des mécanismes optimisant les délais et la perte de paquets lors d'un handover.

Au début du déploiement et d'exploitation de LTE peu de zones seront couvertes, pour pouvoir servir tous les utilisateurs durant le passage de la 3^{ème} génération vers celle du LTE, une coexistence et un interfonctionnement entre les deux réseaux demeure essentiel. Lors d'une procédure de handover entre E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) et celle d'UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network), LTE autorise un temps d'interruption de service qui est inférieur à 300 ms pour les services temps-réel et inférieur à 500 ms pour les autres services non temps-réel [36].

d- La flexibilité dans l'usage de la bande

La technologie LTE offre la possibilité et la flexibilité d'opérer avec une bande de fréquence choisis entre: 1.4, 2.5, 5, 10, 15 et 20 MHz. ce qui permet un déploiement flexible en fonction des besoins des opérateurs et des services qu'ils souhaitent proposer. [29].

e- La capacité en nombre d'utilisateurs simultanés

A nos jours, la contrainte appliquée sur la capacité en nombre d'utilisateurs simultanés devient forte grâce à l'explosion des services dites toujours connecté « always-on ». LTE peut supporter simultanément un large nombre d'utilisateurs par cellule, à savoir 200 utilisateurs simultanés par cellule à l'état actif pour une largeur de bande de 5 MHz, et au moins 400 utilisateurs pour des largeurs de bande supérieures. Un nombre largement supérieur d'utilisateurs devra être possible à l'état de veille [26].

f- L'efficacité spectrale cellulaire

Parmi les objectifs principaux du LTE, on trouve l'accroissement de l'efficacité spectrale cellulaire (bit/s/Hz/cellule), en voie descendante, LTE permet une efficacité spectrale trois à quatre fois supérieure à celle offerte par le HSPA Release 6 au sein d'un réseau chargé, et deux à trois fois supérieure en voie montante [20].

g- Le toujours connecté

La possibilité d'être toujours connecté à internet est l'une des meilleures manifestations de l'accès à haut débit. Même si la connexion est permanente au niveau du réseau, il est toujours nécessaire pour le terminal de passer de l'état IDLE à l'état ACTIF lorsqu'il veut échanger du trafic avec d'autres terminaux. Le fait de se disposer d'une adresse IP permet aux usagers de recevoir à n'importe quel moment le trafic depuis les terminaux rattachés au réseau [33].

3.2. L'Architecture du réseau LTE.

Pour faire face aux futures évolutions technologiques, le projet LTE est mené par l'organisme de standardisation 3GPP comme étant une technologie candidate pour la 4^{ème} génération, il a été considéré comme étant une évolution à long terme de la norme UMTS des réseaux 3G. LTE présente des plateformes multi-technologiques capables de supporter de nouvelles applications innovatrices. Pour pouvoir améliorer ses services et comme le montre la figure I.11, LTE est doté d'une architecture simple, dite plate qui comporte des équipements utilisateurs UE, un réseau d'accès évolué E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) et un réseau cœur appelé System Architecture Evolution (SAE) [27] [45] [46].

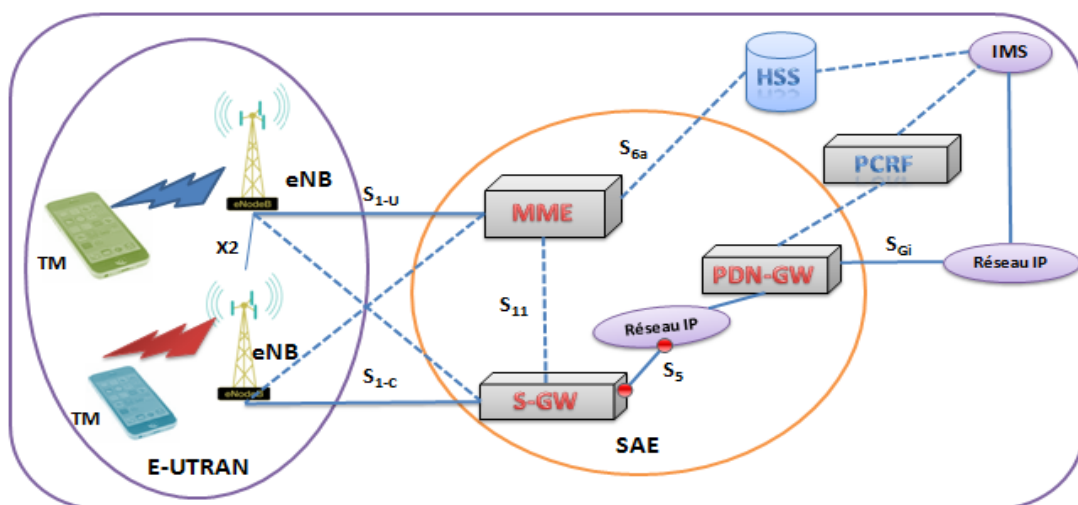


Figure I. 11: L'architecture du réseau 4G/LTE.

3.2.1. Réseau d'accès 4G/LTE

Comme le montre la figure I.12, et afin de rendre l'architecture du réseau d'accès plus simple ainsi que pour réduire la latence du système, les fonctionnalités des nœuds NodeB et RNC de l'UMTS ont été regroupées dans le réseau LTE en un seul nœud appelé eNodeB (Evolved NodeB) [40]. La principale fonctionnalité de l'eNodeB est d'acheminer les flux de données de l'UE vers l'EPC (Evolved Packet Core Network) au moyen des fonctions comme le RRM (Radio Resource Management) et le CAC (Call Admission Control) [49].

Pour acheminer les données entre le réseau d'accès et le réseau cœur, LTE a mis en place une interface nommée S1 reliant l'eUTRAN avec L'EPC. Cette interface consiste en S1-U (S1-User) entre l'eNodeB et la SGW (Serving Gateway) et S1-C (S1-Contrôle) entre l'eNodeB et la MME (Mobility and Management Entity). LTE dispose aussi d'une nouvelle interface nommée X2 permettant de réaliser des échanges de données et de signalisation entre différents eNodeB. Cette simplicité dans l'architecture du réseau d'accès entraîne une réduction des pertes de paquets qui peuvent subvenir en cas de relèvements, celle des coûts d'opération et une diminution de latence dans le système. La planification des réseaux d'accès devient ainsi très simple pour les opérateurs de télécommunication grâce à la réduction du nombre de nœuds et d'interfaces dans le réseau [46].

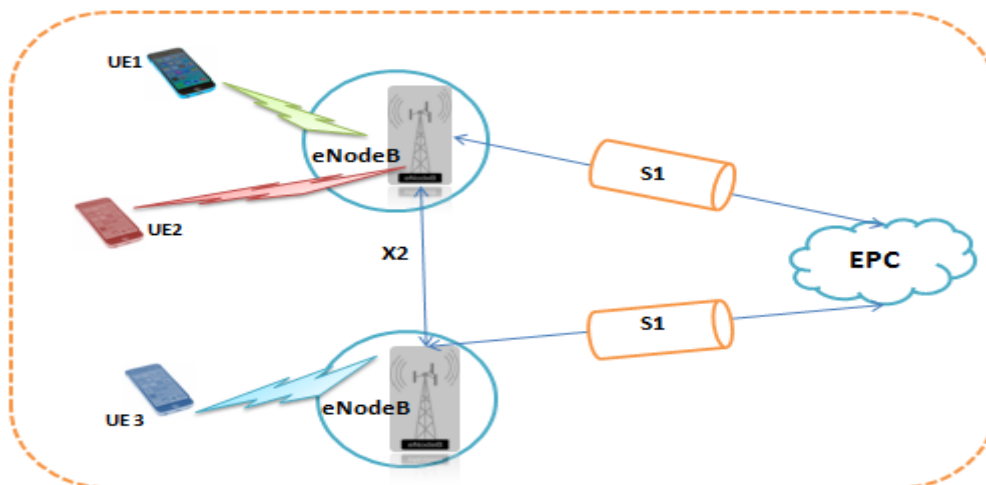


Figure I. 12: Architecture du réseau d'accès LTE.

3.2.2. Réseau cœur 4G/LTE

Le réseau Cœur EPC du LTE est connu aussi sous le nom du SAE (System Architecture Evolution). L'EPC regroupe plusieurs nœuds dont la fonction est d'assurer la gestion d'utilisateurs, la gestion de mobilité, la gestion de qualité de service et la gestion de sécurité. Ces nœuds supportent la connectivité tout IP entre les domaines de l'architecture 4G. On parle alors de la MME, la SGW, la PDN-GW (Packet Data Network Gateway) et la PCRF (Policy and Charging Rules Function), La figure I.13 illustre la composition de base de la partie evolved packet core (EPC) [46]:

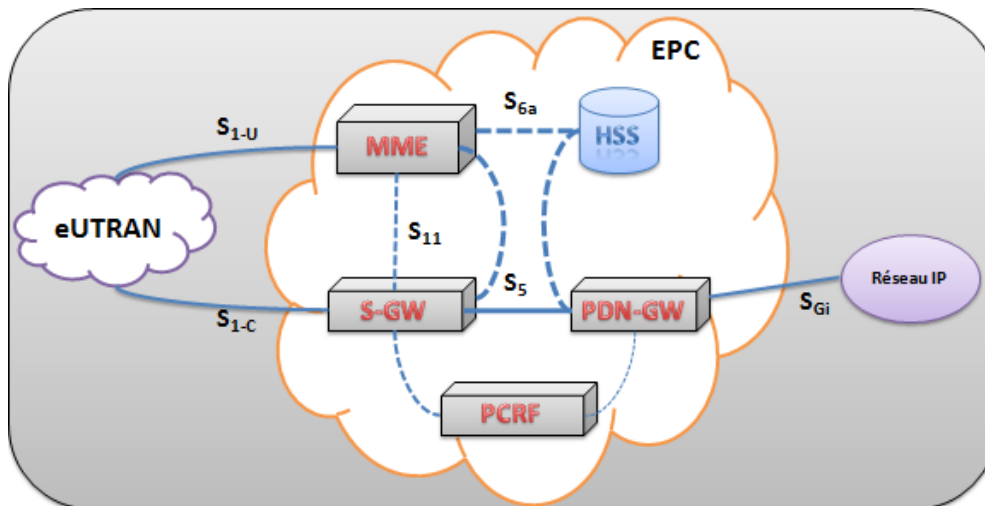


Figure I. 13: L'architecture du réseau cœur EPC.

Le **MME** est l'élément principal de l'EPC, il prend en charge plusieurs fonctionnalités clés, parmi ces fonctionnalités on trouve [42]:

- L'authentification des utilisateurs en utilisant les informations recueillies du HSS, ainsi que la gestion des sessions des utilisateurs authentifiés en se basant sur les fonctions du plan de contrôle.
- Les fonctions de gestion de la mobilité telles que la coordination de la signalisation pour les relèves inter-SGW, ainsi que la collecte et l'échange, avec les UEs, des informations liées à leur mobilité.
- La négociation de la qualité de service à offrir aux utilisateurs.
- La diffusion des messages de paging quand l'UE est incapable de recevoir les paquets qui lui sont destinés. Il fait la mise à jour des paramètres de localisation de l'UE se retrouvant dans une zone qui n'est pas prise en charge par le MME.
- La sélection des ressources nécessaires à l'établissement de la connexion avec un UE tel que la S-GW et la P-GW.
- Il joue un rôle clé dans la relève entre les différentes technologies, en sélectionnant le nœud qui va mettre en place la porteuse, le default bearer, afin d'établir la communication entre les deux architectures.

La **SGW** (Serving Gateway) a pour rôle la gestion des données utilisateurs, elle est responsable du routage et d'acheminement des paquets de données entre le réseau cœur et l'eUTRAN. elle a pour mission de veiller à la continuité de la transmission des paquets même si l'utilisateur est en déplacement, elle est chargée aussi de déclencher le paging, ainsi elle agit comme une frontière principale entre le réseau d'accès et le réseau cœur, En plus lors du déplacement des utilisateurs dans les régions desservies par des eNodeBs différentes, la SGW veille à ce que le chemin de données soit maintenu entre les eNodeBs et les passerelles PDN. Pour transmettre des paquets vers la PDN-GW, la SGW utilise l'interface S5 qui opère comme une ancre locale et permet la relève entre les systèmes mobiles de différentes générations, comme LTE et UMTS [26].

La **P-GW** sert comme passerelle reliant l'utilisateur mobile aux autres réseaux PDN, tels que les réseaux IP, PSTN ainsi que les réseaux non-3GPP. Les requêtes des utilisateurs transitent via la PDN Gateway qui agit comme un routeur. Elle effectue pour chaque Terminal Mobile plusieurs fonctions à savoir l'allocation d'adresses IP, le filtrage des paquets pour déterminer quel type de

service/application, et donc quel canal de transmission doit être utilisé, la PDN Gateway mis en œuvre une politique lui permettant la comptabilisation des octets échangés dans la session à des fins de facturation ainsi que l'amélioration de la qualité de service [26].

La **HSS** est la version évoluée du HLR (Home Location Register). Elle permet quand à elle le stockage des informations d'abonnement pouvant servir à la gestion de session des utilisateurs réalisée par la MME et au contrôle des appels, elle contient aussi les informations de souscription pour les autres réseaux, comme le GSM, le GPRS, 3G, LTE et IMS [45].

La **PCRF** (Policy and Charging Rules Function) est l'entité responsable de la gestion de qualité de service que requiert le réseau, elle alloue en conséquence les porteuses bearer appropriées, ainsi la PCRF fournit les règles de taxation au PDN GW afin que ce dernier puisse réaliser la taxation des flux de service montants et descendants. En effet, la PCRF permet à la fonction PCEF (Policy and Charging Enforcement Function) incluse dans la PDN GW d'apprendre les règles PCC (Policy and Charging Control) nécessaire à l'identification des flux circulant sur le contexte PDP, aux blocages ou autorisations des flux, à l'attribution de la QoS par flux, et à la taxation de chaque flux individuellement [59].

En résumé, les réseaux 4G/LTE viennent pour répondre aux besoins accrues des utilisateurs, et ce grâce à l'implémentation de 3 fonctionnalités clés à savoir la nouvelle méthode d'accès OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) en amont, la SC FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) en uplink et la technique MIMO (Multiple Input Multiple Output) [51]. Au niveau de l'architecture, au lieu d'avoir une station de base NodeB et un contrôleur de station de base RNC comme dans le cas du réseau UMTS, le réseau d'accès LTE est réduit à une entité unique nommée eNodeB, elle remplit à la fois le rôle des stations de base ainsi que des contrôleurs de stations de base, ce qui implique une réduction du délai de transmission ainsi que le nombre de trafic de signalisation dans le réseau [44]. Le fait que l'architecture du réseau LTE est basée tout IP, permet d'apparaître de nouveaux services à commutation de paquet qui remplaceront les services à commutation de circuits.

3.3. Schéma de transmission radio sur LTE.

LTE est l'un des candidats pour le réseau de 4^{ème} génération, son schéma de transmission est basé dans les deux sens, montant et descendant, sur des techniques radios avancées telles que l'OFDM et le MIMO, ainsi concernant sa méthode d'accès, LTE déploie deux techniques d'accès distinctes, l'une pour la liaison descendante, elle s'agit de l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) et l'autre pour la liaison montante, elle s'agit de la méthode SC-FDMA (Single carrier Frequency Division Multiple Access), de plus LTE prend en charge les deux modes de duplexage FDD et TDD pour toutes ces largeurs de bande. Dans la suite de notre travail, seulement le mode de duplexage FDD est considéré, comme il est le mode de fonctionnement déployé par la majorité des fournisseurs de services de télécommunications [28].

Dans un système OFDM, le spectre disponible est divisé en un ensemble de sous porteuses. Chaque sous-porteuse est indépendamment modulée par un flux de données à faible débit. Pour combattre les interférences inter-symboles dans le domaine temporel, un intervalle de garde, appelé le préfixe cyclique (PC), doit être ajouté à chaque symbole. La figure I.14 montre une représentation fréquentielle-temporelle d'un signal OFDM [29] :

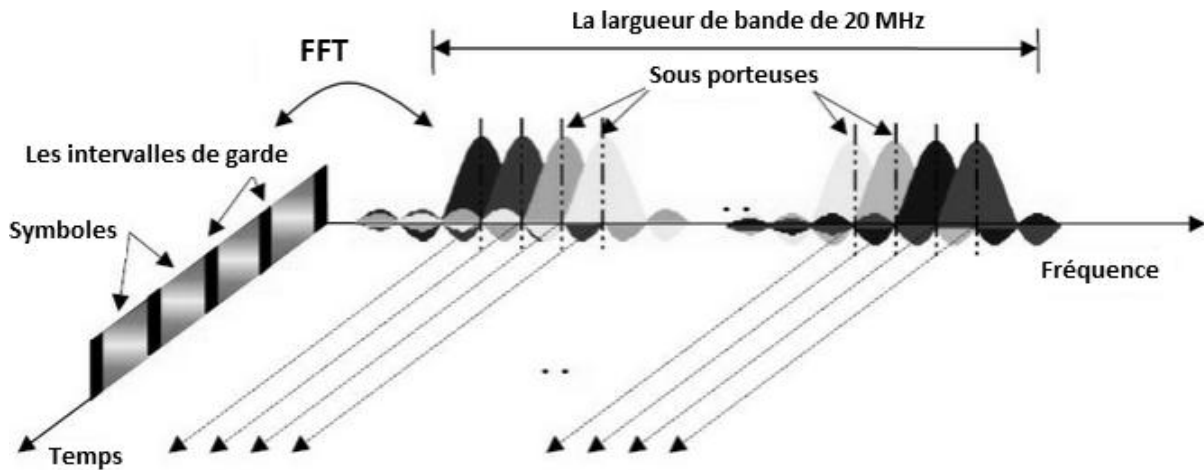


Figure I. 14: Représentation fréquentielle-temporelle d'un signal OFDM.

3.3.1. Structure de la trame LTE :

Le réseau eUTRAN du LTE supporte deux types de structure, Le type 1 pour le mode FDD et le type 2 pour le mode TDD. Pour le mode FDD, Les trames sont de 10 ms. elles sont divisées en 10 sous-trames, chaque sous-trame a une longueur de 1 ms, Chaque sous-trame est divisée en deux slots, chacun est de 0,5 ms. Un slot est composé de 6 ou 7 symboles OFDM, selon que le préfixe cyclique est étendu ou court. La figure I.15 montre la structure de la trame FDD [32].

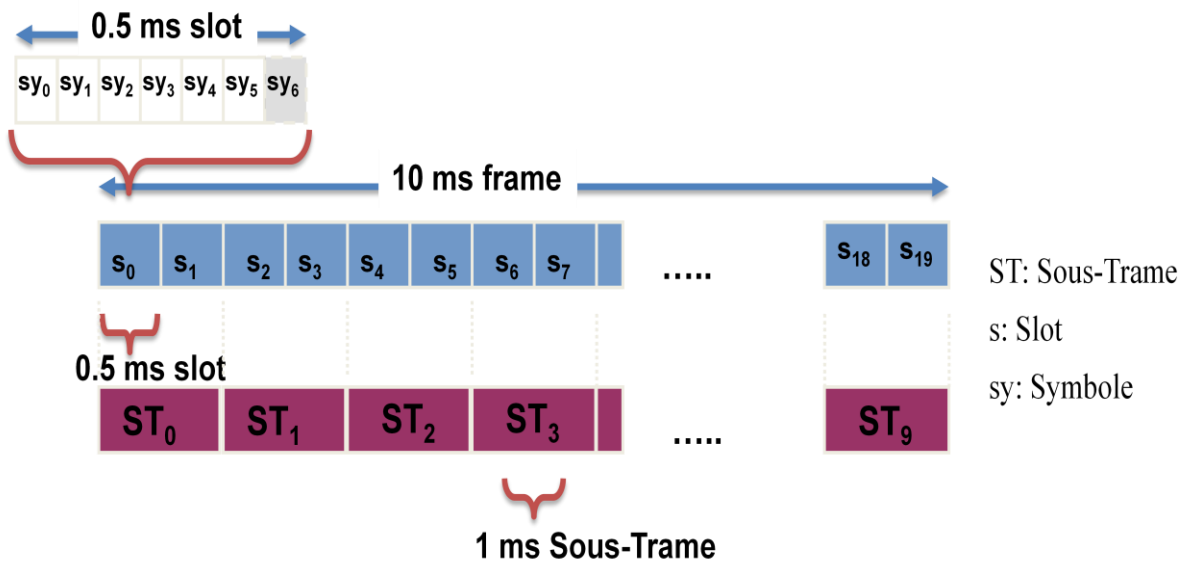


Figure I. 15: La structure de la trame FDD.

Pour la trame type 2, elle a une durée de 10 ms divisée en deux demi-trames de 5 ms chacune. Chaque demi-trame est constituée par 5 sous-trames de 1ms chacune, toutes les sous-trames sont constituées par deux times slots de 0.5 ms chacun à part la sous-trame spéciale qui est constituée par trois champs : DwPTS (Downlink Pilot Timeslot), GP (Guard Period) et UpPTS (Uplink Pilot Timeslot) [26].

Bloc de ressource radio (BR) :

L'unité utilisée pour l'allocation des ressources radio est nommée Bloc de ressource (BR), La répartition des BRs est gérée par une fonction d'ordonnancement au niveau de la station de base eNodeB, pour chaque intervalle de temps de transmission (TTI) de 1 ms, une décision d'ordonnancement est prise en se basant sur des algorithmes d'ordonnancement pour permettre le partage des canaux radio entre les utilisateurs actifs au cours de cet TTI. Ces algorithmes font l'objet de notre recherche et prennent en compte plusieurs critères à savoir, la condition canal des utilisateurs, les interférences, les critères relatifs à la qualité de service (QoS), priorités des services...etc.

Un bloc de ressource radio correspond à 12 sous-porteuses de 15 KHz chacune (180 KHz) dans le domaine fréquentiel et à un time slot (0,5 ms) dans le domaine temporel, chaque slot est composé de 6 ou 7 symboles OFDM, selon que le préfixe cyclique est étendu ou normal. La figure ci-dessous montre la structure d'un bloc de ressources avec un préfixe cyclique normal [34].

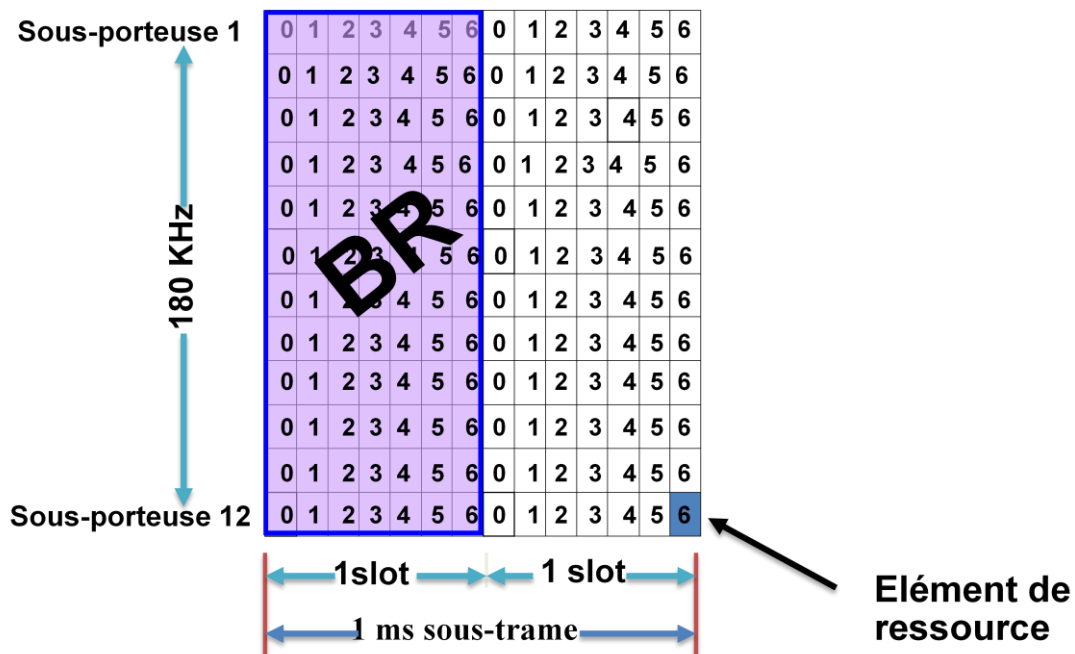


Figure I. 16: La structure du bloc de ressource (BR).

LTE supporte aussi les différents schémas de modulation à savoir, la modulation en quadrature de phase (QPSK) dont l'élément de ressource est de 2 bits par symbole, la modulation d'amplitude en quadrature à 16 état dont l'élément de ressource est de 4 bits et la 64 QAM qui permet d'avoir un élément de ressource de 6 bits [32].

Le tableau ci-dessous illustre le nombre de blocs de ressources pour chaque bande [37] :

Tableau I. 5: Le nombre de bloc de ressources pour chaque bande.

| La bande passante (MHz) | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|------------------------------|-----|----|----|----|----|-----|
| Nombre de blocs de ressource | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |

Le choix de la modulation et du schéma de codage est fait par l'ordonnanceur en se basant sur l'indice de qualité du canal (IQC) qui donne une estimation de la qualité du canal. Outre les schémas et les techniques de modulation, les performances du LTE sont augmentées grâce à l'exploitation d'un nouveau concept de multiplexage spatial via l'introduction de la technique MIMO (multi Input and Multi Output) qui vise à augmenter le nombre d'antenne de transmission, pour la version 8, 3GPP a recommandé l'usage de 4 antennes en émission et 4 antennes en réception (4x4) dans le sens descendant et de 2 antennes en émission et 2 autres en réception dans le sens montant (2x2). Pour les versions suivantes, la MIMO a été évoluée jusqu'à permettre l'usage de 8x8 en sens descendante et de 4x4 en sens montant [51].

3.3.2. Méthodes d'accès sur LTE.

Grâce aux avantages majeurs offerts par l'OFDM, l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) a été adopté comme étant la technique d'accès multiple la plus appropriée dans le sens descendant, et ce grâce à sa capacité d'offrir à un ensemble d'utilisateurs un accès multiple à la bande passante, les utilisateurs se voient alors attribuer un nombre précis de blocs de ressources physiques (PRBs, Physical Resource Blocks), la figure I.17 présente un exemple d'allocation des ressources radio pour l'OFDM vis-à-vis de l'OFDMA [28].

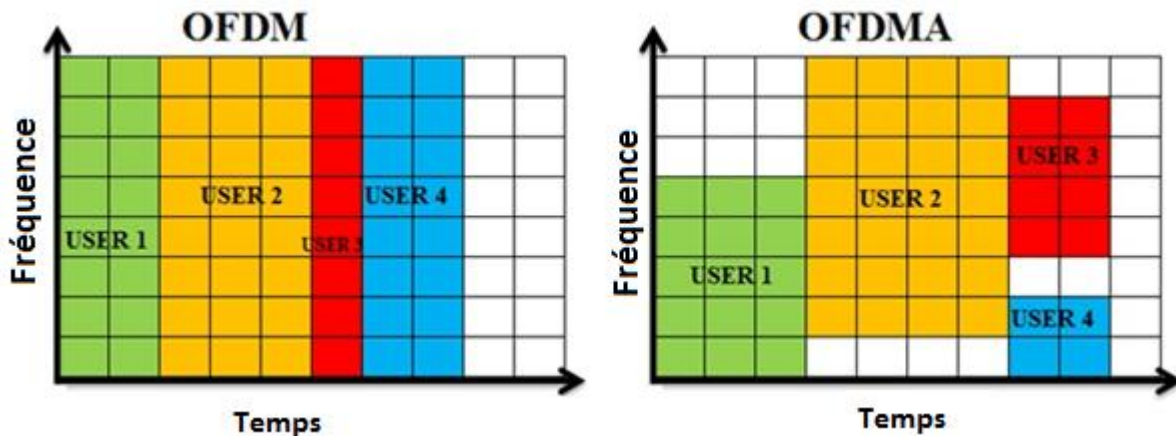


Figure I. 17: L'OFDM vis-à-vis l'OFDMA.

L'OFDMA est considérée comme la technique d'accès multiple la plus optimale pour remplir les exigences LTE en liaison descendante, Alors que ses propriétés sont moins favorables pour la liaison montante. Cela est dû principalement au plus faible rapport crête-à-moyenne de puissance (PAPR) d'un signal OFDMA résultant d'une mauvaise couverture en sens montant(UL) et les défis liés à la conception d'un amplificateur de puissance car elle nécessite des amplificateurs de puissance très linéaire [28].

Enfin la technique d'accès multiple SC-FDMA (Single Frequency Division Carrier Multiple Access) avec un préfixe cyclique a été choisie comme étant le schéma de transmission alternatif pour la liaison montante. Un signal SC-FDMA a une meilleure propriété de PAPR comparée à un signal OFDMA. Elle s'agissait d'une des principales raisons pour lesquelles la SC-FDMA a été choisi comme la technique d'accès multiple de liaison montante. Les caractéristiques de PAPR sont importantes dans la conception rentable des amplificateurs de puissance pour un UE. Pourtant, le traitement du signal SC-FDMA a quelques similitudes avec le traitement de signal OFDMA [28].

3.4. Les mécanismes de support de la voix sur LTE.

De nos jours les appels vocaux continuent à représenter la principale source de revenus pour les opérateurs de téléphonie mobile, le service vocal est toujours considéré comme important par les utilisateurs, d'où la nécessité d'une solution stable et normalisée pour fournir ces services et protéger cette part de leur chiffre d'affaires.

Pour le succès de la technologie LTE, il est d'une importance cruciale de maintenir le soutien pour le service de voix sur le réseau LTE. Le LTE est un système IP complet conçu exclusivement pour l'acheminement des données, alors que les opérateurs ont eu recours aux réseaux 2G/3G via les fonctions CS Fallback et VoLGA pour l'acheminement des communications vocales. La technologie VoLTE (voice over LTE) représente l'étape logique suivante pour la prise en charge des appels vocaux sur IP de bout en bout.

3.4.1. CSFB (Circuit Switched Fall Back):

La solution CS-FallBack (Circuit Switched Fallback) est l'une des standards mise en oeuvre pour combler l'incapacité du réseau LTE à supporter les services voix, elle consiste tout simplement à tirer profits des réseaux 2G/3G existants pour véhiculer le trafic voix et à réserver le réseau LTE seulement pour le service de transmission de données. Cette solution est standardisée et fournit aux opérateurs la flexibilité de déployer le réseau LTE en parallèle avec le réseau 2G/3G existant. Pour se faire, le terminal mobile doit être équipé de deux antennes qui lui permettront de se connecter soit au réseau GSM/UMTS soit au réseau LTE selon l'application qu'il utilise. Afin que le mobile puisse basculer entre le réseau 2G/3G et celui du LTE, un échange de signalisation entre le réseau cœur NSS (Network Sub System) et le réseau cœur EPC (Evolved PacketCore) du réseau LTE est alors nécessaire [52].

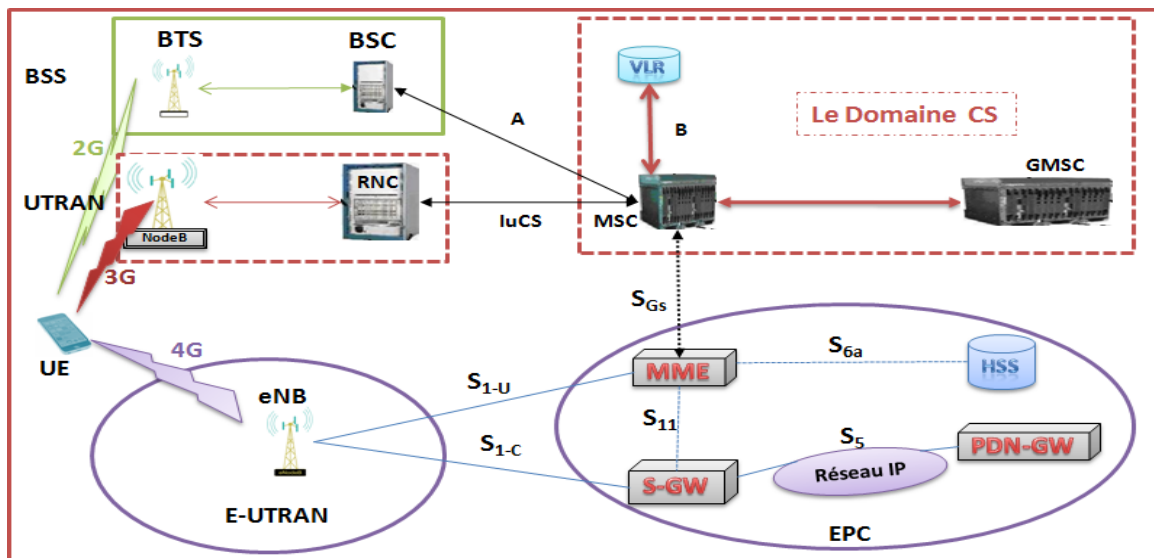


Figure I. 18: La solution CSFB (Circuit Switched Fallback).

La MME est l'élément responsable de l'enregistrement 2G /3G pour le compte de l'utilisateur. Tout au long de la procédure initial d'enregistrement, l'utilisateur doit être enregistré à la fois au réseau 4G ainsi qu'au réseau 2G/3G. Si un utilisateur procède à l'initiation d'un appel vocal, la MME redirige sa requête vers l'MSC (Mobile Switching Center), si les ressources radio sont réservées pour cet appel, le MSC doit répondre à la MME en lui envoyant l'état de la demande. Des instructions sont alors envoyées par la MME à l'eNodeB pour demander à cet utilisateur d'effectuer un « handover » vers le réseau 2G/3G. Si le réseau de destination est celui de la 2G, la session de données de l'utilisateur dans

le réseau LTE est suspendue. Par contre s'il s'agit du réseau 3G, il est possible de basculer le mode PS établi avec le réseau 4G vers le mode PS du réseau 3G.

Cette solution offre plusieurs avantages aux opérateurs de télécommunications à savoir, la flexibilité de déployer LTE comme uniquement un réseau de couverture pour les données et d'utiliser les réseaux CS existants pour le support de la fonctionnalité de la voix, elle permet grâce à des mises à jour mineurs une réutilisation complète de l'infrastructure. En contre partie la solution CS-FallBack présente plusieurs inconvénients notamment l'augmentation du temps de basculement entre les réseaux 4G et 2G/3G ce qui affecte la qualité de service requise par les utilisateurs, les transferts de données sont également perturbés durant le passage du réseau 4G vers celui du 3G, ainsi en isolant la voix du trafic donnée, le développement de nouveaux services combinant la voix et les données (conférence, jeux ...) devient impossible [52].

La mise en pratique de cette solution permet de prolonger la vie du réseau 2G/3G existant sans pouvoir tirer profit des avantages de la 4G, ainsi, CSFB est considérée comme une solution temporaire durant le déploiement initial du réseau LTE, ce qui est considéré comme obstacle devant l'adoption de cette nouvelle technologie.

3.4.2. La solution SVLTE (Simultaneous Voice and LTE)

SVLTE (Simultaneous Voice and LTE) est un mécanisme assez similaire à celui du CSFB, il fournit les fonctionnalités de CSFB tout en offrant les services de données PS (Packet Switched), SVLTE permet d'éviter le délai causé par la phase de basculement entre le réseau 2G/3G et celui du LTE grâce à la simultanéité de la voix et des données, en fait SVLTE permet à un UE d'utiliser en même temps le réseau 2G/3G pour véhiculer la voix et le réseau LTE pour acheminer les données, ce qui permet au réseau de données LTE d'être disponible même durant un appel vocal. L'implémentation de la dite SVLTE ne nécessite pas de modifications dans le réseau mais rend le terminal mobile plus complexe grâce à l'exécution simultanée de deux radios, ce qui présente un impact sérieux sur la consommation énergétique de la batterie des terminaux LTE. Ce qui diminue l'intérêt des constructeurs des téléphones mobiles pour cette solution [57].

La figure suivante décrit l'architecture de la solution SVLTE :

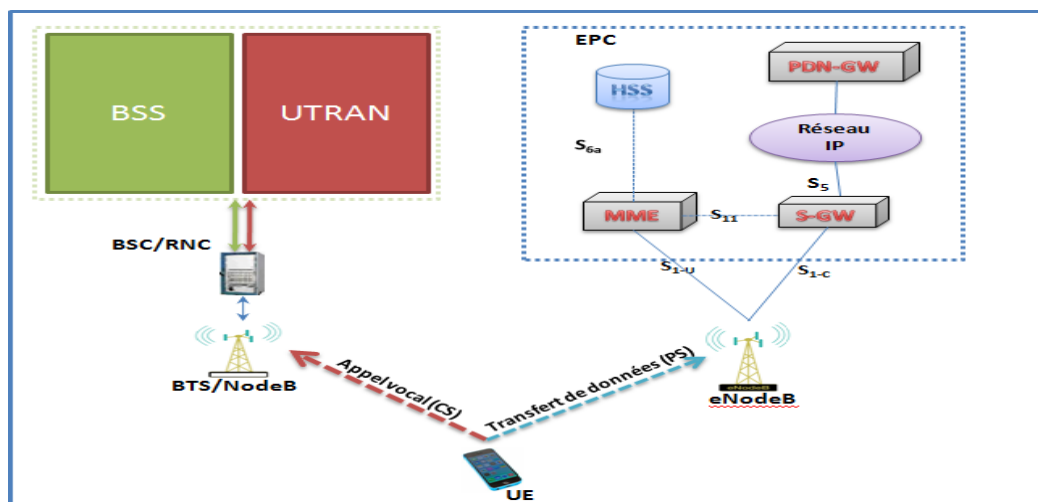


Figure I. 19: La solution SVLTE (Simultaneous Voice and LTE).

Comme le montre la figure I.19, la solution SVLTE intervient au niveau du terminal LTE, L'UE choisit, selon le service demandé, de se connecter au réseau d'accès 2G/3G ou le réseau d'accès LTE.

3.4.3. VoLGA (Voice Over LTE via Generic Access):

La solution VoLGA quand à elle permet de réutiliser l'infrastructure du réseau existant mais cette fois-ci d'une manière plus évoluée, elle ne souffre plus des inconvénients connus par CSFB, et cela grâce à un accès simultané aux services voix depuis le réseau 2G/3G et aux services de données depuis le réseau LTE. Cette solution ne nécessite aucune modification que ça soit au niveau du réseau EPS aussi bien qu'au réseau cœur NSS [53].

Cette solution consiste à connecter les MSCs existants du réseau NSS au réseau LTE par l'intermédiaire d'une passerelle appelée VANC (VoLGA Access Network Controller). Ainsi pour connecter cette passerelle avec les réseaux 2G/3G, les mêmes interfaces A et Iu sont utilisées sans aucune modification, l'interface A est utilisée pour connecter la VANC au MSC du réseau 2G. De même, L'interface Iu est utilisée pour connecter la VANC au MSC du réseau 3G. Le VANC est alors vu comme étant un contrôleur de station de base (BSC) pour le MSC du réseau 2G, et un contrôleur du réseau radio (RNC) pour le MSC du réseau 3G. Les MSCs sont alors inconscients du fait que les mobiles ne sont pas directement connectés à leurs réseaux mais à celui du réseau LTE. Au niveau du réseau LTE, la VANC est connectée au PDN-GW du réseau cœur EPC via l'interface SGi sur laquelle les flux de signalisation et de données sont transportés. La figure I .20 englobe les nœuds et les interfaces du réseau VoLGA [53]:

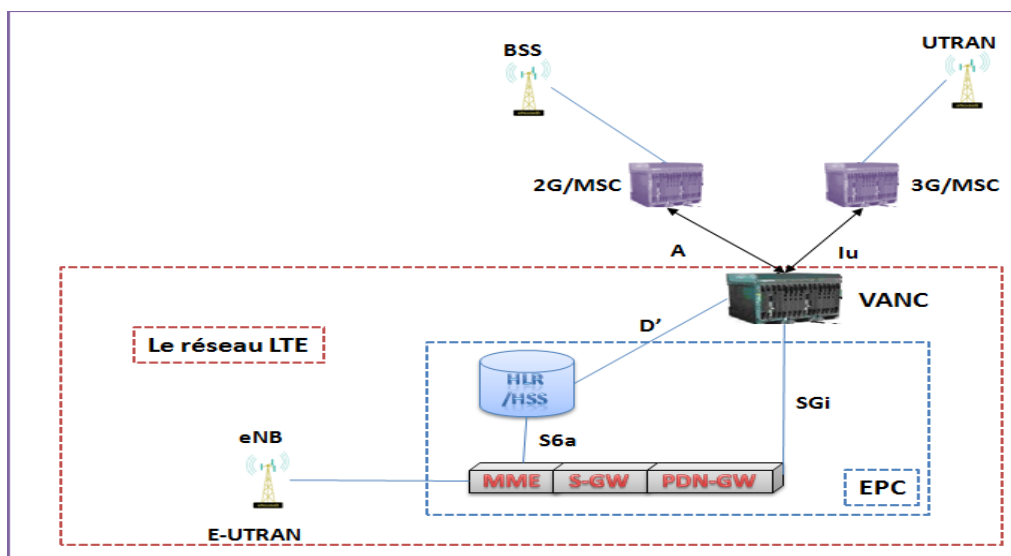


Figure I. 20: La solution VoLGA (Voice Over LTE via Generic Access).

En contre partie le déploiement de la dite VOLGA présente des inconvénients, à savoir la difficulté d'intégrer cette nouvelle technologie dans les terminaux LTE, afin d'être en mesure pour encapsuler les services à commutation de circuits dans des paquets IP. Cette difficulté est due au fait que l'adoption de cette solution nécessite un grand support des fournisseurs de terminaux mobiles pour une technologie de transition qui ne durera pas longtemps. Par ailleurs, VoLGA, comme CSFB, ne permet pas une évolution des services combinant la voix et les données car les réseaux gérant ces deux flux restent séparés.

3.4.4. La solution dite VoLTE via IP Multimedia Subsystem:

Vue que le réseau LTE est basé sur IP et vue la nécessité de supporter la voix sur LTE, une nouvelle solution considérée à long terme a été spécifiée par l'organisme de standardisation 3GPP, l'IMS (IP Multimedia Subsystem) est un réseau multimédia essentiellement utilisé pour remplacer les services de voix fournis par les réseaux CS existants. En plus l'IMS peut offrir des services multimédia avancés comme les vidéo-conférences et les jeux en ligne (Real time gaming). Pour se faire, le réseau cœur de l'IMS est intégré au-dessus du réseau LTE [54].

L'adoption de la solution IMS bénéficie du fait que l'architecture LTE est totalement utilisée au lieu de celle des réseaux CS, en plus de la possibilité d'interaction avec les réseaux 2G/3G existants pour assurer une continuité de service en cas du déplacement hors zone de couverture LTE. Pour permettre l'enregistrement du mobile au service téléphonique et l'établissement des sessions, l'IMS utilise le protocole de signalisation SIP (Session Initiation Protocol). Ainsi, pour supporter la négociation du média (voix, vidéo, données), le protocole SDP (Session Description Protocol) est associé à celui du protocole SIP [55].

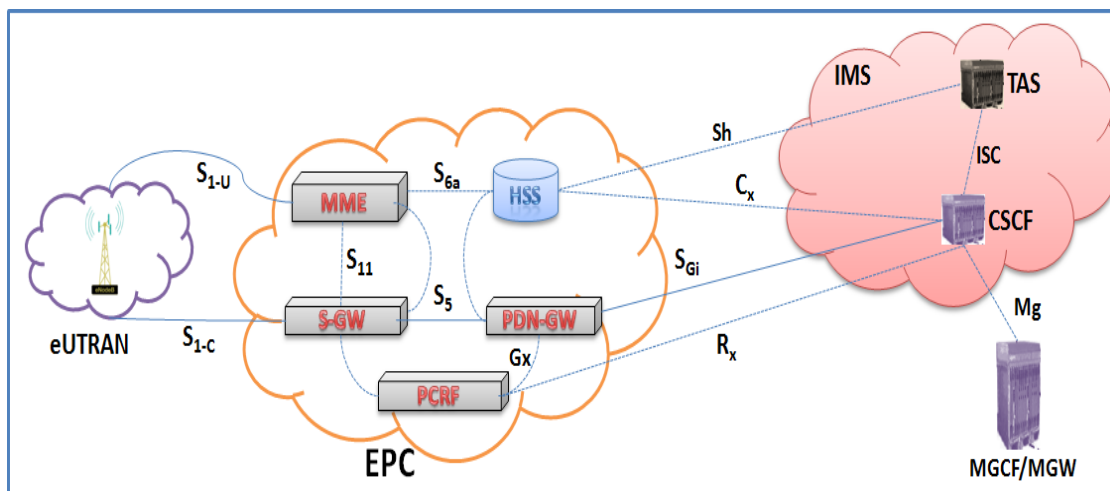


Figure I. 21: Architecture réseau dans le cas de déploiement de VoLTE.

Comme le montre la figure I.21, l'IMS se présente comme une couche de services située au-dessus du réseau cœur EPC. Le service des appels vocaux est géré par l'entité TAS (Telephony Application Server). Au cours du déploiement initial du LTE, la couverture va être limitée ainsi il est nécessaire de faire interagir le réseau LTE avec les réseaux existants 2G/3G. Dans ce sens, il y'a deux solutions basées sur IMS pour permettre cette interaction.

a- La solution basée commutation de paquet (Seamless mobility).

Dans cette solution, la voix via IMS est implémentée à la fois dans les réseaux LTE et 3G. Durant la perte de couverture LTE, un handover PS est effectué vers le réseau 3G ainsi fournissant une mobilité fluide « Seamless Mobility » entre LTE et le réseau 3G. Par conséquent, les sessions de voix et de données qui sont active sont transférées toutes les deux simultanément vers le 3G, ainsi évitant la perte de la voix et de données durant toute la période de perte de couverture LTE. La figure I.22 met en évidence l'architecture utilisée pour l'approche « PS Based Solution » [58].

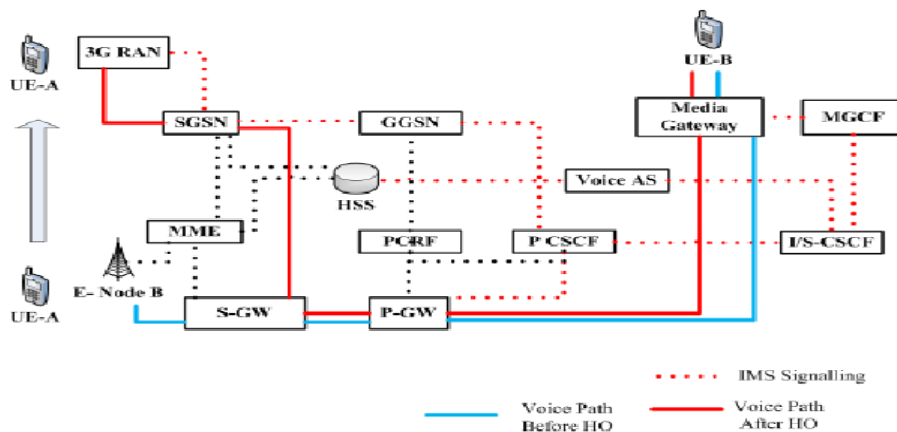


Figure I. 22: La solution basée commutation de paquets.

b- SRVCC/ICS (Single Radio Voice Call Continuity).

Pour la solution SRVCC (Single Radio Voice Call Continuity), c'est le réseau IMS qui se charge du contrôle de service des appels vocaux. L'élément responsable d'accomplissement des appels dans l'IMS est le serveur d'application de continuité et de centralisation de service SCCAS (Service Continuity and Centralization Application Server), via lequel les messages de signalisation SIP (Session Initiation Protocol) sont transportés. Durant l'enregistrement initial, un numéro de transfert de session STN-SR (Session Transfer Number for SRVCC) est alors attribué aux mobiles par le SCCAS, ce numéro est utilisé aussi dans le cas d'un handover entre le réseau LTE et celui du 2G/3G [56].

Les messages de signalisation SIP (Session Initiation Protocol) provenant de l'utilisateur attaché au réseau LTE et l'utilisateur de destination sont transmis via le SCC AS.

Le mobile se voit aussi attribuer un numéro de transfert de session pour SRVCC (Session Transfer Number for SRVCC), par le SCC AS durant l'enregistrement initial et il est utilisé durant le handover de l'appel depuis le réseau LTE vers le réseau 2G/3G. La figure I.23 présente la procédure utilisée lors d'un transfert de session LTE vers 2G/3G via la solution SRVCC comme définie par le 3GPP [56].

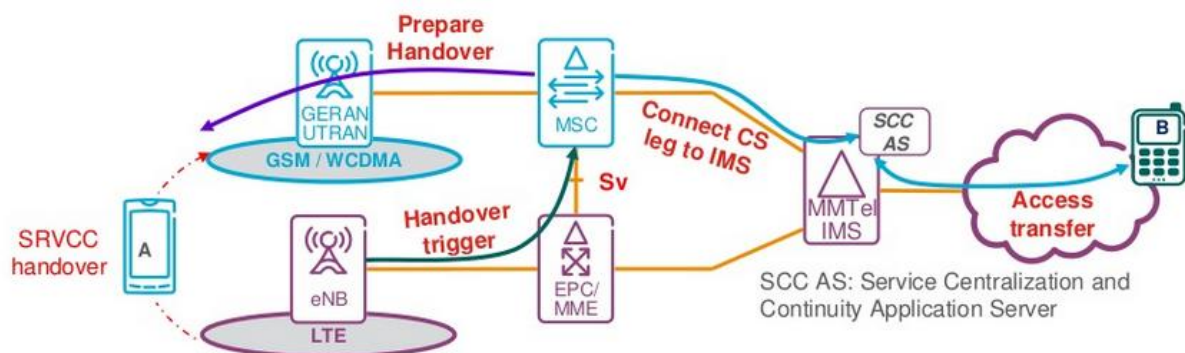


Figure I. 23: La solution SRVCC (Single radio Voice Call Continuity).

