

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA - Bejaia

**Faculté de Technologie**  
**Département d'électronique**



Mémoire de fin de cycle  
En vue de l'obtention du diplôme

**MASTER**

Présenté par

**OUARET Salah**  
**BENHAMICHE Mohamed**

**Filière : Electronique**  
**Spécialité : Télécommunication**

*Thème*

**Gestion des ressources radio dans les  
réseaux LTE**

Soutenu le : 28/06/2016

Devant le jury composé de :

Mr SADJI	MCB	Président
Mr TOUNSI	MCB	Encadreur
Mme MEZHOUD	MCB	Examinatrice

**Année universitaire : 2015 - 2016**

## **Remerciements**

Nous remercions dieu, le tout puissant de nous avoir accordé santé, volonté, courage et patience pendant l'élaboration de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Dr M. TOUNSI, d'avoir accepté de suivre notre travail ainsi que les membres du jury Dr MEZHOUD et Dr SADJI pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont également au Dr Benhamiche Amal pour sa disponibilité et sa grande contribution dans la partie pratique.

Enfin, nous adressons nos remerciements à nos parents et nos proches pour le courage qu'ils nous ont apporté et leur soutien tout au long de notre travail.

# **Dédicaces**

Ce mémoire est dédié à,

Nos parents,

Nos familles,

Nos amis.

# **Table des matières**

# Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 : Rétrospective des générations mobiles .....</b>	<b>2</b>
I. Introduction .....	2
II. Histoire des réseaux de la téléphonie mobile .....	2
II.1. Les réseaux mobiles de 1 <sup>ère</sup> génération .....	2
II.1.1. Définition de la 1G .....	2
II.1.2. Les standards mobiles de 1 <sup>ère</sup> génération.....	2
II.1.3. Les inconvénients de la 1 <sup>ère</sup> génération .....	3
II.2. Les réseaux mobiles de 2 <sup>ème</sup> génération .....	3
II.2.1. Définition de la 2G .....	3
II.2.2. Les standards mobiles de 2 <sup>ème</sup> génération.....	3
II.2.3. Les principales caractéristiques du GSM.....	4
II.2.4. L'architecture du réseau GSM.....	6
II.2.4.1. Le sous-système radio BSS .....	6
II.2.4.2. Le sous-système réseau NSS.....	6
II.2.5. Les inconvénients et les évolutions de la 2 <sup>ème</sup> génération .....	7
II.3. Les réseaux mobiles de 3 <sup>ème</sup> génération .....	7
II.3.1. Définition de la 3G-UMTS .....	7
II.3.2. L'architecture du réseau UMTS .....	8
II.3.2.1. Le réseau d'accès UTRAN .....	8
II.3.2.2. Le réseau cœur CN.....	10
II.3.3. Le principe du W-CDMA en UMTS .....	11
II.3.4. Les inconvénients du W-CDMA .....	12
II.3.5. Les évolutions de l'UMTS .....	12
II.3.5.1. Le HSPA .....	12
II.3.5.2. Le HSPA+ .....	12

---

III. Conclusion.....	14
<b>Chapitre 2 : Caractéristiques et architecture du LTE.....</b>	<b>15</b>
I. Introduction .....	15
II. Caractéristiques du réseau LTE .....	15
II.1. Motivations et exigences du LTE .....	15
II.2. Allocation de spectre pour le LTE .....	17
II.2.1 Au niveau mondial.....	17
II.2.2. Au niveau régional.....	17
II.3. Contrôle de la qualité de service dans un réseau LTE .....	18
II.4. Performance du Handover dans le LTE .....	19
III. Architecture du LTE .....	19
III.1. Composants essentiels du réseau LTE.....	19
III.2. Les interfaces du réseau LTE.....	21
III.3. L'architecture protocolaire de l'interface radio du LTE.....	22
III.3.1. Présentation des piles protocolaires .....	22
III.3.2. Interactions logiques entre les couches protocolaires.....	22
III.3.3. Les couches de l'interface radio .....	24
III.3.3.1. La couche L1 (Physique) .....	24
III.3.3.2. La couche L2 (Liaison de données).....	24
III.3.3.3. La couche RRC .....	24
III.4. Structure de trames en LTE .....	25
III.4.1. Trame adaptée au FDD : .....	25
III.4.2. Trame adaptée au TDD : .....	25
IV. Principe de l'OFDM.....	26
IV.1. Intervalle de garde en OFDM.....	28
IV.2. Technique d'accès multiple OFDMA.....	29
IV.3. Porteuses orthogonales .....	30
IV.4. Modulation OFDM.....	31
IV.5. Avantages et inconvénients de l'OFDM .....	31
V. SC-FDMA .....	32
VI. La technique MIMO en LTE.....	33