La SRVCC, présente des inconvénients liés au temps d'interruption pour effectuer un passage depuis le réseau LTE vers les réseaux 2G/3G, Ainsi qu'un temps d'interruption de la session voix lors du basculement est introduit que ce soit au niveau de l'appelé ou de l'appelant.

4. 2015, l'année de la 4G au Maroc :

Les réseaux de quatrième génération des mobiles (4G) ont commencé à faire leurs preuves dans certains pays au niveau des quatre continents (Amérique, Asie, Europe et Océanie). Au Maroc, dès le mois de mars 2015 les trois opérateurs télécoms marocains se sont vus attribués le droit d'exploiter la technologie mobile de quatrième génération (4G), et ce dans les trois bandes de fréquences, 800 Mhz, 1800 Mhz et 2,6 GHz. Cette technologie peut garantir des débits théoriques autour de 100Mb/s, succède à la 3G, qui était mise en service au Maroc à partir de 2008 et qui offre un débit théorique autour de 42Mb/s. L'implémentation de la 4G a eu lieu au Maroc à partir de juin 2015.

Etant donné que le Maroc a opté pour les mêmes bandes de fréquences déjà opérationnelles en Europe vue qu'il appartient à la même zone du plan mondial, l'ANRT a décidé de réserver les bandes de fréquence de 800 MHz et de 2 600 MHz pour les réseaux de téléphonie mobile 4G. Mais dans beaucoup de pays, notamment européens, les opérateurs ont réutilisé la bande de fréquence des 1 800 MHz initialement attribuée au GSM (2G). Le Maroc a opté aussi pour le même choix, ainsi, les terminaux fonctionnant en Europe ne posent aucun problème à être utilisés en situation de Roaming au Maroc et réciproquement. Par ailleurs, L'implémentation des services voix, va continuer à transiter par les réseaux mobiles GSM et 3G, la raison pour laquelle les dispositions techniques sont prévues d'une manière à permettre aux terminaux compatibles de basculer automatiquement de la 4G à la 2G ou à la 3G lorsqu'on voudrait passer un appel ou lorsqu'on quitte une zone couverte en 4 G.

La 4G est la première technologie mobile qui permet le très haut débit en fréquences basses (800 MHz). Ces fréquences dans la bande 800Mhz sont payées relativement plus chères. Car la bande des 800 MHz a une portée relativement meilleure, limitant en théorie le nombre de relais pour le déploiement du réseau 4G et de ce fait ces fréquences permettent d'assurer une meilleure couverture, soit dans des zones éloignées ou dans les zones urbaines. Elle pénètre également mieux à l'intérieur des bâtiments. Cette bande 800 Mhz ne nécessite pas beaucoup d'investissements pour les opérateurs télécoms comme pour les cas des deux autres bandes.

Quant à La bande de 2600 MHz, elle présente des caractéristiques opposées au 800 MHz. Elle ne peut couvrir qu'une surface de faible rayon. Elle traverse moins facilement les murs que les fréquences de la bande 800 Mhz. Ses caractéristiques font qu'elle est plus adaptée pour une utilisation en ville où elle est plus à même d'accepter un trafic intense. Mais pour parvenir à traiter plus de trafic issu des Smartphones, il faut avoir une largeur de bande importante. C'est pour cela que tous les opérateurs ont pris plus de blocs de fréquences en 2600 MHz qu'en 800 MHz. La bande 1800 MHz, est aussi considérée comme meilleure, du fait qu'elle possède les caractéristiques techniques, situées entre la bande 800 MHz et celle de 2600 MHz.

Le très haut débit par fibre optique ça ne sera pas pour demain pour l'Afrique étant donné le manque d'infrastructure pour assurer une grande couverture acceptable et aussi par manque de rentabilité financière pour ces réseaux très haut débit. Le financement du génie civil qui constitue 70% de l'investissement de l'infrastructure fibre optique sera difficilement assuré étant donné que les organismes de financement n'aiment pas financer que les projets rentables et où il existe une certaine valeur ajoutée. Donc par manque d'infrastructure fibre optique, la 4G est une grande opportunité à terme pour le Maroc et pour notre continent pour le développement du très haut débit pour les particuliers et pour les entreprises, surtout dans la bande 800 Mhz et plus tard dans celle des 700 Mhz.

Conclusion :

En effet ces bandes qui ont l'avantage de ne pas nécessiter beaucoup d'investissement permettent d'assurer de la couverture contrairement à la 2,6 GHz qui est destinée plutôt pour l'urbain dense comme Casablanca. La 4G dans la bande 800Mhz pourra constituer une belle opportunité pour améliorer certains secteurs dont ceux de la santé et de l'éducation.

En ce qui concerne l'avenir, plusieurs équipementiers ont annoncé l'avènement de la 5G au congrès mondial des mobiles tenu à Barcelone du 02 au 05 mars 2015. Ils prévoient, d'ici 2020, des réseaux 5G offrant des débits autour de 10 Gb/s par terminal dans des bandes supérieures à 15 GHz. L'Union internationale des télécoms a lancé les études nécessaires en vue de se préparer à la 5G.

Conclusion :

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté d'une façon générale l'évolution des différentes générations de téléphonie mobiles ainsi que leurs principales caractéristiques. On a vu que le passage de l'analogique vers le numérique a fait marqué l'évènement, et que la mise en œuvre du service GPRS a impliqué une modification de l'infrastructure matérielle et logicielle du réseau GSM déjà existants. L'évolution du GSM vers GPRS a préparé l'arrivée des réseaux de troisième génération à savoir le UMTS grâce à l'adoption de la commutation de paquets permettant d'assurer un accès simple au réseau Internet. Pour les réseaux 4G (LTE), nous avons présenté un bref aperçu des exigences de normalisation du standard LTE par le groupe 3GPP, on a décrit l'architecture et les spécifications techniques du standard LTE, ainsi que les fonctions de chaque nœud du réseau d'accès E-UTRAN et du réseau cœur EPC. Ensuite, nous avons présenté les différentes solutions proposées pour supporter la voix sur LTE.

Toutefois, dans le chapitre suivant nous allons décrire les paramètres de gestion de la qualité de service sur le réseau LTE, on va présenter aussi la structure et les fonctionnalités clés de l'interface radio sur LTE, Ensuite on va décrire le concept d'ordonnancement radio dans le réseau LTE.

CHAPITRE II: La qualité de service et la gestion des ressources radio sur LTE.

1. La qualité de service QoS sur le réseau LTE

La qualité de service (QoS) sur LTE est assurée grâce à la notion de Bearers ou Porteurs dont le but est de fournir une capacité accrue au système en termes de débit, de délai et d'efficacité spectrale, ainsi les Bearers permettent de distinguer entre les flux en les identifiant d'une manière unique, ils s'établissent après les phases d'authentification et d'enregistrement de l'utilisateur dans le réseau, et sont aussi responsables de la priorité affectée à un flux de paquets dans le réseau LTE. L'organisme 3GPP définit l'EPS comme étant un réseau de transmission orienté connexion qui exige l'établissement d'une connexion virtuelle, appelée EPS Bearer, entre deux terminaux du réseau avant que tout trafic soit transmis entre eux. Cette connexion logique est requise pour que le système LTE puisse différencier entre les services tels que la voix, le streaming vidéo et le transfert de données. La figure II.1 montre les différents types de bearer [59] :

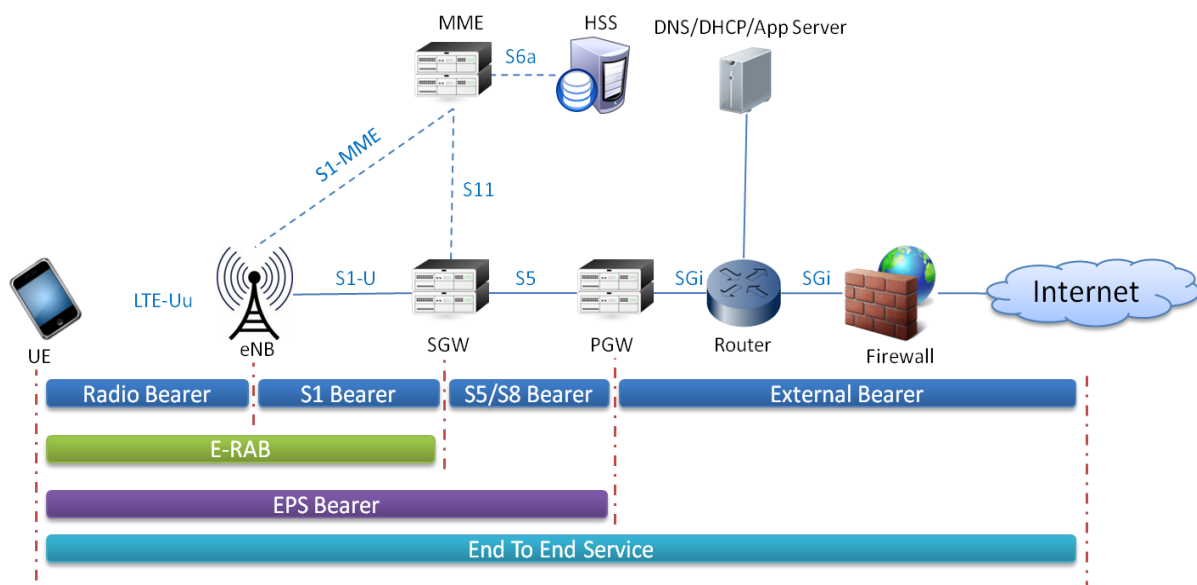


Figure II. 1: Les différents types de bearer.

Comme montré dans la figure, entre chaque nœud du réseau LTE, une connexion logique existe. Le radio bearer et le bearer S1 forment une connexion logique entre l'UE et la S-GW cependant, le bearer E-RAB (E-UTRAN Radio Access Bearer) constitue un élément agrégé du bearer EPS. Ainsi, l'association du bearer EPS et du bearer externe sur le réseau de données externe constitue ce qu'on appelle, bearer de service bout-en-bout.

Deux types de Bearer EPS ont été définis dans le réseau LTE, le Bearer EPS par défaut (Default EPS Bearer) et le Bearer EPS dédié (Dedicated EPS Bearer) [63]. On peut les décrire comme suit.

- Le Bearer EPS par défaut est établi au cours du processus d'attachement et reste actif pendant toute la connexion, il permet d'allouer une adresse IP à l'UE. Son fonctionnement est similaire au contexte PDP primaire de l'UMTS.
- Le Bearer EPS dédié est lié au bearer EPS par défaut, il est établi au cours d'une configuration d'appel comme il peut être établi au cours du processus d'attachement, ce bearer ne permet pas d'allouer une adresse IP supplémentaire à l'UE, cependant il est doté d'une qualité de service souvent garantie. Son fonctionnement est similaire au contexte PDP secondaire de l'UMTS.

Une autre classification consiste à distinguer entre les EPS Bearer qui peuvent garantir une QoS aux paquets transportés, appelés GBR (Guaranteed Bit Rate), et ceux qui sont utilisés pour les services qui ne nécessitent pas une prise en considération de QoS, appelés NGBR (Non Guaranteed Bit Rate) [64].

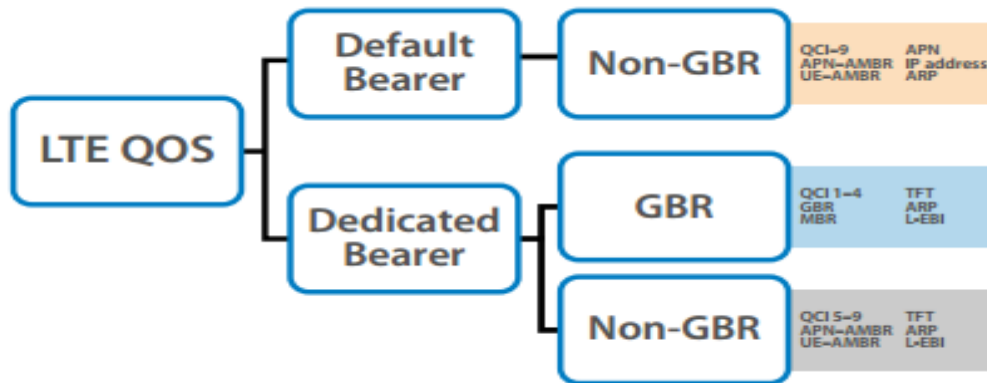


Figure II. 2: Classification des Bearer EPS.

1.1. Paramètres de QoS sur LTE.

Un EPS Bearer dans le réseau LTE pourra être caractérisé par un ensemble de paramètres dont on cite l'identificateur de la classe QoS (QCI), la priorité d'allocation et de rétention ARP (Allocation and Retention Priority) et le débit maximum atteignable. Ces paramètres sont associés à chaque porteur en fonction des données d'application qu'il porte, ce qui permet une différenciation entre les flux. Pour les services temps réel, la garantie d'un maximum de débit reste primordiale [59].

a- QoS Class Identifier (QCI)

Le paramètre QCI est défini au sein du système LTE/EPC pour permettre la différenciation de la qualité de services entre les différents flux de services, il permet d'identifier le type du Bearer fourni à l'utilisateur, ainsi de déterminer le type de traitement que doit subir le flux de paquets dans chaque nœud du réseau LTE. Les valeurs de QCI sont identifiées dans la norme 3GPP pour le réseau LTE comme montré dans le tableau II.1 [62] :

Tableau II. 1: Paramètres QCI (QOS Class Identifier).

| QCI | Bearer Type | Priority | Packet Delay | Packet Loss | Example |
|-----|-------------|----------|--------------|-----------------|---|
| 1 | GBR | 2 | 100 ms | 10^{-2} | VoIP call |
| 2 | | 4 | 150 ms | 10^{-3} | Video call |
| 3 | | 3 | 50 ms | | Online Gaming (Real Time) |
| 4 | | 5 | 300 ms | Video streaming | |
| 5 | Non-GBR | 1 | 100 ms | 10^{-6} | IMS Signaling |
| 6 | | 6 | 300 ms | | Video, TCP based services e.g. email, chat, ftp etc |
| 7 | | 7 | 100 ms | 10^{-3} | Voice, Video, Interactive gaming |
| 8 | | 8 | 300 ms | 10^{-6} | Video, TCP based services e.g. email, chat, ftp etc |
| 9 | | 9 | | | |

b- Allocation Retention Priority (ARP)

Le paramètre ARP est un paramètre interne au réseau de l'opérateur et n'est pas montré à l'UE, il permet l'établissement ou la modification de bearer, la configuration de connexion et la libération du bearer en cas de congestion. Une fois le bearer est établi, l'ARP n'a aucune influence sur le traitement des données ainsi il n'est utilisé que pour le contrôle d'admission, ainsi, les mécanismes d'ordonnancement ou de contrôle de débit implémentés au sein de l'eNodeB n'intègrent pas ce paramètre. L'ARP est caractérisé par un niveau de priorité pris entre 1 et 15, 1 étant la priorité la plus élevée, aussi par sa capacité de préemption et par sa vulnérabilité à la préemption.

Le niveau de priorité déjà décrit permet de s'assurer que le bearer qui a la plus haute priorité sera établi dans une situation de ressources limitées. Par ailleurs, l'ARP peut être utilisé en cas de restriction de ressources pour décider de libérer un ou plusieurs bearers EPS. Il se peut aussi que tous les abonnés aient les mêmes paramètres de préemption pour un même QCI [59].

c- Le débit.

- Maximum Bit Rate (MBR)

Le paramètre MBR est défini pour les bearers GBR comme étant le débit maximal autorisé sur le bearer EPS, il est applicable uniquement pour les services temps réel. Si le débit instantané mesuré par un équipement du plan usager dépasse le MBR, cet équipement peut effectuer un lissage du débit en supprimant des paquets, afin de respecter ce seuil.

Ce lissage de trafic sera typiquement réalisé par l'eNodeB dans le sens montant et par la P-GW dans le sens descendant. En Release8, la norme impose que le MBR soit toujours égal au GBR lorsque ce dernier est utilisé. Cela peut nécessiter de surévaluer légèrement le GBR pour éviter le phénomène de lissage [64].

- Guaranteed Bit Rate (GBR)

Le paramètre GBR (Guaranteed bit rate) est semblable à celui du MBR, il est défini pour les bearers GBR seulement. Il spécifie le débit binaire minimal requis par EPS. Un GBR est défini par exemple pour un bearer EPS portant un service de streaming ou de VoIP. Le débit réel peut cependant

être inférieur au GBR si les utilisateurs fournissent des données à un rythme moins élevé. Lors d'un appel VoIP via l'IMS, et en cas de changement de technologie radio RAT, l'UE ou le réseau peut prendre l'initiative de modifier le codec utilisé et le GBR associé, pour s'adapter à l'évolution des conditions radio [64].

- **Débits agrégés (UE-AMBR et APN-AMBR)**

Pour un ensemble de bearers EPS, des paramètres de qualité de service agrégés sont définis: il s'agit du débit maximal agrégé par APN, appelé **APN-AMBR** et du celui agrégé par UE, appelé **UE-AMBR**.

- L'APN-AMBR (Access Point Name-Aggregated Maximum Bit Rate) définit le débit total autorisé pour tous les bearers NGBR associés à un nom de point d'accès. L'APN-AMBR limite le débit total pour un APN donné indépendamment des connexions et des bearers NGBR établis pour cet APN. Par exemple si un opérateur désire fournir un APN pour internet, il peut limiter la largeur de la bande pour cette APN.
- L'UE-AMBR (User Equipment-Aggregated Maximum Bit Rate) est défini par abonné, il désigne le débit maximal accordé à un UE pour l'ensemble de ses bearers non-GBR, C'est un paramètre lié à la souscription de l'abonné, il est donc enregistré au sein du HSS dans le contexte de l'abonné et transmis par le HSS au MME lors de l'enregistrement de l'UE au réseau [59].

1.2. La gestion de la qualité de service.

Vue que le protocole IP tend à s'imposer dans la plupart des infrastructures réseaux existante, que ce soit dans les réseaux locaux des entreprises, et vue l'arrivée des applications multimédia à savoir, la visioconférence, la VoIP, TV sur internet, vidéosurveillance, vidéo en demande, jeux en ligne...etc. L'adoption d'un modèle de gestion de qualité de service permettant de mieux gérer cette multitude de services, devient primordiale. C'est L'IETF qui a lancé des travaux en vue de développer des modèles de gestions de qualité de service, ce qui a aboutit à la mis au point de deux modèles de gestion de la qualité de service, le modèle INTSERV, et le modèle DIFFSERV. Pour le réseau LTE est vue qu'il est tout IP, son architecture de QOS a été intégrée avec celle du DiffServ pour permettre d'obtenir de bonnes performances de bout en bout [61].

- **Le model DiffServ.**

Le Differentiated Service (DiffServ), le protocole du monde IP est utilisé pour classifier les divers types de services dans le réseau de transport de LTE, il consiste à affecter des priorités au niveau d'un champ de l'entête IP appelé DSCP (DiffServ Control Point), l'architecture DiffServ est utilisée par les eNodeB et la PDN-GW pour faire le « mapping » entre la QCI et le DSCP (DiffServ Code Point) dans le sens montant et descendant [92].

L'architecture DiffServ consiste en un ensemble de comportements par nœud PHB (Per Hop Behaviours) qui sont utilisés pour identifier et classifier les paquets et appliquer les politiques de gestion du flux en fonction des priorités des paquets. On distingue les classes PHB comme ceci: Expedited Forwarding (EF), Assured Forwarding (AF) et Best Effort (BE). La classe EF possède la plus grande priorité et elle est utilisée généralement pour les services de délai critique comme la signalisation et la voix etc. La classe AF, quant à elle, consiste en un ensemble de sous classes avec

des niveaux de précedence différents correspondant à des niveaux de QoS différents. La classe BE est la classe par défaut, elle a la plus petite priorité [92].

2. Structure et gestion des ressources de l'interface radio LTE.

2.1. Architecture et structure de l'interface radio sur LTE.

2.1.1. Architecture en couche de l'interface radio LTE.

L'interface LTE se compose d'un ensemble de couches verticales et horizontales. Les couches horizontales sont basées sur le modèle OSI. Les couches verticales divisent l'interface entre le plan de contrôle et le plan utilisateur. L'interface radio offre des connexions fiables entre les équipements des usagers et les eNodeBs. Cette interface contient trois couches qui sont : la couche physique, la couche liaison et la couche RRC. La figure suivante présente le découpage en couches et les interactions logiques entre celles-ci pour les données du plan de contrôle et celles du plan usager. Cette architecture s'applique à l'UE et à l'eNodeB [60].

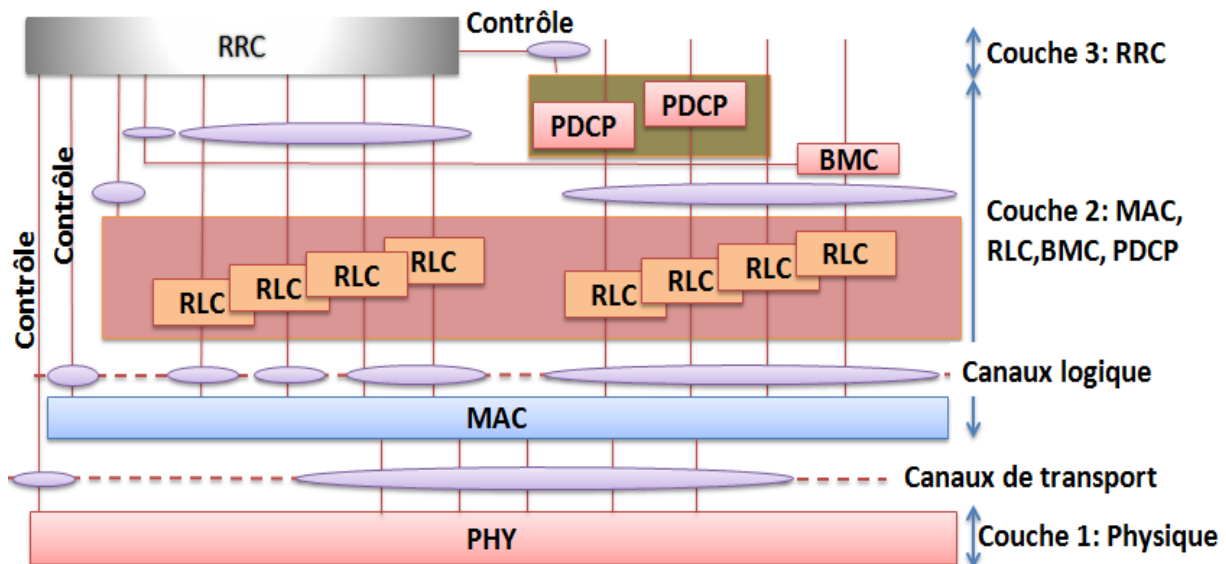


Figure II. 3: Architecture en couche de l'interface radio de système LTE.

a- La couche physique

La couche 1 de l'architecture protocolaire du LTE est la couche physique, elle a pour rôle d'assurer la transmission des données sous une forme d'onde capable de se propager dans l'air et de résister aux différentes perturbations au canal radio mobile. Elle offre un service de transport sur l'interface air à la couche MAC. En plus, La couche physique effectue une multitude de services à savoir, le codage du canal qui permet de lutter contre les erreurs de transmission subit par les bits d'information, la modulation qui permet quand à elle le collage des bits à transmettre sur les symboles de modulation, ainsi elle est responsable du traitement spatial connu sous le nom de MIMO (Multi Input Multi Output) afin de transmettre les symboles de modulation à travers plusieurs antennes, ainsi la couche physique est responsable de la modulation dite multi-porteuse qui permet d'associer le signal à transmettre sur chaque antenne à des porteuses multiple en respectant le principe d'OFDMA en sens descendant et du SC-FDMA en sens montant [65].

En réception, les opérations inverses sont effectuées par la couche physique, ainsi que des traitements de lutte contre l'interférence à savoir l'égalisation. En outre, la couche physique fournit des informations essentielles au fonctionnement de la couche MAC à savoir, la synchronisation en temps et en fréquence avec la porteuse de l'émetteur, les mesures radio qui permettent d'estimer le canal de transmission, la qualité du signal et aussi les niveaux de puissance reçus, sans oublier les messages de signalisation entre la station de base et l'UE ainsi que les informations de détection de cellules qui permettent de découvrir la présence d'une cellule voisine afin de faire un Handover intercellulaire.

b- La couche liaison

La couche liaison est la deuxième couche de l'architecture en couche du système LTE, elle est constituée de trois sous-couches à savoir la sous couche MAC (Medium Access Control), la sous couche RLC (Radio Link Control) et la sous couche PDCP (Packet Data Convergence Protocol). Ces sous-couches interviennent pour le transfert des données du plan usager et du plan de contrôle.

- Sous-couche MAC (Medium Access Control)

La fonction clé de la sous couche MAC est l'ordonnancement des paquets, elle repose sur les mesures assurées par la couche physique, cette fonction est exécutée au niveau de l'eNB via des algorithmes de scheduling. La sous couche MAC prend en charge plusieurs autre fonctionnalité comme [62] [70] [71] [72]:

- L'accès et l'adaptation au support de transmission grâce au mécanisme d'accès aléatoire.
- La correction d'erreurs à travers le mécanisme HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request).
- Le maintien de la synchronisation sur le lien montant.
- Le mapping entre les canaux logiques et les canaux de transport.
- Le multiplexage/démultiplexage des paquets SDU MAC qui font partie des canaux logiques.
- L'acheminement des informations de scheduling.
- La sélection du format de transport. Le format de transport fait référence à des informations telles que la taille du bloc de transport (TB) et le schéma de modulation.

Ces techniques sont liées à la couche physique et sont primordiales pour l'optimisation des fonctions inter couches.

- Sous-couche RLC (Radio Link Control).

Les fonctions de contrôle du lien de données sont assurées par la sous-couche RLC à savoir la détection et la retransmission des PDU (Protocol Data Unit) manquantes, la remise en séquence des PDU pour assurer l'ordonnancement des SDU (Service Data Unit) à la couche PDCP et l'optimisation de la transmission en utilisant des fenêtres d'émission et de réception. Vue l'architecture plate du LTE, la fonctionnalité de contrôle de flux n'est pas gérée par la sous couche RLC, l'UE et l'eNodeB doivent être doués de traiter les trames RLC [68].

- Sous-couche PDCP (Packet Data Convergence Protocol)

La sous-couche PDCP fournit un ensemble de fonctionnalité à savoir, la sécurité et le transfert des données, la signalisation RRC et le chiffrement de données, la détection et la suppression des unités de données PDCP reçu en redondance et Le contrôle de l'intégrité des messages de

signalisation. Le rôle principale du PDCP reste d'assurer le transport de données utilisateurs et la signalisation [73].

c- La couche RRC (Radio Resource Control).

Comme montré dans la figure II.3, la couche RRC est connectée aux quatre autres couches, via des points d'accès de contrôle, elle permet cependant plusieurs fonctionnalités à savoir [69]:

- L'établissement et la libération de la connexion RRC entre l'UE et l'eNB.
- La diffusion des informations système.
- L'établissement et la libération des ressources radio pour le transport des messages de signalisation ou des données utilisateurs entre l'UE et l'eNB.
- Le paging.
- La transmission des messages de signalisation.
- La mesure de contrôle qui fait référence aux configurations des mesures réalisées par le terminal.
- Le support des procédures de mobilité inter-cellules ou le handover.

2.1.2. Architecture protocolaire de l'interface radio.

L'interface radio permet le transfert des données entre l'UE et l'eNB tout en répondant aux exigences en termes de qualité de service via l'optimisation d'accès aux ressources spectrales. Dans la suite de cette partie, nous allons rappeler le principe de fonctionnement de l'interface radio dans les réseaux LTE pour pouvoir par la suite décrire le processus de scheduling en mode downlink.

Une pile protocolaire est associée à chaque interface de l'architecture EPS, permettant l'échange des données et des messages de signalisation entre les éléments du réseau. La pile protocolaire LTE regroupe deux plans, un plan usager qui se charge de la gestion d'acheminement des données utiles dans le réseau et un plan de contrôle qui permet la gestion des messages de signalisation échangés entre les éléments du réseau. La figure II.4 représente l'architecture protocolaire de l'interface radio du réseau LTE [60].

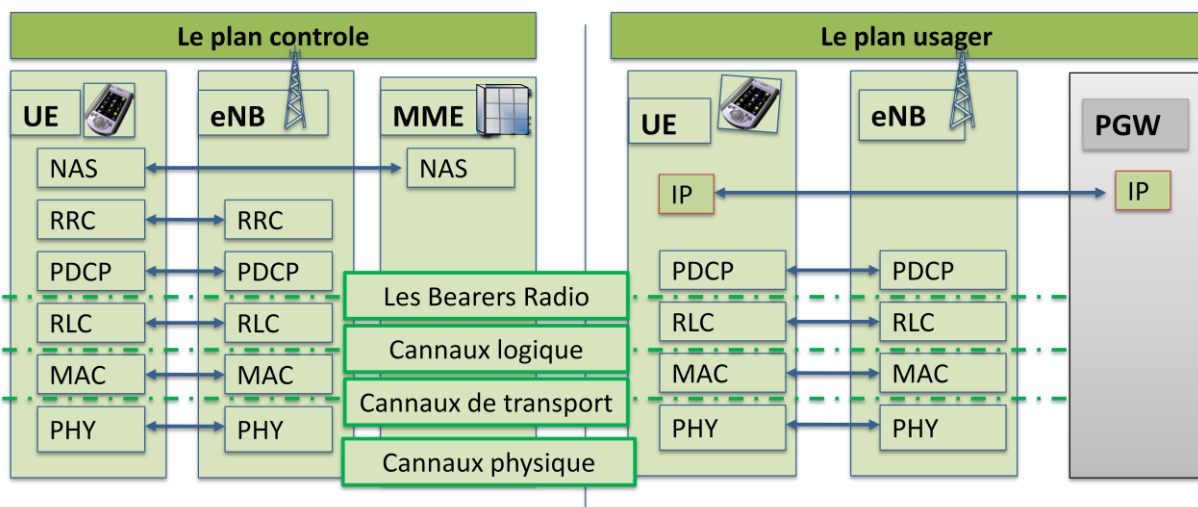


Figure II. 4: L'architecture protocolaire du deux plans usager et contrôle du réseau LTE.

Les protocoles de transport de l'interface radio sont regroupés sur deux couches, la couche physique et la couche liaison de données, la couche physique de l'interface radio comporte les fonctions

numériques et analogiques de traitement de signal que l'UE et l'eNB utilisent pour l'échange des données entre eux, tandis que la couche liaison de données est constituée des protocoles Medium Access Control (MAC), Radio Link Control (RLC) et le Packet Data Convergence Protocol (PDCP). La fonction de scheduling est assurée au niveau de l'eNB par les protocoles de la sous-couche MAC. Elle spécifie comment les ressources de l'interface radio sont allouées et utilisées en mode downlink comme en mode uplink.

2.1.3. Les canaux de communication de l'interface radio LTE

Le système LTE utilise le concept de canal pour identifier les types des données transportées sur l'interface radio ainsi que les paramètres physiques liés à la transmission. Les canaux de l'interface radio sont des points d'accès aux services suggérés par une couche N. Chaque sous-couche reçoit de la sous-couche supérieure deux flux de données SDUs (Service Data Unit) pour chacun des UEs actifs, un flux de données IP et un flux de contrôle RRC. Elle effectue ensuite des traitements sur les paquets et les envoie sous forme de PDUs (Protocol Data Unit) à la sous-couche directement inférieure [65].

Les interactions entre sous-couches se basent sur des canaux de communication pour le transfert des paquets. On distingue trois catégories de canaux pour un système LTE, les canaux logiques, physiques et de transports : Nous décrivons ci-après l'ensemble des canaux utilisés par l'interface radio du LTE, pour chacune de ces trois catégories.

– **les canaux physiques** : utilisés par la couche physique, ils fournissent le moyen de transmettre par radio les données des canaux de transport. Un canal physique correspond à un ensemble d'éléments de ressource temps-fréquence dans la sous-trame. De plus, il est associé à des caractéristiques physiques particulières, comme la séquence d'embrouillage, les schémas de codage et modulation et les schémas MIMO. La couche physique réserve pour la liaison downlink cinq canaux, PBCH, PDSCH, PMSCH, PDCCH et PHICH, quand à la voie montante, seulement trois canaux sont réservés, PRACH, PUSCH et PUCCH, ils sont définis comme suit :

- **PDSCH** (Physical Downlink Shared Channel) : il transporte les données usagées et la signalisation des couches hautes.

- **PDCCH** (Physical Downlink Control Channel) qui transporte les assignations d'ordonnement pour le lien montant.

- **CCCH** (Common Control Channel) est en usage pour la communication entre l'UE et l'E-UTRAN lorsque la connexion RRC. Ce canal est utilisé dans les premières phases de l'établissement de communication.

– **Les canaux de transport** : décrivent la raison et avec quelles caractéristiques les données sont transmis via l'interface radio, ils opèrent entre la couche MAC et la couche physique et ils sont distingués par le mode de transport des données sur l'interface radio. Les informations issues des canaux logiques sont transportées sur quatre canaux de transport (PCH, BCH, DL-SCH et MCH) en mode downlink et sur un seul canal de transport (UL-SCH) en mode uplink.

- **BCH** (Broadcast Channel) est associé au canal logique BCCH.

- **PCH** (Paging Channel) associé au BCCH.

- **DL-SCH** (Downlink Shared Channel) : utilisé pour transporter le contrôle d'utilisateur ou le trafic data.

- **MCH** (Multicast Channel) qui est utilisé pour le contrôle des informations de transport [3].

- **UL-SCH** (Uplink Shared Channel) : permet l'HARQ et l'adaptation de lien, l'allocation dynamique ou semi-persistante de ressources

– **Les canaux logiques** : opèrent entre les couches RLC et MAC et ils sont définis selon le type d'information qu'ils transportent. Un canal logique ne peut être porté que par un seul canal de transport, mais ce dernier peut transporter plusieurs canaux logiques. L'interface radio LTE comporte sept canaux logiques (PCCH, BCCH, CCCH, DCCH, DTCH, MCCH et MTCH) utilisés tous pour les transmissions downlink, alors que la liaison uplink n'utilise que trois canaux (CCCH, DCCH et DTCH).

- **BCCH** (Broadcast Control Channel) : utilisé pour diffuser l'information de contrôle sur la cellule.
- **PCCH** (Paging Control Channel) : permet la notification d'appel.
- **CCCH** (Common Control Channel) : permet la transmission de signalisation, quand elle ne peut être transmise via le canal dédié (DCCH)
- **MCCH** (Multicast Control Channel) : utilisé pour transmettre les informations dans le réseau à plusieurs terminaux.
- **DCCH** (Dedicated control Channel) : gère les informations de contrôle entre l'UE et le réseau.
- **DTCH** (Dedicated Traffic Channel) : supporte la transmission du trafic utilisateurs.
- **MTCH** (Multicast Traffic Channel) : supporte la transmission de trafic de données aux utilisateurs.

Les deux figures II.5 et II.6 décrivent l'association entre les canaux logiques, de transport et physiques, respectivement pour la voie descendante et la voie montante.

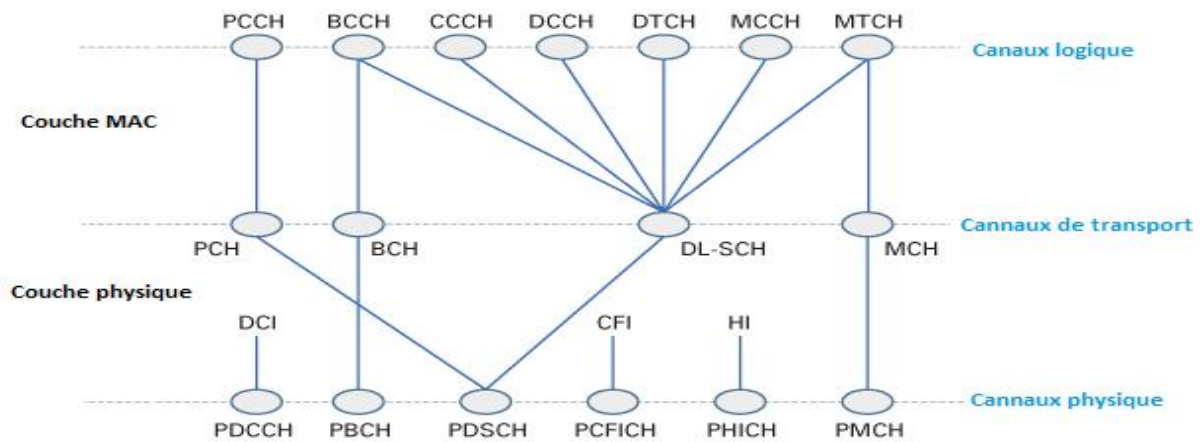


Figure II. 5: Les canaux de communication de l'interface radio LTE sur la voie descendante.

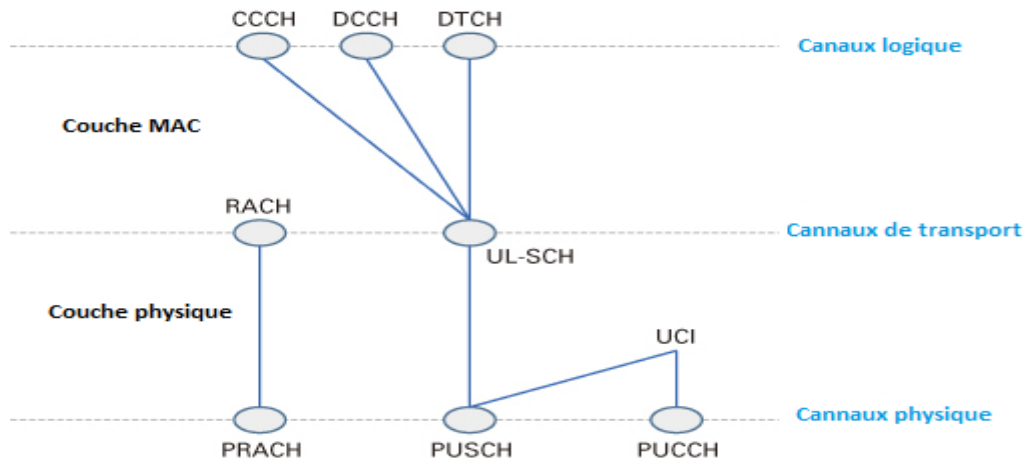


Figure II. 6: Les canaux de communication de l'interface radio LTE sur la voie montante.

2.1.4. Les informations de contrôle échangées sur l'interface radio LTE.

Les informations de contrôle échangées entre une station de base eNB et les UEs actifs peuvent être classifiées en quatre catégories, celles transmises en mode uplink, les informations transmises en mode downlink, les Indicateurs de contrôle de format et les indicateurs d'ARQ hybride [72].

- Informations de contrôle transmises en mode uplink

Pour permettre à l'eNB de mieux gérer l'ensemble des UEs actifs, ainsi que pour lui permettre d'adapter dynamiquement la transmission sur la liaison downlink, des informations de contrôle sont transmises périodiquement sur la liaison uplink de l'UE à l'eNB sous forme d'indicateurs de qualité de canal [38].

– **Indicateur de qualité de canal (CQI)** : il indique le taux de données maximal qu'un UE peut gérer avec un taux d'erreur par bloc (BLER) inférieur ou égal à 10%. C'est une valeur numérique, codée sur 4 bits, comprise entre 0 et 15. Cette valeur dépend principalement de la valeur du rapport signal sur interférence et bruit (SINR) mesurée sur le canal descendant au niveau de l'UE, elle est influencée aussi par le niveau de performance de ce dernier qui reflète la capacité de l'UE à traiter les données pour de faibles valeurs de SINR.

– **Indicateur de rang (RI)** : il a pour but, l'optimisation et la maximisation de la capacité du canal radio en sens descendant sur l'ensemble de la bande passante disponible, il indique le nombre maximal de signaux différents que peut recevoir simultanément un utilisateur en liaison descendante. Ce nombre dépend du nombre d'antenne utilisé par eNodeB et par secteur, ainsi, il est compris entre 1 et N (avec N : nombre d'antennes par secteur dans l'eNodeBs). L'UE calcule son RI correspondant au nombre d'antennes qui maximise son débit en liaison downlink.

– **Indicateur de matrice de précodage (PMI)** : il spécifie la matrice de précodage que l'eNB doit appliquée sur les flux de données avant de les transmettre, il est possible de maximiser le nombre de bits de données susceptible d'être reçu par l'UE via l'ensemble des antennes en choisissant judicieusement cette matrice. Ceci nécessite toutefois la connaissance de la qualité du canal pour chaque antenne en liaison downlink que l'UE peut identifier par le biais des mesures. S'il connaît les matrices de précodage admissibles, l'UE peut transmettre un rapport PMI à l'eNB en proposant une matrice de précodage bien appropriée.

– **Requêtes d'ordonnement (SR)** : elles sont déclenchées dans le cas où l'UE possède des données en attente de transmission sur le canal physique de contrôle montant (PUSCH).

– **Hybrid ARQ acknowledgements** : Ce sont les accusés de réception envoyés sur la liaison uplink en réponse aux transmissions envoyés par l'eNB à l'UE sur le canal downlink partagé (DL-SCH) [72].

- Informations de contrôle transmises en mode downlink

Pour permettre à l'eNB d'informer et de contrôler les UEs qui lui sont connectés, des informations de contrôle sont transmises de l'eNB à l'UE en les alertant avant l'envoi des données ou en envoyant des demandes d'adaptation des paramètres de transmission de l'UE. Ces informations sont :

- Commandes d’ordonnancements envoyées sur la liaison downlink : l’eNB peut alerter l’UE sur les futures transmissions sur le canal partagé en liaison downlink (PDSCH).
- Privilèges d’ordonnement en liaison uplink : l’eNB accorde à l’UE des privilèges de transmission sur la liaison uplink.
- Commandes de contrôle de la capacité de transmission en liaison uplink : l’eNB peut également régler la puissance avec laquelle les UEs émettent, par l’utilisation des commandes de contrôle de capacité de transmission.

Indicateur de contrôle de format

L’eNB envoie les indicateurs de contrôle de format sur la liaison downlink pour informer les UEs sur l’organisation des données et des informations de contrôle sur la liaison downlink.

Indicateur hybride ARQ

Ce sont les accusés de réception envoyés sur la liaison downlink en réponse aux transmissions envoyés par les UEs à l’eNB sur le canal ascendant partagé (UL-SCH).

2.2. Gestion des ressources radio (RRM)

Dans les réseaux cellulaires, le grand souci des opérateurs de télécommunication est d’utiliser efficacement la largeur de la bande disponible, car une meilleure exploitation des ressources radio permet de fournir des services à un plus grand nombre d’utilisateurs et par la suite permet de minimiser le coût d’exploitation de l’infrastructure via la réduction du nombre des nœuds dans le réseau à savoir les stations de base (eNodeB) [26]. Pour les utilisateurs, le besoin en nouveaux services avec une meilleure qualité (QoS) demeure essentiel. Afin de satisfaire les besoins des opérateurs tout en garantissant une diversité de services avec une meilleure qualité, un mécanisme de gestion doit être mis en œuvre, il s’agit d’une fonctionnalité clé de la station de base l’eNodeB, la gestion des ressources radio (RRM) est un ensemble de procédures visant à optimiser l’utilisation des ressources radio disponibles dans la cellule tout en satisfaisant les exigences de QoS avec une capacité maximale en termes de débit et une amélioration d’équité entre les UEs qui cherchent à acquérir des ressources radio [36].

La RRM fait appel à quatre mécanismes de base, il s’agit du contrôle d’admission qui permet de garantir la continuité des services fournis tout en accueillant des nouvelles demandes de connexions, le contrôle de puissance quand à lui est un élément essentiel qui permet d’élargir la durée de vie des batteries via un meilleur contrôle de puissance des signaux en émission ainsi qu’en réception, pour permettre une mobilité aux utilisateurs tout en garantissant la continuité de service, le mécanisme de contrôle du handover est mis en œuvre, et finalement une autre fonctionnalité clé du mécanisme de gestion de ressources radio (RRM) qui fait l’objet de notre travail de recherche est celle de l’ordonnement de paquets PS (Packets scheduling), PS est l’entité responsable d’allocation et du partage des ressources radio entre les utilisateurs actifs dans un même secteur d’une cellule [60]. La prise de décision concernant les blocs de ressource affectés à chaque UE est faite suite à l’exécution, au niveau de la sous couche MAC de l’eNB, d’un algorithme de scheduling [71]. Les ressources radio

peuvent être partagées selon plusieurs critères à savoir la durée d'attente des UEs, la qualité du canal, le débit atteint par chaque UE ou encore l'équité entre les UEs.

2.2.1. Contrôle d'admission :

Le contrôle d'admission est l'un des mécanismes les plus importants du fait qu'il prend en charge la régulation du fonctionnement du réseau d'une manière à fournir un service garanti tout en accueillant de nouvelles connexions d'une manière optimale. La décision d'admettre ou de refuser un nouvel utilisateur dépend de plusieurs critères à savoir, les interférences causées par cet utilisateur qui s'ajouteraient aux connexions existantes, la disponibilité des ressources, l'impact sur la qualité de services (QoS) en cours, la priorité des utilisateurs, etc [60].

Le contrôle d'admission pourrait être amené à bloquer une nouvelle connexion si elle est jugée susceptible de dégrader la qualité des connexions en cours ou si la qualité de connexion demandée ne pourra pas être satisfaite. Ainsi que pour prévenir la congestion des connexions existantes. En effet, si un grand nombre d'utilisateurs partagent les mêmes ressources disponibles, l'interface radio sera chargée d'une manière à ne plus garantir une qualité de service aux utilisateurs, ce qui provoquera une augmentation du taux de blocage, la chose qui est plus critique pour les utilisateurs, En fait vaut mieux pour un utilisateur de ne plus établir une nouvelle connexion que de perdre une connexion déjà établie.

Dans les réseaux de première et seconde génération, le CA a été développé pour des environnements mono service. Dans les réseaux de quatrième génération et vue la diversité des services à savoir les services multimédia tels que la vidéoconférence, les jeux en ligne, la télévision sur Internet...Etc, de nouveaux schémas ont été pris en charge par le CA pour permettre différents profils de QoS. Les algorithmes de contrôle d'admission ne sont pas spécifiés par le groupe 3GPP, ils sont spécifiques aux fournisseurs.

2.2.2. L'adaptation de lien et l'ordonnancement :

L'adaptation de lien constitue l'ensemble des techniques utilisées afin d'adapter les paramètres de transmission aux changements instantanés de lien radio, pour ce faire, une sélection adaptative du schéma de codage et de modulation MCS à attribuer à l'UE est mise en œuvre. L'opération d'allocation de ressources est effectuée par le scheduler en se basant sur des mesures effectuées par la couche physique. Dans le cas d'un ordonnancement dynamique, L'adaptation de lien s'effectue à chaque sous-trame ou l'UE est servie. Par contre, pour un ordonnancement semi-persistant, elle reste fixe sur l'ensemble des sous-trames.

Les informations sur la qualité du canal sont calculées en voie montante par l'eNodeB à partir des signaux de références SRS émis par l'UE. Cependant, l'eNodeB ne peut pas mesurer la qualité du canal expérimentée par l'UE en voie descendante, c'est à l'UE donc d'effectuer cette mesure et de la retourner à l'eNodeB sous forme de rapport d'Indicateur de qualité CQI. Ces indicateurs dépendent de la puissance utile reçue, du niveau d'interférence sur les PRB considérés et du récepteur de l'UE.

L'ordonnancement quand à lui joue un rôle primordial dans le processus d'allocation des ressources radio aux utilisateurs au niveau de la cellule. Les algorithmes d'ordonnancement et l'adaptation de lien exigent la valeur de CQI comme information déterminante de la qualité du canal. De plus les algorithmes de l'adaptation de lien ont besoin des décisions de l'ordonnancement pour connaître les

utilisateurs qui sont prévus et les blocs de ressources (PRB) qui seront assignés à eux. Les résultats de ces deux algorithmes sont envoyés aux UEs via le canal PDCCH [62].

a- Adaptation de lien :

Afin d'adapter les paramètres de transmission aux changements instantanés du lien radio, plusieurs techniques sont utilisées à savoir, le contrôle de puissance (PC), modulation et codage adaptative (AMC) et bande de transmission adaptative (ATB) [79].

→ Contrôle de puissance :

Le contrôle de puissance est un mécanisme de base des réseaux radio mobiles visant à améliorer la capacité totale du système tout en assurant une qualité de service acceptable par les utilisateurs. Il consiste à choisir la puissance d'émission la plus convenable pour atteindre des performances acceptables au niveau de la liaison radio tout en minimisant les interférences intercellulaires /intra-cellulaires ainsi que de prolonger la durée de vie de la batterie au niveau du terminal mobile. Plusieurs outils et algorithmes sont mis en œuvre pour contrôler la puissance de transmission [65] [74].

→ Types d'algorithmes de contrôle de puissance :

Les algorithmes de contrôle de puissance peuvent être classifiés en plusieurs catégories à savoir, le contrôle de puissance en boucle fermée et celui en boucle ouverte.

- Contrôle de puissance en boucle ouverte :

Le contrôle de puissance en boucle ouverte permet de déterminer le niveau de puissance du signal à transmettre avant de rentrer en communication avec la station de base. Ce type de contrôle décrit la capacité d'UE à régler sa puissance de transmission en se basant sur les mesures contenues dans le signal de référence RSRP (Reference signal Receive Power) envoyé par l'eNodeB afin de calculer la valeur de perte de trajet PL (Path Loss) et sur les paramètres reçus de la part d'eNodeB qui sont diffusés au niveau des informations systèmes (SIB2) [29].

Le calcul de la valeur de la perte de trajet PL estimée au niveau d'UE est basé sur la puissance des symboles de référence reçus (RS). La figure II.7 montre le schéma synoptique des étapes impliquées dans le contrôle de la puissance de transmission en boucle ouverte.

- Contrôle de puissance en boucle fermée :

Ce type de contrôle est caractérisé par la capacité d'UE d'ajuster la puissance d'émission de la liaison montante conformément à la valeur de correction de la boucle fermée également connu sous la commande TPC (Transmit power control). La commande TPC est émise par l'eNB vers l'UE en se basant sur la valeur de SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) reçue et celle cible. Le récepteur au niveau de l'eNB estime la valeur SINR du signal reçu, et la compare avec la valeur de SINR cible souhaitée. Si la valeur de SINR reçue est inférieure à la valeur de SINR cible, alors une commande

TPC est envoyée à l'UE pour lui demander d'augmenter la puissance de l'émetteur. Sinon, une commande TPC est envoyée pour lui demander de diminuer la puissance de l'émetteur [74].

La figure II.8 montre les étapes impliquées dans le contrôle de puissance de transmission en boucle fermée :

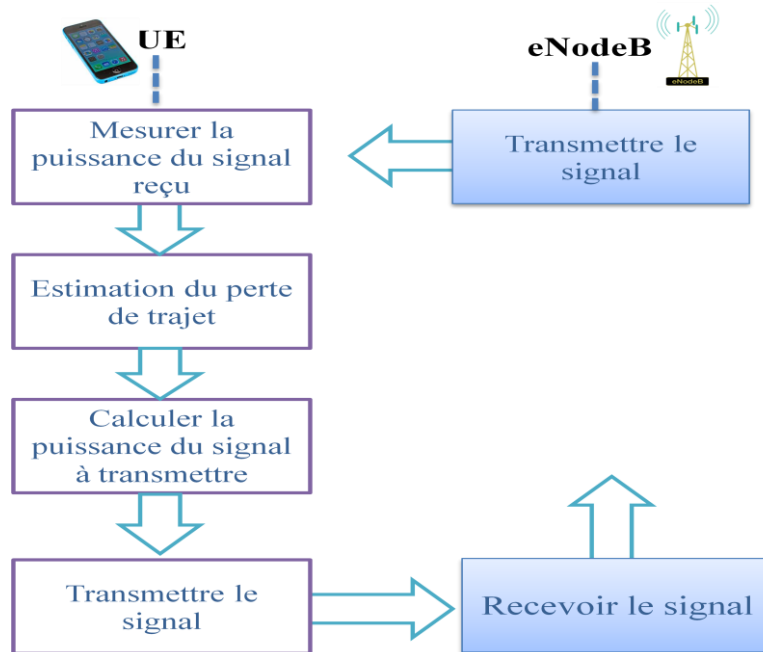


Figure II. 7: Le schéma de synoptique du contrôle de puissance en boucle ouverte.

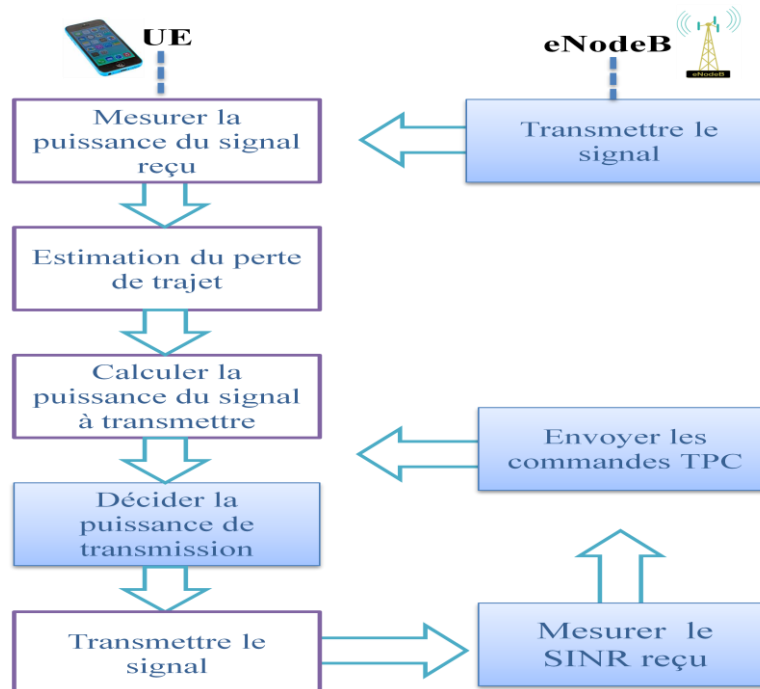


Figure II. 8 : Le schéma de synoptique du contrôle de puissance en boucle Fermée.

b- Modulation et codage adaptative (AMC) :

Après avoir spécifié les blocs de ressources à partager entre les différents utilisateurs, une désignation du schéma de codage et de modulation demeure essentielle, en fait, le processus d'adaptation de lien détermine le schéma MCS à être utilisé pour les transmissions, en sens montant qu'en sens descendant, d'une manière à maximiser le débit tout en gardant une probabilité acceptable d'erreur cible. Les algorithmes AMC peuvent sélectionner le schéma de modulation et le taux de codage de la manière suivante [32]:

- Schéma de codage : si la valeur de SINR est suffisamment grande, alors un schéma de modulation d'ordre supérieure comme le 64QAM peut être sélectionné avec une grande efficacité spectrale ce qui permet d'offrir un grand débit. Sinon un schéma de modulation d'ordre inférieure comme QPSK qui est le plus robuste contre les erreurs de transmission mais qui a une faible efficacité spectrale peut être sélectionné.
- Taux de codage : pour un schéma de modulation donné, un taux de codage approprié peut être choisi prenant en considération la qualité du canal. Pour un canal d'une bonne qualité, un grand taux de codage peut être choisi.

Donc le choix de ces deux paramètres de transmissions est basé sur la valeur CQI à l'entrée de l'algorithme.

2.2.3. Équilibrage de charge :

L'un des problèmes majeurs que peut avoir un réseau cellulaire est celui du déséquilibre de charge, il se produit grâce à la distribution non uniforme des utilisateurs dans la cellule ce qui affecte les performances du réseau en terme d'efficacité spectrale, En effet le déséquilibre de charge ne permet pas une meilleure utilisation des ressources radio ce qui provoque une congestion rapide du réseau. Pour remédier à ce problème plusieurs techniques basées sur l'ajustement des paramètres de contrôle du réseau ont été définis [65].

Le principe de base du mécanisme d'équilibrage de charge se base sur le transfert des utilisateurs depuis la cellule la plus chargée vers celle la moins chargée. Lorsque la cellule serveuse devient plus chargée que celle voisine, et si l'utilisateur est en mode connecté, une demande de Handover doit être déclenchée par la station de base permettant le transfert d'utilisateurs depuis sa propre cellule vers celle voisine, si l'utilisateur est en mode veille, une demande de ré sélection de cellule suffit. Au niveau du MME, une procédure de RRC-CONNECTION-RELEASE permettant la libération de l'ancienne connexion doit être déclenchée pour permettre le déplacement d'utilisateur vers une autre MME voisine si la MME serveuse est surchargée.

L'équilibrage de charge peut être fait en deux façons : manuelle et automatique.

- Manuelle : le principe de cette démarche consiste en une intervention manuelle visant la reconfiguration des paramètres de contrôle d'un certain nombre de procédure à savoir celle du

Handover pour le cas des utilisateurs en mode connecté ou celle de ré-sélection dans le cas des utilisateurs en mode veille. L'adoption de cette démarche malgré sa simplicité connaît des limites en termes d'efficacité spectrale ainsi qu'en termes de nombre de techniciens qu'il faut mettre en œuvre pour la reconfiguration chaque fois qu'une surcharge est découverte dans le réseau.

➤ Automatique : contrairement à la démarche manuelle, la démarche automatique permet d'atteindre une meilleure efficacité spectrale au niveau du réseau, et ce grâce à l'implémentation au niveau des stations de base, d'un algorithme qui va surveiller à tout instant l'équilibrage de charge dans le réseau puis va prendre un ensemble de décisions de transfert des utilisateurs vers les autres cellules voisines en cas d'une surcharge au niveau de la cellule serveuse. Les différents algorithmes ne sont pas spécifiés par le groupe 3GPP, son développement reste spécifique aux constructeurs. Ils visent à minimiser le nombre des procédures de Handover et de ré-sélection pour permettre d'atteindre un niveau d'équilibrage de charge optimal. Cette démarche demeure efficace sauf qu'un grand nombre d'informations de signalisation nécessite d'être véhiculé entre les différentes cellules à travers l'interface X2.

2.2.4. La gestion d'interférences.

Dans les réseaux cellulaires, des interférences mutuelles peuvent se produire entre la cellule dans laquelle opère un UE et celles voisines qui réutilisent typiquement les mêmes ressources fréquentielles pour véhiculer le trafic ainsi que la signalisation des utilisateurs. Ces interférences affectent la qualité de la communication radio. En effet, un utilisateur se trouvant éloigné de sa station de base eNodeB serveuse, au voisinage de sa cellule sera soumis à deux mécanismes affectant sa qualité de canal à savoir l'affaiblissement de la puissance du signal reçu au niveau de l'UE due à l'augmentation des pertes de propagation, et l'augmentation de la puissance de signal d'interférence intercellulaire du fait que l'utilisateur se rapproche des stations de base voisines. De ce fait, un utilisateur se trouvant proche de l'eNodeB aura un débit beaucoup plus meilleur que celui d'un UE se situant au bordure de la cellule, ce qui dégrade la qualité de service en terme d'équité entre utilisateurs, l'amélioration de cette équité pourra être réalisée mais au détriment de la capacité de la cellule en allouant plus de ressources aux utilisateurs éloignés de l'eNodeB [75].

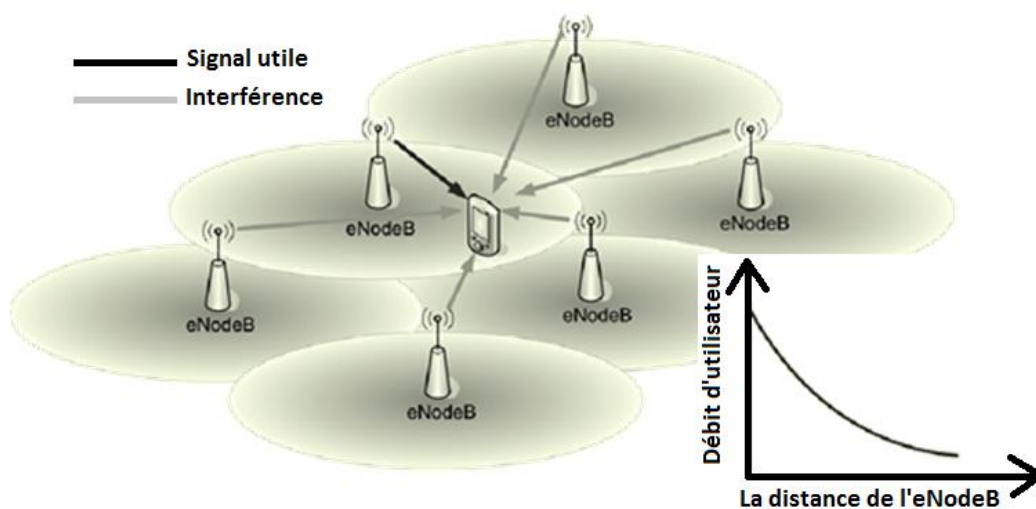


Figure II. 9: L'influence de la position de l'UE dans la cellule sur son débit.

En général, il existe plusieurs types d'interférence, à savoir :

- l'interférence entre symboles : en LTE, cette interférence n'est présente que dans la voie montante en raison de l'utilisation de l'OFDM sur la voie descendante, comme nous le verrons par la suite ;
- l'interférence intracellulaire, créée par la transmission d'autres UE dans la cellule ; en LTE, la seule source d'interférence intracellulaire est la transmission MIMO multi-utilisateurs, où plusieurs UE sont servis sur les mêmes ressources temps-fréquence en étant séparés dans l'espace ;
- l'interférence intercellulaire, créée par les cellules voisines.
- l'interférence de canal adjacent, créée par une transmission sur une fréquence adjacente à celle de la porteuse assignée à l'UE ;
- l'interférence entre couches spatiales, créée par une transmission MIMO mono-utilisateur, ce qui consiste à transmettre plusieurs flux d'information (ou couches spatiales) indépendants vers un même UE, sur les mêmes ressources temps-fréquence.

Dans le réseau LTE, ces interférences peuvent être évitées ou réduites à travers l'usage des procédures plus sophistiquées à savoir, l'insertion du préfixe cyclique qui permet de réduire les interférences entre symboles l'ISI (Inter Symbol Interference), l'introduction de la technique de coordination d'interférences entre cellules ICIC (inter-cell interference coordination) qui assurent une restriction et une sélection efficace de l'usage des ressources radio. En plus des techniques d'annulation d'interférences entre cellules qui impliquent le décodage ou la démodulation de l'information désirée, qui sont encore utilisées avec les estimations de canal pour éliminer ou réduire l'interférence du signal reçu. Deux techniques d'annulation d'interférence sont largement utilisées dans les réseaux cellulaires, il s'agit de l'annulation successive d'interférences (Successive interference cancellation SIC) et l'annulation d'interférence parallèle (Parallel interference cancellation PIC) [75].

- Préfixe cyclique (CP)

Comme le montre la figure II.10, le problème majeur que connaît les réseaux cellulaires est celui du multi trajet qui provoque des interférences inter symbole, pour remédier à ce problème l'insertion d'un préfixe cyclique demeure essentielle, un préfixe cyclique CP est une copie de la première section d'un symbole, ajoutée à la fin du symbole OFDM comme l'indique la figure II.11. Pour pouvoir éliminer complètement les interférences entre symbole, une condition clé doit être satisfaite, il s'agit de la taille du CP qui doit être plus grande que celle du délai maximal de propagation (τ_{\max}) soit comme montré dans la figure $T_g \geq \tau_{\max}$ [34] [36] [38].

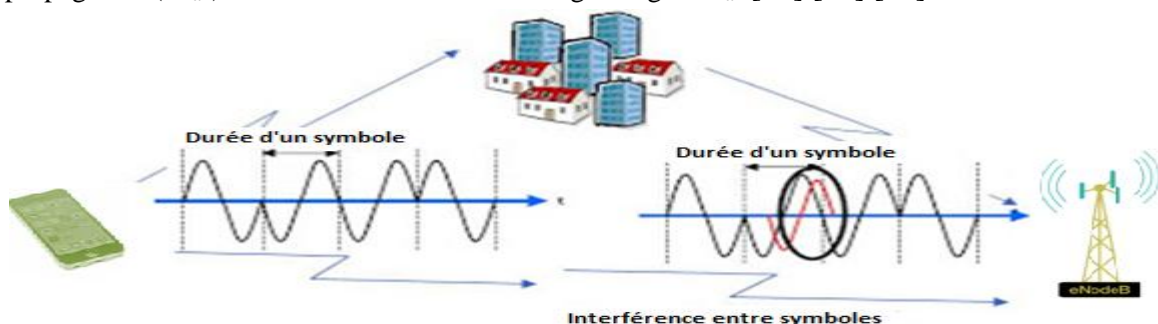


Figure II. 10: Les interférences entre symboles dues au multi-trajet.

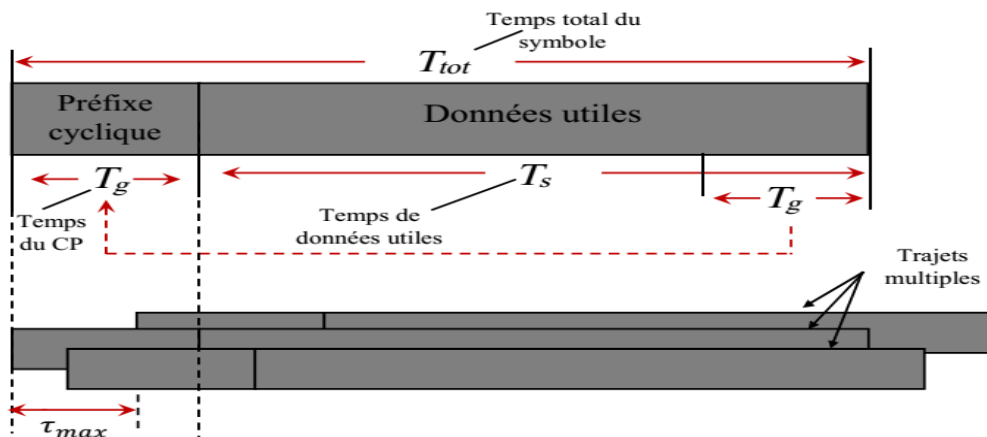


Figure II. 11: Principe d'insertion du Préfixe cyclique.

Notons qu'après son insertion, l'espacement entre les sous-porteuses est toujours $\Delta f = 1/T_s$, alors que la durée des symboles OFDM est $T_{tot} = T_s + T_g$, ce qui entraîne la perte d'orthogonalité entre les sous-porteuses. La suppression de l'intervalle de garde permet de restituer l'orthogonalité entre les sous-porteuses. De plus, comme l'intervalle de garde est la recopie des échantillons de fin de symbole OFDM, cet intervalle peut être exploité pour la synchronisation temporelle du signal OFDM.

L'utilisation d'un préfixe cyclique permet de supprimer les interférences inter-symboles alors que l'orthogonalité des sous porteuses permet de supprimer les interférences inter-canaux, ce qui permet de considérer que les interférences intracellulaires sont presque nulles en LTE. Parmi les techniques clés utilisées pour éliminer les interférences intercellulaires sont celle de la planification de fréquences pour les réseaux de deuxième génération et celle des codes pour les réseaux de troisième génération, cette technique n'est pas applicable dans le réseau LTE grâce à l'adoption de la technique de réutilisation de fréquence, pour remédier à ce problème, LTE adopte deux catégories des techniques pour réduire l'effet des interférences, il s'agit de [75]:

- **Techniques d'annulation des interférences** : cette technique est basée sur des techniques de traitement de signal qui visent, à la réception de signal, d'éliminer les interférences estimées depuis la composante du signal utile.

- **Technique d'évitement des interférences** : cette technique est basée sur une fonctionnalité clé, elle s'agit de la coordination entre cellule ICIC (Inter-Cell Interference Coordination), cette technique permet d'éliminer totalement les interférences en évitant l'utilisation des mêmes ressources dans deux cellules voisines ou de les minimiser si les mêmes ressources sont utilisées pour des cellules voisines. Les interférences intercellulaires peuvent se produire dans les deux sens montant et descendant :

- **Interférences en sens montant** : c'est au niveau de la station de base, l'eNodeB, que ce type d'interférence a eu lieu, cette interférence est causée par les blocs de ressources utilisés en sens montant et qui sont envoyés depuis un utilisateur se situant au bordure d'une cellule voisine et qui n'appartient pas à la même eNodeB.

- **Interférences en sens descendant** : de même que les interférences causées par les utilisateurs au bordure de la cellule au niveau de la station de base, les stations de base voisines peuvent aussi causer des interférences sur les blocs de ressources utilisés en sens descendant au niveau d'une station mobile située à l'extrémité d'une cellule.



Exemple des interférences en sens montant

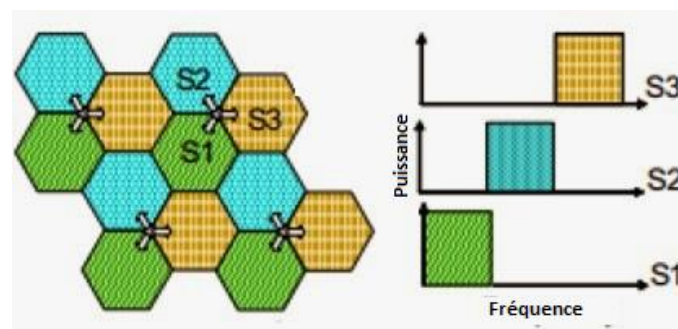
Exemple des interférences en sens descendant

Figure II. 12: Exemple d'interférences en sens montant et descendant.

Les stratégies ICIC consistent à déterminer les ressources qu'il faut allouer à chaque cellule et celles allouées à chaque utilisateur au niveau de ces cellules, deux stratégies ICIC existent, statique et dynamique :

- **ICIC statique** : au cours de cette stratégie, une configuration initiale est effectuée durant le processus de planification radio, consiste à allouer à chaque cellule les ressources estimées optimales. Des réajustements peuvent être réalisés à long terme durant l'exploitation du réseau. ICIC statique repose essentiellement sur le concept de réutilisation de fréquences à savoir, le Hard Frequency Reuse, (HFR), le Soft Frequency Reuse (SFR) et le Fractional Frequency Reuse (PFR) [75].

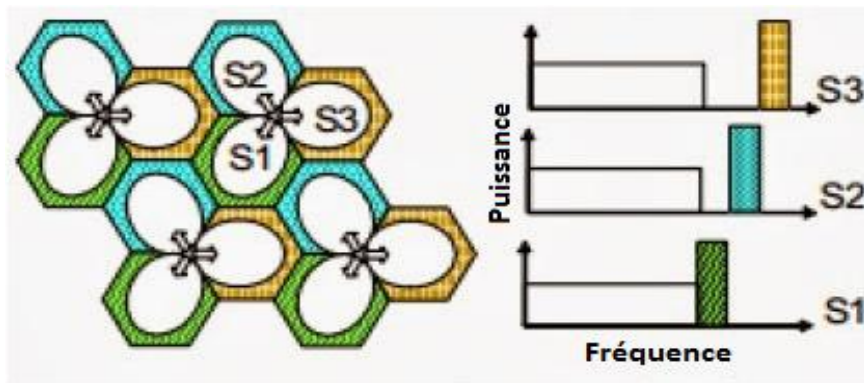
o **Hard frequency reuse (HFR)** : Le principe de base de cette technique consiste à diviser la totalité de la bande en des groupes de sous porteuses d'une manière à éviter la réutilisation du même groupe de sous porteuses par des cellules voisines. Cette méthode est simple à mettre en place, mais elle a montré ces limites en termes d'efficacité spectrale [76].



Le schéma de réutilisation HFR

Figure II. 13: Le schéma de réutilisation HFR (Hard Frequency Reuse).

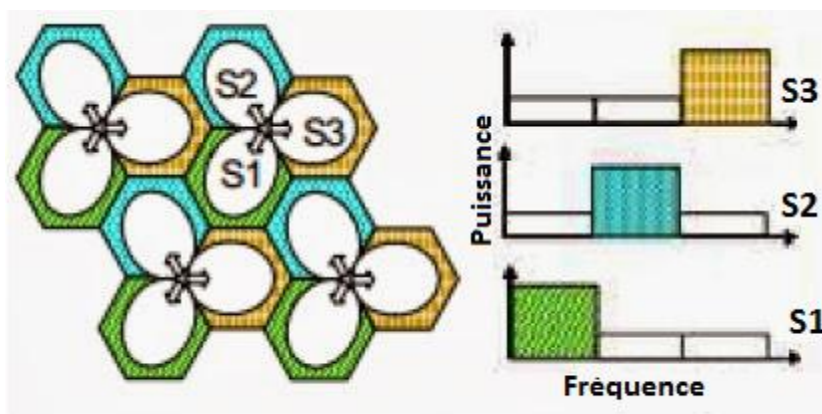
o **Fractional frequency reuse (FFR)**: cette technique permet de diviser la bande de fréquences, en tenant compte de la puissance ainsi que du facteur de réutilisation, en deux grande parties, la première est caractérisée par une puissance bas et un facteur de réutilisation égal à 1, ce qui explique que cette parties sera désignée aux utilisateurs se situant proches de l'eNodeB, quand à la deuxième partie elle est caractérisée par un niveau de puissance plus haut permettant de servir les utilisateurs se situant au niveau des bordures des cellules, les ressources dans cette parties sont allouées suivant le schéma de réutilisation HFR. La FFR est généralement utile pour l'ICIC en sens montant [78].



Le schéma de réutilisation FFR

Figure II. 14: Le schéma de réutilisation FFR (Fractional Frequency Reuse).

o **Soft frequency reuse (SFR):** Cette technique est utile pour l'ICIC en sens descendant, Elle consiste à utiliser toute la bande par toutes les cellules en utilisant des schémas de puissance différents de telle sorte que les utilisateurs existant au niveau des bordures de la cellule auront bénéficié des ressources avec un niveau de puissance plus grand, alors que les utilisateurs existant au centre des cellules auront les blocs de ressources avec une faible puissance [77].



le schéma de réutilisation SFR

Figure II. 15: Le schéma de réutilisation SFR (Soft Frequency Reuse).

- **ICIC dynamique :** Parmi les inconvénients majeurs de l'ICIC statique, on trouve la non prise en compte des variations de charge au niveau du réseau grâce à une configuration initial dès la phase de planification, ce qui induit à une diminution des performances du réseau. Pour remédier à ce problème LTE adopte une coordination dynamique entre les différentes cellules voisines. Cette coordination est basée sur un échange d'un ensemble d'informations à travers l'interface X2 entre les différentes cellules voisines à savoir les informations HII (High Interference Information), OI (Overload Indicator) et RNTP (Relative Narrowband Transmit Power) [75].

- **High Interference Information (HII) :** Ce type d'information est utilisé pour les interférences en sens montant. Les informations HII servent à informer les cellules voisines à propos des blocs de

ressources à haute puissance qui seront allouées aux utilisateurs se situant aux bordures de la cellule serveuse. Et ce pour que les cellules voisines utilisent ces blocs de ressources pour une allocation interne de la cellule d'une manière à éviter les interférences aux bordures des cellules. Ce mécanisme est déclaré proactif du fait qu'il anticipe l'opération d'allocation des ressources radio.

- Overload Indicator (OI) : est un mécanisme réactif consistant à envoyer le niveau des interférences que connaissent les blocs de ressources de la cellule en sens montant vers les cellules voisines. Les cellules voisines qui reçoivent l'OI peuvent changer leurs stratégies d'allocation via l'ajustement des paramètres de contrôle de puissance ou par un autre assignement de blocs de ressources. L'OI indique trois niveaux d'interférences, faible, moyen et élevé.

- Relative Narrowband Transmit Power (RNTP) est utilisé pour améliorer la situation des interférences en sens descendant. Son fonctionnement est similaire à celui du HII tel qu'il indique si la puissance de transmission, déterminée pour chaque bloc de ressource, dépasse un seuil ou non. A la réception de cette information les cellules voisines peuvent prendre certaines décisions afin d'améliorer la situation des interférences à la bordure de la cellule. Par exemple ils peuvent éviter d'allouer les blocs de ressources qui sont transmises par la cellule serveuse avec une puissance qui dépasse un certain seuil.

3. L'ordonnement en mode Downlink

3.1. Scheduling en mode downlink dans l'interface radio LTE

3.1.1. Processus de scheduling en mode downlink.

Le scheduler est un élément de base du processus d'ordonnement, se situant au niveau de la sous-couche MAC de l'eNB, il est responsable de l'allocation des canaux de communication sur l'interface radio LTE pour les deux sens montant et descendant [41]. Pour se faire, il se base sur les informations de contrôle issues des échanges entre l'eNB et l'UE telles que l'indicateur de qualité (CQI) et le signal de référence (SR). Deux types d'ordonnement existent, celui des canaux partagés PDSCH et PUSCH qui sont responsable de la transmission des données du plan usager et de la majorité des messages de signalisation du plan de contrôle, et celui du canal de contrôle PDCCH qui informe les utilisateurs de la décision d'allocation des canaux partagés PDSCH et PUSCH, les ressources radio ne seront plus utilisés si l'utilisateur n'est pas informé sur la décision d'ordonnement.

Etant donné que nous focalisons particulièrement à l'allocation des ressources radio dans la voie descendante, nous allons nous intéresser dans la suite de ce chapitre au processus de scheduling du canal partagé PDSCH. PDSCH peut contenir les données du plan usager comme il peut transmettre des informations de signalisations à savoir ceux des couches L2 et L3, les informations système envoyées en mode diffusion, ainsi que les messages de paging envoyés par le canal PCH.

Pour mieux gérer les ressources radio, une présélection des utilisateurs susceptible d'être ordonnancés

demeure essentielle. En effet, les utilisateurs ayant des conditions particulières doivent être éliminés du processus d'ordonnancement, à savoir ceux ayant des creux de mesures qui se déconnecte temporairement de l'eNodeB servante afin de mesurer la qualité radio d'une eNodeB voisine, les utilisateurs qui souffre d'une réception discontinue à cause de la réduction de la puissance de l'interface radio due à la gestion d'autonomie de la batterie, ainsi les UEs non synchronisés sont incapables de transmettre sur la liaison montante des données qui nécessitent une synchronisation temporelle effectuée suite à la réception d'acquittements HARQ. Une fois la sélection préliminaire des UEs est achevée, le scheduler exécute aussitôt un algorithme de scheduling pour l'ordonnancement des UEs [63].

3.1.2. Principe d'allocation des ressources

Les performances d'un ordonnanceur sont mesurées par sa capacité à acheminer une grande quantité d'informations vers les différentes destinations tout en garantissant une meilleure qualité de service. Avant de proposer un nouvel ordonnanceur, nos travaux ont débuté par une réflexion approfondie sur les objectifs à viser dans l'allocation de ressources LTE et sur la manière optimale de vérifier dans quelle mesure ils sont éventuellement atteints. Ce chapitre décrit le principe de fonctionnement des ordonnanceurs ainsi que les critères d'évaluation des performances afin d'avoir une classification juste et efficace des ordonnanceurs modernes [85].

En OFDMA, l'ordonnancement de niveau MAC (Medium Access Control) est inséparable de la couche physique. Ces problématiques sont souvent décrites sous l'expression « cross layer ». Dorénavant, en plus de l'état du trafic (considéré dans les techniques classiques), la sélection des usagers doit tenir compte des conditions radio pour assurer un bon débit (bonne utilisation des ressources). Les décisions doivent néanmoins tenir compte de l'équité [71].

Un usager pourrait être longtemps privé de transmissions si l'on ne considérait que les conditions radio. L'ordonnancement est l'un des plus considérables mécanismes de gestion de ressources dans les réseaux LTE, il autorise de déterminer à quel usager il convient de transmettre dans un intervalle de temps donné. C'est un élément déterminant dans la conception puisqu'il répartit l'allocation du canal entre les usagers et ainsi, généralement, détermine le comportement global du système. La figure II.16 présente le principe de fonctionnement de l'ordonnanceur radio.

A chaque TTI, l'ordonnanceur calcule une métrique pour chaque flux de données pouvant être ordonné. Nous désignons dans la suite de l'étude par $W_{i,j}$ la métrique assignée au flux de données i pour le $j^{\text{ème}}$ bloc de ressource (RB). Les algorithmes d'ordonnancement diffèrent dans la manière avec laquelle cette métrique se calcule. L'ordonnanceur veille à assigner chaque $j^{\text{ème}}$ RB au flux de données qui a la plus grande $W_{i,j}$. Pour calculer la métrique, les algorithmes d'ordonnancement ont souvent besoin de connaître le débit moyen de transmission des données R_i de l' $i^{\text{ème}}$ flux de données, et le débit instantané disponible de l'UE de destination pour le $j^{\text{ème}}$ RB. Cette information est importante vu que la métrique va prendre en compte la performance garantie dans le passé pour chaque flux de données dans le but d'avoir une certaine répartition équitable [85].

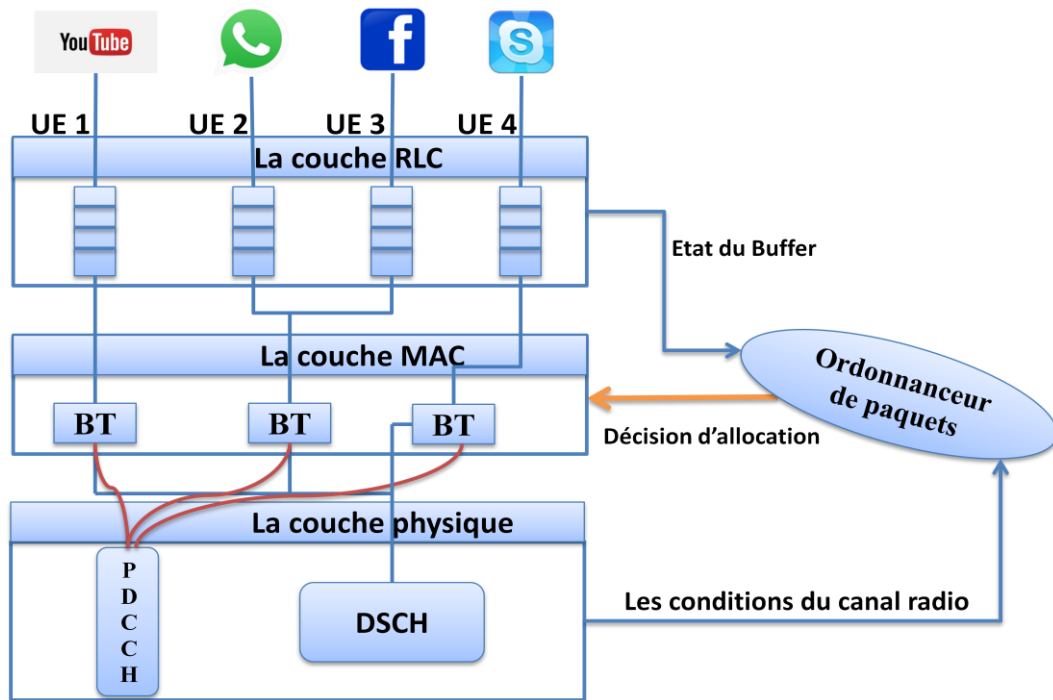


Figure II. 16: Le principe de fonctionnement d'un ordonnanceur.

La métrique calculée au niveau du BR détermine la priorité de transmission de chaque utilisateur sur cette BR. La procédure d'ordonnement peut être résumée par les étapes suivantes [86] :

- 1) Chaque utilisateur calcule la valeur du SNR (Signal to Noise Ratio) ce qui est équivalent à une valeur de CQI à partir du signal de référence envoyé par l'eNodeB, puis il envoie cette valeur en retour vers l'eNodeB.
- 2) les informations du (CQI) seront utilisées par la suite pour aider l'eNodeB à la prise des décisions d'affectation des ressources et au rempli de la ressource block en question.
- 3) En se basant sur la valeur du CQI, Le module AMC sélectionne le meilleur MCS supporté par l'utilisateur qui sera servis.
- 4) Les informations sur l'utilisateur choisit en cours (RBs et MCS) sont envoyés au utilisateur correspondant sur le canal de contrôle PDCCH.
- 5) Chaque UE reçoit une information sur la charge utile de PDCCH accède à la charge utile de PDSCH appropriée.

Chaque utilisateur envoie la valeur du CQI correspondante périodiquement à la station de base, cette valeur permet à l'eNodeB d'avoir une idée sur la qualité du canal, ainsi une adaptation de liaison peut être effectuée. Une grande valeur de CQI indique une meilleure condition canal. Chaque valeur de CQI est codée sur 5 bit envoyés par chaque équipement actif dans le réseau vers l'eNodeB dans des intervalles réguliers. Le tableau suivant présente les 15 valeurs de CQIs et leurs correspondants en termes de types de modulation et d'efficacité spectrale [59].

Tableau II. 2: La correspondance entre les valeurs CQI et les types de modulation.

| MCS | CQI | Modulation | Efficacité Spectrale | MCS | CQI | Modulation | Efficacité Spectrale |
|-----|-----|------------|----------------------|-----|-----|------------|----------------------|
| 0 | 2 | QPSK | 0.2344 | 16 | | 16 QAM | 2.5684 |
| 1 | | | 0.3057 | 17 | | 64 QAM | 2.5684 |
| 2 | 3 | | 0.3770 | 18 | 10 | | 2.7305 |
| 3 | | | 0.4893 | 19 | | | 3.0264 |
| 4 | 4 | | 0.6016 | 20 | 11 | | 3.3223 |
| 5 | | | 0.7393 | 21 | | | 3.6123 |
| 6 | 5 | | 0.8770 | 22 | 12 | | 3.9023 |
| 7 | | | 1.0264 | 23 | | | 4.2128 |
| 8 | 6 | | 1.1758 | 24 | 13 | | 4.5234 |
| 9 | | | 1.3262 | 25 | | | 4.8193 |
| 10 | | 16 QAM | 1.3262 | 26 | 14 | | |
| 11 | 7 | | 1.4766 | 27 | | | 5.3349 |
| 12 | | | 1.6953 | 28 | 15 | | 5.5547 |
| 13 | 8 | | 1.9141 | 29 | | QPSK | Réservé |
| 14 | | | 2.1602 | 30 | | 16 QAM | |
| 15 | 9 | | 2.4063 | 31 | | 64 QAM | |

3.1.3. Critères de classification des algorithmes d'ordonnement

Dans la partie suivante, nous allons rappeler les paramètres et les métriques utilisées dans l'élaboration des algorithmes d'ordonnement.

- Notion de métrique.

La classification des algorithmes d'ordonnement sera basée sur un certain nombre de critères qui utilisent des métriques pour performer des décisions d'allocation de ressources radio. L'allocation des ressources radio en termes de RBs aux UEs actifs est généralement basée sur le principe suivant [60]:

Notons $W_{i,k}$ la métrique d'ordonnement de l'UE d'indice i (UE_i) correspondant au k^{eme} RB (RB_k). Ce dernier est alloué à l' i^{eme} utilisateur si la métrique de ce dernier est la plus grande :

$$W_{i,k} = \max_{1 \leq j \leq N} W_{j,k} \quad (2.1)$$

Avec N est le nombre d'UEs 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*). Dans la suite nous allons énumérer succinctement les principaux critères selon lesquels nous allons établir une classification des algorithmes d'ordonnement. Ces critères visent généralement une optimisation particulière de l'ordonnement aussi bien mono-paramètre que multi-paramètres.

Dans le cas d'une optimisation multi-paramètres, il s'agit de maximiser (ou minimiser) une fonction utilité sous une ou des contraintes données.

- Équité.

L'équité est un critère qui doit être pris en compte pour garantir un seuil minimum de performance pour les utilisateurs, en particulier ceux pénalisés par de mauvaises conditions de canal. Dans ce cas, l'ordonnanceur ne se préoccupe ni de la façon dont les ressources sont utilisées par les UEs, ni de l'état du canal de transmission.

- Efficacité spectrale.

L'utilisation efficace des ressources radio est l'une des principaux objectifs à atteindre. Plusieurs types de mesures de performance peuvent être envisagés, citons à titre d'exemple [65]:

- Maximisation du nombre d'utilisateurs desservis dans un intervalle de temps donné.
- Maximisation de l'efficacité spectrale (exprimée en bit/s/Hz) en servant toujours des utilisateurs qui bénéficient des meilleures conditions canal.
- Un des indicateurs les plus utilisés de l'efficacité est le goodput de l'utilisateur.

- Qualité de service.

La qualité de service (QOS) est un facteur important pour les systèmes de 4^{eme} génération dans la mesure où, s'il est considéré comme un critère d'ordonnement, il peut contribuer à respecter les contraintes et les exigences des flux. Ces derniers peuvent avoir des contraintes diverses qui nécessitent à adopter un ordonnancement différencié [59].

3.2. Stratégies d'ordonnement dans les systèmes LTE en mode downlink

L'ordonnanceur est l'un des mécanismes les plus importants dans la procédure de gestion des ressources radio, il vise à optimiser l'utilisation de la ressource globale disponible, c'est à lui de décider à quel utilisateur il convient à transmettre dans un intervalle de temps donné en tenant compte des conditions de propagation radio, du volume de données à transmettre et des contraintes de qualité de service à respecter. Pour ce faire, il doit maximiser le débit global du système via l'amélioration d'efficacité spectrale tout en garantissant une meilleure qualité de service, la chose qui nécessite d'assurer une équité et une différenciation de service entre les différents utilisateurs de la cellule [63].

L'organisme 3GPP n'a pas standardisé les algorithmes utilisés pour l'allocation des ressources radio, cependant, les opérateurs peuvent choisir différents critères de QOS selon les stratégies adoptées dans la planification des ressources. Pour la suite de ce travail, on s'intéresse au fonctionnement de l'ordonnanceur dans le sens descendant mais ceci reste semblable au sens montant.

Face à la multitude de familles d'ordonneurs existants, il n'est pas envisageable de faire un état de l'art exhaustif. Cependant, la plupart d'entre eux sont dérivés d'une poignée d'algorithmes qui sont répartis en trois grandes catégories : les algorithmes simples et anciens dérivés du filaire que l'on dénommera par le terme « classiques », les algorithmes « équitables » plus complexes mais introduisent plus d'équité et les algorithmes « opportunistes » qui surclassent les deux premières catégories [86].

3.2.1. Les algorithmes classiques

Certains algorithmes d'ordonnancement utilisés dans les réseaux sans fil proviennent directement du réseau filaire. Notamment, le Round Robin et l'allocation aléatoire qui sont deux ordonnanceurs très simples, facilement implémentés et qui servent régulièrement d'étalon pour mesurer le gain des performances des ordonnanceurs modernes.

3.2.1.1. Le Round Robin.

Le Round Robin (RR) a été considéré comme étant l'algorithme d'ordonnancement le plus utilisé dans les réseaux sans fil, Cette technique d'ordonnancement est particulièrement simple à mettre en œuvre et donc largement implémentée, elle consiste à allouer la même quantité d'unités de ressources radio entre les utilisateurs. Chacun d'eux est ainsi sûr d'accéder régulièrement au canal, ce qui conduit souvent à mal penser que cette stratégie d'allocation est équitable. En effet, comme montré dans la figure II.17, même si la même unité de ressource est allouée aux utilisateurs, cela ne garantit pas qu'ils auront le même débit, et ce grâce à l'affaiblissement de propagation due à la distance parcourue par le signal pour arriver au destinataire, ainsi à cause des différentes contraintes de qualité de service [89]. Par exemple un utilisateur bénéficiant d'une meilleure condition canal sera capable de transmettre avec une puissance plus grande et alors avec un débit plus grand que celui d'un autre ayant de mauvaise condition canal [90]. RR est basé sur la métrique suivante :

$$W_{ij} = T - T_i \quad (2.2)$$

T étant le temps actuel

T_i le temps de la dernière fois dont cet utilisateur a été servi.

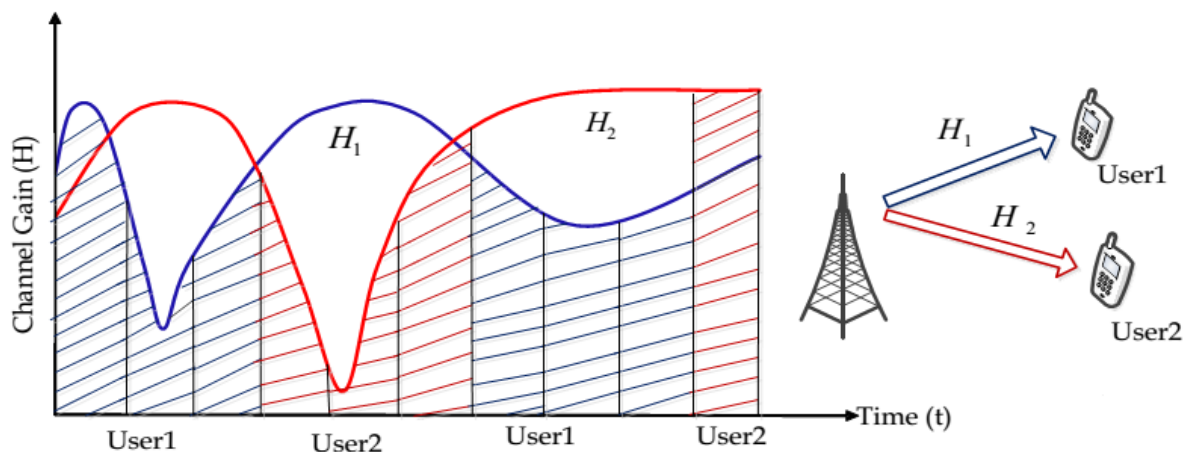


Figure II. 17: Principe de fonctionnement du Round Robin.

En effet, le Round Robin ne tient pas compte de la position, des capacités et des besoins de chaque utilisateur. Il alloue aveuglément la même quantité d'unités de ressource à chacun d'eux sans aucune possibilité de différencier entre les services et donc d'assurer une quelconque qualité de service. Les utilisateurs se voient donc attribuer un débit qui n'a aucune relation avec leurs besoins. Ainsi pour le cas de deux utilisateurs, l'un utilisant une application temps réel qui nécessite un débit intéressant se voit alors attribuer la même quantité de ressource qu'un autre utilisant des applications de type Best Effort qui ne nécessitent pas un grand débit. Dans ce cas le premier va être pénalisé par contre le deuxième bénéficiera d'un débit qui est au-delà de ces besoins [91].

3.2.1.2. L'allocation aléatoire (RA)

Une autre technique d'allocation de ressources extrêmement répandue est l'Allocation Aléatoire. Il s'agit tout simplement d'allouer la ressource radio de façon aléatoire entre les utilisateurs. Tous les utilisateurs ayant statistiquement la même chance d'accéder au médium, L'utilisateur déjà servis ne le sera plus qu'après avoir répondu à toutes les demandes des autres utilisateurs qui recevront sur le moyen/long terme un même nombre d'unités de ressource quels que soient leurs besoins. Allouer ainsi la ressource conduit à la distribuer d'une manière homogène et revient à procurer les mêmes performances réseau que le Round Robin. Cette technique d'ordonnancement est particulièrement simple à mettre en œuvre et donc largement implémentée sauf qu'elle ne tient pas compte de la qualité de service [94]. Ainsi comme montré dans la figure II.18, les UEs se trouvant proche de la station de base seront favorisés et auront plus de débit que ceux situés plus loin.

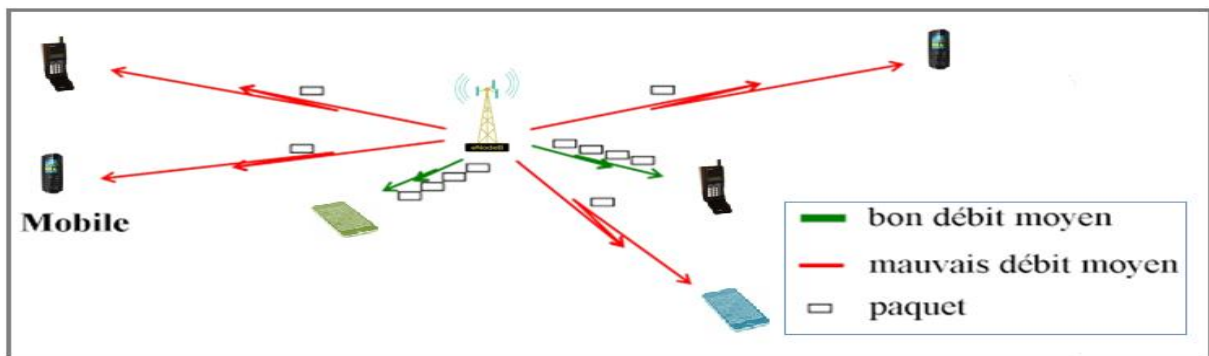


Figure II. 18: Le débit en fonction de la distance des utilisateurs depuis la station de base.

3.2.2. Les algorithmes équitables.

A l'essor des nouvelles technologies et du nombre toujours plus grand d'utilisateurs, une meilleure gestion de ressource radio devient aujourd'hui comme un objectif crucial. Cela rend les algorithmes classiques obsolètes. De nombreux travaux ont été effectués dans la conception d'ordonnanceurs plus efficaces tentant de corriger les défauts des précédents ordonnanceurs. Plus complexes, ils visent à apporter une amélioration en termes d'équité tout en permettant une différenciation de service.

3.2.2.1. Le Fair Queuing (FQ)

L'allocation des ressources selon l'algorithme Fair Queuing consiste à allouer la même quantité d'information calculée pour chaque lien par l'équation [93] :

$$d = D / K \quad (2.3)$$

Avec : D est le débit possible pour le lien.

: K est le nombre d'utilisateurs.

En termes d'équité, le Fair Queuing est plus équitable que le Round Robin puisqu'il assure le même débit à chaque utilisateur. L'équité de niveau 2 est donc atteinte ici. Cependant, les besoins des utilisateurs restent ignorés, mais les utilisateurs nécessitant plus de débit restent toujours pénalisés face aux autres. Quand à la différenciation de service qui est un réel support de QOS qui reste inexistant.

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

Le principe de l'algorithme **Max-Min Fair (MMF)** consiste à partager les unités de ressources UR entre les utilisateurs de telle sorte que le débit global offert à chaque utilisateur augmente progressivement et de manière identique. Une fois l'utilisateur se voit allouer les ressources demandées, aucune autre UR ne lui est attribué et l'exécution de l'algorithme se poursuit avec les autres utilisateurs. L'algorithme s'arrête ensuite par épuisement de ressources ou lorsque les utilisateurs sont tous servis [95].

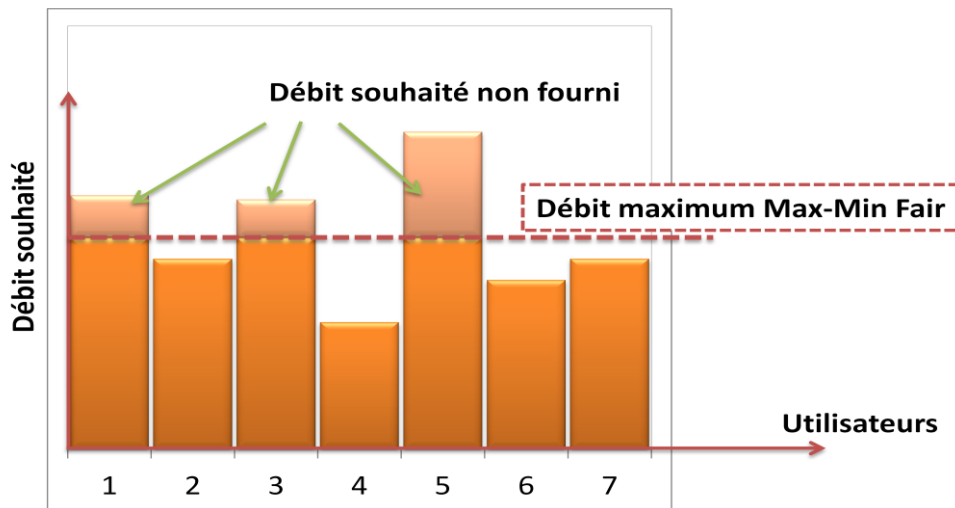


Figure II. 19: Principe d'allocation pour l'algorithme Max-Min Fair.