---

VII. Conclusion.....	34
<b>Chapitre 3 : Algorithmes d'allocation en LTE.....</b>	<b>35</b>
I. Introduction .....	35
II. Principe et paramètres du Scheduling .....	35
III. Objectifs du Scheduling .....	35
IV. Facteurs influant sur la fonction du Scheduling.....	36
V. Types d'allocation de ressources en LTE .....	36
V.1. Allocation de ressources en temps .....	36
V.2. Allocation de ressources en fréquence.....	36
V.2.1. En voie descendante .....	36
V.2.2. En voie montante.....	39
VI. Les algorithmes d'ordonnancement .....	39
VI.1. Les algorithmes d'ordonnancement en Downlink.....	39
VI.1.1. Algorithmes classiques (Round Robin) .....	39
VI.1.2. Algorithmes équitables .....	40
VI.1.2.1. Fair Queuing (FQ) .....	40
VI.1.2.2. Weighted Fair Queuing (WFQ).....	40
VI.1.2.3. Max-Min Fair (MMF) .....	40
VI.1.3. Algorithmes opportunistes .....	41
VI.1.3.1. L'algorithme Max C/I.....	41
VI.1.3.2. Proportional Fair (PF).....	43
VI.1.3.3. L'algorithme M-LWDF .....	45
VI.1.3.4. L'algorithme EXP PF .....	45
VII. Récapitulatif des performances des ordonnanceurs en Downlink .....	46
VIII. Les algorithmes d'ordonnancement en Uplink.....	47
VIII.1. L'algorithme FME .....	48
VIII.2. L'algorithme RME.....	48
VIII.3. L'algorithme IRME .....	49
IX. Conclusion.....	50
<b>Chapitre 4 : Simulation d'algorithmes d'allocation.....</b>	<b>51</b>
I. Introduction .....	51

---

I.1. Présentation du logiciel LTE-Sim .....	51
I.1.1. Présentation de l'ensemble des algorithmes prédéfinis dans le LTE-Sim.....	51
I.1.2. Présentation de l'ensemble des scénarios prédéfinis dans le LTE-Sim.....	52
I.1.3 Interprétation et exploitation des résultats de simulation.....	54
I.1.3.1. Interprétation des résultats de simulation .....	54
I.1.3.2. Exploitation des résultats de simulation .....	55
II. Simulations et résultats .....	57
II.1. Services Temps Réel (RT) .....	58
II.1.1. VoIP .....	58
II.1.1.1. Simulation Single Cell without Interference (Paramètres 1) .....	59
II.1.1.2. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 1).....	61
II.1.1.3. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 2).....	63
II.1.2. VIDEO.....	65
II.1.2.1. Simulation Single Cell without Interference (Paramètres 1) .....	65
II.1.2.2. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 1).....	67
II.1.2.3. Simulation Single Cell with Interference (Paramètres 2) .....	69
II.2. Service Non Temps Réel (NRT).....	71
II.2.1. Best Effort.....	71
II.2.1.1. Simulation Single Cell without Interference (paramètres 1).....	71
II.2.1.2. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 1).....	73
II.2.1.3. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 2).....	75
III. Conclusion.....	77
Conclusion générale .....	78
Annexe A	
Références	



# Liste des abréviations

<b>16QAM</b>	16 Quadratic Amplitude Modulation.
<b>64QAM</b>	64 Quadratic Amplitude Modulation.
<b>0 G</b>	génération avant-première.
<b>1G</b>	1 <sup>ère</sup> Génération.
<b>2G</b>	2 <sup>ème</sup> Génération.
<b>3G</b>	3 <sup>ème</sup> Génération.
<b>3GPP</b>	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project.
<b>4G</b>	4 <sup>ème</sup> Génération.

## A

<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System.
<b>ARP</b>	Auto Radio Puhelin.
<b>AT&amp;T</b>	American Telephone & Telegraph.
<b>AuC</b>	Authentication Center.

## B

<b>BER</b>	Bit Error Rate.
<b>BSC</b>	Base Station Controller
<b>BSS</b>	Base Station Subsystem.
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station.

## C

<b>CD</b>	Channel Dependent.
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access.
<b>CN</b>	Core Network.
<b>CP</b>	Cyclic Prefix.
<b>CQI</b>	Channel Quality Indicator.
<b>CS</b>	Circuit Switched.
<b>CSI</b>	Channel State Information.