La figure II.19 illustre un exemple d'allocation pour l'algorithme Max-Min Fair. En effet, pour ce type d'allocation, les utilisateurs à faibles besoins sont largement avantagés car leur débit souhaité est pratiquement toujours atteignable, ils sont souvent très satisfaits. Par contre, les autres qui demandent plus de ressources sont pénalisés [96].

A nos jours, là où les applications multimédia sont de plus en plus rentables et demande une meilleure qualité de service, Le Max-Min Fair n'est pas envisageable, cependant il ne permet pas une utilisation efficace de la bande passante, En effet, n'accorder à un utilisateur qu'une partie du débit demandé conduit forcément à une impossibilité d'accéder correctement au service. Compte tenu de ce qui précède, nous ne retiendrons pas dans cette thèse cet ordonnanceur comme l'un des étalons malgré la réputation dont il jouit.

3.2.2.3. Le Weighted Fair Queuing (WFQ)

Le Weighted Fair Queuing (WFQ) est une amélioration de l'algorithme Fair Queuing (FQ). Cet algorithme utilise une autre alternative de déploiement des priorités qui permet de privilégier certains flux en leur accordant davantage de bande passante, il s'agit d'une approximation de l'algorithme Weighted Fair Queuing (WFQ). Où un poids w_i est associé à l' $i^{\text{ème}}$ UE en utilisant la métrique de l'ordonnanceur Round Robin [95], la nouvelle métrique est donnée comme suit :

$$W_{\text{WFK } i,k} = w_i \times W_{\text{RR } i,k} \quad (2.4)$$

Avec $W_{\text{RR } i,k}$ est la métrique RR de l'UE i .

Selon cet algorithme, l'accès aux ressources dépend de deux facteurs, celui du poids w_i qui est compris entre 0 et 1, plus ce facteur est grand, plus le flux est prioritaire. Et celui exprimant l'intervalle de

temps compris entre l'instant actuel et celui de la dernière allocation de ressources, ce facteur augmente proportionnellement avec le temps [97].

3.2.3. Algorithmes opportunistes

Les algorithmes classiques ne tirent pas une meilleure part de la bande passante et offrent un débit global du système très éloigné des limites théoriques. Ainsi, les algorithmes équitables ne tiennent pas compte des conditions canal qui séparent la station de base des utilisateurs. Cependant, de nombreux travaux ont donc cherché à corriger ces problèmes crucial pour les réseaux actuels et futurs, pour cela de nouveaux ordonnanceurs particulièrement efficaces sont ainsi apparus : les ordonnanceurs opportunistes, ces algorithmes développés, prennent en considération l'état de canal de transmission sans fil, ils sont beaucoup plus efficaces parce qu'ils permettent de bien adapter les besoins aux conditions de propagation [98].

3.2.3.1. Maximum Signal-to-Noise Ratio (MaxSNR).

Egalement connu sous le nom de Maximum Carrier to Interférence ratio (MaxC/I). Avec le MaxSNR, la priorité est donnée à l'utilisateur actif qui a le plus grand rapport signal sur bruit (signal-to noise ratio (SNR)). Si on désigne par $W_{k,n}$ le débit maximale possible qui peut être supporté pour l'utilisateur k sur la sous-porteuse n durant un intervalle de temps, l'allocation MaxSNR consiste alors à allouer l'unité de ressource à l'utilisateur J qui a le plus grand $W_{k,n}$ avec :

$$J = \operatorname{argmax} (W_{k,n}), k = 1, \dots, K, \quad (2.5)$$

Avec : K est le nombre total d'utilisateurs actifs. L'allocation fournie par l'algorithme *MaxSNR* est illustrée par la figure ci dessous.

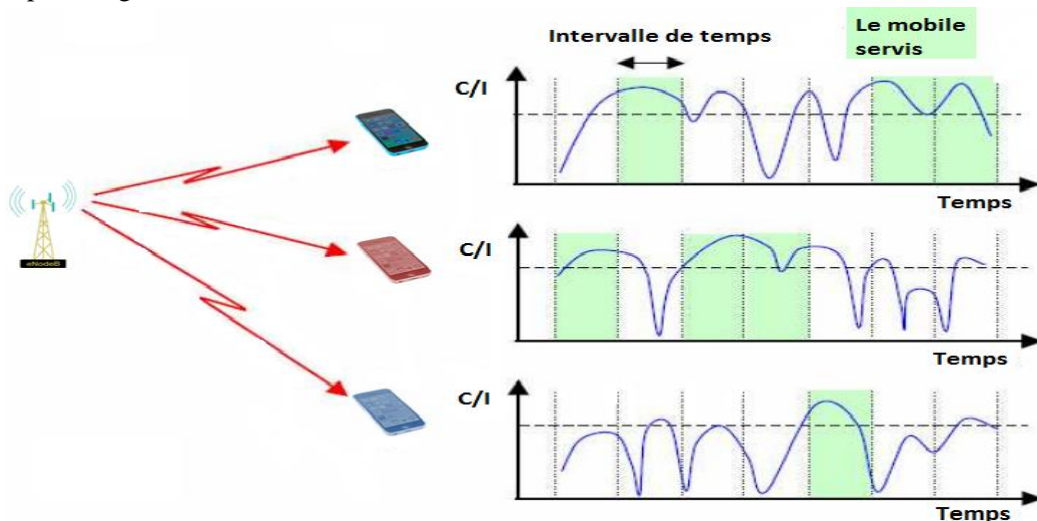


Figure II. 20: Le principe de maximisation du débit via l'allocation MaxSNR

L'ordonnancement MaxSNR permet d'offrir le meilleur débit pour chaque utilisateur. Et ce grâce à l'adaptation dynamique de la modulation, il permet ainsi de faire un usage extrêmement efficace de la ressource radio et de se rapprocher de la limite de capacité de *Shannon* ce qui lui permet d'accroître très fortement le débit du système. Cependant, les utilisateurs se trouvant plus éloignés de la station de

base seront punis à cause de la haute atténuation de propagation qu'ils subissent et donc auront un faible SNR qui ne leur permet pas d'être sélectionnés [98].

3.2.3.2. L'ordonnanceur PF (Proportional Fair).

L'ordonnement PF est reconnu par la communauté scientifique par sa simplicité et ses très bonnes performances dans le réseau 3G. Pour partager les ressources radio, il prend en compte la qualité du canal expérimentée ainsi que le débit d'utilisateur obtenu dans le passé [99].

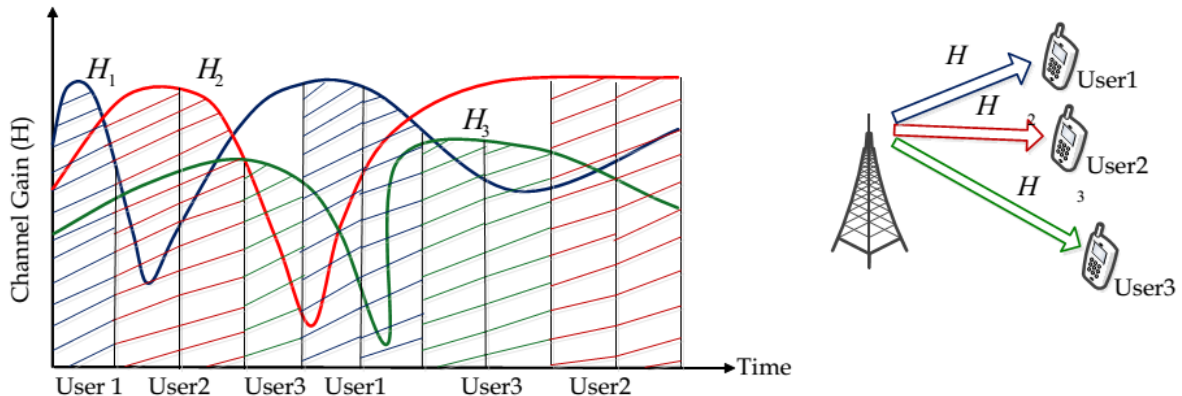


Figure II. 21: Le principe de fonctionnement de l'algorithme PF.

Le principe de fonctionnement du Proportional Fair est exprimé dans la figure II.21, il consiste à allouer un intervalle du temps de la sous-porteuse n à l'utilisateur j bénéficiant d'une meilleure condition de transmission. L'objectif du PF est d'améliorer le débit total du réseau tout en assurant une certaine équité entre les différents flux de données [100]. Pour cet ordonnanceur, la métrique est définie comme le rapport du débit instantané disponible $r_{i,j}$ par le débit moyen de données dans le passé \bar{R}_l :

$$w_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_l} \quad (2.6)$$

Où :

- $r_{i,j}$ est calculé par le module AMC en prenant en compte le feedback CQI qu'envoie l'UE hébergeant l' $i^{\text{ème}}$ flux au $j^{\text{ème}}$ sous-canal.
- \bar{R}_l est le débit moyen estimé de données.

3.2.3.3. L'ordonnanceur M-LWDF (Modified Largest Weighted Delay First).

M-LWDF prend en considération un grand nombre d'utilisateurs en temps réel tout en considérant des flux de données avec des exigences de qualité de service différentes. Pour se faire, MLWDF considère un délai de paquets seuil τ_i , et une probabilité δ_i comme étant la probabilité maximale pour que le délai $D_{HOL,i}$ (Head Of Line Packet Delay) du premier paquet à transmettre dans la queue dépasse le délai seuil. Dans le cadre de l'allocation MLWDF, les paquets appartenant à un flux de données temps réel sont supprimés de la queue MAC s'ils ne sont pas transmis avant l'expiration de leur deadline [101]. Cette opération est nécessaire pour éviter le problème de gaspillage de la bande passante. Cette implémentation n'existe pas pour le PF [102].

Pour prioriser les flux de données temps réel avec le plus grand délai $D_{HOL,i}$ et la meilleure condition canal, la métrique est calculée comme suit [103] :

$$w_{i,j} = \alpha_i D_{HOL,i} \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (2.7)$$

Où $r_{i,j}$ et \bar{R}_i ont la même signification que dans pour PF et α_i est donnée par l'équation :

$$\alpha_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} \quad (2.8)$$

Cet algorithme s'adresse essentiellement au flux temps réel qui impose le respect de délais, il fournit de bons résultats dans ce contexte, par contre pour les flux non temps réel, ce n'est pas vraiment un bon choix étant donné que le délai n'est pas un paramètre important.

3.2.3.4. L'ordonnanceur EXP-PF :

Cet algorithme est conçu pour accroître la priorité des flux en temps réel (RT) vis-à-vis les applications non temps réel (NRT), EXP-PF affecte une priorité supérieure au trafic temps réel tout en gardant un minimum de garantie pour celui non temps réel. Pour les flux de données temps réel la métrique est calculée en utilisant l'équation [103] :

$$w_{i,j} = \exp\left(\frac{\alpha_i D_{HOL,i} - X}{1 + \sqrt{X}}\right) \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (2.9)$$

Où les symboles $\alpha_i, r_{i,j}, D_{HOL,i}$ et \bar{R}_i ont la même signification qu'avant et X est défini comme suit :

$$X = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=\&}^{N_{rt}} \alpha_i D_{HOL,i} \quad (2.10)$$

Avec :

- N_{rt} est le nombre de flux de données temps réel actifs dans le sens descendant. Et pour les flux de données non temps réel, la métrique considérée est celle du simple PF.

Conclusion :

Les algorithmes classiques sont considérés comme étant des standards d'ordonnancement, et cela à cause de leur simplicité de mise en œuvre. Cependant, leurs incapacités à prendre en considération les particularités des flux des utilisateurs conduit à une incapacité à satisfaire les besoins des utilisateurs d'une manière équitable, ainsi l'assurance d'un minimum de Qualité de service demeure impossible. Ces ordonnanceurs ne sont plus conçus pour les environnements sans fil.

Même si les ordonnanceurs équitables ne font qu'uniformiser les débits des utilisateurs, l'équité entre mobiles est améliorée par rapport aux ordonnanceurs classiques. Cependant, leur défaut commun et non négligeable est qu'ils ne tiennent pas en considération les états des liens qui séparent la station de base des utilisateurs. En plus, des URs sont régulièrement allouées à des utilisateurs qui souffrent de mauvaises conditions canal ce qui conduit à des pertes globales de débit du système.

Les ordonnanceurs opportunistes permettent de bien adapter les besoins des utilisateurs aux conditions de propagation, ils sont considérés plus efficaces grâce à leur possibilité d'utiliser la modulation adaptative ainsi que celle de maximisation de débit. Les ordonnanceurs opportunistes sont toujours utilisés dans le contexte multiutilisateur.

Le tableau II.3 tente de résumer le niveau de performance des ordonnanceurs les plus connus en termes de maximisation du débit, d'apport d'équité, de différenciation de service et de simplicité d'implémentation. Le premier critère est essentiel pour accepter les utilisateurs dans le réseau avec succès. Le deuxième et le troisième sont nécessaires pour garantir une qualité de service. Le quatrième est quant à lui un élément clef du succès des ordonnanceurs.

Tableau II. 3: Comparaison de performances des algorithmes d'ordonnancements.

| Ordonnanceur | Réf | Débit | Conditions de canal | Equité | Simplicité | Différenciation de service |
|--------------|-------|-------|---------------------|--------|------------|----------------------------|
| RR | [91] | 0 | 0 | 1 | 2 | NON |
| RA | [94] | 0 | 0 | 1 | 2 | NON |
| FQ | [93] | 0 | 0 | 2 | 2 | NON |
| MMF | [95] | 0 | 0 | 2 | 1 | NON |
| WFQ | [97] | 0 | 2 | 2 | 1 | OUI |
| Max-SNR | [98] | 2 | 2 | 0 | 1 | NON |
| PF | [99] | 2 | 2 | 1 | 1 | NON |
| M-LWDF | [100] | 2 | 2 | 1 | 1 | OUI |
| EXPPF | [103] | 2 | 2 | 1 | 1 | OUI |

Les étalons sélectionnés

CHAPITRE III : Evaluation des performances des algorithmes opportunistes.

Introduction :

Le plus grand souci des opérateurs de télécommunication est de garantir les meilleures performances exigées par les clients, pour cela la Qualité de Service doit être au minimum au niveau des exigences des utilisateurs, et ce pour leur entière satisfaction. Le principal objectif d'un opérateur est d'attirer le plus grand nombre d'abonnés pour pouvoir augmenter son chiffre d'affaire, pour cela chaque opérateur mobile devra se focaliser sur les demandes de ces clients ainsi pour augmenter son taux de popularité, il doit se préoccuper sur l'amélioration de son réseau (couverture, la bande passante,...) et des paramètres de la Qualité de Service (débit, latence, Taux de paquet perdus, etc.).

L'optimisation des ressources radio du réseau et la garantie des performances aux applications sont des buts primordiaux de la Qualité de Service. En fait cette dernière permet d'offrir aux utilisateurs des débits et des temps de réponse différenciés par application suivant les protocoles mis en œuvre au niveau de la couche réseau. Elle permet ainsi aux fournisseurs de services de s'engager formellement auprès de leurs clients sur les caractéristiques de transport des données applicatives sur leurs infrastructures IP.

Dans ce chapitre nous allons étudier le comportement de trois algorithmes d'ordonnement les plus connues par leurs performances dans les réseaux 3G : le PF, le MLWDF et l'EXP/PF [98]. Et par la suite nous allons choisir quel type d'ordonneur on doit utiliser pour chaque type de flux pour obtenir les performances attendus du réseau LTE, et cela pour différents cas de scénario.

Dans un premier lieu, nous allons présenter l'outil de simulation. Ensuite, nous allons définir les critères de performances adoptés. Dans un deuxième lieu, nous allons définir les scénarios réalisés et décrire les résultats des simulations obtenus.

1. Les critères d'évaluation et choix du simulateur.

1.1. Les critères d'évaluation.

Dans la dernière décennie et grâce à la découverte des téléphones intelligents, Les clients sont devenus assez exigeants, ils recommandent la qualité de service ainsi que de nouveaux aspects. Pour répondre à leurs exigences et dans le cadre de la normalisation du standard LTE, l'organisme 3GPP a défini les exigences que la LTE doit satisfaire. En synthèse, l'objectif majeur du LTE est d'améliorer le support des services de données via une capacité accrue, une augmentation des débits et une réduction de la latence. En plus le 3GPP a défini des prérequis fonctionnels tels que la flexibilité

spectrale et la mobilité. Pour les applications multimédia telles que la voix-IP ou la vidéo à la demande, en plus des applications classiques, un niveau minimal de qualité de service est nécessaire en termes de bande passante, de délai ou du taux de paquets perdues.etc [60].

a- Le débit utile (Throughput).

C'est le débit total en réception, la mesure de ce débit est l'une des opérations importantes qui permette d'identifier le taux de réussite moyen de transfert des messages sur un canal de communication. Sa valeur est calculée pour un intervalle de temps, en divisant la quantité totale d'information reçue pendant cet intervalle, par la durée de l'intervalle en question. La formule générale pour le calcul du débit utile est :

$$\text{Débit utile} = \frac{N_p * T_p}{\tau} \quad (3.1)$$

Avec :

N_p : est le nombre de paquet reçus pendant l'intervalle de temps τ .

T_p : est la taille du paquet.

τ : est la durée de l'intervalle de temps.

b- La perte de paquets

L'amélioration d'estimation du taux de paquets perdues (PLR) est une question cruciale, car sa valeur a un grand effet sur les performances du réseau, surtout lorsqu'il s'agit du trafic temps réel comme les flux Voix sur IP et vidéo. La perte de paquets correspond aux octets perdus lors de la transmission des paquets. Elle s'exprime en taux de perte. Plutôt rare, Elle correspond au nombre de paquet de données qui n'ont pas étaient reçus par la destination lors d'une communication. Cela peut être causé par plusieurs facteurs, la plupart du temps due à un encombrement du réseau, comme il peut être causé par une expiration du temps d'attente des paquets. Le taux des paquets perdus est calculé comme suit :

$$\text{Taux des paquets perdus} = \frac{N_{PP}}{N_{PE}} * 100 \quad (3.2)$$

Avec :

N_{PP} : est le nombre de paquets perdus.

N_{PE} : est le nombre de paquets envoyés.

c- La latence.

Le délai a une influence très importante sur les performances du réseau. La latence est le temps de transit d'un paquet à partir de l'eNodeB jusqu'à atteindre le UE. C'est en fonction de la nature des applications présentes dans un réseau que le degré d'exigence change, il sera faible s'il s'agit d'une messagerie électronique ou de fichiers échangés, comme il sera fort s'il s'agit de données temps réel à savoir la voix et la vidéo. La latence dépend du temps de propagation, du temps de traitement et de la taille des paquets.

$$Délai = T_r - T_s \tag{3.3}$$

Avec :

T_r : est le temps réception du paquet par l'UE.

T_s : est le temps d'émission du même paquet par la source.

d- L'efficacité spectrale

L'efficacité spectrale est définie comme étant le débit maximal de l'utilisateur divisée par la largeur de bande du canal. C'est le nombre de bits reçus correctement normalisé par la ressource consommée en temps et en bande passante [12]. Ainsi, l'efficacité spectrale est fortement liée à la consommation des ressources et du taux d'erreur des paquets.

$$Efficacité\ Spectrale = \frac{D_{max}}{W_c} \tag{3.4}$$

Avec : D_{max} le débit maximal de l'utilisateur et W_c la largeur de bande du canal.

Le tableau suivant illustre les critères de performances du réseau LTE [49].

Tableau III. 1: Les critères de performances du réseau LTE, IMT-advanced et LTE-advanced.

| | | LTE | IMT-advanced | LTE-advanced |
|------------------------------|-----------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Débits crêtes maximums | DL | 300Mb/s | | 1Gb/s |
| | UL | 75Mb/s | | 500Mb/s |
| Bandes de fréquence | | 1,4 à 20MHz | → 40MHz | → 100MHz |
| Latence | données | 10ms | 10ms | 10ms (RTT) |
| | session | 100ms | 100ms | 50ms |
| Efficacité spectrale DL / UL | Max | 5,0 / 2,5 b/s/Hz | 15 / 6,75 b/s/Hz | 30 / 15 b/s/Hz |
| | Moyen | 1,8 / 0,8 b/s/Hz | 2,2 / 1,4 b/s/Hz | 2,6 / 2,0 b/s/Hz |
| | En limite | 0,04 / 0,02 b/s/Hz | 0,06 / 0,03 b/s/Hz | 0,009 / 0,07 b/s/Hz |

1.2. Choix du simulateur.

La problématique abordée dans ce mémoire étant l'évaluation des performances des réseaux 4G, et en particulier l'amélioration de la QoS sur le réseau LTE pour les flux voix et vidéo. Pour se faire, il est coûteux de déployer un banc d'essai complet contenant tous les nœuds du réseau LTE (eNodeB, Antennes, PDN Gateway, VLR.etc.) pour valider et vérifier un protocole de réseau ou un algorithme spécifique. C'est pour cela que l'utilisation des simulateurs de réseaux devienne une nécessité. Les simulateurs du réseau offrent beaucoup d'économie, de temps et d'argent pour l'accomplissement des simulations et sont également utilisés pour tester les nouveaux protocoles ou pour modifier des protocoles déjà existants d'une manière contrôlée et productive.

L'étude des performances des systèmes de communications au niveau des réseaux représente une tâche complexe ou des outils de simulation spécialisés doivent être utilisés. Dans notre cas on s'intéresse aux algorithmes d'ordonnancement adoptés par la technologie LTE, donc une prise en charge du model LTE est d'une importance primordiale pour le choix de notre simulateur. Nous présenterons une étude comparative entre les simulateurs les plus utilisés. Le but de cette comparaison est de déterminer quel outil de simulation nous permet mieux de tester, d'analyser et d'évaluer les algorithmes d'ordonnancement déployés dans le réseau LTE.

a- Simulateurs existants :

Un simulateur de réseau doit être composé d'un large éventail de technologies et de protocoles réseaux qui lui permettront la construction et la simulation des réseaux selon des scénarios que l'utilisateur décide. En général, il existe plusieurs simulateurs réseaux, nous allons présenter par la suite quelques un, tel que :

- OPNET

OPNET (Optimum Network Performance) est un outil de modélisation et de simulation de réseaux s'adressant au différent public tel que les entreprises, les opérateurs et la recherche, très puissant et très complet. Basé sur une interface graphique intuitive, son utilisation et sa prise en main est relativement aisée. OPNET fournit en standard une liste impressionnante d'implémentations de routeurs, de stations de base, de switches, ...etc [80].

On peut donc construire une simulation de réseaux sous OPNET en utilisant principalement deux méthodes :

- En utilisant les nœuds préprogrammés fournis par la librairie de OPNET.

- En commençant depuis le début et en définissant soi-même un modèle de lien, des modèles de processus décrivant des routeurs et des hôtes...

La deuxième méthode est plus complexe que la première, et nécessite de bonnes connaissances en matière de programmation et de réseaux. Pour tester un nouvel algorithme on doit l'implémenter directement dans un nœud de la bibliothèque d'OPNET : ceci permet de faire des tests dans des conditions très proches de la réalité, Dans la mesure où OPNET fournit les codes source des nœuds proposés dans la librairie, cette opération paraît envisageable. Parmi ses avantages, OPNET permet de concevoir et d'Étudier des réseaux de communications, des nouvelles technologies, des protocoles et des applications avec facilité et Evolutivité. Il est utilisé spécialement par les entreprises des technologies les plus performantes pour accélérer et améliorer leurs procédés de recherches et de développements. Mais, les versions qui sont compatibles avec la LTE méritent une licence.

- Matlab

MATLAB et son environnement interactif est un langage de haut niveau permettant l'exécution de tâches nécessitant une grande puissance de calcul et dont la mise en œuvre sera plus rapide qu'avec des langages de programmation traditionnels tels que le C, le C++. Pour la simulation d'un réseau, il est nécessaire de développer tout un projet. il existe un projet en cour de développement pour la simulation du réseau LTE (LTE-link Level Simulator) mais jusqu'à présent il ne tient compte que de la couche physique, la couche MAC qui nous intéresse le plus pour l'accomplissement de notre travail de recherche n'est pas prise en considération par ce Projet [86].

- NS-2/ NS-3

NS (Network Simulator) est un simulateur gratuit possédant une bonne documentation, le code de simulation a été contribué par plus de cent personnes et organisations, il est exécutable tant sous Unix /Windows. NS-2 bénéficie d'une utilisation répandue dans le milieu de la recherche, Il permet de simuler différents types de réseaux sans fil. Il permet de simuler la couche MAC 802.11 et plusieurs autres extensions. Il implémente plusieurs protocoles de routage et contient plusieurs modèles d'énergie [81].

Cependant, une lacune majeure de NS-2 est son évolutivité en termes d'utilisation de la mémoire et du temps d'exécution de la simulation. Ceci pose un problème particulièrement en ce qui concerne les nouveaux domaines de recherche dans les réseaux informatiques le cas du réseau LTE qui est composé d'une architecture en couche qui exige une simulation de réseaux très larges. La version 3 offre un module pour LTE mais qui n'est pas riche en algorithme d'ordonnancement sujet de notre recherche [121].

- LTE-SIM

La plupart des fournisseurs d'équipements de communication mobiles à savoir la multinationale HUAWEI, ALCATEL, NOKIA .etc. ont mis en œuvre leurs propres simulateurs pour la modélisation et la simulation de leurs propres scénarios. LTE-Sim est un simulateur open source qui peut être utilisé sous Unix comme sous Windows. il a été conçu pour effectuer des simulations pour les différentes stratégies de planification en liaison montante (UL) et descendante (DL), Il possède une bibliothèque très riche qui tient compte de tous les aspects intervenants dans le réseau LTE et implémente les différents types de protocole pour toutes les couches, aussi il est utilisé pour des simulations multi-cellules, multi-environnements et multiutilisateurs, prenant en considération la mobilité des utilisateurs, l'optimisation des ressources radio, la réutilisation de fréquences, la modulation adaptative (AMC) et d'autres aspects importants pour l'industrie et les communautés scientifiques [82].

LTE-SIM est très modulaire ce qui permet l'intégration de nouveau modèle propre au chercheur. Son inconvénient c'est qu'il présente une faible documentation, vu qu'il est en cours de développement et il est enrichi de nouveauté d'une version à autres. Pour notre application, nous avons choisi d'utiliser le simulateur LTE-Sim version 15 pour sa richesse en protocole d'ordonnancement objectif principale de notre recherche, et surtout pour sa modularité qui permet de développer nos propres modèles, les intégrer et les tester. En plus de sa disponibilité (open source) [83].

1.3. Présentation du simulateur LTE-SIM.

1.3.1. Présentation générale.

L'optimisation de tous les aspects LTE vaut un sujet de recherche pour les industries et les milieux universitaires. A l'heure actuelle, il n'existe pas de simulateur complet gratuit du réseau LTE. En fait, la plupart des fournisseurs d'équipements de communication mobiles ont mis en œuvre leurs propres simulateurs. Par ailleurs, d'autres simulateurs, développés dans les coopérations universitaires-industriel, peuvent être achetés au moyen d'une licence commerciale, et leurs codes sources ne sont pas accessibles au public. Le manque d'un simulateur commun de référence pose de sérieux problèmes dans la comparaison des résultats présentés par différents groupes de recherche. Pour combler cette lacune, LTE-SIM a été créé pour simuler les réseaux LTE et fournir une vérification complète de la performance des systèmes LTE. LTE-Sim englobe plusieurs aspects de réseaux LTE, incluant à la fois le réseau d'accès évolué (E-UTRAN) et le réseau cœur évolué (EPS) du réseau LTE [84] [82].

1.3.2. Fonctionnalités.

LTE-Sim possède une bibliothèque très riche qui tient en compte plusieurs aspects à savoir :

- Les environnements mono et multicellulaires (macro, micro, femto).
- La gestion de QOS.

- Les environnements multiutilisateurs.
- La mobilité
- UDP dans la couche transport
- Le mode du duplexage TDD et FDD.
- L'ordonnement.
- La modulation AMC.

1.3.3. Structure du LTE-Sim

Le simulateur est composé de 4 grandes classes : Simulator, NetworManager, Flows Manager, FrameManager.

a- Simulator:

Cette classe permet la gestion des événements .elle contient 4 méthodes importantes :

- **Schedule () Creates** : permet la création et l'insertion de nouveaux événements sur le calendrier des événements.
- **RunOneEvent ()** : permet l'exécution des événements.
- **Run () / Stop ()** : permet le démarrage et l'arrêt de la simulation.

b- NetworkManager : Cette composante permet la création des équipements, gestion de la position des UEs, la mobilité, et la gestion des techniques de réutilisation de fréquences. Elle est composée de 5 méthodes importantes:

- **CreateUserEquipment ()** : permet de créer un équipement.
- **CreateCell ()** : permet de créer les cellules.
- **UpdateUserPosition ()** : permet la mise à jour de la position de l'utilisateur.
- **HandOverProcedure ()** : permet la gestion des procédures d'Hanover.
- **RunFrequencyReuse ()** : implémente les techniques de réutilisation de fréquence.

c- FlowManager : Permet la gestion des applications. Elle est composée d'une seule méthode : **CreateApplication ()**.

d- FrameManager : Elle garantie la mise en œuvre effective de la structure de trame LTE est garantie par cette composante. Il est en charge de la programmation correcte des trames et sous-trames et de la synchronisation de tous les eNBs. Elle est composée de deux méthodes importantes :

- **StartSubFrame ()** : gère le début des sous trames LTE.
- **StopSubFrame()** : gère la fin des sous trames LTE.

1.3.4. Présentation des différentes étapes de création de scénarios

Un scénario de simulation est constitué par plusieurs objets, modélisant les principaux éléments d'un système LTE. Dans LTE-Sim, un scénario LTE peut être créé en tant que fonction statique dans un fichier en-tête C++, qui doit être stocké dans le dossier scénarios. Il convient d'ajouter cette fonction dans le programme principal. De cette façon, l'utilisateur est capable de simuler un scénario approprié LTE, en le sélectionnant directement à partir du programme principal [83]. En créant:

- a- Les instances Simulator, Network-Manager, Flow-Manager, Frame-Manager.
- b- Les cellules, des eNodeB et des UE en utilisant les méthodes de la classe Network-Manager
- c- Les applications et pour chacune d'elles définir le type de donnée radio Bearer, les paramètres IP, début et fin du flux de données, les paramètres de qualité de service. En Définissant la durée de la simulation et lancer la simulation par la méthode Simulator:RUN ().

LTE-Sim implémente six scénarios qui reflètent les différents cas de scénario à savoir :

- Le scénario monocellulaire avec rues, single-cell-with-streets.
- Le scénario monocellulaire sans interférences, single-cell-without-interference.
- Le scénario monocellulaire avec interférences single-cell-with-interference.
- Le scénario monocellulaire avec Femto single-cell-with-femto.
- Le scénario multi-cell-sinrplot.
- Le scénario multi-cell.

Dans notre cas d'étude on s'intéressera à deux scénarios, celui du monocellulaire avec interférences et du monocellulaire avec Femto, dans le premier scénario on examinera le cas d'une mobilité normale, de la haute mobilité et de la haute congestion.

1.4. Modèle de simulation.

Le trafic généré par les applications sources au niveau de l'équipement eNodeB sera transporté vers le classificateur pour le classer selon son type de QoS correspondant. Des entêtes de niveau transport sont ajoutés au paquet avant d'être reçu par le classificateur [121]. Le protocole de transport utilisé est UDP. Chaque file (bearer) fonctionne selon le mode FIFO (First In First Out). Au moment où le paquet est classé selon son type de services, un entête du protocole PDCP est ajouté. Puis une fonction de compression selon le protocole ROHC (Robust Header Compression) est exécutée. L'entête RLC et MAC sont par la suite ajoutés [82].

Les paquets acheminés par un bearer radio dédié sont créés au niveau de la couche Application par l'un des générateurs du trafic suivants :

- **Le générateur traced-based** : sert à envoyer les paquets suivant un modèle réaliste de trace de fichiers vidéo. Dans cette simulation, une source de service vidéo fournis des données avec un débit de 242 kbps.

- **Le générateur VoIP** : produit les flux G.729 pour la voix. Quoique, sous LTE-Sim, la voix a été modélisée par un modèle de chaîne de Markov ON/OFF.
- **Le générateur Infinite Buffer** : spécifie une source qui a toujours des données à envoyer. Ce générateur permet la modélisation du trafic des classes du service best effort (BE).

1.5. Modèle du canal.

Le modèle de perte de propagation LTE est composé de 4 modèles différents (Shadowing, trajets multiples, perte de pénétration et les pertes dues au chemin traversé) [82].

- Pathloss : $PL = 128.1 + 37.6 \cdot \log(d)$ où d est la distance entre l'UE et l'eNodeB en km.
- Multitrajet : modèle de Jakes.
- Pénétration Loss : Les pertes de pénétration sont fixées à 10dB.
- Shadowing : Modélisés par une distribution de loi normale logarithmique de moyenne 0 et de déviation standard égal à 8 dB.

2. Evaluation des performances des ordonnanceurs radio.

2.1. Scénario de la haute mobilité.

2.1.1. Formulation et justification de problématique.

La mobilité est une fonctionnalité clé pour un réseau radio mobile, de ce fait, un réseau 4G devra être fondé sur une technologie qui résistera aux coupures de communications causées par le déplacement à grande vitesse d'un terminal mobile. La LTE comme étant une solution candidate du réseau 4G vise lui aussi à rester fonctionnelle pour le cas des UEs en haute mobilité [107]. Les services temps-réel comme les services voix et vidéo doivent être proposés avec un niveau de qualité supérieur à celui des générations précédentes des réseaux radio mobiles [108]. Le système LTE doit également intégrer des mécanismes optimisant les délais et la perte de paquets dans le cas de la haute mobilité.

La raison du choix de ce scénario étant que la mobilité est l'une des aspects les plus difficiles à gérer dans un réseau cellulaire. Par conséquent, Nous recommandons aux opérateurs d'opter dès le début du déploiement des réseaux 4G pour l'option de mobilité. Ce qui tiendrait compte de l'évolution des besoins des abonnés et constituerait une solution avantageuse pour l'opérateur de télécom. Dans cette partie nous traiterons le problème de la mobilité utilisateur dans le réseau LTE dans un souci d'améliorer le niveau de la QoS pour le trafic temps-réel [110]. Pour cela, nous allons simuler le cas d'une autoroute au Maroc localisée dans une zone rurale, dont les stations mobiles circulent à une vitesse de 120Km/h et se communiquant au travers des applications de type VoIP, transfert vidéo ou données de type Best Effort.

La qualité de service (QOS) est la capacité pour un système de transmettre dans de bonnes conditions un certain nombre de paquet dans une connexion entre un émetteur et un récepteur, et cela peut être présenté sous plusieurs termes tels que la disponibilité, le débit [112], le délai de transmission [109], la gigue et le taux de pertes de paquets [111]. Le mécanisme de gestion des ressources radio (RRM) joue un rôle primordial dans le processus d'amélioration de la qualité de service, son objectif est d'accepter ou de rejeter les demandes de connexion au réseau, en assurant une distribution optimale des ressources radio entre les UEs (Users Equipements). Il est constitué principalement de deux éléments Contrôle d'admission 'AC' (Admission Control) et l'ordonnanceur des paquets 'PS' (Packet Scheduling) [114]. Dans ce travail on se focalise sur les ordonnanceurs radio, dont la fonction est de fournir une allocation efficace des ressources radio, et ce via une comparaison de performances des algorithmes d'ordonnancement les plus connues à savoir, l'ordonnanceur PF (Proportional Fairness), EXP/PF (Exponential Proportional Fairness) et le MLWDF (Maximum-Largest Weighted Delay). Le but de cette comparaison est de chercher lequel de ces algorithmes satisfait de meilleures performances pour chaque type de flux temps réel dans le cas où des utilisateurs se déplacent à une vitesse de 120 Km dans une autoroute. Cette comparaison sera aussi couronnée par une découverte des limites ainsi que des faiblesses de ces algorithmes dans le but de concevoir et de développer un nouvel algorithme capable de surmonter ses limites [116].

2.1.2. Scénario d'étude et paramètres de simulation.

Dans notre simulation, nous avons considéré le cas d'une seule cellule macro avec interférences, nous avons utilisé un environnement à trois cellules avec un rayon de 1 kilomètre chacune et dans lequel un ensemble d'utilisateurs choisi dans la plage [5-25] sont uniformément en haute mobilité 120 km/h et sont distribués dans une cellule, les deux autres cellules étant une source d'interférence pour la première. Les UEs se déplacent dans la cellule suivant le modèle de mobilité de MANHATTAN [117]. Chaque utilisateur reçoit un flux vidéo H.264, un flux VOIP, et un flux de données modélisé par le tampon Infinie.

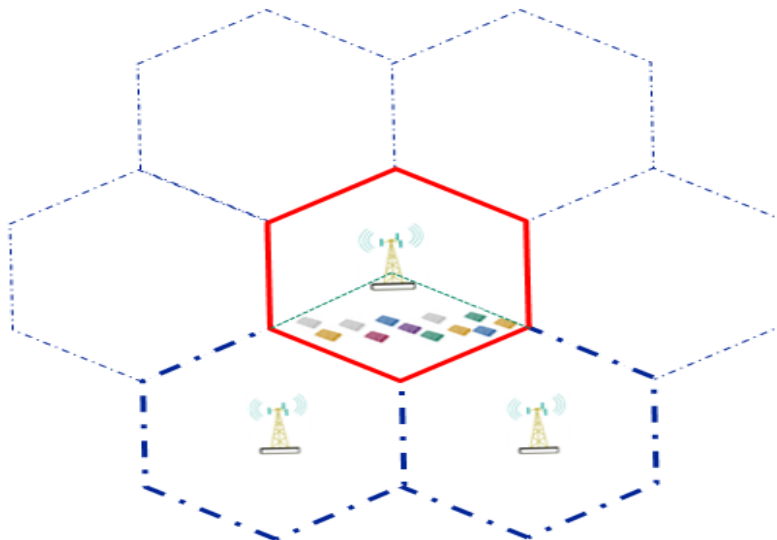


Figure III. 1: Environnement de simulation pour le scénario de la haute mobilité.

Le but de cette simulation est d'évaluer les performances du réseau LTE en haute mobilité, notre évaluation est basée sur des ordonnanceurs implémentés dans les stations de base du réseau LTE (PF, MLWDF et EXP/PF), et ce par la mesure du délai de transmission des paquets, du taux de perte de paquets (PLR), du débit et d'efficacité spectrale, les paramètres de simulation sont illustrés dans le tableau suivant.

Tableau III. 2: Paramètres de simulation pour le scenario de la haute mobilité.

| Paramètres | Value |
|---|-----------------|
| La durée de simulation | 120 s |
| La durée du flux | 120 s |
| La structure Trame | FDD |
| La vitesse de l'équipement mobile | 120 Km/h |
| Rayon de la cellule | 1 km |
| La bande passante | 20 MHz |
| La durée du Slot | 0.5 ms |
| Le temps d'ordonnancement (durée TTI) | 1 ms |
| Le Nombre de Bloque de ressources (RBs) | 100 |
| Le délai Maximal | 0.1 s |
| Le débit du flux Vidéo | 242 kbps |
| Le débit du flux Voix sur IP | 8.4 kbps |
| Le nombre minimal des utilisateurs | 5 |
| Le nombre maximal des utilisateurs | 25 |
| L'intervalle entre utilisateurs | 5 |

2.1.3. Résultats de simulation.

2.1.3.1. Mesure du délai de paquets.

Le délai a une influence très importante sur les performances du réseau. Surtout pour les services temps réel, comme les flux Voix et Vidéo qui nécessitent une faible latence [104]. D'autres services qui tolèrent un peu de retard sont les jeux et les applications non temps réel, telles que la messagerie électronique ou le transfert de fichiers. Notons qu'il est toutefois difficile d'améliorer sensiblement la latence sans réduire l'intervalle du temps de transmission (TTI).

a- Pour le flux VoIP.

La figure III.2 représente, pour le flux VoIP, l'évolution de la latence (ou délai de paquet) en fonction du nombre d'UEs en haute mobilité dans la zone de couverture de la cellule. La simulation montre que jusqu'à 25 utilisateurs tous les algorithmes se valent et ont un délai acceptable qui ne dépasse pas 12 ms, avec une nette distinction en faveur des algorithmes PF et EXP/PF qui présentent un plus faible délai comparé à celui de l'algorithme MLWDF (2 ms contre environ 3.7 ms pour 5 UEs et 5 ms contre 11.3 ms environ pour 25 UEs).

b- Pour le flux Vidéo.

La figure III.3 représente, pour le flux vidéo, l'évolution de la latence (en secondes) en fonction du nombre d'UEs en haute mobilité dans la zone de couverture de la cellule. Comme le montre la simulation, la latence du flux vidéo pour les algorithmes MLWDF et EXP/PF est pratiquement négligeable quel que soit le nombre d'UEs (entre 5 et 25) présents dans la cellule. Ceci n'est toutefois pas le cas pour l'algorithme PF qui démontre ses faiblesses en matière de délai de paquet pour les flux VoIP et vidéo à mesure que croît le nombre d'UEs présents dans la cellule. En effet la latence pour ce dernier algorithme semble croître de façon exponentielle à partir de 10 UEs pour franchir le seuil de 4.25 s, valeur de latence intolérable par la norme LTE.

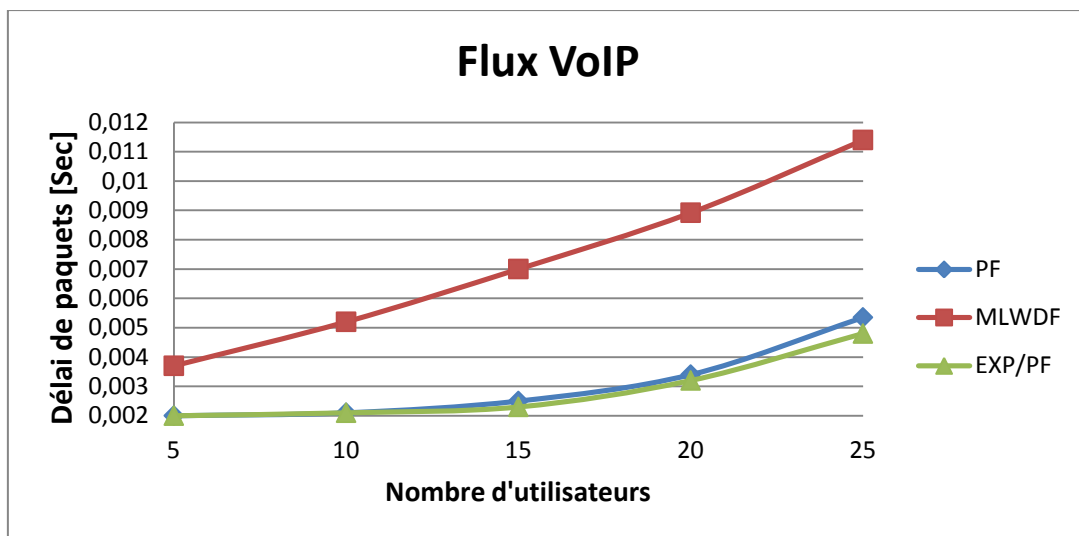


Figure III. 2: Evolution du délai de paquets en fonction du nombre d'UEs pour le flux VoIP dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

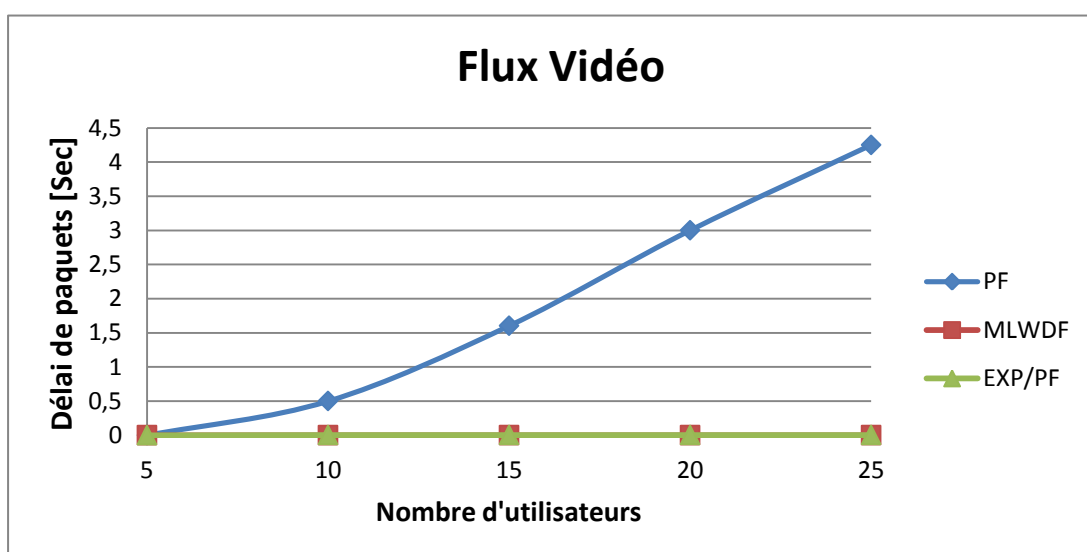


Figure III. 3: Evolution du délai de paquets en fonction du nombre d'UEs pour le flux Vidéo, dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

2.1.3.2. Mesure du taux de perte de paquets (PLR).

L'amélioration d'estimation du taux de perte de paquets (PLR) est une question cruciale, car sa valeur a un grand effet sur les performances du réseau, surtout lorsqu'il s'agit du trafic en temps réel comme pour les flux VoIP et vidéo [120].

a- Pour le flux VoIP.

La figure III.4 représente, pour le flux VoIP, l'évolution du taux de paquets perdus (PLR) en fonction du nombre d'UEs en haute mobilité dans la zone de couverture de la cellule. Comme le montre la figure, les trois algorithmes montrent globalement des performances très comparables, avec un léger avantage pour les algorithmes EXP/PF et PF. Pour ce dernier surtout, le taux de paquets perdus, relatif au flux VoIP, semble être le plus faible des trois algorithmes, parait relativement insensible au nombre d'UEs actifs dans la cellule et reste en dessous de la limite des 0,5%. La stabilité et la quasi-insensibilité au nombre des UEs actifs dans la cellule demeurent un constat qui peut être généralisé et étendu aux trois algorithmes étudiés qui témoignent globalement de bonnes performances en matière de taux de paquets perdus pour le flux VoIP.

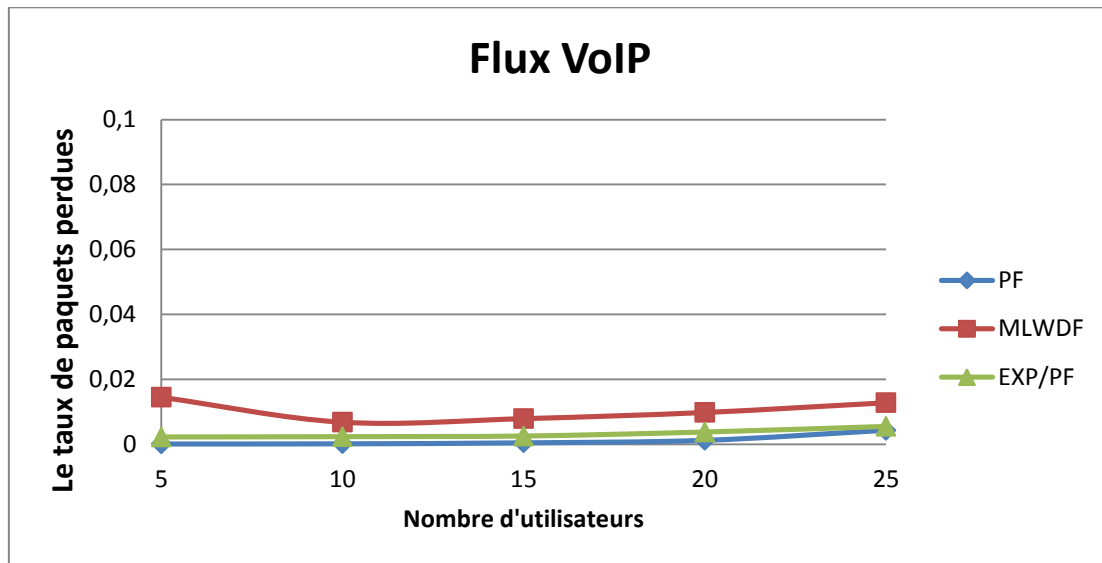


Figure III. 4: Evolution du PLR en fonction du nombre d'UEs pour le flux VoIP, dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

b- Pour le flux Vidéo.

La figure III.5 représente, pour le flux vidéo, l'évolution du taux de paquets perdus (PLR) en fonction du nombre d'UEs en haute mobilité dans la zone de couverture de la cellule. Contrairement aux bonnes performances démontrées des trois algorithmes pour le flux VoIP, la présente figure

témoigne, pour les trois algorithmes comparés, d'une grande dégradation de performances en matière de taux de PLR pour le flux vidéo. Ces dégradations sont d'autant plus importantes que le nombre d'UEs actifs croît dans la cellule, en particulier pour l'algorithme PF qui a pu atteindre un taux maximal de 88 %. Avec de telles performances, un taux de perte de paquets évoluant pour les algorithmes EXP et MLWDF de 30 % à 73 % pour un nombre d'UEs passant de 5 à 25 respectivement, les trois algorithmes confondus ne semblent guère représenter des choix indiqués pour la gestion de l'allocation des ressources pour le flux vidéo, dans le cas de la haute mobilité utilisateur. D'autres algorithmes d'ordonnancement doivent donc être utilisés pour relever ce défi, ce sera l'objet de notre proposition d'algorithme d'ordonnancement présenté dans le chapitre IV.

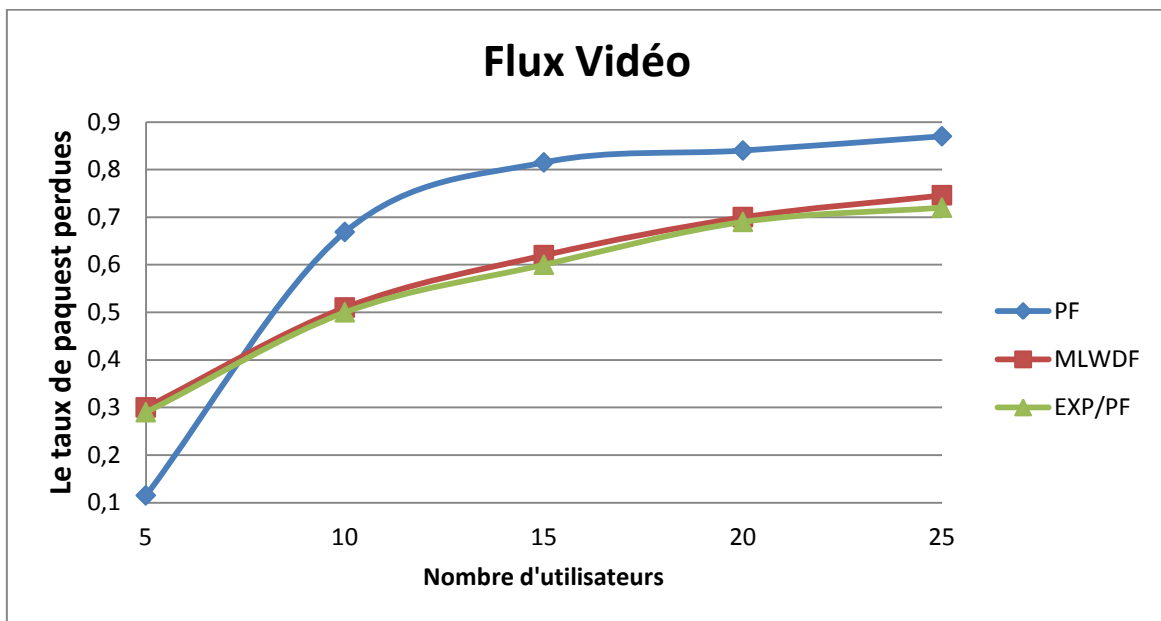


Figure III. 5: Evolution du taux de perte de paquets en fonction du nombre d'UEs actifs pour le flux vidéo, dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

2.1.3.3. Mesure du débit.

La mesure du débit est l'une des opérations importantes qui permet d'identifier le taux de réussite moyen de transfert des messages sur un canal de communication [100].

a- Pour le flux VoIP.

La figure III.6 représente, pour le flux VoIP, l'évolution du débit moyen de paquets en fonction du nombre d'UEs en haute mobilité dans la zone de couverture de la cellule. Les performances, en termes de débit moyen de paquets, des trois algorithmes sont quasiment identiques, le débit moyen évolue de façon linéaire en fonction des UEs actifs dans la zone de la cellule.

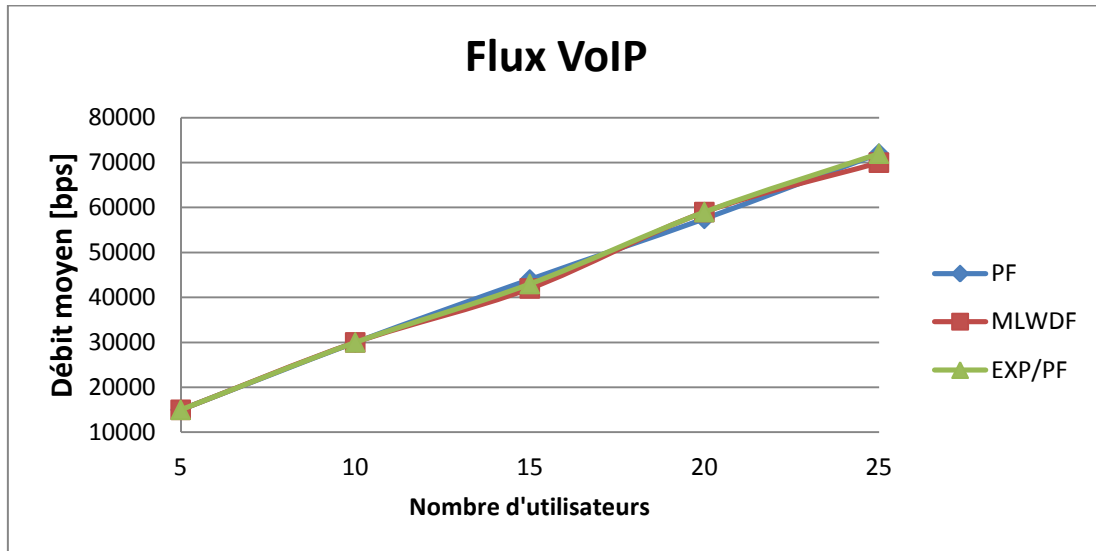


Figure III. 6: Evolution du débit moyen en fonction du nombre d'UEs pour le flux VoIP, dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

b- Pour le flux Vidéo.

La figure III.7 représente, pour le flux vidéo, l'évolution du débit moyen de paquets en fonction du nombre d'UEs en haute mobilité dans la zone de couverture de la cellule. Comme on peut le constater sur la figure, pour les algorithmes MLWDF et EXP/PF le débit des paquets pour le flux vidéo augmente avec le nombre d'utilisateurs. Pour l'algorithme PF le débit diminue avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs, ce qui explique que l'ordonnanceur PF n'est plus convenable pour le flux vidéo. La valeur du débit moyen dans le cas de la haute mobilité est moins que celle en mobilité normale.

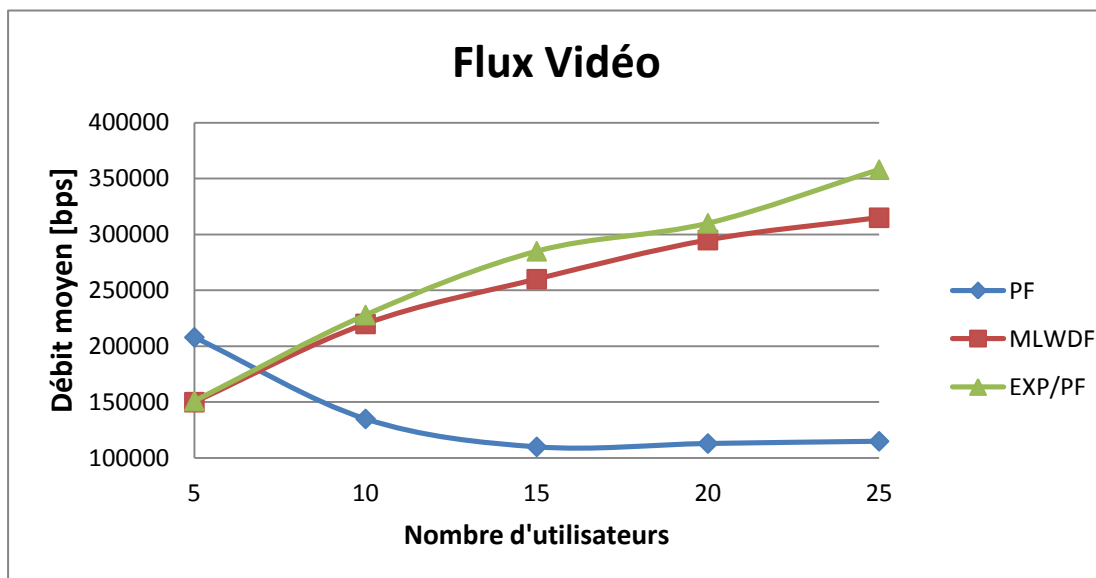


Figure III. 7: Evolution du débit moyen en fonction du nombre d'UEs pour le flux Vidéo, dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

2.1.3.4. Mesure de l'efficacité spectrale.

L'efficacité spectrale est définie comme étant le débit maximal de l'utilisateur divisée par la largeur de bande du canal. C'est le nombre de bits reçus correctement normalisé par la ressource consommée en temps et en bande passante [118]. Ainsi, l'efficacité spectrale est fortement liée à la consommation des ressources et du taux d'erreur des paquets. Comme le montre la figure III.8, l'efficacité spectrale de la cellule est la plus basse pour l'algorithme d'ordonnancement PF, mais pour les algorithmes MLWDF et EXP/PF, elle est plus haute. Cependant cette valeur est acceptable pour tous ces algorithmes vue quelle est située entre la valeur limite (0,04 b/s/Hz) et celle moyenne (1,8 b/s/Hz), comme spécifié par le 3GPP [49].

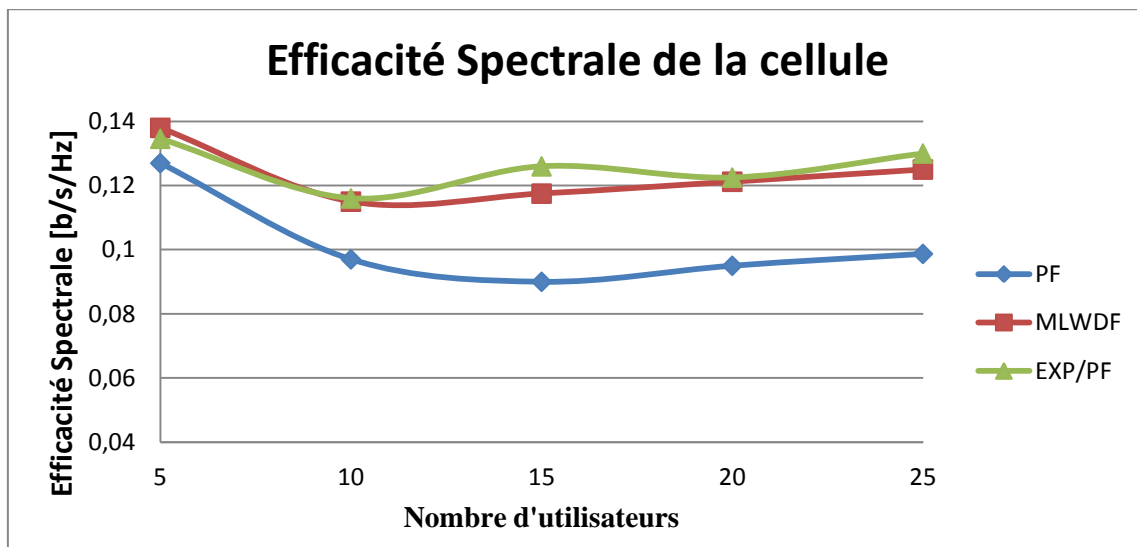


Figure III. 8: Evolution de l'efficacité spectrale en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

2.1.4. Bilan :

Dans cette partie nous avons procédé à une comparaison des performances du réseau LTE dans le cas des utilisateurs en haute mobilité, ce résultat est considéré pour différents algorithmes d'ordonnancement qui sont évalués en utilisant le simulateur de réseau LTE-SIM, et finalement, nous constaterons que pour le flux VoIP, les algorithmes PF, EXP/PF et MLWDF sont tous appropriés, tandis que pour les flux vidéo, les algorithmes M-LWDF et EXP/PF montrent de meilleures performances alors que pour l'algorithme PF et en raison de son large délai, son grand taux de perte de paquets et son faible débit, il ne justifie pas de bonnes performances.

Selon les résultats simulés, on peut conclure que le réseau LTE est capable de maintenir le fonctionnement en haute mobilité, en choisissant pour chaque type de trafic l'algorithme d'ordonnancement le plus approprié. Malgré cela il est observé que le taux de perte de paquets dans le cas de ce scénario présente une évolution énorme avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs, la chose qui constitue l'une des faiblesses de ces algorithmes qu'on doit apporter solution.

2.2. Scénario de la haute congestion.

2.2.1. Formulation de problématique et justification.

L'un des problèmes majeur auquel le standard LTE doit apporter des solutions est la congestion du trafic réseau qui se produit, en période d'affluence, au niveau du réseau d'accès par suite d'une sollicitation massive d'un grand nombre de dispositifs mobiles qui essaient d'accéder simultanément au réseau et qui le pénalisent à cause de l'intensité du trafic, des signalisations et des messages de données simultanés (appels vocaux, messages, conférences audio et vidéo, etc...) qu'ils engendrent dans le réseau. En effet, la conception du réseau LTE avec un haut débit de l'ordre de 100 Mbps en lien descendant et de 50 Mbps en lien ascendant et la souplesse de son utilisation dans différentes largeurs de bande allant de 1,4 MHz à 20 MHz [118], devrait garantir une faible latence, une flexibilité spectrale très efficace et une grande capacité en termes de nombre de mobiles supporté par chaque cellule pour éviter la congestion du réseau [119].

Nous nous fixons comme but ici d'évaluer par simulation les performances et la capacité du réseau LTE à gérer le problème de la congestion du trafic réseau pour les flux temps réel VoIP et vidéo. Pour cela, et afin de découvrir lequel des algorithmes montre de meilleures performances pour chaque type de flux temps réel dans le cas de la haute congestion, nous allons de nouveau tester et comparer les performances des trois algorithmes d'ordonnancement PF, MLWDF et EXP-PF en matière d'évitement de la congestion réseau pour les flux temps réel VoIP et vidéo. Les critères de performance choisis dans cette simulation sont toujours le débit, le délai de transmission, le taux de perte de paquets et l'efficacité spectrale. Cette étude comparatifs nous aidera par la suite à soulever les limites de chacun de ces ordonnanceurs dans le cas d'un grand nombre d'utilisateurs et justifier notre proposition d'un nouveau modèle d'algorithme d'ordonnancement se voulant apporter une solution à ces limites [115].

2.2.2. Scénario d'étude et paramètres de simulation.

Dans notre simulation, nous nous plaçons dans le même environnement réseau que précédemment, celui de trois cellules. Notre étude portera sur une seule cellule. Les deux autres cellules serviront uniquement de source d'interférence pour la première. La cellule d'étude est choisie avec une couverture de 1 km de rayon. Le nombre d'utilisateurs de la cellule est choisi cette fois-ci dans l'intervalle [25-100]. Les utilisateurs se déplacent dans la cellule selon le modèle de mobilité «Random_Walk » avec une vitesse de 3 km/h. Chaque utilisateur reçoit un flux vidéo H.264, un flux de VoIP, et un flux « best effort » modélisé par un tampon (buffer) infini, la figure III.9 représente l'environnement de notre simulation.

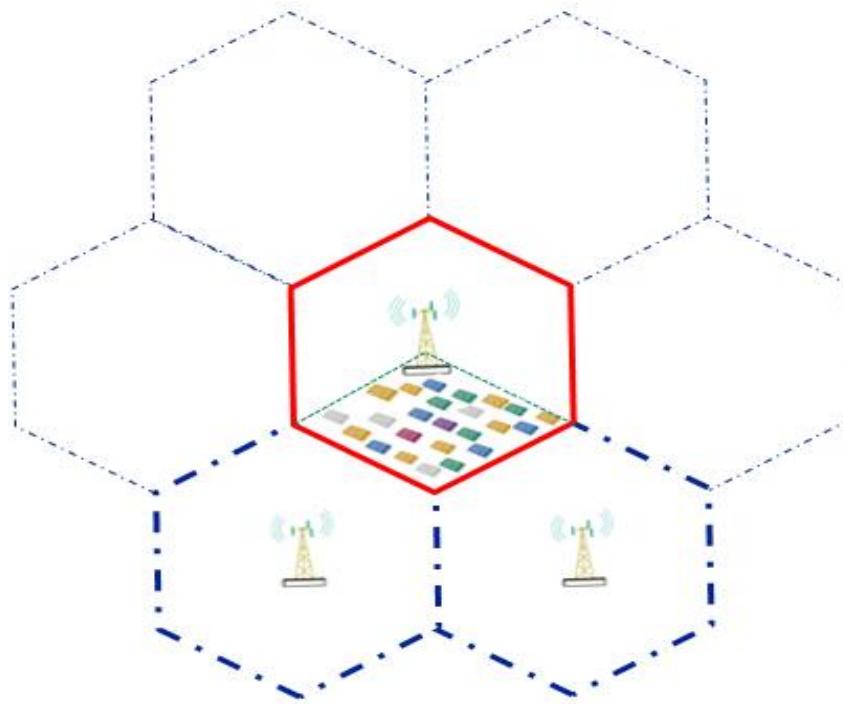


Figure III. 9: Environnement réseau d'étude de la haute congestion du trafic réseau. La cellule centrale constitue la zone de couverture radio d'étude. Les deux cellules périphériques représentent la source d'interférences pour la cellule centrale.

Les paramètres de simulation choisis sont consignés dans le tableau III.3.

Tableau III. 3: Paramètres de simulation pour le scénario de la haute congestion.

| Paramètres du scénario d'étude | Valeur |
|----------------------------------|---------|
| Durée de simulation | 120s |
| Durée de flux | 120s |
| Structure de la trame | FDD |
| Vitesse de l'équipement mobile | 3km/h |
| Couverture de la cellule (rayon) | 1Km |
| Bande passante | 20MHz |
| Durée du slot | 0.5ms |
| Temps d'ordonnancement (TTI) | 1ms |
| Nombre de blocs de ressource | 100 |
| Délai maximal | 0.1s |
| Débit du flux vidéo | 242kbps |
| Débit du flux VoIP | 8.4kbps |
| Nombre minimal d'utilisateurs | 25 |
| Nombre maximal d'utilisateur | 25 |
| Intervalle entre utilisateurs | 100 |

2.2.3. Résultats de simulation.

2.2.3.1. Mesure du délai de paquet.

a- Pour le Flux VoIP.

La figure III.10 représente, pour le flux VoIP, l'évolution du délai de paquets en fonction du nombre d'UEs actifs dans la zone de couverture de la cellule, en période de haute congestion réseau. Comme on peut le constater sur la figure, les algorithmes MLWDF et EXP-PF présentent le délai de transmission le plus faible des trois algorithmes (2 ms pour 25 UE et 40 ms pour 100 UE). Quant à l'algorithme PF, son délai est intolérable en présence d'un nombre d'UE considérable dans la cellule, notamment pour 100 UEs, il obtient un délai de 120 ms qui dépasse la limite autorisée qui est de 100ms.

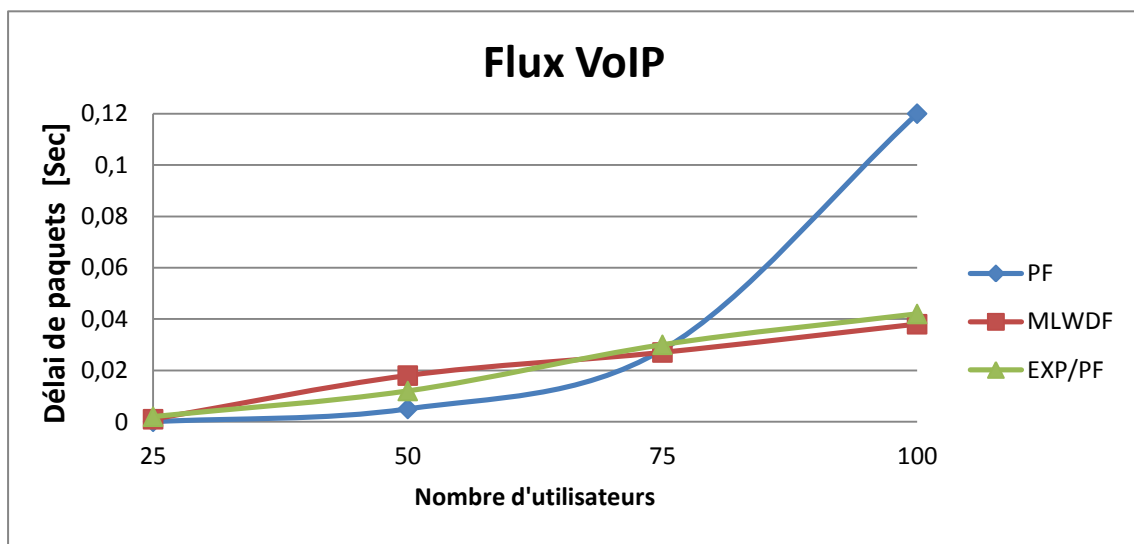


Figure III. 10: Evolution du délai de paquet pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion réseau.

b- Pour le Flux Video.

La figure III.11 représente, pour le flux vidéo, l'évolution du délai de paquets en fonction du nombre d'UEs actifs dans la zone de couverture de la cellule, en période de haute congestion réseau. Comme on peut le constater sur la figure, le délai du flux vidéo pour les algorithmes d'ordonnancement MLWDF et EXP-PF est pratiquement très faible et stable et semble être insensible à l'augmentation du nombre d'UEs dans la cellule. Quant à l'algorithme PF, comme pour le flux VoIP, son délai de paquet pour le flux vidéo s'avère intolérable lorsque le nombre d'UEs dans la zone de couverture de la cellule est important.

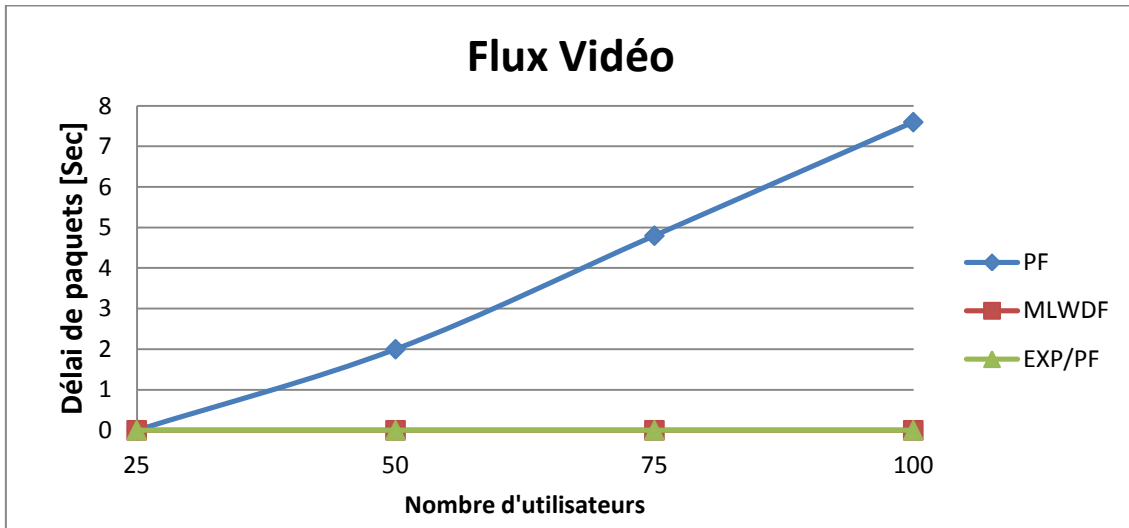


Figure III. 11: Evolution du délai de paquet pour le flux vidéo en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion réseau.

2.2.3.2. Mesure du taux de perte de paquets (PLR)

a- Pour le flux Voix sur IP.

La figure III.12 représente, pour le flux VoIP, l'évolution du taux de paquets perdus en fonction du nombre d'UEs actifs dans la zone de couverture de la cellule, en période de haute congestion réseau. Comme le montre cette figure, pour les trois algorithmes, le taux de perte de paquets évolue dans le même sens en fonction du nombre d'utilisateurs actifs dans la cellule et reste pratiquement insignifiant pour un nombre d'UEs compris entre 25 et 50. Toutefois, au-delà de 50 UEs environ, les trois algorithmes montrent une croissance quasi-exponentielle du taux de pertes de paquets. MLWDF est visiblement celui qui offre le meilleur taux de pertes de paquets.

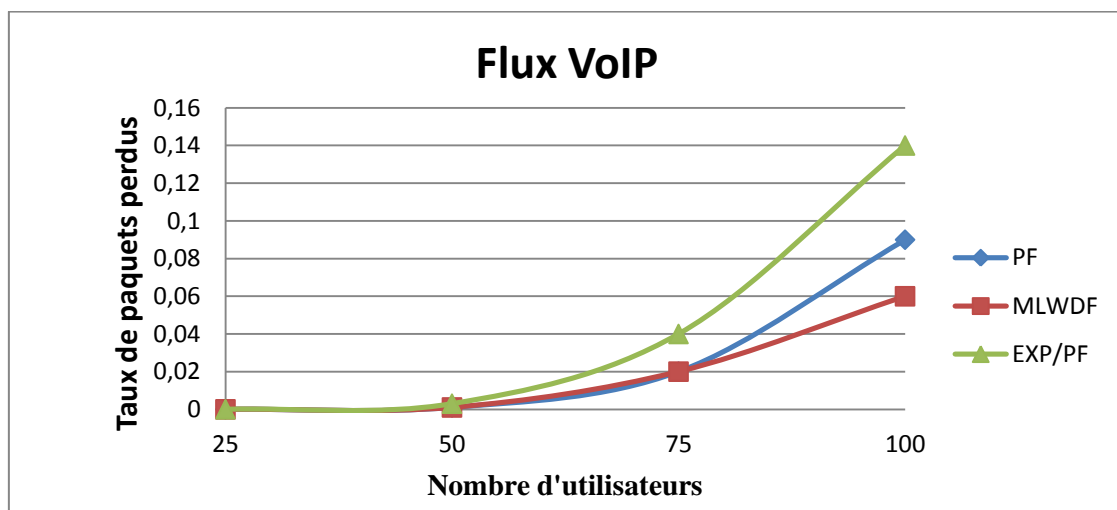


Figure III. 12: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion réseau.

b- Pour le flux Vidéo.

La figure III.13 représente, pour le flux vidéo, l'évolution du taux de perte de paquets en fonction du nombre d'UEs actifs dans la zone de couverture de la cellule, en période de haute congestion réseau. Comme le montre la figure, le taux de perte de paquets pour une transmission vidéo est supérieur à celui mesuré précédemment pour le flux VoIP. L'algorithme PF est celui qui montre un taux de perte de paquets le plus élevé en période d'affluence dans la cellule. En plus, pour un nombre d'UEs supérieur ou égal à 50, les performances inacceptables des trois algorithmes, en termes de PLR (supérieur ou égal à 70 %) disqualifient ces derniers comme ordonnanceurs pour le flux vidéo.

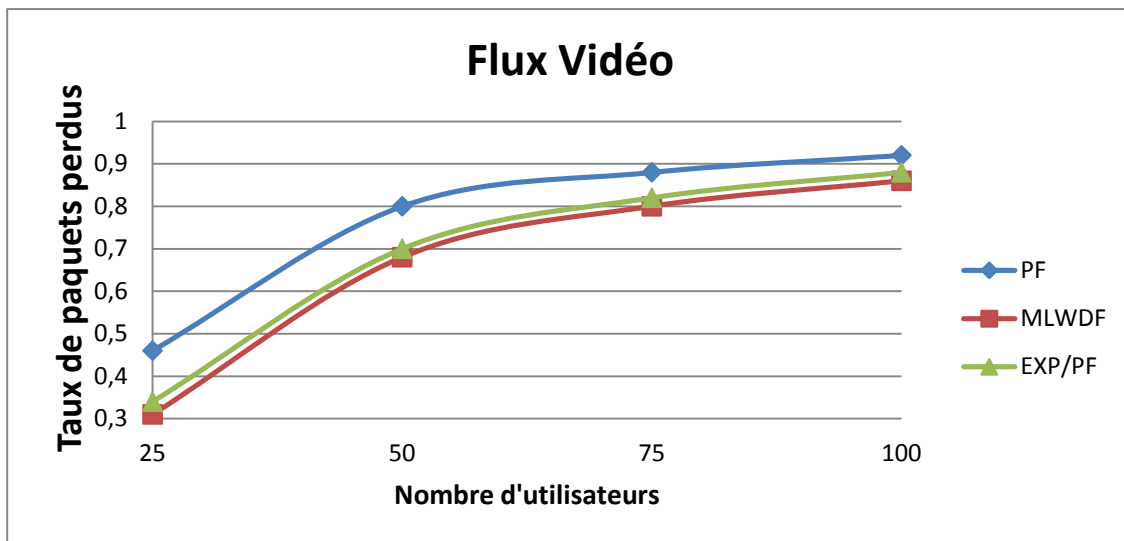


Figure III. 13: Evolution du PLR pour le flux vidéo, en fonction du nombre d'UEs, en période de haute congestion du trafic réseau.

2.2.3.3. Mesure du débit.

a- Pour le flux voix sur IP

La figure III.14 représente, pour le flux voix sur IP, l'évolution du débit de paquets moyen, en fonction du nombre d'UEs actifs dans la zone de couverture de la cellule et en période de haute congestion réseau. Comme le montre la figure, les trois algorithmes témoignent d'une augmentation exponentielle et très comparable du débit de paquets pour le flux VoIP, pour un nombre d'UEs actifs dans la cellule allant jusqu'à 75. Au-delà, les algorithmes MLWDF et PF semblent enregistrer un relatif avantage par rapport à l'algorithme EXP/PF.

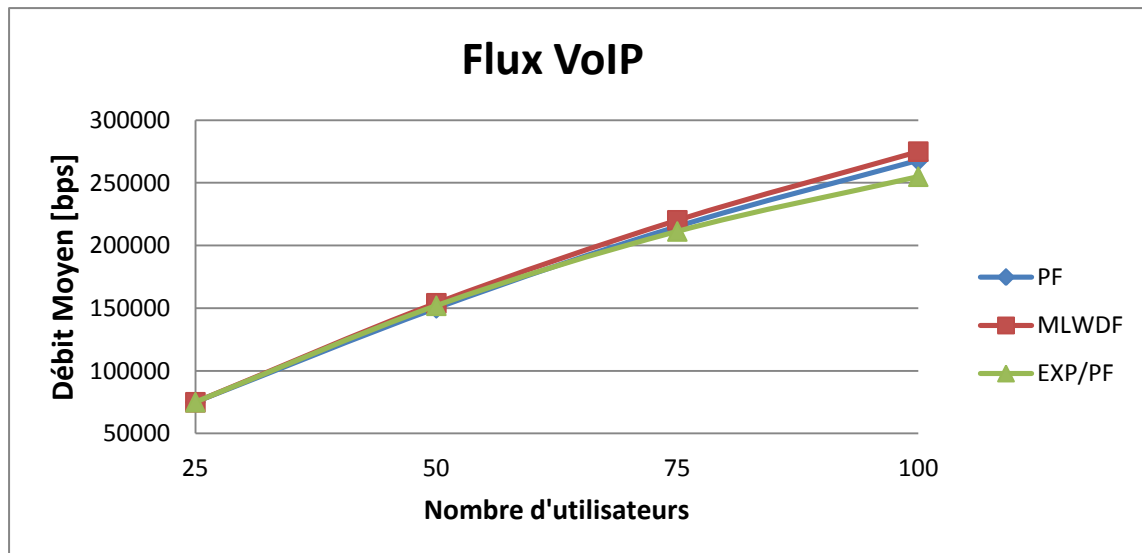


Figure III. 14: Evolution du débit moyen pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs et en période de forte congestion du trafic réseau.

b- Pour le flux Vidéo.

La figure III.15 représente, pour le flux vidéo, l'évolution du débit de paquets moyen, en fonction du nombre d'UEs actifs dans la zone de couverture de la cellule et en période de haute congestion réseau. Comme on peut le constater sur la figure, le débit moyen pour les trois algorithmes décroît globalement à mesure que le nombre d'UEs croît. Toutefois, l'algorithme MLWDF, suivi en seconde position de l'algorithme EXP-PF semblent présenter de meilleures performances en termes de débit, comparées à celles de l'algorithme PF qui ne semble guère supporter la croissance du nombre d'Es dans la cellule.

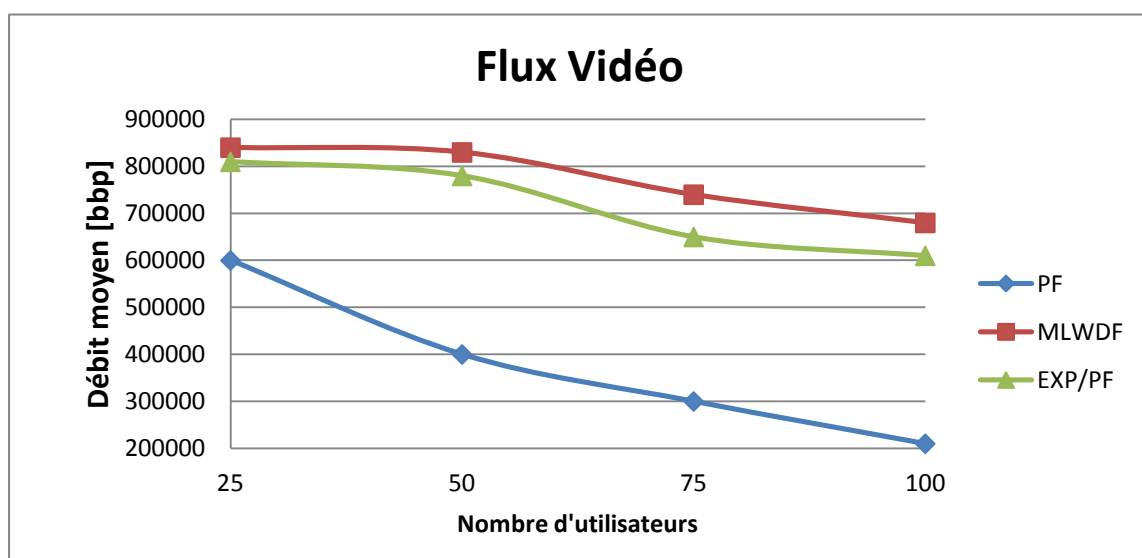


Figure III. 15: Evolution du débit, pour le flux vidéo, en fonction du nombre d'UEs et en période de haute congestion du trafic réseau.

2.2.3.4. Mesure de l'efficacité spectrale.

Comme le montre la figure III.16, l'algorithme PF est celui qui présente l'efficacité spectrale la plus faible comparée à celle mesurée pour les algorithmes MLWDF et EXP-PF. Pour un nombre d'utilisateur donné, c'est toujours l'algorithme MLWDF qui offre la meilleure valeur d'efficacité spectrale. Cette dernière, pour les trois algorithmes, décroît à mesure que le nombre d'utilisateurs croît sans dépasser la valeur limite qui est de 0,04 b/s/Hz.

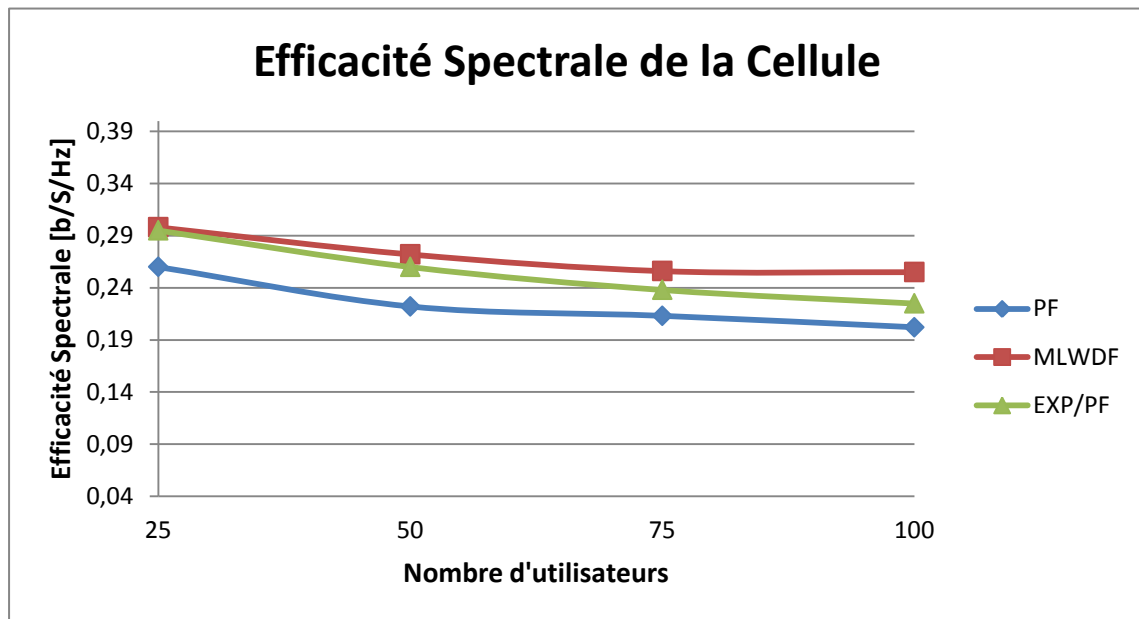


Figure III. 16: Evolution de l'efficacité spectrale en fonction du nombre d'utilisateurs en période de forte affluence dans la zone de couverture de la cellule.

2.2.4. Bilan

Les résultats de simulation précédents permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'algorithme MLWDF ressort globalement et relativement vainqueur des trois algorithmes d'ordonnancement comparés, en matière de performances d'évitement de la congestion des flux VoIP et vidéo sur LTE. L'algorithme PF, en raison de son faible débit, de sa latence élevée et de son taux de perte de paquets élevé n'a pas démontré son aptitude à gérer convenablement la congestion du flux VoIP.
- Malgré leurs capacités relatives à gérer le problème de la congestion réseau sur LTE, aucun des algorithmes d'ordonnancement étudié notamment EXP-PF et MLWDF ne satisfait à lui seul toutes les performances requises pour la gestion de la congestion réseau pour les flux étudiés et pour chacun des critères évalués (débit, latence, taux de perte de paquets et

efficacité spectrale). En effet, ces ordonnanceurs présentent un grand taux de perte de paquets pour le flux vidéo, un défaut que nous prendrons en compte dans la conception de notre nouvel algorithme (chapitre IV).

2.3. Scénario avec des cellules femto.

2.3.1. Formulation de problématique et justification.

L'amélioration de la couverture indoor est un grand souci pour les opérateurs, ils doivent fournir une bonne couverture indoor non seulement pour les services voix mais aussi pour les services vidéo et données qui deviennent de plus en plus importants [105]. Il est estimé que dans les réseaux cellulaires [43], deux tiers des appels et environ 90% des services liés aux données sont faits à l'intérieur des bâtiments. En dépit, une étude a montré que 45% des maisons et 30% des locaux de travail ont une faible couverture [125].

Pour remédier à ce problème, l'organisme de standardisation 3GPP a introduit une nouvelle solution basée sur les cellules femto. La couverture est alors améliorée dans les bâtiments, le trafic des réseaux extérieurs est allégé et la qualité de service ainsi que la capacité du réseau sont améliorées. Le but de notre étude est d'évaluer les performances du réseau LTE pour les communications à domicile en se basant sur les cellules Femto, L'évaluation de ces performances est menée à l'aide du simulateur LTE-SIM en termes de débit, de délai et de taux de pertes de paquets. Et ce en utilisant les mêmes ordonnanceurs cités précédemment [113].

2.3.2. Scénario d'étude et paramètres de simulation.

Dans cette simulation, nous allons considérer un scénario dont une cellule macro est présentée avec 25 appartements casés selon le modèle 5*5 comme illustré dans la figure III.17, chacune a une superficie de 100 m².

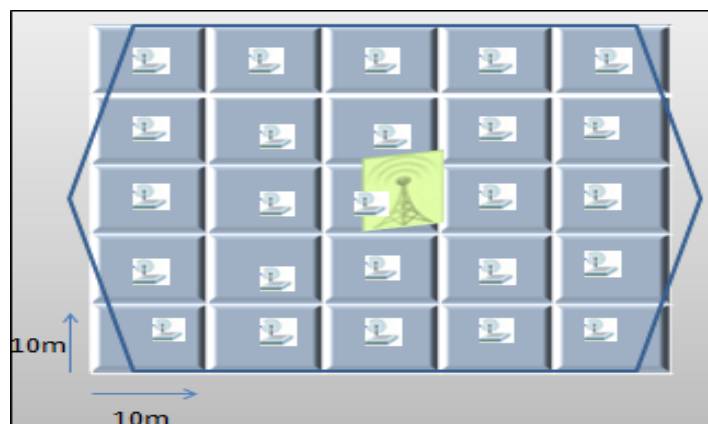


Figure III. 17: Environnement de simulation avec des cellules Femto.

La cellule macro est de rayon égal à 200 m et contient une station eNodeB qui transmet à l'aide d'une antenne omnidirectionnelle dans une bande passante de 5 MHz. Un nombre d'UEs, choisi dans la plage [5-20], est considéré en déplacement dans la zone de couverture de la cellule selon le modèle de mobilité de RANDON WALK. Chaque utilisateur reçoit un flux vidéo H.264, un flux de VOIP et un flux Best Effort. Le but de cette simulation est de prouver lequel des algorithmes étalons justifie de meilleurs performances pour le cas des cellules femto, par le biais d'une étude comparative de la QoS pour les flux VoIP et Vidéo des trois algorithmes d'ordonnancement PF, EXP-PF et MLWDF implémentés dans la station de base du réseau LTE. Cette évaluation des performances porte sur les mêmes indices de performance qui sont, rappelons-le, le délai de paquet, le taux de perte de paquets (PLR), le débit de paquet et l'efficacité spectrale. Le model de propagation du canal pris en considération dans cette simulation est celui présenté précédemment en prenant également en compte un facteur d'atténuation supplémentaire lors du calcul de pertes de trajet à savoir, l'atténuation de la paroi externe qui est fixée par défaut à une valeur de 20 dB [124]. Les paramètres de simulation sont présentés dans le tableau III.4 ci-dessous.

Tableau III. 4: Paramètres de simulation pour le scénario des cellules Femto.

| <i>Paramètres</i> | <i>Value</i> |
|---------------------------------------|--------------|
| Durée de simulation | 120 s |
| Durée de flux | 120 s |
| Structure de la trame | FDD |
| Couverture de la cellule (rayon) | 200 m |
| Bande passante | 5 MHz |
| Durée du slot | 0.5 ms |
| Temps d'ordonnancement (TTI duration) | 1 ms |
| Nombre de blocs de ressource | 25 |
| Délai maximal | 0.1 s |
| Débit du flux vidéo | 242 kbps |
| Débit du flux VoIP | 8.4 kbps |
| Nombre minimal d'utilisateurs | 5 |
| Nombre maximal d'utilisateur | 5 |
| Intervalle entre utilisateurs | 20 |

2.3.3. Résultats de simulation.

2.3.3.1. Mesure du délai des paquets.

a- Pour le flux VoIP.

La figure III.18 montre que pour un nombre maximal d'utilisateurs l'algorithme EXP/PF présente le plus faible délai pour le flux voix sur IP à savoir 2,8 ms, par contre l'algorithme MLWDF connaît une évolution avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs et présente le plus long délai de

transmission qui est de 6,5 ms, la valeur qui est toujours tolérable et qui ne dépasse plus la limite autorisé (100ms), pour l’algorithme PF le délai commence à augmenter à partir de 10 utilisateurs pour atteindre une valeur de 5,2 ms pour 20 utilisateurs.

b- Pour le flux Vidéo.

La figure III.19 représente, pour le flux vidéo, l’évolution du délai de paquets en fonction du nombre d’UEs, pour le scénario de la cellule femto. Comme le montre cette figure, le délai du flux vidéo est stable et présente une valeur minimale pour les algorithmes MLWDF et EXP/PF malgré l’augmentation du nombre d’utilisateurs, la chose qui n’est pas vraie pour l’algorithme PF qui présente une évolution exponentielle à partir de 6 utilisateurs jusqu’à atteindre une valeur maximale inacceptable par la norme LTE qui est de 178 ms.

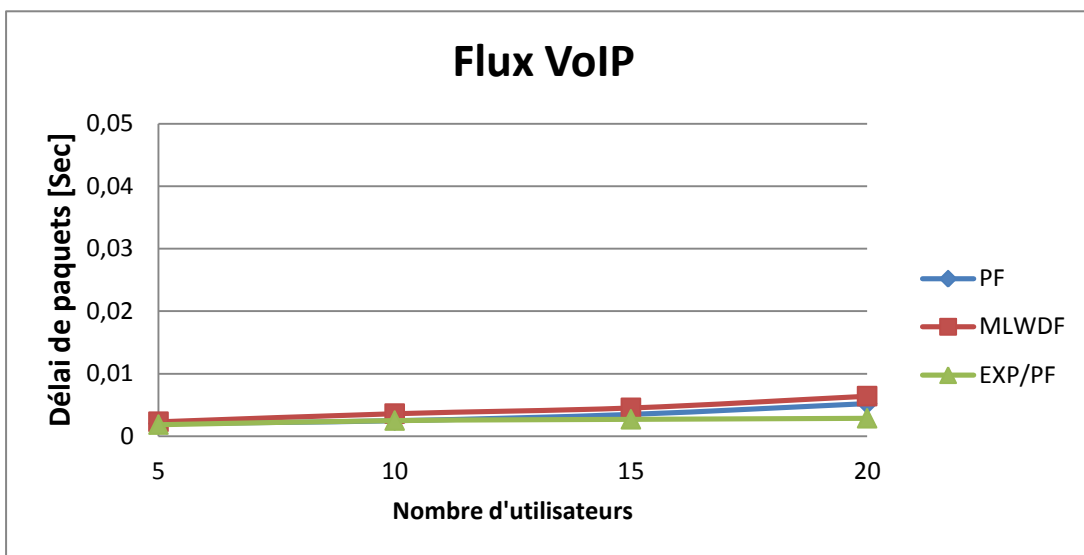


Figure III. 19: Evolution du délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs.

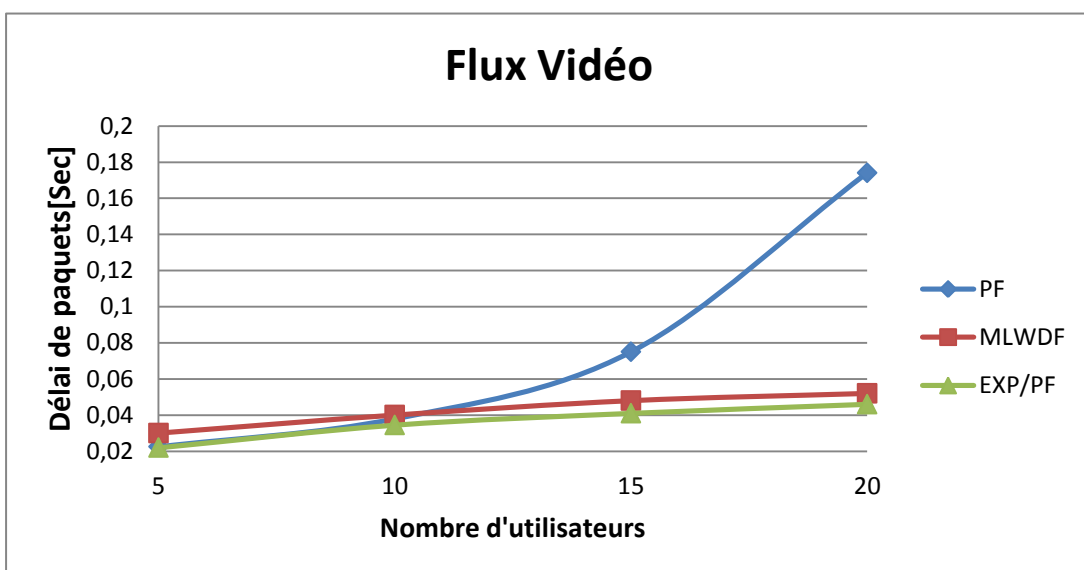


Figure III. 18: Evolution du délai pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UE.

2.3.3.2. Mesure du taux de perte de paquets (PLR)

a- Pour le flux VoIP.

Le taux de perte de paquets donné sur la figure III.20 montre que pour tous les algorithmes le Taux de perte de paquets (PLR) augmente avec l'augmentation du nombre d'utilisateur. Pour l'algorithme d'ordonnancement PF le taux de perte est de l'ordre de 5% pour 20 UEs, En revanche, les algorithmes EXP/PF et MLWDF présentent un taux de perte de paquets moins faible de l'ordre de 3% pour 20 utilisateurs.

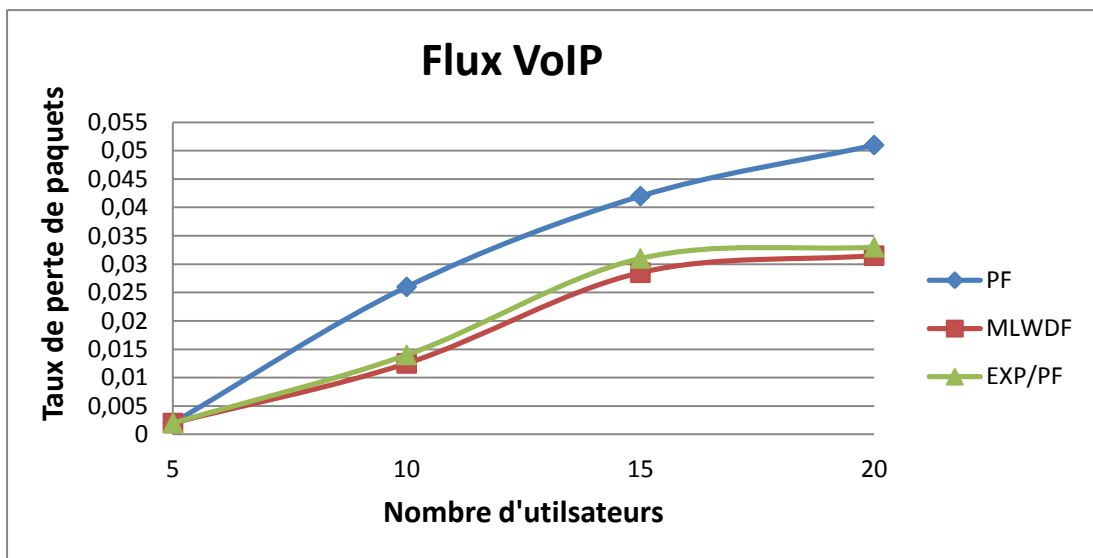


Figure III. 20: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs.

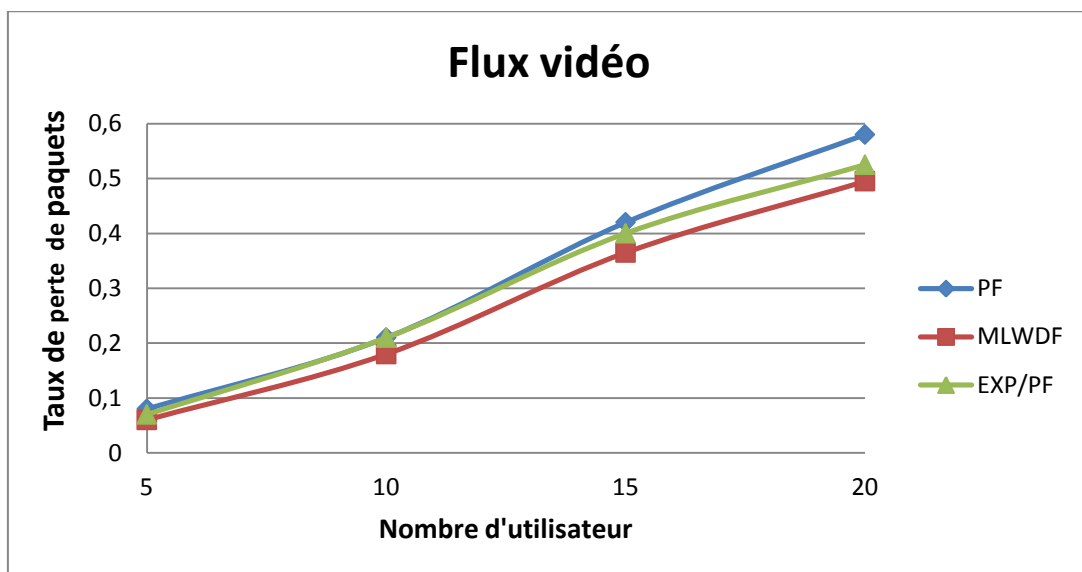


Figure III. 21: Evolution du PLR pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs.

b- Pour le flux Vidéo.

Le taux de perte de paquets pour le flux vidéo est donné sur la figure III.21, elle montre que le PLR du flux vidéo augmente avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs, et ce pour tous les algorithmes jusqu'à atteindre une valeur maximale de 50% pour l'algorithme MLWDF, 53 % pour l'EXP/PF et 58% pour l'algorithme PF. Ce grand taux de pertes présente aussi l'une des limites découvertes pour ces algorithmes et à qui nous devons apporter une solution.

2.3.3.3. Mesure du débit.

a- Pour le flux VoIP.

La figure III.22 montre que le débit des paquets pour le flux VoIP augmente de façon exponentielle selon le nombre d'utilisateurs, et c'est la même chose pour tous les algorithmes d'ordonnement.

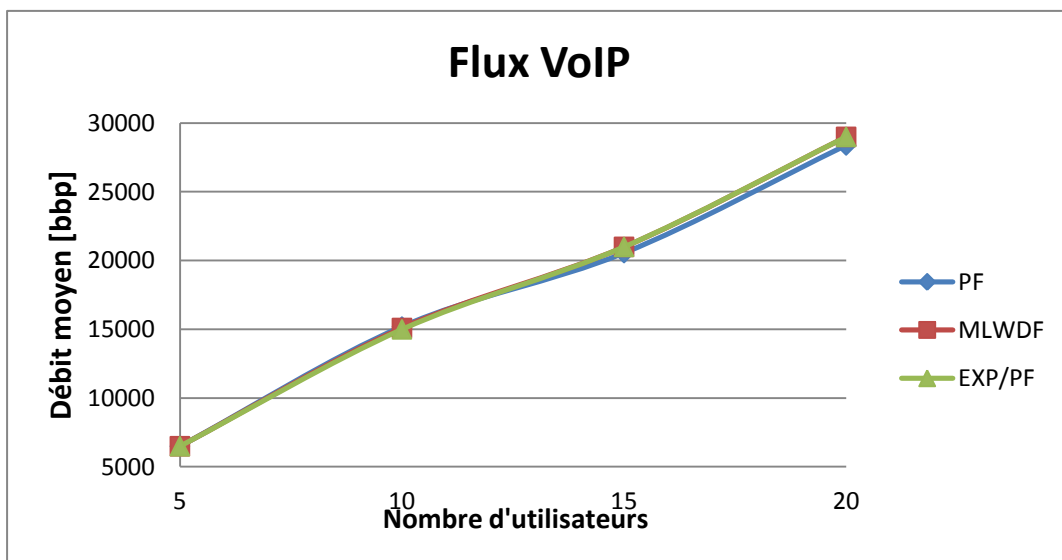


Figure III. 22: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs.

b- Pour le flux Vidéo.

Pour les algorithmes MLWDF et EXP/PF comme illustré sur la figure III.23, le débit des paquets pour le flux vidéo augmente selon le nombre d'utilisateurs. Pour l'algorithme PF, le débit commence à diminuer à partir de 15 utilisateurs avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs. L'algorithme MLWDF offre le meilleur débit, celui de 240 kbit/s pour 25 UEs.

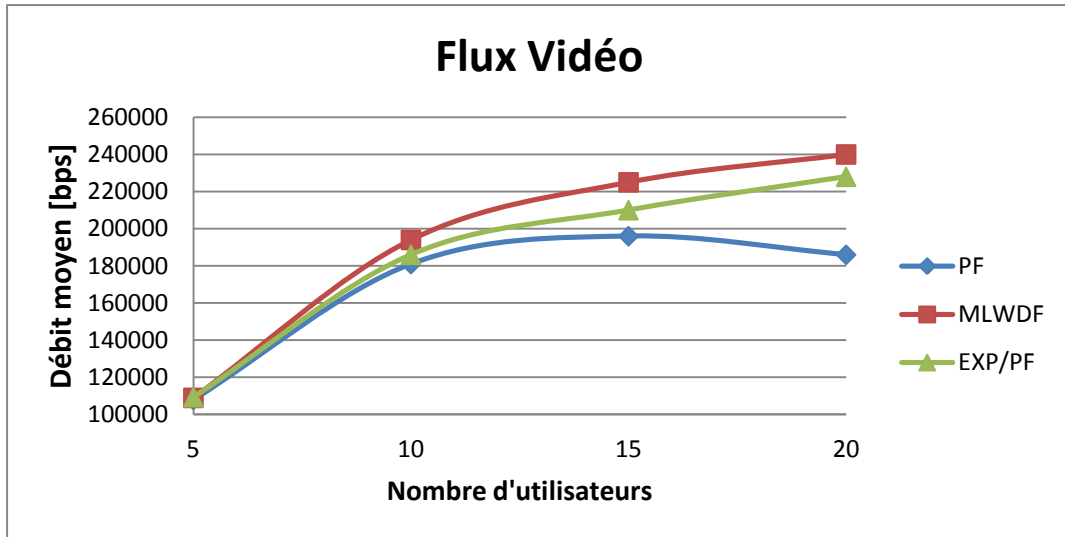


Figure III. 23: Evolution du débit pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs.

2.3.3.4. Mesure de l'efficacité spectrale.

L'efficacité spectrale de la cellule est montrée dans la figure III.24, elle est la plus basse pour l'algorithme d'ordonnancement PF, mais pour les algorithmes MLWDF et EXP/PF, elle est plus haute comparée avec celle du PF. Pour tous les algorithmes, la valeur de l'efficacité spectrale est tolérable puisqu'elle est située entre la valeur limite (0,04 b/s/Hz) et la valeur moyenne (1,8 b/s/Hz).

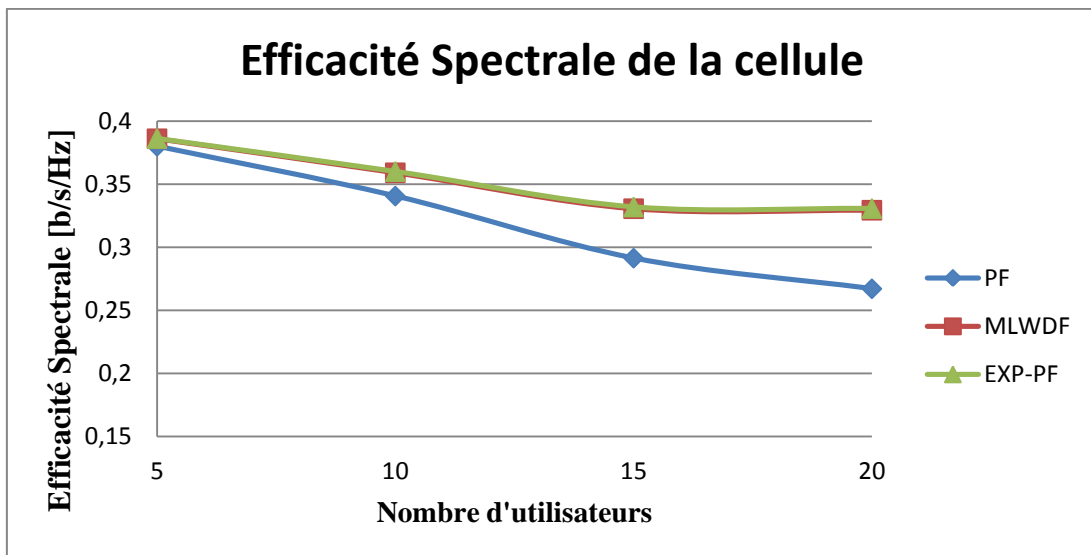


Figure III. 24: Evolution de l'efficacité spectrale en fonction du nombre d'utilisateurs.

2.3.4. Bilan :

Dans cette partie nous avons comparé les performances du réseau LTE dans le cas d'un environnement macro en présence des cellules femto. Les résultats obtenus dans cette simulation sont considérés pour les mêmes algorithmes d'ordonnancement évalués précédemment en utilisant le même

simulateur, et finalement, nous avons constaté que les algorithmes MLWDF et EXP/PF ont montré de meilleures performances pour les deux types de flux, alors que, pour l'algorithme PF et en raison de son large délai, son grand taux de perte de paquets et son faible débit, il ne justifie pas de bonnes performances.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons procédé à une comparaison des performances du réseau LTE pour différents cas de scénarios. Ces résultats ont été obtenus pour différents algorithmes d'ordonnancement qui sont évalués en utilisant le simulateur de réseau LTE-SIM. L'examen des différents résultats obtenus permet de constater que l'algorithme MLWDF ressort globalement et relativement vainqueur des trois algorithmes d'ordonnancement comparés en termes de débit moyen dans la cellule, de délai de paquets, de taux de pertes des paquets et d'efficacité spectrale. Cependant et en dépit de sa supériorité globale sur les autres ordonnanceurs, l'algorithme MLWDF présente néanmoins de nettes limitations de performances en matière de taux de perte de paquets pour le flux vidéo dans les cas de la haute mobilité, de la haute congestion et dans celui des cellules femto. Cette limitation de performance a été constatée aussi sur le délai de paquets pour le cas de la haute mobilité.

Le nouvel algorithme d'ordonnancement que nous avons développé et que nous présentons dans le chapitre suivant est basé justement sur l'algorithme MLWDF et se présente comme une correction et une amélioration de ce dernier. En effet notre algorithme doit combler les lacunes de performance de l'algorithme MLWDF et les améliorer et ce pour les différents scénarios d'études considérés. Le grand taux de perte de paquets constaté pour l'algorithme MLWDF est relativement lié au délai d'attente des paquets dans la file d'attente. Ce délai, s'il dépasse un certain seuil maximal, provoquera automatiquement l'annulation et la suppression du flux en question et engendrera en conséquence une augmentation du taux de perte des paquets. Pour remédier à ce problème la solution consiste à se pencher sur la métrique utilisée par l'ordonnanceur MLWDF, la modifier convenablement de manière à optimiser l'allocation des ressources vis à vis des UEs qui se trouvent dans de mauvaises conditions de canal sans pour autant défavoriser les UEs se trouvant dans de bonnes conditions de canal. C'est le but ultime visé par notre proposition d'algorithme d'ordonnancement présentée et explicitée dans le chapitre IV suivant.

CHAPITRE IV : Evaluation des performances de l'algorithme proposé.

Introduction :

Le degré de satisfaction d'un utilisateur ou d'une application est en relation directe avec le niveau de qualité de service qui leur est assurée. Avant de penser à proposer un nouvel algorithme d'ordonnancement, nos travaux ont débuté par une réflexion approfondie sur les objectifs à viser dans l'allocation de ressources LTE et sur la manière optimale de vérifier dans quelle mesure ils sont éventuellement atteints. En fait l'étude comparative menée dans le chapitre III, nous a permis de relever les objectifs les plus prétentieux qui doivent être relevés sur le nouvel algorithme à savoir :

- ✓ La différenciation de services afin de satisfaire correctement les besoins des nouvelles applications multimédia apparues.
- ✓ L'augmentation de la capacité globale du réseau LTE pour faire face au nombre croissant d'utilisateurs et à aux applications gourmandes en ressource radio.
- ✓ La gestion de la mobilité intracellulaire afin de garantir la même qualité de service à tout endroit de la cellule.
- ✓ La résolution du problème de manques de couverture dans les locaux et les zones non couvertes via l'implémentation de la cellule femto.

Cependant, la qualité de service dépend de plusieurs critères comme le retard de paquets, le taux de perte de paquets, le débit et l'efficacité spectrale. La mesure de ces paramètres donnerait une information pertinente permettant de déterminer efficacement le niveau de QoS fourni à plusieurs flux d'applications multimédias et de ce fait, permettrait d'évaluer et de comparer correctement les performances données par les différents ordonnanceurs.

Plusieurs travaux de recherche ont proposé ces dernières décennies des algorithmes d'ordonnancement efficaces à implémenter dans l'eNodeB du réseau LTE. Mais la plupart entre eux montrent de bonnes performances dans certains contextes et des faiblesses dans d'autres. Ces algorithmes sont souvent conçus en visant différents objectifs et leurs performances sont généralement données par leurs concepteurs en fonction de critères distincts qui dépendent des spécificités de chaque algorithme [104-106-107-108-109-110].

Dans ce chapitre, nous commencerons par décrire le principe de fonctionnement de notre nouvel algorithme qui s'est inspiré de l'algorithme MLWDF. Nous évaluerons ces performances en les comparant à celles des algorithmes les plus connus et qui sont déjà mentionnés dans le chapitre précédent à savoir PF, MLWDF et EXP-PF, et pour une comparaison plus étendue, d'autre

algorithmes, basés sur les étalons sélectionnés, ont été ajoutés au champ de comparaison de notre algorithme, à savoir l'EXP-Rule et le LOG-Rule [126][Annexe I]. Ces performances ont été mesurées pour différents cas de scénarios à savoir le cas de mobilité normal avec un nombre d'utilisateurs réduit, celui de la haute congestion, celui de la haute mobilité et celui des cellules femto.

1. L'algorithme d'ordonnement Proposé.

1.1. Principe de fonctionnement de l'algorithme proposé.

Dans les communications radio mobile les conditions de canal jouent un rôle primordial dans la maximisation des performances des utilisateurs. Avec l'algorithme MLWDF, les UEs qui possèdent souvent de mauvaises conditions de canal traduite par une faible valeur de CQI (Channel Quality Indicator) sont pénalisés et risquent de ne pas être servis durant plusieurs TTIs successifs et, par la suite, leurs paquets seront supprimés de la queue MAC. Pour garantir plus d'équité globale entre les UEs sur l'intervalle de temps TTI, nous avons pensé à améliorer l'algorithme MLWDF en proposant un nouvel algorithme qui utilise une pondération régulatrice de sa métrique pour favoriser les UEs non servis auparavant afin qu'ils le seront dans le ou les prochains TTIs.

Le principe de fonctionnement de notre algorithme consiste donc à maximiser le débit global dans le secteur de la cellule tout en prenant en considération les informations sur l'état du buffer. Profitant des diversités multiutilisateurs et fréquentielles, notre ordonnancement alloue constamment la ressource radio à l'utilisateur qui a la meilleure condition de canal et par conséquent qui permettrait d'obtenir le meilleur débit sur chaque bloc de ressource (RB), tout en garantissant un délai d'attente acceptable pour les utilisateurs qui ne bénéficient pas d'une meilleure condition canal.

Dans ce qui suit, nous désignons par $W_{i,j}$ la métrique assignée au flux de données i pour le $j^{\text{ème}}$ sous-canal (RBj). Les algorithmes d'ordonnement diffèrent dans la manière avec laquelle cette métrique est calculée. L'ordonnancement veille à assigner le $j^{\text{ème}}$ bloc de ressource (RBj) au flux de données qui a la plus grande métrique $W_{i,j}$. Pour calculer la métrique, notre algorithme a souvent besoin de connaître le débit moyen de transmission des données R_i de l' $i^{\text{ème}}$ flux de données, et le débit instantané disponible de l'UE de destination pour le $j^{\text{ème}}$ bloc de ressource (RBj). Cette information est importante vu que la métrique va prendre en compte la performance garantie dans le passé pour chaque flux de données dans le but d'avoir une certaine répartition équitable. En fait, lors de l'allocation d'un BR, l'ordonnancement choisit l'UE qui possède la métrique la plus grande (dans ce BR).

Durant chaque TTI, l'ordonnancement est amené à affecter p RBs à n UEs actifs dans un même secteur d'une cellule selon un critère bien déterminé. Ce critère repose sur l'affectation du RBj ($1 \leq j \leq p$) à l'UEi ($1 \leq i \leq n$) dans le même TTI, qui possède la métrique la plus grande dans ce RB.

Chaque métrique exprime la priorité de chaque UE pour chaque RB donné le long du TTI. Une fois l'UE_i servi de k BR, le processus d'affectation des (p - k) RBs se répètera de la même manière pour les (n - 1) UEs actifs et non encore servis pendant le TTI courant. A titre illustratif, l'ensemble des métriques peut être représenté sous forme d'une matrice W à deux dimensions de taille (n × p) où :

$$W = \begin{pmatrix} W_{1,1} & \dots & W_{1,j} & \dots & W_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{i,1} & \dots & W_{i,j} & \dots & W_{i,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{n,1} & \dots & W_{n,j} & \dots & W_{n,p} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

- $w_{i,j}$ représente la métrique assignée au flux de données i pour le j^{ème} sous-canal (RBj).
- n représente le nombre d'UEs actifs dans le même secteur d'une cellule LTE donnée.
- p représente le nombre de BRs disponibles le long d'un TTI par secteur sur la totalité de la bande passante.

Dans le cadre de l'allocation des ressources par l'algorithme MLWDF, les paquets appartenant à un flux de données sont supprimés de la queue MAC s'ils ne sont pas transmis avant l'expiration de leur deadline. Cette opération est nécessaire pour éviter le problème de gaspillage de la bande passante. En contrepartie cette implémentation augmentera le taux de pertes de paquets, élargira le délai de paquets et diminuera le débit moyen des utilisateurs.

Afin de remédier à ce problème, notre nouvel algorithme propose une métrique composée du produit de deux facteurs, le premier facteur est celui mentionné dans l'algorithme MLWDF, contenant des informations favorisant les UEs bénéficiant d'une meilleure condition canal, à savoir le débit moyen de données estimé \bar{R}_i et le débit instantané disponible $r_{i,j}$ calculé par le module AMC (Adaptive Modulation and Coding) en prenant compte du CQI envoyé par l'UE hébergeant l'i^{ème} flux au j^{ème} sous-canal, ce facteur est exprimé comme suit :

$$W_i = \frac{(\alpha_i * r_{i,j})}{\bar{R}_i} \quad (4.2)$$

Avec :

- $\alpha_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i}$
- τ_i est le délai seuil.
- δ_i est la probabilité maximale pour que le délai dans la queue du paquet à transmettre dépasse τ_i .

Le deuxième facteur privilégie au fil du temps les utilisateurs dont la condition canal est mauvaise. Pour mieux gérer les situations de criticité où le délai d'attente $D_{HOL,i}$ sera proche de celui du délai maximal τ_i , une maximisation rapide de la valeur de ce facteur par l'introduction de la fonction exponentiel demeure essentielle, ce qui permet une réduction du taux de pertes de paquets. Ce facteur pourra être exprimé sous la forme suivante :

$$W_2 = \exp\left(\frac{\tau_i}{(\tau_i - D_{HOL,i})}\right) \quad (4.3)$$

La métrique $W_{i,j}$, de notre algorithme, égale au produit des deux facteurs décrits ci-dessus est donnée donc par la relation suivante :

$$W_{i,j} = W_1 \times W_2 = \frac{(\alpha_i * r_{i,j})}{\bar{R}_i} \exp\left(\frac{\tau_i}{(\tau_i - D_{HOL,i})}\right) \quad (4.4)$$

Où, rappelons-le :

- $r_{i,j}$ représente le débit instantané disponible.
- \bar{R}_i représente le débit moyen de données estimé.
- τ_i représente le délai seuil.
- δ_i est la probabilité maximale pour que le délai dans la queue du paquet à transmettre dépasse τ_i .
- $\alpha_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i}$
- $D_{HOL,i}$ représente le délai d'attente du paquet dans la file d'attente.

1.2. Implémentation de la nouvelle métrique dans le simulateur LTE-SIM.

Pour implémenter cette métrique dans le simulateur LTE-SIM, il a fallu utiliser le langage de programmation C++, à cette fin la partie du calcul de la métrique pour les flux temps réel est exprimée comme suit :

```
DL_Proposed_PacketScheduler::ComputeSchedulingMetric (RadioBearer *bearer,
double spectralEfficiency, int subChannel)
{
if ((bearer->GetApplication ()->GetApplicationType () ==
Application::APPLICATION_TYPE_TRACE_BASED)
//
(bearer->GetApplication ()->GetApplicationType () ==
Application::APPLICATION_TYPE_VOIP))
{
QoSFor_Proposed *qos = (QoSFor_Proposed*) bearer->GetQoSParameters ();

double a = (-log10 (qos->GetDropProbability())) / qos->GetMaxDelay ();
double b = (spectralEfficiency * 180000.) / bearer->GetAverageTransmissionRate ();
double HOL = bearer->GetHeadOfLinePacketDelay ();
double c = exp ( qos->GetMaxDelay () / (qos->GetMaxDelay () - HOL));

double metric = (a * b *c);
}
return metric;
}
```

NB : Pour les flux de données Best Effort, la métrique considérée est celle de l'algorithme d'ordonnement PF.

1.3. Modèle du trafic et du canal de simulations.

- Modèle du trafic.

Le trafic généré par les applications sources au niveau de l'équipement eNodeB sera transporté vers le classificateur pour le classer selon son type de QoS correspondant. Des en-têtes de niveau transport sont ajoutés au paquet avant d'être reçu par le classificateur. Le protocole de transport utilisé est UDP. Chaque file (bearer) fonctionne selon le mode FIFO (First In First Out). Au moment où le paquet est classé selon son type de services, un entête du protocole PDCP est ajouté. Puis une fonction de compression selon le protocole ROHC (Robust Header Compression) est exécutée. L'en-tête RLC et MAC sont par la suite ajoutés.

Les paquets acheminés par un bearer radio dédié sont créés au niveau de la couche Application par l'un des générateurs du trafic suivants:

- **Le générateur traced-based :** sert à envoyer les paquets suivant un modèle réaliste de trace de

fichiers vidéo. Dans cette simulation, une source de service vidéo fournit des données avec un débit de 242 kbps.

- **Le générateur VoIP** : produit les flux G.729 pour la voix. Quoique, sous LTE-Sim, la voix est modélisée par un modèle de chaîne de Markov ON/OFF.

- **Le générateur Infinite Buffer** : spécifie une source qui a toujours des données à envoyer. Ce générateur permet la modélisation du trafic des classes du service best effort (BE).

- **Le modèle du canal.**

Le modèle de perte de propagation LTE est composé de 4 modèles différents (shadowing, trajets multiples, perte de pénétration et les pertes dues au chemin traversé).

- Pathloss : $PL = 128.1 + 37.6 \cdot \log(d)$ où d est la distance entre l'UE et l'eNodeB en km.

- Multitrajet : modèle de Jakes.

- Pénétration Loss : Les pertes de pénétration sont fixées à 10dB.

- Shadowing : Modélisés par une distribution de loi normale logarithmique de moyenne 0 et de déviation standard égal à 8 dB.

2. Présentation et interprétation des résultats de simulation.

Dans cette section, nous allons évaluer et analyser les performances de l'algorithme proposé en comparant ses performances avec celle des algorithmes étudiés dans le chapitre précédent, ainsi qu'avec d'autres algorithmes récemment développés. Pour se faire, nous avons considéré 4 cas de scénarios :

- 1- Le cas d'une cellule Macro avec interférence pour une situation normale (mobilité normale, trafic normal).
- 2- Le cas d'une cellule Macro avec interférence pour le cas de forte congestion du trafic.
- 3- Le cas d'une cellule Macro avec interférence dans le cas de la haute mobilité utilisateur.
- 4- Le cas d'une cellule Macro avec des cellules Femto.

2.1. Scénario d'une mobilité normale.

2.1.1. Formulation de problématique et justification.

Le standard LTE vise à offrir de bonnes performances en termes de débit, de délai, de taux de perte de paquets et d'efficacité spectrale. Pour se faire, LTE met en œuvre un mécanisme clé faisant

partie des mécanismes de gestion des ressources radio RRM (Radio Ressource Management), il s'agit de l'ordonnancement des paquets PS (Packets Scheduling), l'attribution des ressources radio fait appel à cet ordonnanceur qui est implémenté au niveau de l'eNodeB. Plusieurs ordonnanceurs ont été développés dans la littérature et dont le but est d'améliorer les performances du réseau en matières de qualité de service surtout pour les flux temps réel à savoir la VoIP et la Vidéo. Le but de cette simulation est d'évaluer les performances de notre algorithme proposé dans le cadre de cette thèse. Cette évaluation est effectuée à l'aide du simulateur réseau LTE-SIM pour les flux VoIP et vidéo. Les critères de performances choisis sont le débit, le délai de transmission, le taux de perte de paquets et l'efficacité spectrale [122].

2.1.2. Scénario et paramètres de simulation.

Dans notre simulation, nous nous plaçons dans le même environnement que celui décrit dans le chapitre précédent, le cas d'une seule cellule d'étude en présence de deux autres jouant le rôle de sources d'interférence pour la première. La cellule d'étude est choisie avec une couverture de 1km de rayon. Le nombre d'utilisateurs de la cellule est choisi dans l'intervalle [5-25]. Les utilisateurs se déplacent dans la cellule selon le modèle de mobilité «Random_Walk » avec une vitesse de 3km/h. Chaque utilisateur reçoit un flux vidéo H.264, un flux de VoIP, et un flux « best effort » modélisé par un tampon (buffer) infini.

Les paramètres de simulation choisis sont consignés dans le tableau IV.1 :

Tableau IV. 1: Paramètres de simulation pour le scénario d'une mobilité normale.

| Paramètres du scénario d'étude | Valeur |
|---------------------------------------|---------|
| Durée de simulation | 120s |
| Durée de flux | 120s |
| Structure de la trame | FDD |
| Vitesse du mobile | 3km/h |
| Couverture de la cellule (rayon) | 1Km |
| Bande passante | 20MHz |
| Durée du slot | 0.5ms |
| Temps d'ordonnancement (TTI duration) | 1ms |
| Nombre de blocs de ressource | 100 |
| Délai maximal | 0.1s |
| Débit du flux vidéo | 242kbps |
| Débit du flux VoIP | 8.4kbps |
| Nombre minimal d'utilisateurs | 5 |
| Nombre maximal d'utilisateur | 25 |
| Intervalle entre utilisateurs | 5 |

2.1.3. Résultats de simulation.

2.1.3.1. Mesure du délai de paquet.

- Pour le Flux VoIP.

La Figure IV.1 montre que l'algorithme proposé présente un délai beaucoup plus faible que celui du MLWDF dont il s'est inspiré, justifiant ainsi l'amélioration de la vitesse de traitement des paquets. En fait, les UE qui ne bénéficient pas d'une meilleure condition canal ne seront pas trop tarder pour être servis que ce soit dans le TTI suivant ou dans les prochains TTIs. Pour tous les algorithmes le délai de transmission est faible et ne dépasse pas 2,5 ms pour 25 UE sauf pour le MLWDF qui présente un délai de 4 ms pour 25 UE.

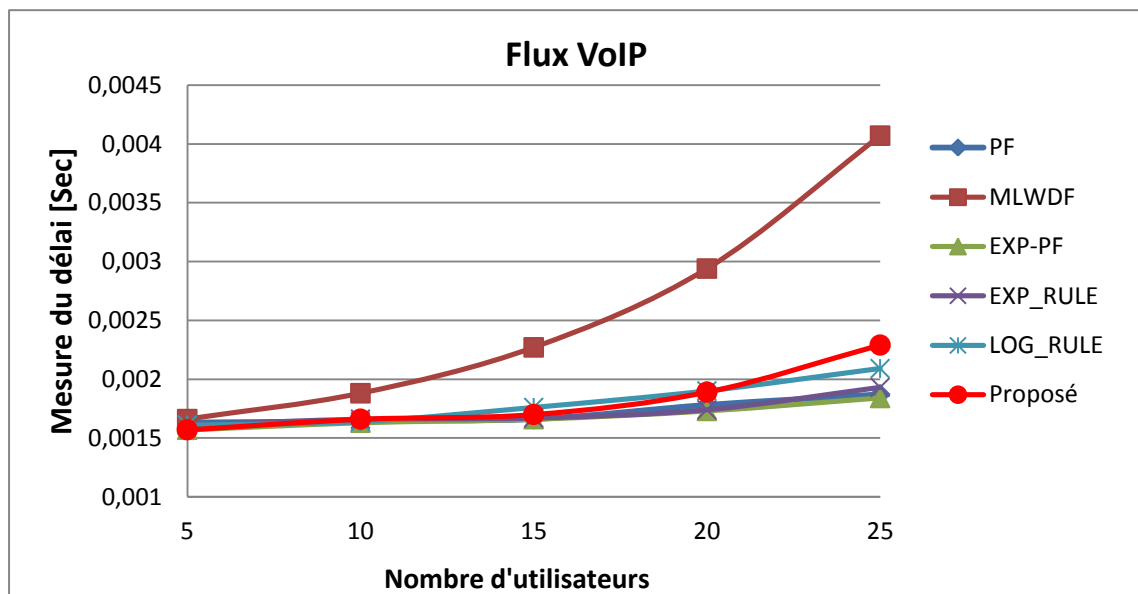


Figure IV. 1: Evolution du délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs. Pour le cas d'une mobilité normale.

- Pour le flux Vidéo.

Comme on peut le constater sur la figure IV.2, le délai pour le flux vidéo pour notre algorithme ainsi que pour l'algorithme EXP-Rule est le plus faible malgré l'augmentation du nombre d'UEs dans la cellule, le même comportement s'est observé pour les algorithmes Log-Rule, EXP/PF et MLWDF sauf que leur délai est un peu plus supérieur que celui proposé. Pour les algorithmes EXP-PF, MLWDF et LOG-Rule, le délai suit le même comportement que celui de notre algorithme sauf que sa valeur est un peu plus supérieure à celle de l'algorithme proposé. Quant à l'algorithme PF, son délai commence à évoluer d'une manière exponentielle au-delà de 15 UE jusqu'à s'avérer intolérable à partir 20 utilisateurs.

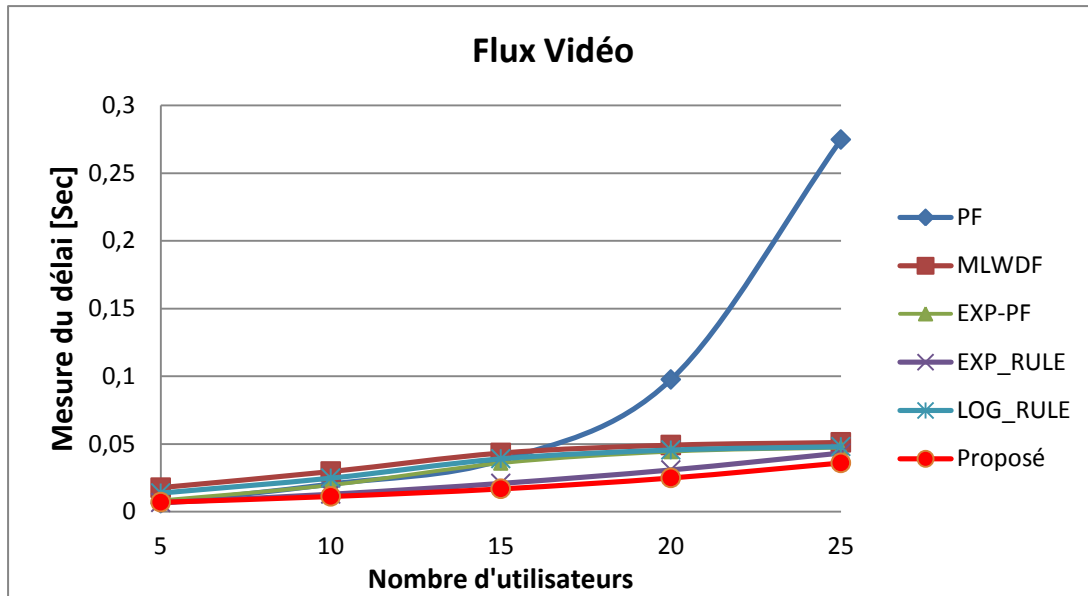


Figure IV. 2: Evolution du délai pour le flux vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale.

2.1.3.2. Mesure du taux de perte de paquets (PLR)

- Pour le flux Voix sur IP.

Comme le montre la figure IV.3, pour tous les algorithmes, le taux de perte de paquets reste minimal pour un nombre d'UE compris entre 5 et 25. Notre algorithme est considéré parmi ceux qui offrent relativement le meilleur taux de perte de paquets à savoir le PF qui est pratiquement insignifiant pour le nombre d'utilisateur compris entre 5 et 25.

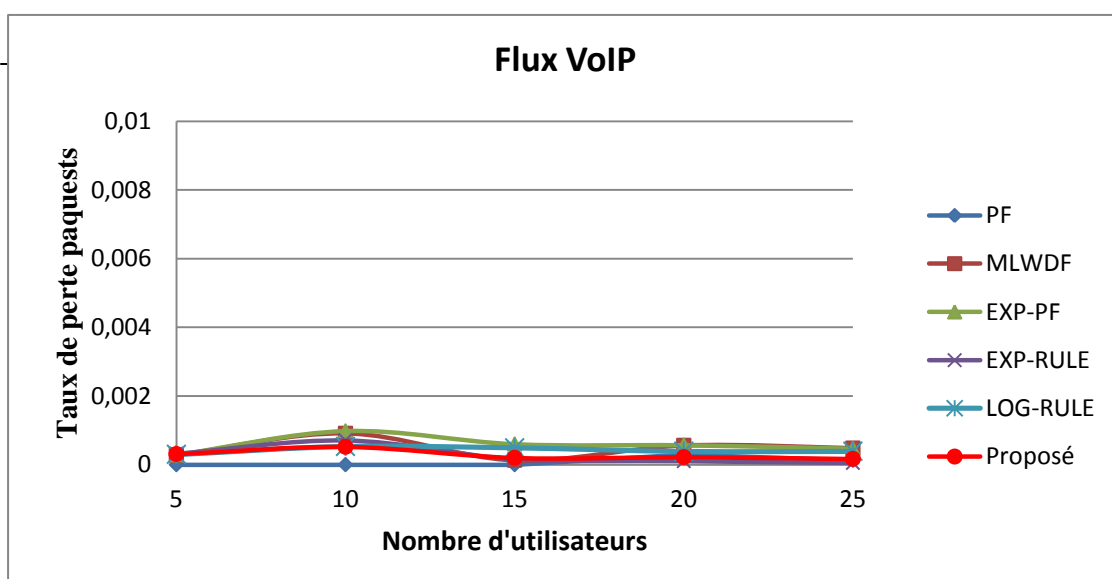


Figure IV. 3: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale.

- **Pour le flux Vidéo.**

Comme on peut le voir sur la figure IV.4, Le taux de perte de paquets pour une transmission vidéo est supérieur à celui mesuré précédemment pour une transmission VoIP. Le taux de perte de paquets pour l'algorithme proposé ainsi que pour celui de l'EXP-Rule est le plus faible et semble être insensible à l'augmentation des UEs dans la cellule. Pour l'algorithme PF, MLWDF, EXP/PF et LOG-Rule le taux de perte de paquets est plus élevé et augmente d'une manière exponentielle avec le nombre d'utilisateurs présents dans la cellule et ce à partir de 10 UEs. L'algorithme PF présente le plus grand taux de pertes pour 25 utilisateurs qui est de 47 %.

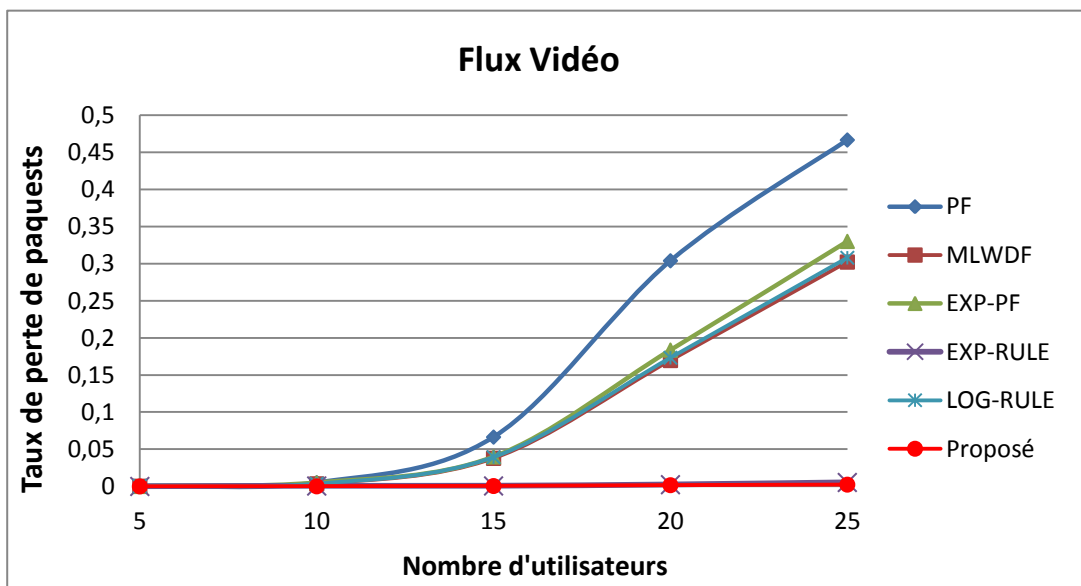


Figure IV. 4: Evolution du PLR pour le flux vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale.

2.1.3.3. Mesure du débit.

- **Pour le flux voix sur IP.**

La figure IV.5 témoigne d'une augmentation exponentielle du débit de paquet du flux VoIP pour tous les algorithmes. Ces derniers s'avèrent très comparables et témoignent de mêmes performances vis-à-vis ce type de flux. C'est la diversité multiutilisateur qui permet d'utiliser efficacement toutes les fréquences de la bande. Plus le nombre de mobiles est important, plus la distribution de ressources radio est adéquate et donc une meilleur exploitation de la bande.

- **Pour le flux Vidéo.**

Comme le montre la figure IV.6, l'algorithme proposé et celui de l'EXP-Rule sont très comparables en termes de performance de débit qui est le plus grand pour le flux vidéo, ce débit augmente en fonction du nombre d'utilisateurs actifs présents dans la cellule. Pour les algorithmes MLWDF, EXP/PF et LOG-Rule ils ont le même comportement sauf que leur débit devient plus faible

que celui de l'algorithme proposé à partir de 15 utilisateurs. Pour l'algorithme PF, son débit évolue aussi dans le même sens que celui des autres algorithmes, mais il présente une décroissance à partir de 15 utilisateurs. En fait, plus le nombre d'utilisateurs est élevé plus il y a de chance de trouver un utilisateur bénéficiant d'une meilleure condition canal et réalisant un gain élevé.

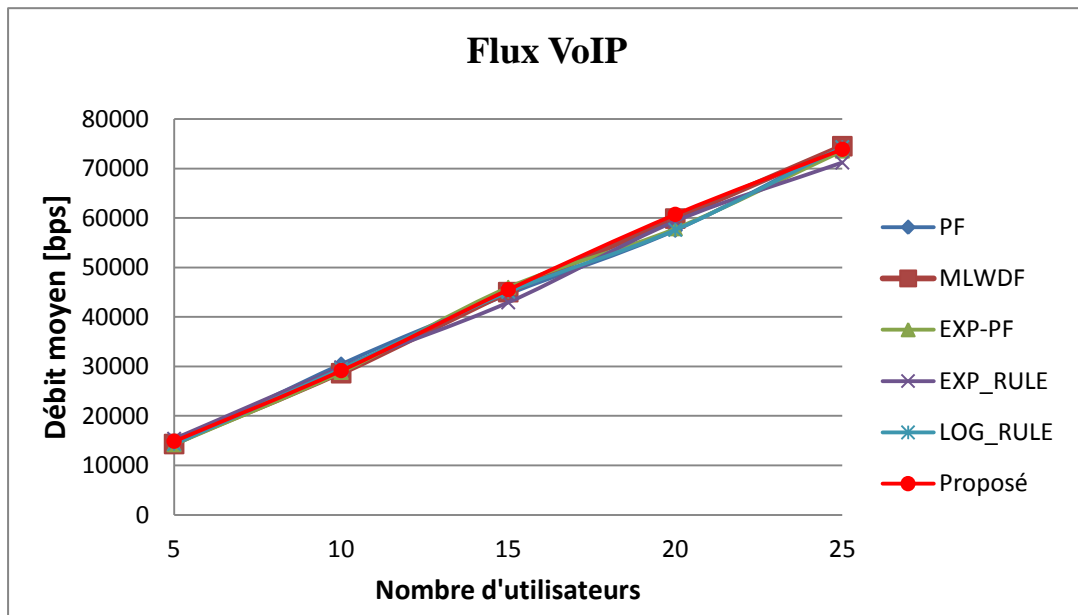


Figure IV. 5: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale.

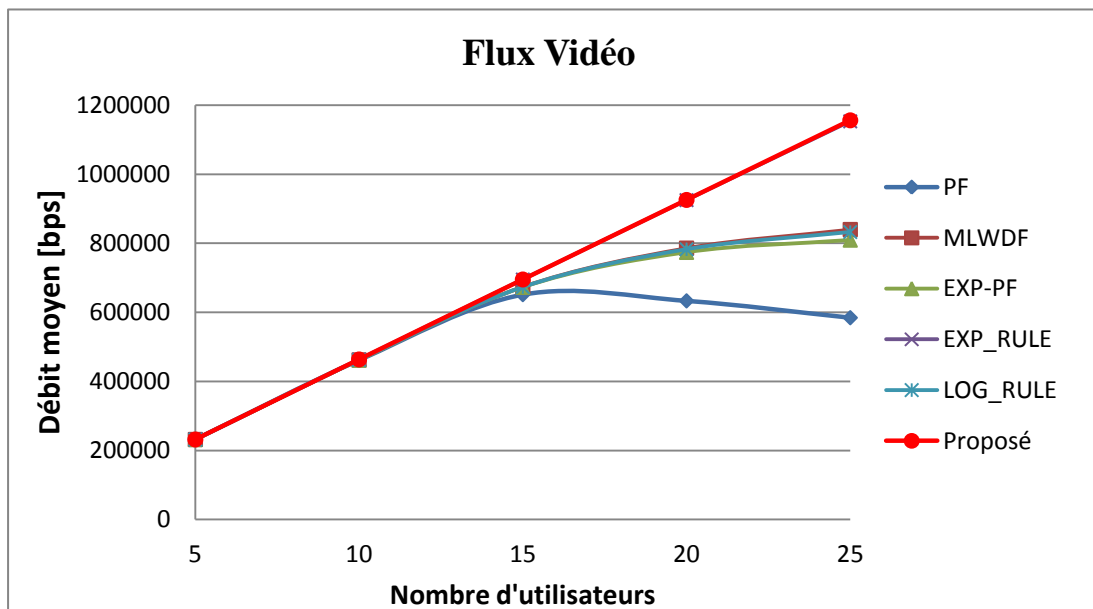


Figure IV. 6: Evolution du débit pour le flux vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale.

2.1.3.4. Mesure de l'efficacité spectrale.

Comme le montre la figure IV.7, l'algorithme PF est celui qui présente l'efficacité spectrale la plus faible comparée à celle mesurée pour les autres algorithmes. Pour notre algorithme son efficacité spectrale est comparable à celle des algorithmes EXP-Rule, Log-Rule, MLWDF et EXP/PF. L'algorithme MLWDF offre la meilleure valeur d'efficacité spectrale. Cette dernière, pour tous les algorithmes, décroît à mesure que le nombre d'utilisateurs croît en se situant entre la valeur moyenne (1,8 b/s/Hz) et celle limite (0,04 b/s/Hz) comme spécifié par l'organisme 3GPP.

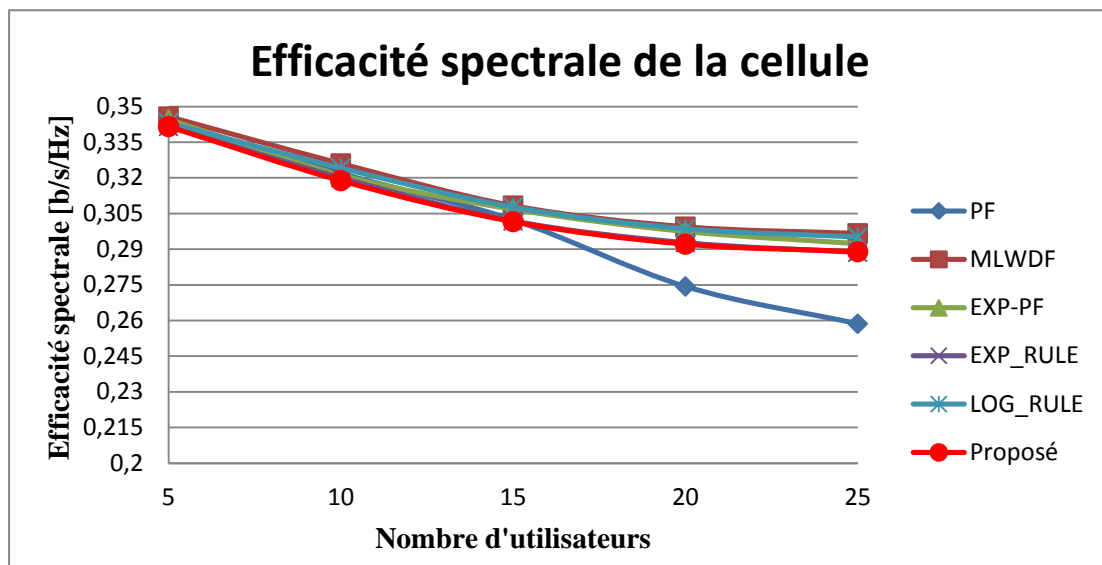


Figure IV. 7: Evolution de l'efficacité spectrale de la cellule en fonction du nombre d'UEs pour le cas d'une mobilité normale.

2.1.4. Bilan :

Les résultats de simulation précédents permettent de conclure que notre algorithme ressort globalement et relativement vainqueur des autres algorithmes pour le flux Vidéo alors qu'il garde les mêmes performances que les autres algorithmes pour le flux VoIP. Donc on peut dire que notre algorithme dans le cas d'une mobilité normale et en présence d'un nombre d'utilisateurs inférieur à 25 UEs, satisfait à lui seul toutes les performances requises du réseau LTE.

2.2. Scénario de la haute congestion.

2.2.1. Formulation de problématique et justification.

Parmi les objectifs du standard LTE, le maintien de service pour un grand nombre d'utilisateurs. Le but de cette simulation donc est d'évaluer les performances de l'algorithme proposé en présence d'un grand nombre d'utilisateurs allant de 25 UE à 100 UE. Pour cela, à l'aide du simulateur réseau LTE-SIM, nous avons comparé une fois de plus les performances de notre

algorithme avec celles des algorithmes d'ordonnement PF, EXP-PF, LOG-Rule, EXP-Rule et MLWDF, et ce pour les flux temps réel VoIP et vidéo. Les critères de performance choisis sont le débit, le délai de transmission, le taux de perte de paquets et l'efficacité spectrale.

2.2.2. Scénario et paramètres de simulation.

Dans notre simulation, nous nous plaçons dans le même environnement que précédemment, celui de trois cellules. La cellule d'étude est aussi choisie avec une couverture de 1 km de rayon. Le nombre d'utilisateurs de la cellule est choisi cette fois-ci dans l'intervalle [25-100]. Les utilisateurs se déplacent dans la cellule selon le modèle de mobilité «Random_Walk » avec une vitesse de 3 km/h. Chaque utilisateur reçoit un flux vidéo H.264, un flux de VoIP, et un flux « best effort » modélisé par un tampon (buffer) infini.

Les paramètres de simulation choisis dans ce scénario sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 2: Paramètres de simulation pour le cas de la haute congestion.

| Paramètres du scénario d'étude | Valeur |
|------------------------------------|---------|
| Durée de simulation | 120s |
| Durée de flux | 120s |
| Structure de la trame | FDD |
| Vitesse du mobile | 3km/h |
| Couverture de la cellule (rayon) | 1Km |
| Bande passante | 20MHz |
| Durée du slot | 0.5ms |
| Temps d'ordonnement (TTI duration) | 1ms |
| Nombre de blocs de ressource | 100 |
| Délai maximal | 0.1s |
| Débit du flux vidéo | 242kbps |
| Débit du flux VoIP | 8.4kbps |
| Nombre minimal d'utilisateurs | 25 |
| Nombre maximal d'utilisateur | 100 |
| Intervalle entre utilisateurs | 25 |

2.2.3. Résultats de simulation.

2.2.3.1. Mesure du délai de paquets.

- Pour le Flux VoIP.

La figure IV.8 montre que pour un nombre d'utilisateurs entre 25 et 75 tous algorithmes présentent le même comportement concernant le délai, ce dernier évolue avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs. Notre algorithme offre le délai le plus faible pour un nombre d'utilisateurs entre 75 et 100 UEs. Pour l'algorithme PF, le délai commence à évoluer exponentiellement à partir de 75

UE jusqu'à atteindre 90 ms pour 100 UEs. Pour un nombre d'utilisateurs conséquent dans la cellule, ce délai s'avère nettement supérieur à celui mesuré pour un nombre inférieur à 25 UEs.

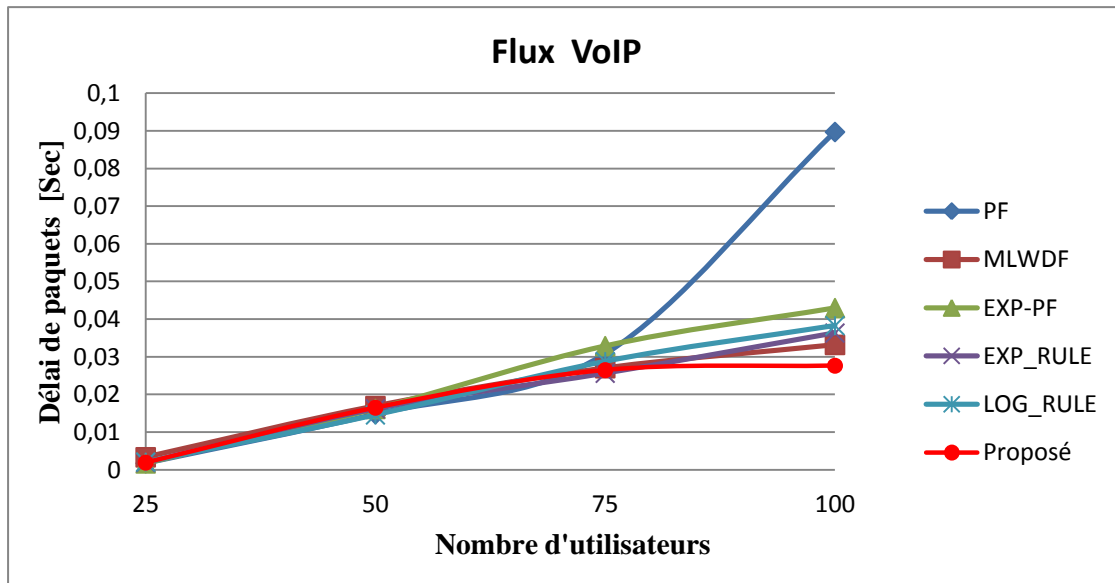


Figure IV. 8: Evolution du délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau.

- Pour le Flux Video.

Comme on peut le constater sur la figure IV.9, pour l'algorithme d'ordonnancement PF et comme ce qui a été observé pour le flux VoIP, le délai est en haute augmentation jusqu'à devenir intolérable avec une valeur du délai supérieur à 100 ms. Pour l'algorithme proposé ainsi que pour les autres algorithmes le délai reste le plus faible et s'avère négligeable et insensible à l'augmentation des UEs dans la cellule.

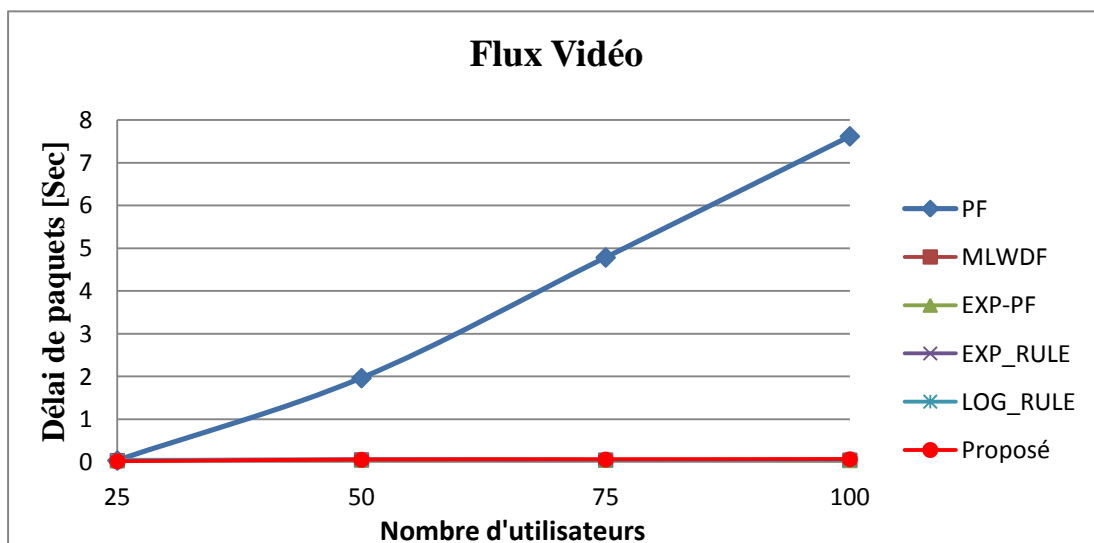


Figure IV. 9: Evolution du délai pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau.

2.2.3.2. Mesure du taux de perte de paquets (PLR).

- Pour le flux Voix sur IP.

Comme le montre la figure IV.10, pour tous les algorithmes, le taux de perte de paquets reste pratiquement insignifiant pour un nombre d'UE compris entre 25 et 50 UEs. Toutefois, au-delà de 50 UEs environ, les algorithmes LOG-Rule, EXP-PF et EXP-Rule montrent une croissance exponentielle du taux de perte de paquets surtout pour le Log-Rule qui a atteint 9% pour 100 UEs. Les algorithmes MLWDF et PF présentent le même comportement à partir de 75 UEs. Quant à notre algorithme, Le taux de perte de paquets reste négligeable indépendamment du nombre d'utilisateurs.

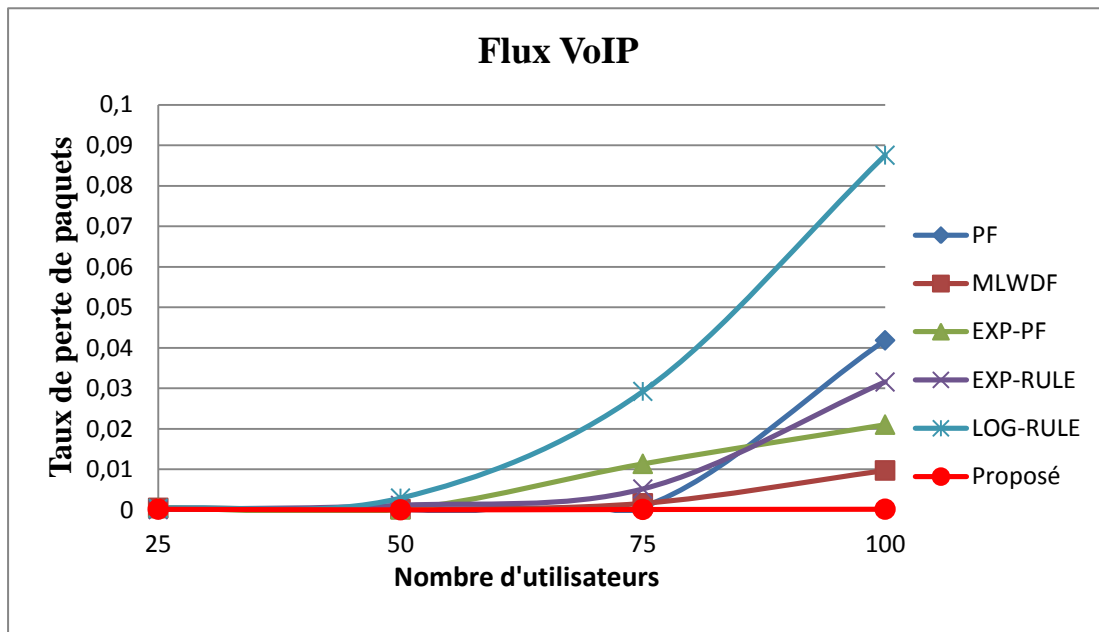


Figure IV. 10: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau.

- Pour le flux Vidéo

Comme on peut le voir sur la figure IV.11 ci-dessous, Le taux de perte de paquets pour une transmission vidéo est toujours supérieur à celui mesuré précédemment pour une transmission VoIP. Parmi les limites qu'on a cherché à apporter solution durant la phase d'évaluation des performances du chapitre précédent, celle du grand taux de pertes pour le cas d'un grand nombre d'utilisateurs. Et comme le montre la même figure, le taux de pertes offert par notre algorithme reste le plus faible malgré l'augmentation du nombre d'UEs. Pour un nombre de 100 UEs, le taux de pertes a été réduit à 53% pour celui proposé contre 83% pour le MLWDF et ce grâce à l'amélioration apportée sur ce dernier. L'algorithme LOG-Rule présente le taux de pertes le plus grand suivi par celui d'EXP-Rule.

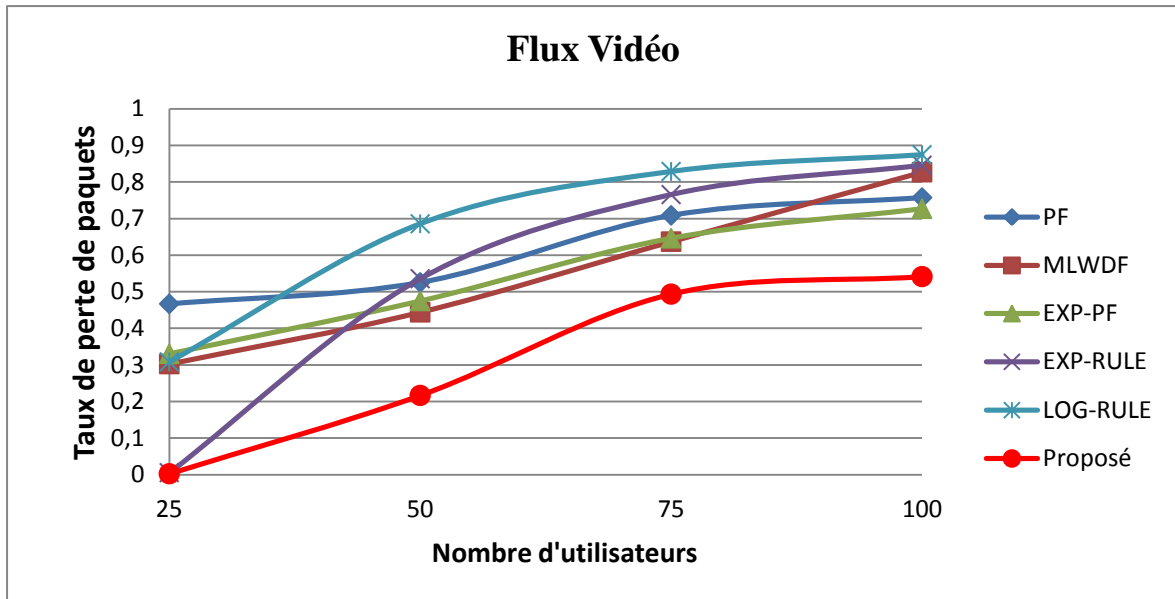


Figure IV. 11: Evolution du PLR pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau.

2.2.3.3. Mesure du débit.

- Pour le flux voix sur IP.

La figure IV.12 témoigne d'une augmentation exponentielle du débit de paquets du flux VoIP pour tous les algorithmes. Ces derniers ont le même comportement pour un nombre d'utilisateurs entre 25 et 75UEs, à partir de 75 UEs l'algorithme EXP-PF commence à avoir une décroissance du débit. Quant à notre algorithme, il témoigne les mêmes performances que celles des autres algorithmes.

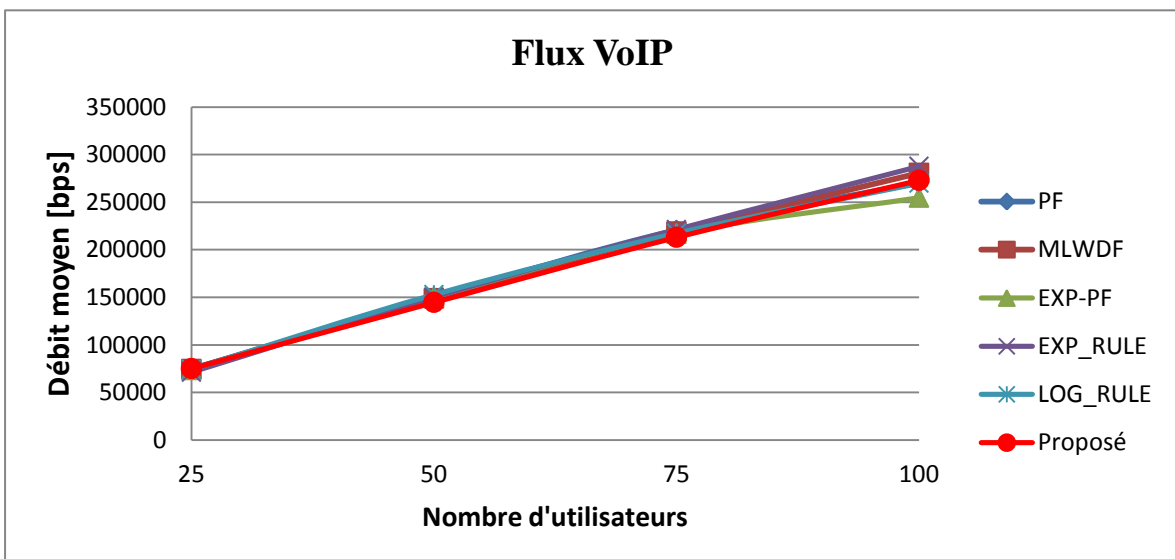


Figure IV. 12: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau.

- Pour le flux Vidéo.

Comme le montre la figure IV.13, l'algorithme proposé offre le plus grand débit pour le cas du flux vidéo, suivi par celui d'EXP-Rule. Les algorithmes EXP-PF, MLWDF et LOG-Rule sont très comparables en termes de performance de débit qui commence à diminuer à partir de 50 UEs en fonction du nombre d'UEs actifs présents dans la cellule. Pour l'algorithme PF, son débit décroît aussi dans le même sens que les autres algorithmes mais il est nettement inférieur. La décroissance du débit est due à l'indisponibilité des BRs suffisantes pour servir tous les utilisateurs.

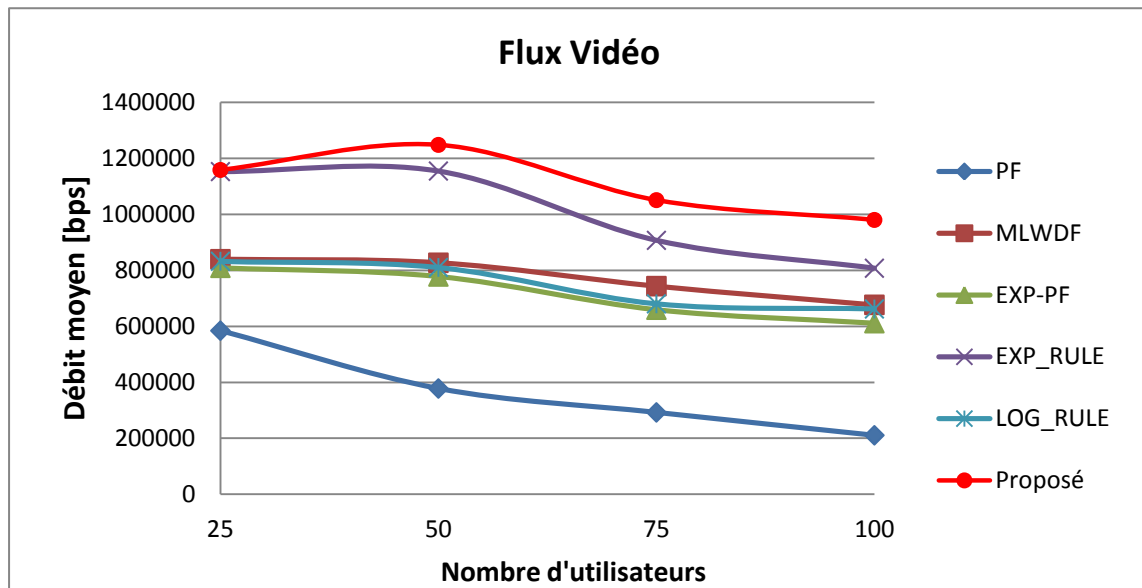


Figure IV. 14: Evolution du débit pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau.

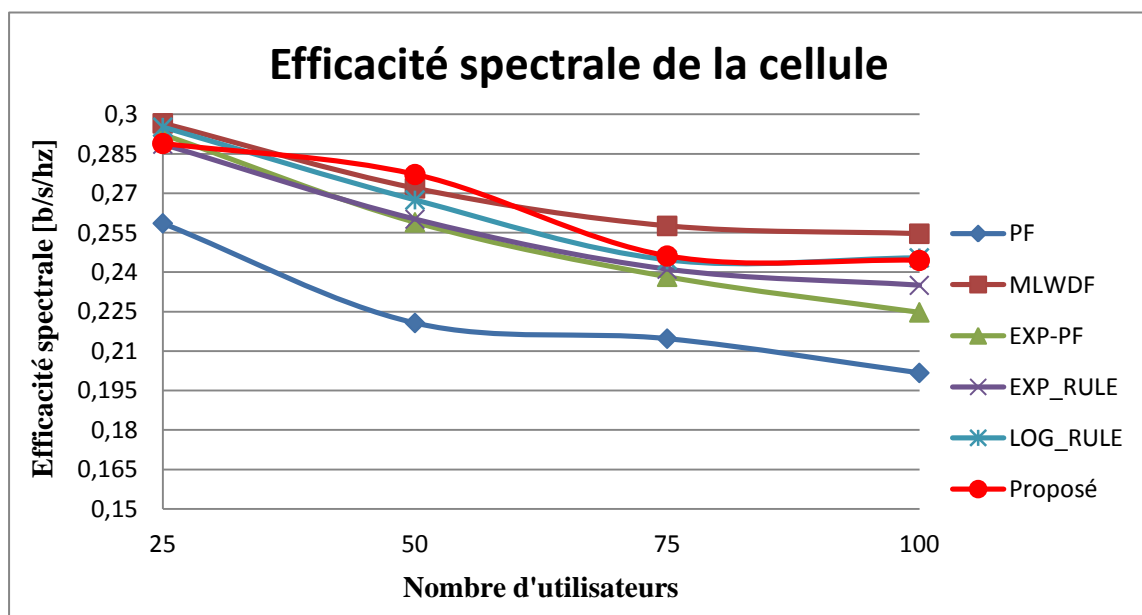


Figure IV. 13: Evolution de l'efficacité spectrale de la cellule en fonction du nombre d'UEs en période de haute congestion du trafic réseau.

2.2.3.4. Mesure de l'efficacité spectrale

Comme le montre la figure IV.14, notre algorithme présente une meilleure efficacité spectrale comparée à celle mesurée pour l'algorithme PF. Pour les algorithmes EXP-PF, Log-Rule et EXP-Rule et MLWDF, la valeur d'efficacité spectrale est comparable à celle de l'algorithme proposé. Cette efficacité décroît pour tous les algorithmes au fur et à mesure que le nombre d'utilisateurs croît.

2.2.4. BILAN :

Dans cette simulation, nous avons procédé à une comparaison des performances du réseau LTE dans le cas d'un grand nombre d'utilisateurs présents dans une cellule. Ce résultat est considéré pour différents algorithmes d'ordonnement y compris notre algorithme proposé. Cette évaluation a été effectuée au moyen du simulateur LTE-SIM. Les résultats obtenus permettent de constater que l'algorithme d'ordonnement proposé a pu démontrer sa capacité à gérer un grand nombre d'utilisateurs tout en offrant les meilleures performances en termes de débit, de délai, de taux de perte de paquets et d'efficacité spectrale. Et ce pour les flux VoIP et Vidéo.

Pour les algorithmes EXP-PF, EXP-Rule et MLWDF, ils ont montré des performances acceptables. L'algorithme LOG-Rule présente le taux de perte de paquets le plus grand pour les flux VoIP et Vidéo. Pour l'algorithme PF il n'est pas pratique pour le flux vidéo étant données ses faibles performances en matière de délai de paquets et de taux de perte de paquets.

2.3. Scénario de la haute mobilité.

2.3.1. Formulation et justification de problématique.

Dans un réseau radio mobile, la mobilité est un aspect difficile à gérer. Et comme montré dans le chapitre précédent, parmi les objectifs que notre algorithme doit atteindre est celui de la minimisation du taux de perte de paquets pour le flux vidéo. Dans cette simulation, on a traité le scénario de la haute mobilité dans le réseau LTE dans le but d'améliorer le niveau de QoS pour le trafic temps-réel. Pour cela, nous avons considéré le même scénario que dans le chapitre précédent, celui d'une autoroute au Maroc localisée dans une zone rurale, dont les stations mobiles circulent à une vitesse de 120 Km/h et se communiquent au travers des applications de type VoIP, transfert vidéo de type Visioconférence ou données de type Best Effort.

2.3.2. Scénario et paramètres de simulation.

Dans notre simulation et pour avoir les mêmes critères de comparaison, nous avons considéré encore une fois le cas d'une seule cellule avec interférences, nous avons utilisé un environnement à

trois cellules avec un rayon de 1 kilomètre et dans lequel un ensemble d'utilisateurs choisi dans la plage [5-25] sont uniformément en haute mobilité 120 km/h et sont distribués dans la cellule, les deux autres cellules étant une source d'interférence pour la première. Les UEs se déplacent dans la cellule suivant le modèle de mobilité de MANHATTAN [8]. Chaque utilisateur reçoit un flux vidéo H.264, un flux de VOIP, et un flux de données modélisé par le tampon Infinie.

Le but de cette simulation est d'évaluer les performances de notre algorithme dans le cas des utilisateurs en haute mobilité, Notre évaluation est basée sur des ordonnanceurs implémentés dans les stations de base du réseau LTE (PF, MLWDF, EXP-Rule, LOG-Rule et EXP/PF), et ce par la mesure du délai de transmission des paquets, du taux de perte de paquets (PLR), du débit et d'efficacité spectrale, les paramètres de simulation sont illustrés dans le tableau IV.3.

Tableau IV. 3: Paramètres de simulation dans le cas de la haute mobilité.

| Paramètres | Value |
|---|----------|
| La durée de Simulation | 120 s |
| La durée du flux | 120 s |
| La structure Trame | FDD |
| La vitesse des stations Mobile | 120 Km/h |
| Rayon de la cellule | 1 km |
| La bande passante | 20 MHz |
| La durée du Slot | 0.5 ms |
| Le temps d'ordonnancement (durée TTI) | 1 ms |
| Le Nombre de Bloque de ressources (RBs) | 100 |
| Le délai Maximal | 0.1 s |
| Le débit du flux Vidéo | 242 kbps |
| Le débit du flux Voix sur IP | 8.4 kbps |
| Le nombre minimal des utilisateurs | 5 |
| Le nombre maximal des utilisateurs | 25 |
| L'intervalle entre utilisateurs | 5 |

2.3.3. Résultats de simulation.

2.3.3.1. Mesure du délai de paquets.

- Pour le flux VoIP.

La figure IV.15 montre que les algorithmes PF et EXP/PF présentent le plus faible délai (de 2 ms pour 10 UEs jusqu'à 5 ms pour 25 UEs). Pour un nombre d'utilisateurs inférieur à 15, le délai est le plus faible et reste le même pour notre algorithme ainsi que pour celui des algorithmes LOG-Rule et EXP-Rule. Au-delà de 15 UEs, le délai présenté par notre algorithme commence à évoluer avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs (de 3,75 ms pour 15 UEs jusqu'à 16,6 ms pour 25 UEs). Tous

les algorithmes étudiés ont un délai tolérable permettront ainsi d'offrir une meilleure qualité de service.

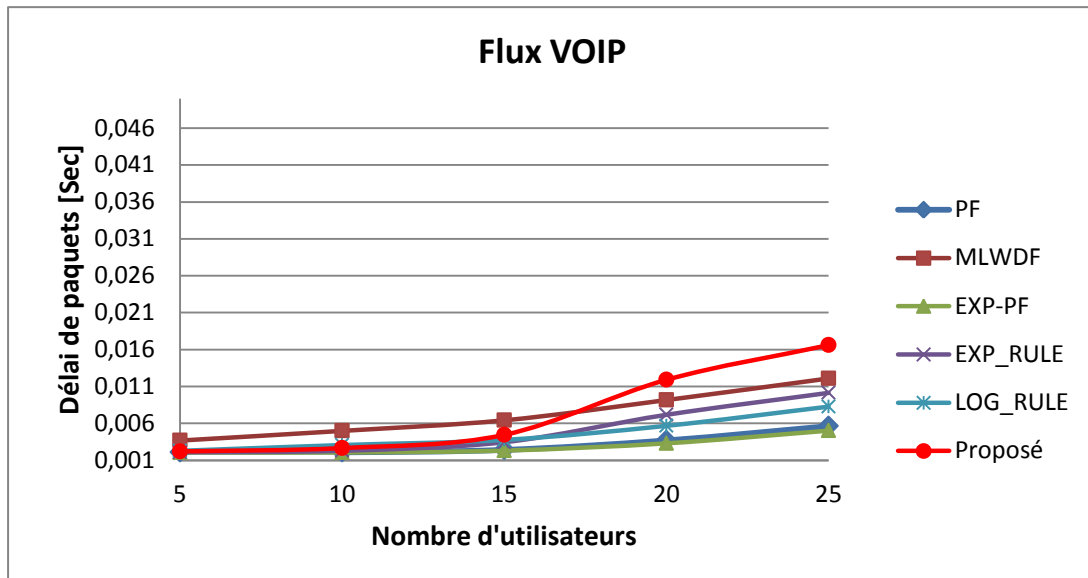


Figure IV. 15: Evolution du délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

- Pour le flux Vidéo.

Comme le montre la figure IV.16, le délai du flux vidéo pour l'algorithme PF connaît une évolution exponentielle jusqu'à atteindre une valeur de 3,64 s pour 25 UEs, un délai qui est intolérable par la norme LTE. Pour l'algorithme proposé ainsi que pour les autres ordonnanceurs, le délai est stable et très négligeable malgré l'augmentation du nombre d'utilisateurs.

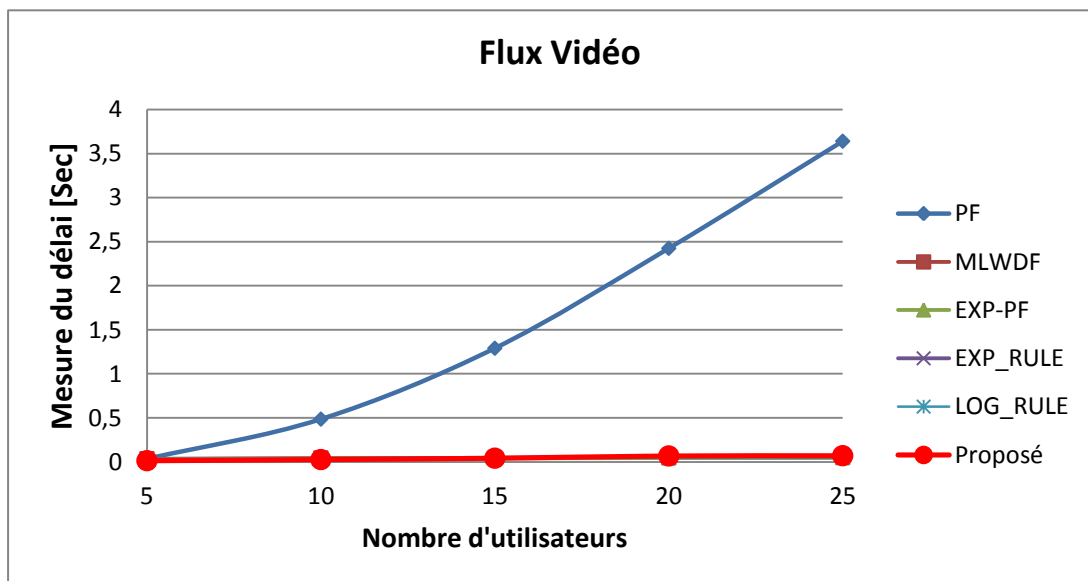


Figure IV. 16: Evolution du délai pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

2.3.3.2. Mesure du taux de perte de paquets (PLR).

- Pour le flux VoIP.

Comme le montre la figure IV.17, Le taux de perte de paquets du flux Voix sur IP pour l'algorithme d'ordonnancement PF est le plus faible, il varie de 0 % pour 5 utilisateurs jusqu'à 0,5 % pour 25 utilisateurs, l'ordonnanceur EXP/PF quant à lui présente le même comportement sauf que son taux varie de 0,2 % pour 5 utilisateurs à 0,63 % pour 25 utilisateurs. Pour l'algorithme proposé ainsi que celui du MLWDF, EXP-Rule et LOG-Rule, le taux de perte de paquets présente à peu près le même comportement sauf que leur taux est un peu plus supérieur à celui du PF, malgré cela leur taux n'a pas dépassé le 1,5 %. Ce qui permet de conclure que tous les algorithmes ont un taux de perte de paquets tolérable.

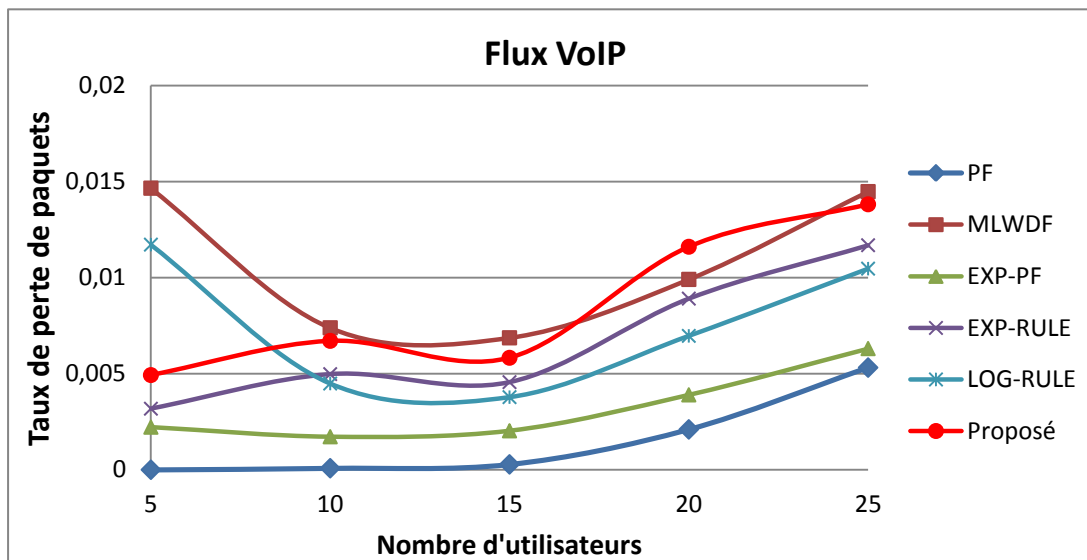


Figure IV. 17: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

- Pour le flux Vidéo.

Le taux de perte de paquets est donné sur la figure IV.18, elle montre que pour le flux vidéo le taux de perte de paquets est plus grand que celui du flux VOIP, en particulier pour l'algorithme d'ordonnancement PF qui a une valeur maximale de 88%. Le taux de perte de paquets est augmenté pour ce type de flux avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs pour tous les algorithmes d'ordonnancement. Le taux de perte de paquets donné par notre algorithme est le plus faible malgré l'augmentation du nombre d'utilisateurs, comparé avec le MLWDF, notre algorithme a pu diminuer le taux de perte de paquets qui est de 73% pour l'algorithme MLWDF pour avoir 56% pour 25 utilisateurs.

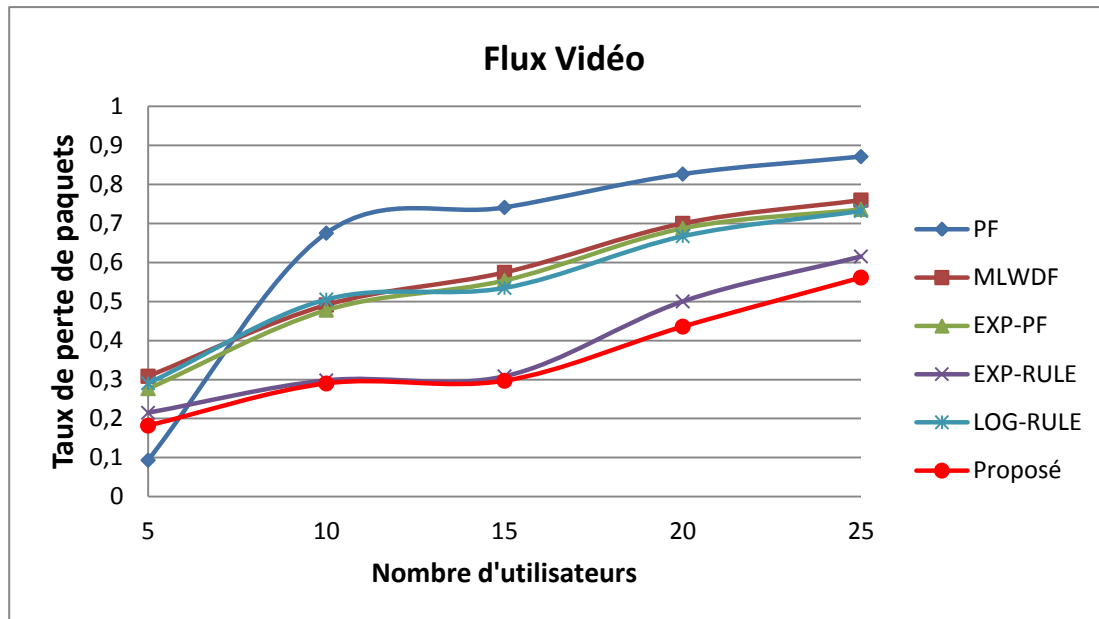


Figure IV. 18: Evolution du PLR pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

2.3.3.3. Mesure du débit.

- Pour le flux VoIP.

La figure IV.19 montre que le débit des paquets pour le flux VoIP augmente de façon exponentielle selon le nombre d'utilisateurs, et c'est le même comportement pour tous les algorithmes d'ordonnancement choisis ainsi que pour l'algorithme proposé.

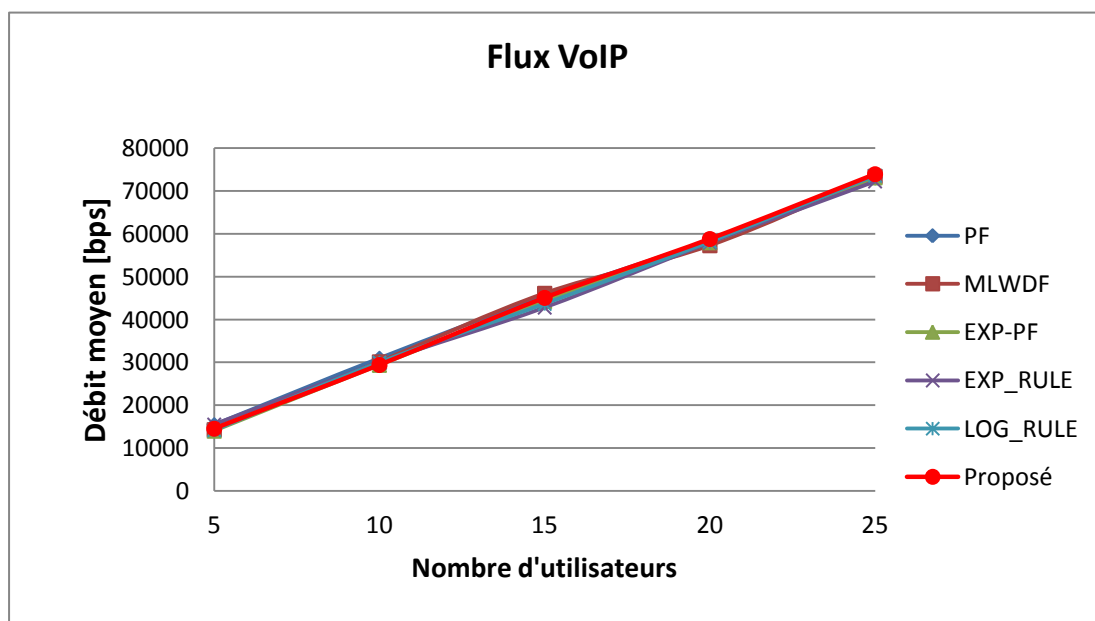


Figure IV. 19: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

- Pour le flux Vidéo.

Comme illustré dans la figure IV.20, l'algorithme d'ordonnancement proposé ainsi que celui d'EXP-Rule présentent, pour un nombre d'utilisateurs compris entre 5 et 15, le plus grand débit qui augmente avec le nombre d'utilisateurs malgré le déplacement en haute mobilité. Cependant pour un nombre d'utilisateurs au-delà de 15 UEs notre algorithme continue à évoluer alors que celui d'EXP-Rule reste stable. Pour les algorithmes LOG-Rule, EXP-PF et MLWDF le débit suit la même évolution que celle de notre algorithme sauf que leur valeur est un peu plus faible que celle obtenue pour l'algorithme proposé. Quand à l'algorithme PF, le débit est le plus faible même avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs, ce qui explique que l'ordonnanceur PF n'est plus convenable pour le flux vidéo. La valeur du débit moyen dans le cas de la haute mobilité est moins faible que celle en mobilité normale.

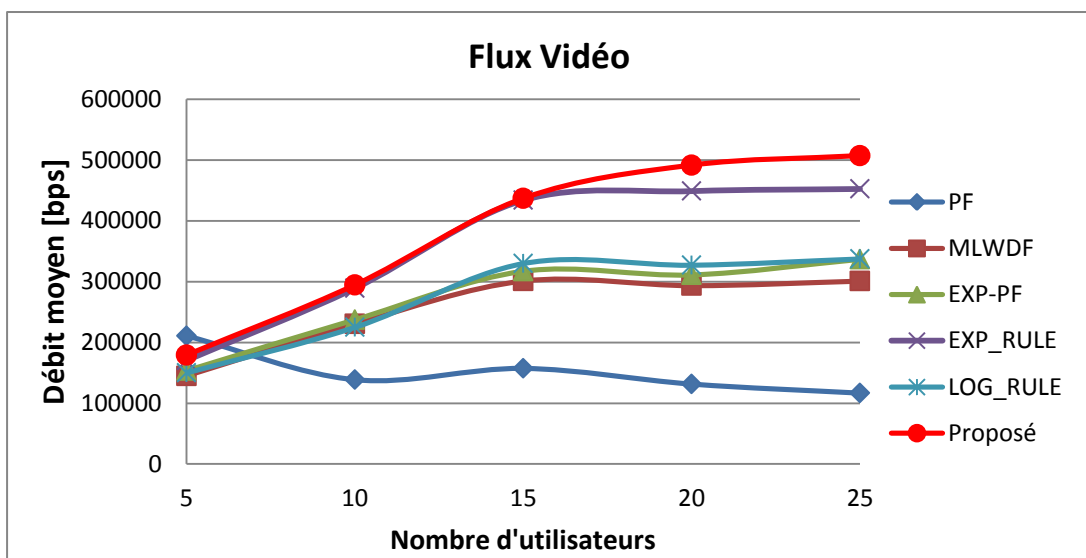


Figure IV. 20: Evolution du débit pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

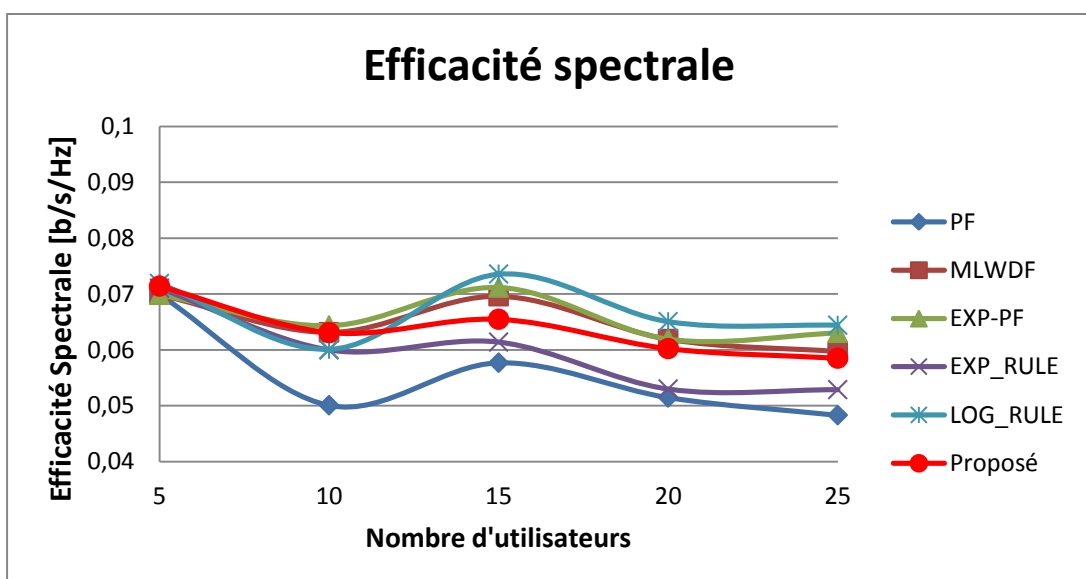


Figure IV. 21: Evolution de l'efficacité spectrale de la cellule en fonction du nombre d'UEs dans le cas de la haute mobilité utilisateur.

2.3.3.4. Mesure de l'efficacité spectrale

Comme le montre la figure IV.21, notre algorithme offre une meilleure efficacité à peu près la même que celle offerte par l'EXP-PF, le LOG-Rule et le MLWDF. Pour les algorithmes EXP-Rule et PF, la valeur de l'efficacité spectrale est un peu faible que celle mesuré pour l'algorithme proposé. Pour tous les algorithmes la valeur de l'efficacité reste au-delà de la valeur limite autorisé par la norme qui est de 0,04 b/s/Hz.

2.3.4. Bilan.

Dans cette partie, on a procédé à une comparaison des performances du réseau LTE dans le cas des utilisateurs en haute mobilité, ce résultat est considéré pour différents algorithmes d'ordonnancement qui sont évalués en utilisant le simulateur de réseau LTE-SIM, et finalement, nous avons constaté que notre algorithme a répondu aux besoins fixés lors de sa conception, En fait l'algorithme proposé a permis la réduction du taux de perte de paquets pour le flux vidéo de 73% pour l'algorithme MLWDF à 56% pour celui proposé dans le cas de 25 utilisateurs actifs dans le cellule.

Notre algorithme a aussi montré de meilleures performances en termes de débit, de délai, et d'efficacité spectrale. Pour l'algorithme PF et en raison de son large délai, son grand taux de perte de paquets et son faible débit, il ne justifie pas de bonnes performances pour le flux Vidéo.

2.4. Scénario avec des cellules femto.

2.4.1. Formulation de problématique et justification.

Le réseau LTE vise à améliorer la couverture indoor dans les bâtiments en adoptant la solution Femto. Le but de cette simulation est d'évaluer les performances de notre algorithme pour les communications à domicile en se basant sur la solution Femto-Cellule, L'évaluation de ces performances est menée à l'aide du simulateur LTE-SIM en termes de débit, de délai et de taux de pertes de paquets. Et ce, en se basant sur une comparaison de ses performances avec celles des ordonnanceurs cités précédemment [123].

2.4.2. Scénario et paramètres de simulation.

LTE-SIM permet la simulation du réseau selon des scénarios que l'utilisateur décide, par exemple dans notre simulation, nous avons considéré le même scénario décrit lors de l'évaluation des performances des algorithmes étalons pour le cas des cellules femto, à savoir, 25 appartements distribués selon le model 5*5, chaque appartement a une superficie de 100 m². La cellule macro elle-même a un rayon de 200 mètres et contient une eNodeB qui transmet à l'aide d'une antenne

omnidirectionnelle dans une bande passante de 5 MHz. Le model de propagation du canal considéré est le même présenté précédemment. Les UEs se déplacent dans la cellule suivant le modèle de mobilité de «**Randon Walk**». Chaque utilisateur reçoit un flux vidéo H.264, un flux de VOIP et un flux Best Effort. Dans ce scénario les paramètres de simulation utilisés pour implémenter la solution Femto sont illustrés dans le tableau IV.4.

Tableau IV. 4: Paramètres de simulation pour le scénario des cellules Femto.

| Paramètres | Value |
|---|--------------|
| La durée de Simulation | 120 s |
| La duré du flux | 120 s |
| La structure Trame | FDD |
| La vitesse des stations Mobile | 3Km/h |
| Rayon de la cellule | 200 m |
| La bande passante | 5 MHz |
| La durée du Slot | 0.5 ms |
| Le temps d'ordonnancement (durée TTI) | 1 ms |
| Le Nombre de Bloque de ressources (BRs) | 25 |
| Le délai Maximal | 0.1 s |
| Le débit du flux Vidéo | 242 kbps |
| Le débit du flux Voix sur IP | 8.4 kbps |
| Le nombre minimal des utilisateurs | 5 |
| Le nombre maximal des utilisateurs | 20 |
| L'Intervalle entre utilisateurs | 5 |

2.4.3. Résultats de simulation.

2.4.3.1. Mesure du délai de paquets.

- Pour le flux VoIP.

Comme le montre la figure IV.22, pour un nombre maximal d'utilisateurs l'algorithme EXP/PF ainsi que celui d'EXP-Rule présente le plus faible délai pour le flux voix sur IP à savoir 3,5 ms pour 25 UEs, par contre l'algorithme MLWDF connaît une évolution spectaculaire avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs et présente le plus long délai de transmission, pour l'algorithme proposé il a permis de diminuer le délai offert par le MLWDF pour atteindre une valeur 5ms au lieu de 7 ms pour celui du MLWDF. L'algorithme PF suit à peu près le même comportement que celui proposé. On peut dire que le délai pour tous les algorithmes d'ordonnancement cités est acceptable vu qu'il ne dépasse pas 7ms pour 25 utilisateurs.

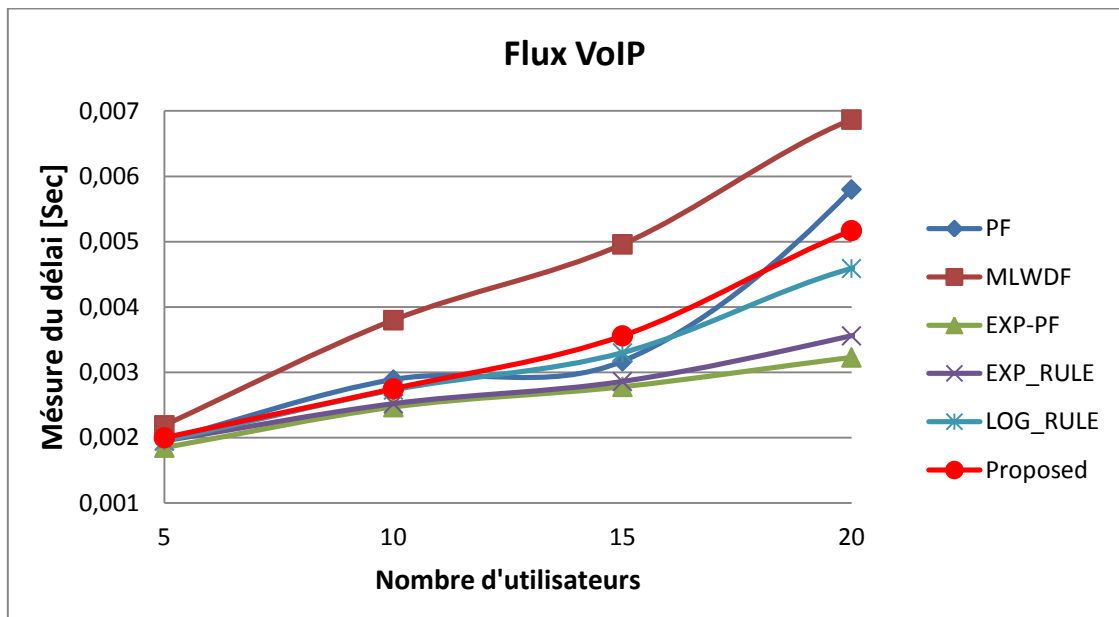


Figure IV. 22: Evolution de délai pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto.

- Pour le flux Vidéo.

La figure IV.23 représente, pour le flux Vidéo, l'évolution du délai de paquets en fonction du nombre d'UEs, pour le scénario des cellules femto, Comme le montre cette figure, notre algorithme est parmi ceux qui présentent un délai minimal malgré l'augmentation du nombre d'utilisateurs à savoir, celui d'EXP-Rule, du LOG-Rule, d'EXP-PF, et celui du MLWDF. Pour l'algorithme PF, le délai connaît une évolution exponentielle au-delà de 10 utilisateurs jusqu'à atteindre une valeur maximale intolérable qui est de 191 ms pour 20 utilisateurs.

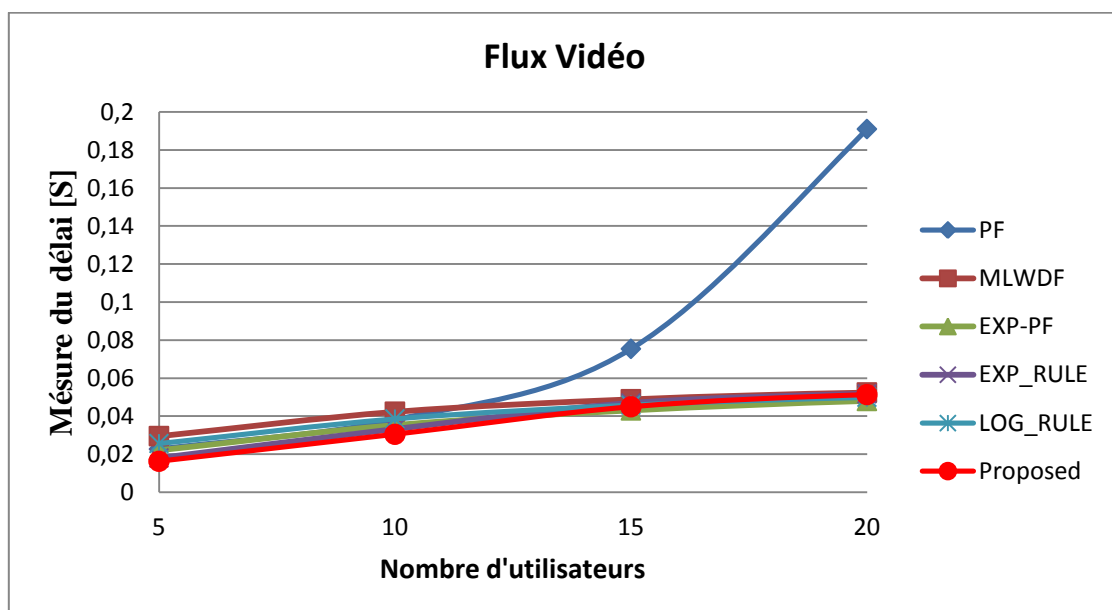


Figure IV. 23: Evolution de délai pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto.

2.4.3.2. Mesure du taux de perte de paquets (PLR).

- Pour le flux VoIP.

Le taux de perte de paquets donné sur la figure IV.24 montre que pour l'algorithme proposé il est le plus faible malgré l'augmentation du nombre d'utilisateurs, pour tous les algorithmes le taux de perte de paquets (PLR) augmente avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs, spécialement pour l'algorithme d'ordonnancement PF où le taux de pertes est de l'ordre de 6% pour 20 utilisateurs, En revanche, les algorithmes EXP-Rule, LOG-Rule, EXP/PF et MLWDF présentent un taux de perte de paquets moins faible que celui du PF, de l'ordre de 3%, pour 20 utilisateurs.

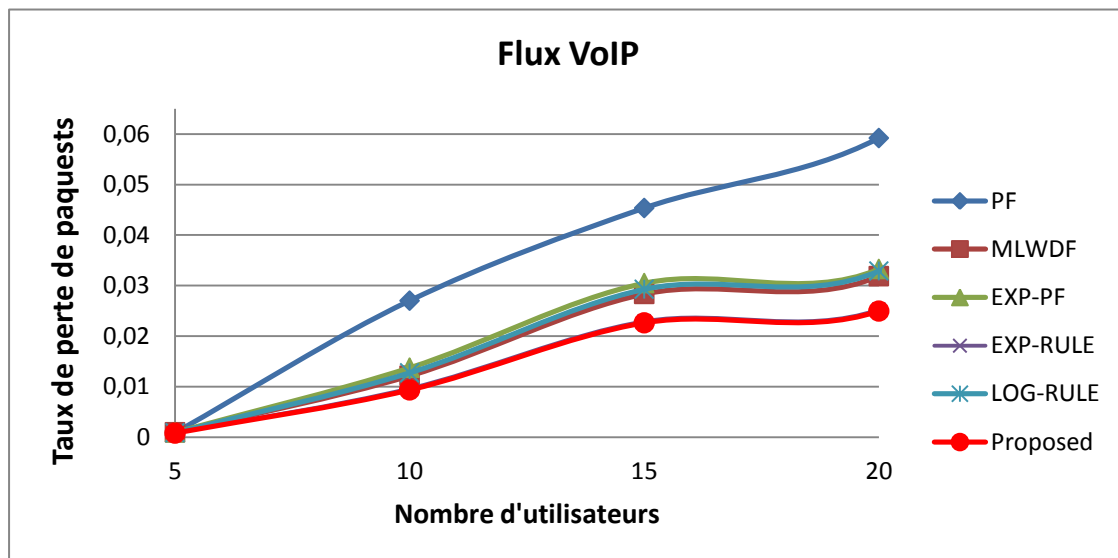


Figure IV. 24: Evolution du PLR pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto.

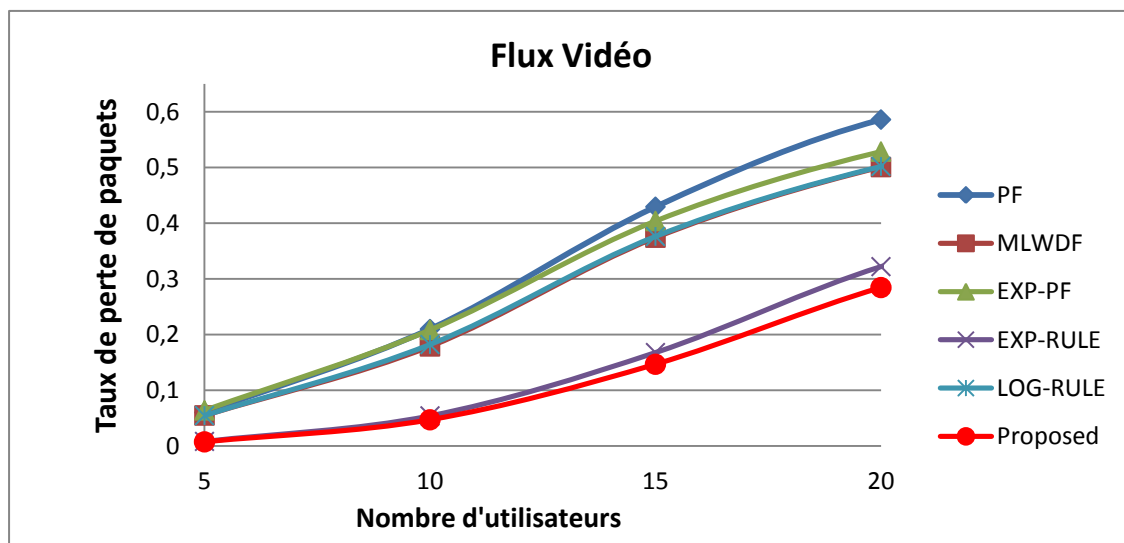


Figure IV. 25: Evolution du PLR pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto.

- **Pour le flux Vidéo.**

Le taux de perte de paquets pour le flux vidéo est donné sur la figure IV.25, comme le montre cette figure, notre algorithme a le plus faible taux pour le cas du flux vidéo comme pour le cas du flux VoIP, il atteint un taux de 28 % pour 20 utilisateurs contre 50 % pour celui de l'algorithme MLWDF. Ce taux augmente pour tous les algorithmes avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs. Pour l'algorithme PF, son taux de perte est le plus grand suivi par celui de l'EXP-PF, le Log-Rule et le MLWDF. Pour l'EXP-Rule, son taux suit la même évolution que celui de l'algorithme proposé sauf que sa valeur est un peu plus supérieure à celle de l'algorithme proposé.

2.4.3.3. Mesure du débit.

- **Pour le flux VoIP.**

La figure IV.26 présente, pour le flux VoIP, l'évolution du débit en fonction du nombre d'utilisateurs actifs dans la cellule, A partir de ce qui est montré sur cette figure, on peut constater que le débit de paquets pour le flux VoIP augmente de façon exponentielle selon le nombre d'utilisateurs, et c'est la même chose pour tous les algorithmes d'ordonnement et dont notre algorithme fait partie.

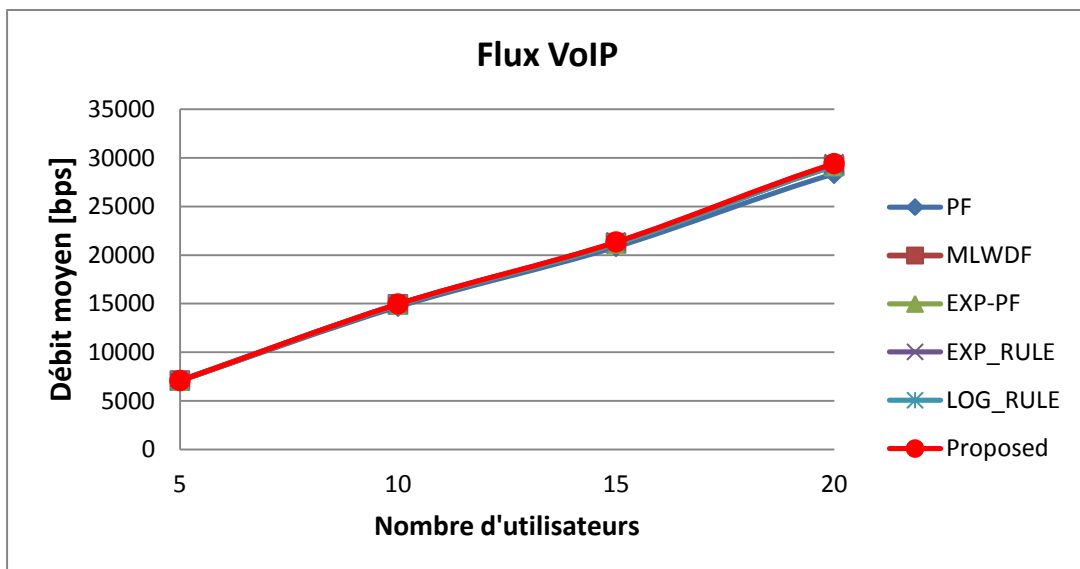


Figure IV. 26: Evolution du débit pour le flux VoIP en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto.

- **Pour le flux Vidéo.**

La figure IV.27 présente pour le flux Vidéo l'évolution du débit moyen de la cellule en fonction du nombre d'utilisateurs, comme illustré sur cette figure, et pour notre algorithme proposé, le débit de paquets est le plus grand et augmente avec le nombre d'utilisateurs. Pour l'algorithme PF le débit est le plus faible et commence à diminuer au-delà de 15 utilisateurs. Notre algorithme présente une amélioration remarquable du débit comparé l'algorithme MLWDF sur lequel il s'est inspiré.

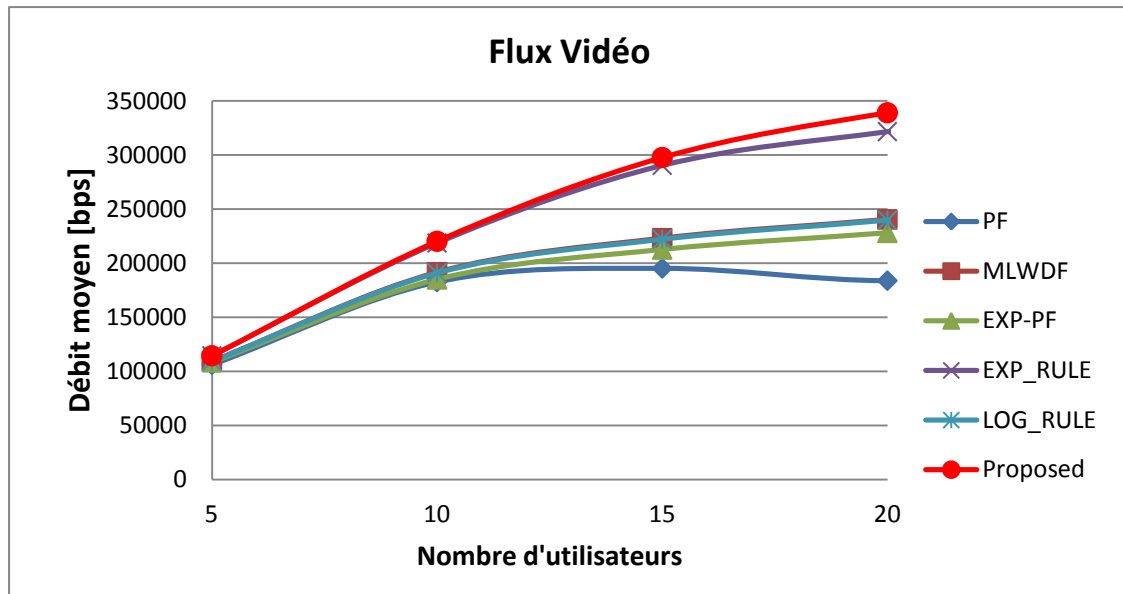


Figure IV. 27: Evolution du débit pour le flux Vidéo en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto.

2.4.3.4. Mesure de l'efficacité spectrale.

La figure IV.28 présente l'évolution de l'efficacité spectrale de la cellule, comme montré sur cette figure, l'efficacité spectrale de la cellule est la plus basse pour l'algorithme d'ordonnement PF, mais pour les autres algorithmes, à savoir celui proposé, elle est un peu plus haute. Pour tous les algorithmes décrits dans cette figure, l'efficacité spectrale est plus haute pour ce cas de scénario comparée avec les autres scénarios présentés dans ce mémoire.

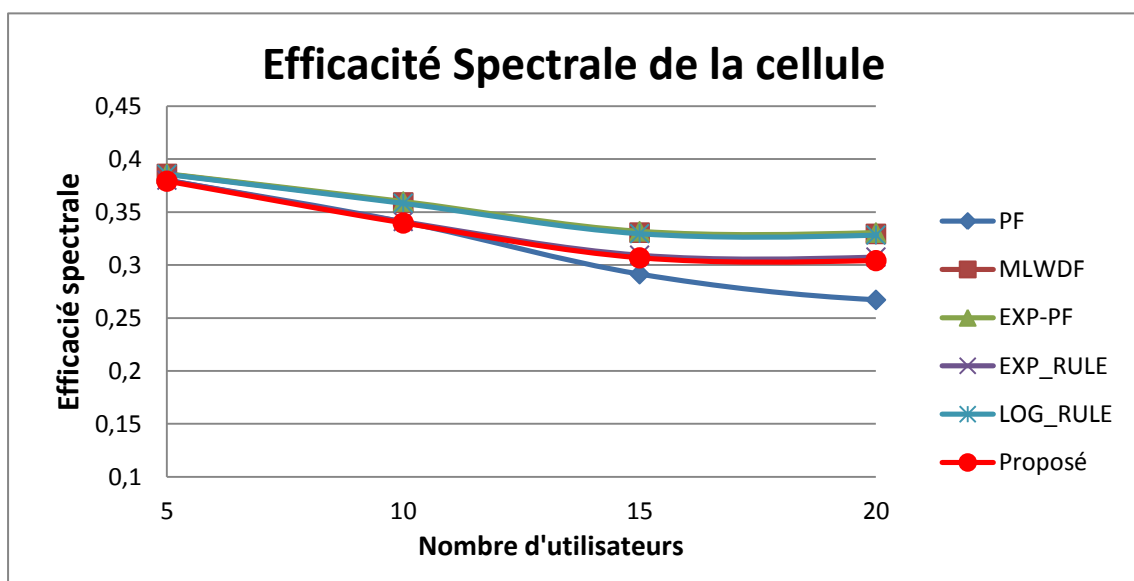


Figure IV. 28: Evolution de l'efficacité spectrale de la cellule en fonction du nombre d'UEs pour le scénario des cellules femto.

2.4.4. Bilan.

Dans cette simulation nous avons considéré le cas d'une cellule femto. Nous avons procédé à la comparaison des performances des algorithmes PF, EXP-PF, EXP-Rule, LOG-Rule, MLWDF et celui proposé. Les résultats de cette simulation ont démontré que l'algorithme proposé a pu combler les défaillances constatées de l'algorithme MLWDF en matière de débit, de réduction du délai de paquet, et de diminution du taux de pertes de paquets.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis au point un nouvel algorithme d'ordonnancement inspiré du modèle d'ordonnancement M-LWDF et dont la vocation est d'améliorer la métrique d'allocation des ressources et offrir ainsi plus d'équité aux utilisateurs se trouvant dans de mauvaises conditions de canal sans pour autant défavoriser ceux qui bénéficient d'une meilleure condition de canal. Nous avons évalué les performances de notre algorithme et nous les avons comparé avec celles des cinq algorithmes, les plus connues par leurs performances à savoir PF, EXP-PF, EXP-Rule, LOG-Rule et MLWDF, cette comparaison est menée pour les différents cas de scénario de mobilité normale, de la haute mobilité, de la haute congestion et celui des cellules femto. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de notre algorithme, comparée à celles des autres algorithmes d'ordonnancement en termes de débit moyen du système LTE, du délai de transmission de paquets et du taux de perte de paquets.

Notre approche a permis de garantir une qualité de service meilleure que celle offerte par les autres algorithmes. Ainsi l'algorithme EXP-Rule est celui classé successeur de notre algorithme en termes de performances, et cela revient du fait que cette algorithme est basé sur une métrique qui fait appel à la moyenne des temps d'attente D_{HOL} dans la file, ce qui nécessite une consommation supplémentaire de ressources. Le tableau ci-dessous résume le niveau de performance de notre algorithme comparé à celui de l'algorithme MLWDF duquel il est inspiré. Ces performances ont été évaluées en termes de maximisation du débit, de réduction de délai, de diminution du taux de perte de paquets et d'augmentation de l'efficacité spectrale.

Tableau IV. 5: Comparaison des performances entre l'algorithme proposé et celui du MLWDF.

| Ordonnanceur | Scénario | Type de flux | Débit | Délai | PLR | Efficacité Spectrale |
|--------------|---------------------|--------------|-------|-------|-----|----------------------|
| MLWDF | Normal | VoIP | ✓ ✓ | ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ |
| | | Vidéo | ✓ | ✓ | ✓ | |
| Proposé | | VoIP | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ |
| | | Vidéo | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | |
| MLWDF | La haute congestion | VoIP | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ | ✓ ✓ |
| | | Vidéo | ✓ | ✓ ✓ | ✓ | |
| Proposé | | VoIP | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ |
| | | Vidéo | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | |
| MLWDF | La haute mobilité | VoIP | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ |
| | | Vidéo | ✓ | ✓ ✓ | ✓ | |
| Proposé | | VoIP | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ |
| | | Vidéo | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | |

| | | | | | | |
|----------------|------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|
| MLWDF | La cellule femto | VoIP | ✓ ✓ | ✓ | ✓ | ✓ ✓ |
| | | Vidéo | ✓ | ✓ ✓ | ✓ | |
| Proposé | | VoIP | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ |
| | | Vidéo | ✓ ✓ | ✓ ✓ | ✓ ✓ | |

Conclusion Générale et Perspectives

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire se focalisent essentiellement sur un mécanisme clé de la gestion des ressources radio (RRM) à savoir le scheduling. Celui-ci utilise des algorithmes d'ordonnancement qui permettent aux utilisateurs prioritaires de bénéficier de l'allocation des blocs de ressources radio selon des critères bien déterminés. Cette allocation de ressource se fait au niveau de l'eNB par le PS (Packet Scheduler), allouer de manière optimale la ressource radio est en effet un défi majeur, car il nécessite de prendre en considération plusieurs facteurs en même temps tout en respectant la contrainte du temps. Notre objectif durant cette thèse de doctorat été d'évaluer, pour différents cas de scénario, les performances des algorithmes opportunistes les plus connus, ainsi de développer un nouvel algorithme d'allocation de ressources radio capable d'apporter une maximisation du débit global, une minimisation du taux de pertes de paquets, une réduction du délai, et une augmentation d'efficacité spectrale.

Nous avons réalisé une évaluation comparative des performances des algorithmes d'ordonnancement les plus connus, dont le but a été de soulever les limites de ces derniers pour différents cas de scénarios, ce qui nous a aidé à sélectionner l'algorithme MLWDF comme étant le plus performant de ces étalons et par la suite comme model de base duquel on s'est inspiré pour créer notre algorithme.

Nous avons développé un nouvel algorithme et nous l'avons implémenté en utilisant le simulateur "LTE-Sim". Notre choix a porté sur ce simulateur vue qu'il possède une bibliothèque très riche qui tient compte de tous les aspects intervenants dans le réseau LTE, aussi parce qu'il est largement utilisé par les chercheurs grâce à sa gratuité, sa modularité du fait qu'il permet l'intégration de nouveau modèle propre au chercheur. Nous avons mené dans un second temps, une comparaison entre notre algorithme proposé et les algorithmes étalons que nous avons déjà évalués ainsi que d'autres algorithmes nouvellement proposés à savoir EXP-Rule et Log-Rule. Celle-ci a démontré, dans tous les cas de scénarios, que notre algorithme a amélioré la qualité de service dans le réseau LTE. Les critères que nous avons étudiés lors de la comparaison entre ces algorithmes d'ordonnancement se rapportent au rendement en termes de débit global de la cellule, du délai de paquets, du taux de perte de paquets et d'efficacité spectrale. Cette thèse aboutit donc à la création d'un nouvel ordonnanceur très efficace dans un certain contexte, capable de supporter avec une QoS élevée les services multimédia des réseaux LTE pour différents cas de scénario.

Dans les travaux de recherche présentés dans ce mémoire, tous les algorithmes étudiés ainsi que celui proposé sont destinés pour la voie descendante dont la méthode d'accès est celle d'OFDMA, Par contre dans le sens montant, la technique d'accès utilisé est la SC-FDMA. Cependant, en guise de perspective, nous envisageons d'étudier et de développer d'autres algorithmes permettant d'optimiser l'allocation des ressources dans le sens montant, En effet, dans la transmission en voie montante les

UEs jouent un rôle primordial dans la prise de décision d'ordonnancement, cette dernière est partagée entre l'eNodeB et les UEs. Ce qui implique qu'une partie de cette décision est faite par l'eNodeB qui alloue les ressources entre les UEs en se basant sur des informations de base telles que les conditions de canal et l'état des files d'attente, alors que l'autre partie est faite par les UEs qui doivent déterminer comment distribuer aux flux de données les blocs de ressources qui ont été alloués par l'eNodeB.

Une autre perspective extrêmement intéressante que nous ouvre cette thèse et sur laquelle nous tenons particulièrement à travailler est l'allocation des ressources radio pour les réseaux 5G, et ce via une adaptation de notre algorithme à la méthode d'accès dite NOMA (Non Orthogonal multiple Access). En effet, plusieurs axes de recherche nouvellement développés considèrent l'algorithme PF comme ordonnanceur pour les réseaux 5G [127][128], et puisque notre algorithme a démontré sa supériorité sur les autres algorithmes, dont PF fait partie, dans le réseau LTE, il pourra aussi montrer de meilleures performances dans les réseaux 5G. Ajoutant que le NOMA est une nouvelle méthode d'accès envisagée pour les réseaux radio de futures générations 5G, son principe de base consiste à multiplexer un nombre d'utilisateur dans le domaine de puissance pour permettre une meilleure utilisation du spectre ainsi notre algorithme devra être adapté à cette nouvelle méthode d'accès.

D'autres axes de recherche qui portent sur la 5G et sur lesquels nous envisageons travailler est celui du massive MIMO qui se traduit par l'augmentation du nombre d'antennes jusqu'à avoir 400 antennes par station de base dont le but est d'améliorer la capacité par canal. Autre axe de recherche que nous espérons porter notre contribution est celui de l'utilisation des ondes radio millimétriques telles que 28 Ghz, 38 Ghz et 72 GHz. En fait, les ondes millimétriques sont des fréquences qui se situent entre 1 millimètre et 1 centimètre, donc de 30 à 300 GHz, et qui offrent une bande passante substantiellement plus grande que les bandes utilisées dans les réseaux 2G, 3G et 4G.

Liste des publications :

- *Articles de revues internationales :*

- 1) M. Mahfoudi, M. El Bekkali, A. Najid, S. Mazer, M. El Ghazi, "High Mobility Evaluation for Voice & Video over LTE". IJCSE (International Journal of computer sciences and engineering) Juillet 2014.(Indexed)
- 2) M. Mahfoudi, M. El Bekkali, A. Najid, S. Mazer, M. El Ghazi, "A Congestion Avoidance Evaluation for Voice & Video over LTE". IRECAP (International Journal on communications antenna and propagation), août 2014.(Indexed Scopus)
- 3) M. Mahfoudi, M. El Bekkali, A. Najid, M. El Ghazi, S. Mazer, "A New Downlink Scheduling Algorithm Proposed for Real Time Traffic in LTE". IJET (International Journal of Electronics and Telecommunications), Décembre 2015.(Indexed Scopus)
- 4) M. Mahfoudi, M. El Bekkali, A. Najid, M. El Ghazi, S. Mazer, "New Scheduling Algorithm Proposed for Real Time Traffic over LTE Femto-Cell". IRECAP (International Journal on communications antenna and propagation), Décembre 2015.(Indexed Scopus)

- *Communications dans des conférences internationales :*

- 1) M. Mahfoudi, M. El Bekkali, A. Najid, S. Mazer, M. El Ghazi, "Proving Higher Mobile Speed Performances using Scheduling Algorithms for Voice & Video over LTE". ISIVC (International Symposium on signal, Image, Video and Communications), 19-20, Novembre 2014.
- 2) M. Mahfoudi, M. El Bekkali, A. Najid, S. Mazer, M. El Ghazi, "LTE Network Capacity Analysis to Avoid Congestion for Real Time Traffic". MMS (14th Mediterranean Microwave Symposium), 12-14, Décembre 2014.(IEEE).
- 3) M. Mahfoudi, M. El Bekkali, A. Najid, "Les performances du réseau LTE en haute mobilité pour les flux voix et vidéo". CIMSI (Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels), 25-26, Décembre 2014.
- 4) M. Mahfoudi, M. El Bekkali, A. Najid, M. El Ghazi, S. Mazer, "Évaluation analytique des performances du standard femto-cellule du réseau LTE". JFMMA (Colloque International TELECOM'2015 & 9ème JFMMA), 13-14-15, Mai 2015.

Liste des références

- [1] W. Koch: Lecture script "Fundamentals of Mobile Communications", University of Erlangen-Nuremberg, **2008**.
- [2] Huawei Technologies CO.,Ltd, 'GSM Fundamentals' ISSUE 2.0, BSC Training Document. December **2006**.
- [3] Ni, S. GPRS network planning on the existing GSM system, Global Telecommunications Conference, **2000**. GLOBECOM '00. IEEE.
- [4] 3GPP TS 23.401 (**2010**). General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access, 9.7.0 ´edition.
- [5] 29.016 (**2009**). General Packet Radio Service (GPRS) ; Serving GPRS Support Node (SGSN) - Visitors Location Register (VLR) ; Gs interface network service specification, 9.0.0 ´edition.
- [6] Huawei Technologies CO.,Ltd, 'Serving GPRS Support Node Technical Manual Architecture and Principles' (V8.30), **2006**.
- [7] Huawei Technologies CO.,Ltd, 'Gateway GPRS Support Node System Principle'(V900R007C01_01_RUS), May **2008**.
- [8] John Wiley & Sons 'Indoor Radio Planning: A Practical Guide for 2G, 3G and 4G', Third Edition. ISBN: 9781118913628, Morten Tolstrup. Page (5-68), **2015**.
- [9] Huawei Technologies CO.,Ltd, 'Universal Media Gateway Technical Manual-Architecture and Principle'(V200R005C02_04_UMTS),
- [10] 23.101. General Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) architecture, 9.0.0 edition, (**2009**).
- [11] 23.110. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) access stratum; Services and functions, 9.0.0 ´edition., (**2009**).
- [12] 36.800. Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Extended UMTS / LTE 800 Work Item Technical Report, 9.0.0 ´edition, (**2009**).
- [13] E.Dahlman, S.Parkvall, J.Skold, P.Beming, "3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband", Elsevier, Second Edition **2008**, ISBN-10: 0123745381, ISBN-13: 978-0123745385.
- [14] 3GPP TS 25.308. High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2, 9.4.0 edition, (**2010**).
- [15] 3GPP TR 25.410. UTRAN Iu interface: General aspects and principles, 9.0.0 edition, (**2009**).
- [16] 3GPP TR 25.420. UTRAN Iur interface general aspects and principles, 9.1.0 edition, (**2010**).
- [17] 3GPP TR 25.426. UTRAN Iur and Iub interface data transport & transport signalling for DCH data streams, 9.0.0 edition, (**2009**).
- [18] 3GPP TS 25.950, UTRA High Speed Downlink Packet Access (HSDPA), 4.0.1 edition,(**2005**).
- [19] Martins, Philippe, Coupechoux, Marceau, Vers les systèmes radio mobiles de 4e génération : De l'UMTS au LTE, Springer **2013**.
- [20] Erik Dahlman , Stefan Parkvall, Johan Skold, Per Beming, 3G EVOLUTION: HSPA AND LTE FOR MOBILE BROADBAND, Second Edition **2008**, 648 p., ISBN-10: 0123745381, ISBN-13: 978-0123745385.
- [21] ANRT, 'TABLEAU DE BORD MARCHÉ DU MOBILE AU MAROC', décembre **2015**, <http://www.anrt.ma/indicateurs/acteurs-du-marche>.
- [22] ANRT, 'Analyse de l'évolution des marchés du fixe, du mobile et de l'internet', 30 Septembre **2015**.
- [23] International Data Corporation, Worldwide Quarterly Mobile Phone Tracker, October 28, **2015**.
- [24] StatCounter Global Stats, <http://gs.statcounter.com>, **2015**.
- [25] 3GPP TS 32.423 version 10.8.0, Digital cellular telecommunications system; LTE; Release10, April **2014**.
- [26] Yannick Bouguen, Eric Hardouin, François-Xavier Woff, LTE et les réseaux 4G, **2012**, Editions EYROLLES, Paris.
- [27] 3GPP TS 36.306, E-UTRA, User Equipment (UE) radio access capabilities, v.10.5.0, mars **2012**.
- [28] H. Holma, A. Toskala, LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, John Wiley & Sons, **2009**.
- [29] 3GPP TR 36.814, E-UTRA, Further advancements for E-UTRA physical layer aspects, v9.0.0, mars **2010**.
- [30] 3GPP TR 36.912, Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced), v9.3.0, juin **2010**.
- [31] 3GPP TS 36.104, E-UTRA, Base Station (BS) radio transmission and reception, v8.8.0, décembre **2009**.

- [32] 3GPP TS 36.211, E-UTRA, Physical channels and modulation, v8.9.0, décembre **2009**.
- [33] Geovanny Mauricio ITURRALDE RUIZ, Performances des Réseaux LTE. MSc Thesis, TUDelft, Octobre **2012**.
- [34] John Wiley & Sons 'An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications, First Edition. ISBN:9781119970385, Page (8-15) **2012**.
- [35] 3GPP TS 23.002 V8.5.0, Network architecture (Release 8), June **2009**.
- [36] 3GPP TR 25.913 V8.0.0 LTE: Requirements for Evolved UTRA (EUTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 8), January **2009**.
- [37] Erik Dahlman, Stefan Parkvall and Johan Skold, 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Elsevier **2011**, ISBN: 978-0-12-385489-6.
- [38] Farooq Khan, LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance, ISBN: 9780521882217, Avril **2009**.
- [39] Pierre Beaufils, Zied Choukair, Sami Tabbane, Réseaux 4G : Technologies et services, Hermes Science Publications **2008**, ISBN : 978-2-7462-1709-6.
- [40] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, **2009** John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0- 470-69716-0.
- [41] 3GPP TS 36.321: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification Roke Manor Research, LTE MAC Scheduler & Radio Resource Scheduling.
- [42] 3GPP TS 29.118. Mobility Management Entity (MME) and Visitor Location Register (VLR) S-GW interface specification, 9.4.0 'édition, (**2010**).
- [43] J.Zhang, G.de la Roche, "Femtocells Technologies and deployment", John Wiley and Sons Ltd, **2010**.
- [44] 3GPP TS 23.002 V8.5.0, Network architecture (Release 8), Juin **2009**.
- [45] 3GPP TR 24.801 V8.1.0, 3GPP System Architecture Evolution (SAE); CT WG1 aspects (Release 8), Décembre **2008**.
- [46] 3GPP TR 23.882 V8.0.0, 3GPP System Architecture Evolution: Report on Technical Options and Conclusions (Release 8), Décembre **2008**.
- [47] LTE RF Optimization Guide V1.0, HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD. May **2012**.
- [48] Harri Holma, Antti Toskala, « LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced», Second Edition. Edited by © 2011 John Wiley & Sons, Ltd. Published **2011** by John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-66000-3.
- [49] Rep. ITU-R M.2134 - Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s), ITU-R, **2008**.
- [50] 3GPP TR 25.996. Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations, 9.0.0 edition, **2009**.
- [51] 3GPP TS 37.976. Measurements of radiated performance for MIMO and multi-antenna reception for HSPA and LTE terminals, 1.1.0 'édition, **2010**.
- [52] Circuit Switched (CS) fallback in Evolved Packet System (EPS); Stage 2 (Release 9). 3GPP, TS 24.229 V9.3.1, December **2009**.
- [53] VoLGA Forum: "Voice over LTE via Generic Access; Stage 2 Specification; Phase1" VoLGA Stage 2, pages 1-89, August **2009**,
- [54] La voix sur LTE (réseau 4G et architecture IMS). André Pérez. Edition Lavoisier, **2013**.
- [55] 3GPP TS 23.237, 'IP Multimedia Subsystem (IMS) Service Continuity; Stage 2 (Release 12)', **09-2013**.
- [56] 3GPP TS 36.216, 'Single Radio Call Continuity (SRVCC); Stage 2 (Release 10)', www.3gpp.org.
- [57] VOICE OVER LTE. Miikka Poikselka - Harri Holma - Jukka Hongisto - Juha Kallio and AnttiToskala. Edition Wiley **2012**
- [58] Paisal, V., Seamless voice over LTE, 4th IEEE International Conference on Internet Multimedia Services Architecture and Application (IMSAA), **2010**.
- [59] 3GPP TS 23.203 V8.3.1, Technical Specification, Policy and charging control architecture (Release 8).
- [60] A. Furuskair, T. Jonsson, and M. Lundevall, "The LTE Radio Interface Key Characteristics and Performance", IEEE, Ericsson Research, Suède, **2008**.
- [61] 3GPP TS 23.107 V12.0.0, Quality of Service (QoS) concept and architecture (Release 12), Sep **2014**.

- [62] Yao Liu; Gang Lu; Wei Zhang; Fengling Cai. The QoS class mapping in WLAN and 3GPP LTE interworking network, 3rd International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), **2013**
- [63] Technical White paper: LTE MAC Scheduler and Radio Bearer QoS, by Roke Manor Research, **2009**
- [64] Salman Ali, Muhammad Zeeshan and Anjum Naveed, A capacity **and minimum guarantee-based** service class-oriented scheduler for LTE networks, in EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2013, **2013**:67.
- [65] 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Rel. 10)", 3GPP TS 36.213 V10.4.0, Dec. **2011**.
- [66] 3GPP TS 24.301, Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS) (Release 8).
- [67] White Paper, Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview, **2008**.
- [68] 3GPP, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification (Release 10)", 3GPP TS 36.322 V10.0.0, Dec. **2010**.
- [69] 3GPP TS 36.331, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 8).
- [70] 3GPP TS 36.321, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release8).
- [71] Technical White paper: LTE eNodeB MAC Scheduler Introduction, by Roke Manor Research, **2009**.
- [72] C. Hsiang, P. Lin, "Performance study for HARQ-ARQ interaction of LTE", wireless communications and mobile computing, Wireless Communications and Mobile Computing, Vol 10, Issuelt, pages. 1459-1469, **2010**.
- [73] 3GPP TS 36.323. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification, 9.0.0 edition, **2010**.
- [74] Pischella, M. and J.-C. Belfiore. Power control in distributed cooperative OFDMA cellular networks, IEEE Trans. On Wireless Communications, 7(5): 2008, May **2008**.
- [75] Boudreau, G., J.Panicker, N. Guo, R. Chang, N. Wang, and S. Vrzic. Interference coordination and cancellation for 4G networks. IEEE Communication Magazine, 47(4): 74-81, Apr. **2009**;
- [76] Fang, L. and X. Zhang. Optimal fractional frequency reuse in OFDMA based wireless networks. In Proc. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Oct. 12-14, **2008**, pp 1-4.
- [77] Huawei. Technologies. R1-050507: Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE. 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #41, May **2010**;
- [78] Assad, M. and N. Hassan. "Optimal fractional frequency reuse (FFR) and resource allocation in multiuser OFDMA system". In International Conference on Information and Communication Technologies, Aug. **2009**, pp 88-92.
- [79] Weihai Li, Yunxiao Zu, Yue Jia. "Sub-channel and Power Allocation for Multiuser OFDM Systems with Proportional Rate Constraints Based on Genetic Algorithms", Second CCF Internet Conference of China, ICoC 2013, Zhangjiajie, China, July **2013**, pp 31-39.
- [80] Yasir Zaki, Thushara Weera wardane, Carmelita Görg and Andreas Timm-Giel, Long Term Evolution (LTE) model development within OPNET simulation environment, OPNET workshop **2011**.
- [81] Lte module for the ns-3 simulator. In [OnLine] Available: <http://www.nsnam.org/docs/release/3.10/manual/html/lte.html>.
- [82] Gr. Projet MIREs Classification des fonctionnalités implémentées par le logiciel LTE-Sim (V. 4.0), **2012**.
- [83] G. piro, L. Grieco, G. Boggia, F. Caopzzi, and P. Camarda, "Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework". IEEE Trans. Veh. Technolo., vol. 60, no. 2, Feb. **2011**, pp. 498-513
- [84] G Piro, LTE-Sim - the LTE simulator. [OnLine] Available: [<http://telematics.poliba.it/LTE-Sim>].
- [85] F Capozzi, G Piro, LA Grieco, G Boggia, P Camarda, Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey. IEEE Commun. Surv. Tutorials. 15(2), **2013**, pp. 678-700.
- [86] T.Dikamba. "Downlink Scheduling in 3GPP Long Term Evolution". MSc Thesis, TUDelft, March **2011**.
- [87] Sun, Q., Tian, H., Dong, K., Zhou, R. and Zhang, P., "Packet Scheduling for Real-Time Traffic for Multiuser Downlink MIMO-OFDMA Systems," in IEEE Wireless Communications and Networking Conference, (**2008**), pp. 1849-1853.

- [88] S Ali, M Zeeshan, A Utility based resource allocation scheme with delay scheduler for LTE service-class support, in Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1450-1455. doi:10.1109/WCNC, **2012**.
- [89] M. T. Kawser, Hasib M. A. B. Farid, Abduhu R. Hasin, Adil M. J. Sadik, and Ibrahim K. Razu. Performance comparison between round robin and proportional fair scheduling methods for lte. International Journal of Information and Electronics Engineering, pages 678–681, **2012**.
- [90] A. Kuurne and A. Miettinen, “Weighted round robin scheduling strategies in(E)GPRS radio interface,”, International Journal on Advances in Networks and Services, vol 5 no 1 & 2, **2012**.
- [91] Oana Iosif and Ion Bănică, Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE. International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 2, No. 5, September **2012**.
- [92] F.Ousta,N. Kamel, Z. Yusoff, S. Ali, Mapping QoS Classes in Loose Coupling Heterogeneous Networks, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8(16): 1777-1780, October, **2014**.
- [93] Mohammad T. Kawser, Hasib M. A. B. Farid, Abduhu R. Hasin, Adil M. J. Sadik, and Ibrahim K. Razu, Performance Comparison between Round Robin and Proportional Fair Scheduling Methods for LTE, International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 2, No. 5, September **2012**.
- [94] K.S. Ko, M.J.Kim, "A Novel Random Access for Fixed-Location Machine-to-Machine Communications in OFDMA Based Systems," IEEE Commun. Lett., vol.16,No.9, pp.1428-1431, Sept. **2012**.
- [95] B. Song, Y.-H. Lin, and R. L. Cruz, Weighted max-min fair beamforming, power control, and scheduling for a MISO downlink, IEEE Transactions on Wireless Communications,vol. 7, pp. 464 – 469, February **2008**.
- [96] A. Elgendy, M. H. Ismail ; K. Elsayed, Max-min fair resource allocation for LTE-advanced relay-enhanced cells, in Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE, vol. 1, 6-9 April **2014**.
- [97] M. Khedr and A. Abderrassoul, Capacity Maximization in Wireless BroadBand OFDMA Networks Using Joint Weighted-Fair Queuing Token Leaky Bucket Algorithms, Research Journal of Applied Sciences, Volume: 8, Issue: 3, Page No.: 167-180, **2013**.
- [98] M. Iturralde and T. Ali Yahiya. Performance Study of Opportunistic Scheduling in LTE Networks. In: Understanding LTE and its Performance. Springer, Agoust **2011**.
- [99] Barayan, Y., & Kostanic, I. Performance evaluation of proportional fairness scheduling in LTE. In Proceedings of the World congress on engineering and computer science (WCECS 2013) (Vol.2). San Francisco, USA, 23-25 October, **2013**.
- [100] M. K. Müller, S. Schwarz, M. Rupp, QoS Investigation of Proportional Fair Scheduling in LTE Networks. Wireless Days (WD), **2013** IFIP.
- [101] W. P. Lai; E. C. Liou; P. C. Chen. Radio resource scheduling using packet-level service differentiation for video over the LTE downlink. International Conference on Communications in China (ICCC), 2014 IEEE/CIC.
- [102] Rabie K. Almatarneh, Mohamed H. Ahmed, Octavia A. Dobre,” Performance analysis of Proportional Fair Scheduling in OFDMA Wireless Systems, “in proc. of 72nd IEEE Vehicular Tech. Conference, 6-9 Sept.,**2010**.
- [103] R. Basukala, H. MohdRamli and K. Sandrasegaran. "Performance Analysis of EXP/PF and M-LWDF in Downlink 3GPP LTE System". IEEE F. Asian Himalayas Conf., pp. 1-5, Nov. **2009**.
- [104] Y. Nagai, L. Zhang, T. Okamawari, T. Fujii, Delay Performance Analysis of LTE in Various Traffic Patterns and Radio Propagation Environments, Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013 IEEE 77th, pp 1 – 5, June **2013**.
- [105] Piro, G., Grieco, L., Boggia, G., Fortuna, R., Camarda, P. Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in LTE networks. IEEE Transactions on Multimedia, 13(5),1052–1065, (**2011**).
- [106] Moustafa M. Nasralla and Maria G. Martini, A Downlink Scheduling Approach for Balancing QoS in LTE Wireless Networks. in Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sept. **2013**.
- [107] AlQahtani, S.A. and Alhassany, M. Performance Modeling and Evaluation of Novel Scheduling Algorithm for LTE Networks. in 12th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA),pp.101- 105, 22-24 Aug. **2013**, Cambridge, MA.
- [108] D. Vinayagam,R. Kurinjimalar,D. Srinivasan, Performance evaluation of cross layer QoS scheduling for Long Term Evolution Network, International Journal of Advanced Computer Research; vol.2 no.3(5):75-83. Septembre-**2012**.

- [109] Pedro Junior Ashidani, Paulo Roberto Guardieiro, Downlink Scheduler Based on Deadlines for LTE Networks, in International Workshop on Telecommunications (IWT) May **2013**.
- [110] Richard Musable, HadiLarijani and Glasgow, Evaluation of New Scheduling Scheme for VoIP with mobility in 3G LTE. The Fifth International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service **2012**.
- [111] A. Alfayly, I.-H. Mkwawa, L. Sun, and E. Ifeakor, QoE-based performance evaluation of scheduling algorithms over LTE, in Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE, **2012**, pp. 1362-1366.
- [112] Y Timner, J Pettersson, H Hannu, M Wang, I Johansson, in Proceedings of the 2014 ACM SIGCOMM Workshop on Capacity Sharing Workshop. Network assisted rate adaptation for conversational video over LTE, concept and performance evaluation (Chicago, **2014**), pp. 45–50.
- [113] M. Iturralde; T. Ali Yahiya; A. Wei; and A.L. Beylot. A real-time services performance and interference mitigation for femtocell scenarios in lte networks. In IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), October **2012**.
- [114] B Sahoo, Performance Comparison of packet scheduling algorithms for video traffic in LTE cellular network. Int J Mobile Netw Commun Telematics 3(3), 9–18 (**2013**).
- [115] Mahfoudi, M., El Bekkali, M., Najid, A., Mazer, S., El Ghazi, M., A congestion avoidance evaluation for voice & video over LTE, International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP), 4 (4), (**2014**), pp. 130-136.
- [116] Mahfoudi, M., El Bekkali, M., Najid, A., Mazer, S., El Ghazi, M., High Mobility Evaluation for Voice & Video over LTE, International Journal of computer sciences and engineering (IJCSE), V-02 , Issue-07, Jul-**2014**, pp. 40-45.
- [117] G. Jayakumar, G. Gopinath, “Performance Comparison of MANET Protocol Based on MANHATTAN Grid Model”, Journal of Mobile Communications, vol. 2, no. 1, **2008**, pp. 18-26.
- [118] V. Plicanic, "Flexible bandwidth in LTE", Department of Electrical and Information Technology, Chp 20, Suède, Mai **2009**.
- [119] O. Iosif and I. Banica. “On the Analysis of Packet Scheduling in Downlink 3GPP LTE System”. Proceedings of the 4th International Conference on Communication Theory, Reliability and Quality of Service, Budapest, pp. 99-102, 17-22 April **2011**.
- [120] Y Timner, J Pettersson, H Hannu, M Wang, I Johansson, in Proceedings of the 2014 ACM SIGCOMM Workshop on Capacity Sharing Workshop. Network assisted rate adaptation for conversational video over LTE, concept and performance evaluation, (Chicago, **2014**), pp. 45–50
- [121] International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) “Survey of lte downlink schedulers algorithms in open access simulation tools ns-3 and lte-sim”. DOI : 10.5121/ijwmn.2015.7201, Vol. 7, No. 2, April **2015**
- [122] Mahfoudi, M., El Bekkali, M., Najid, A., Mazer, S., El Ghazi, M., A New Downlink Scheduling Algorithm Proposed for Real Time Traffic in LTE System, International Journal Of Electronics And Telecommunications, V-06 , No-04, Dec, **2015**, pp. 409-414.
- [123] Mahfoudi, M., El Bekkali, M., Najid, A., Mazer, S., El Ghazi, M., New Scheduling Algorithm Proposed for Real Time Traffic over LTE Femto-Cell, International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP), V-05, No-06, Dec, **2015**, pp. 383-388.
- [124] Francesco Capozzi, Giuseppe Piro, Luigi A Grieco, Gennaro Boggia and Pietro Camarda, ' On accurate simulations of LTE femtocells using an open source simulator', EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, DOI: 10.1186/1687-1499-2012-328, Octobre, **2012**.
- [125] J. Cullen, "Radioframe presentation", in Femtocell Europe 2008 , London, UK, June **2008**.
- [126] F. Afroz1, S. Barua, K. Sandrasegaran, Performance analysis of fls, exp, log and m-lwdf packet scheduling algorithms in downlink 3gpp lte system, International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol. 6, No. 5, October **2014**.
- [127] Saito Yuya; Benjebbour Anass; Li Anxin; Takeda, Kazuaki; Kishiyama, Yoshihisa; Nakamura, Takehiro "System-level evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) for non-full buffer traffic model", Standards for Communications and Networking (CSCN), **2015** IEEE Conference on, pp: 94–99.
- [128] V. Tikhvinskiy, G. Bochechka. "Prospects and QoS Requirements in 5G Networks". Journal of Telecommunications and Information Technology (JTIT) (**2015**).

ANNEXE I

A. Exponential Proportional Fairness_RULE (EXP_RULE)

La règle EXP fournit des garanties de qualité de service sur une liaison sans fil [34]. EXP_RULE sélectionne un seul utilisateur par file d'attente pour recevoir le service dans chaque instant d'ordonnancement. EXP_RULE basé sur l'expression suivante :

$$w_{i,k}^{EXPrule} = b_i \exp\left(\frac{\alpha_i D_{HOL,i}}{c + \sqrt{\left(\frac{1}{N_{rt}}\right) \sum_{j \in N} \alpha_j D_{HOL,j}}}\right) \cdot \Gamma_k^i \quad (3.11)$$

Avec:

N_{rt} : représente le nombre des flux temps réel actives.

$D_{HOL,i}$: Représente le délai d'attente du paquet dans la file d'attente.

Γ_k^i est l'efficacité spectral de l'utilisateur I pour le flux k (*kth* RB).

Pour avoir des résultats optimales, les paramètres α_i , b_i et c , sont définis comme suit:

$$\begin{cases} a_i \in [5 / (0.99\tau_i), 10 / (0.99\tau_i)] \\ b_i = 1 / E[\Gamma^i] \\ c = 1 \end{cases}$$

B. Log Rule (LOG_RULE)

LOG_RULE est un ordonnanceur qui assure un équilibre dans les paramètres de qualité de service en termes de retard moyenne. La règle LOG est représentée comme suit :

$$w_{i,k}^{LOGrule} = b_i \log(c + \alpha_i D_{HOL,i}) \cdot \Gamma_k^i$$

Avec:

$D_{HOL,i}$: Représente le délai d'attente du paquet dans la file d'attente.

Γ_k^i est l'efficacité spectral de l'utilisateur I pour le flux k (*kth* RB).

Pour avoir des résultats optimales, les paramètres α_i , b_i et c , sont définis comme suit:

$$\begin{cases} a_i \in 5 / (0.99\tau_i) \\ b_i = 1 / E[\Gamma^i] \\ c = 1.1 \end{cases}$$