## D

<b>DC- HSDPA</b>	Dual Carrier-HSDPA.
------------------	---------------------

<b>DCS-1800</b>	Digital Communication System-1800.
<b>DFT</b>	Discret Fourier Transform.
<b>DFTS-OFDM</b>	DFT Spread-Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
<b>DwPTS</b>	Downlink Pilot Time Slot.

## E

<b>EDGE</b>	Enhanced Data rates for GSM Evolution.
<b>EIR</b>	Equipment Identity Register.
<b>eNodeB</b>	evolvedNodeB
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core.
<b>EPS</b>	Evolved Packet System.
<b>E-UTRAN</b>	Evolved-UTRAN.
<b>EXP PF</b>	EXponential Proportional Fair.

## F

<b>FDD</b>	Frequency Division Duplexing.
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access.
<b>FFT</b>	Fourier Function Transform.
<b>FME</b>	First Maximum Expansion.

## G

<b>GBR</b>	Guaranteed Bit Rate.
<b>GGSN</b>	Gateway GPRS Support Node.
<b>GMSC</b>	Gateway MSC.
<b>GP</b>	Guard band.
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service.
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communications.

## H

<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat reQuest.
<b>HLR</b>	Home Location Register.
<b>HSDPA</b>	High Speed Downlink Pocket Access.
<b>HSPA+</b>	High Speed Pocket Access+.
<b>HSPA</b>	High Speed Pocket Access.

**HSUPA** High Speed Uplink Pocket Access.

## I

**IES** Interférence Entre Symboles.

**iFFT** inverse Fourier Founction Transform.

**IMEI** International Mobile station Equipment Identity.

**IMT** International Mobile Telecommunication.

**IMT-DS** IMT-Direct Sequence.

**IMT-MC** IMT-Multi-carrier.

**IMT- TD** IMT-Time Division.

**IP** Internet Protocol.

**IRME** Improved Recursive Maximum Expansion.

**IS-95** Interim Standard-95.

## L

**LA** Location Area.

**LTE** Long Term Evolution.

## M

**MAC** Medium Access Control.

**Max C/I** Maximum Carrier to Interference.

**MaxSNR** Maximum Signal Noise Ratio.

**MIMO** Multi input multi output.

**MISO** Multiple Input Single Output.

**MLWDF** Modified Largest Weighted Delay First.

**MME** Mobility Management Entity.

**MS** Mobile Station.

**MSC** Mobile Switching Center.

## N

**NMT** Nordic Mobile Telephone.

**NRT** No Real Time.

**NSS** Network and Switching Subsystem.

**O**

<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnections.

**P**

<b>PAPR</b>	Peak to Average Power Ratio.
<b>PCRF</b>	Policy and Charging Rules Function
<b>PDC</b>	Packet Data Compression Protocol.
<b>PDU</b>	Protocol Data Unit.
<b>PDN</b>	Packet Data Network.
<b>PF</b>	Proportional Fair.
<b>PGW</b>	Packet data network Gateway.
<b>PLR</b>	Packet Loss Ratio.
<b>PN</b>	Pseudo random Noise code.
<b>PRB</b>	Physical Resource Block.
<b>PS</b>	Packet Switched.
<b>PSTN</b>	Public Switched Telephone Network.

**Q**

<b>QCI</b>	QoS Class Identifier.
<b>QoS</b>	Quality of Service.
<b>QPSK</b>	Quadratic Phase Shift Keying.

**R**

<b>RA</b>	Routing Area.
<b>RB</b>	Resource Block.
<b>RBG</b>	Resource Block Group.
<b>RLC</b>	Radio Link Control.
<b>RME</b>	Recursive Maximum Expansion.
<b>RNC</b>	Radio Network Controller.
<b>RRC</b>	Radio Resource Control.
<b>RT</b>	Real Time.

**S**

<b>SC-FDMA</b>	Single Carrier-Frequency Division Multiple Access.
<b>SDU</b>	Service Data Unit.
<b>SF</b>	Spreading Factor.
<b>SFR</b>	Société Française du Radiotéléphone.
<b>SGSN</b>	Serving GPRS Support Node.
<b>SGW</b>	Serving GateWay.
<b>SIMO</b>	Single Input Multiple Output.
<b>SISO</b>	Single input Single output.
<b>SMS</b>	Short Message Service.
<b>SNR</b>	Signal Noise Ratio.
<b>SPS</b>	Semi Persistent Scheduling.

**T**

<b>TD-CDMA</b>	Time Division-Code Division Multiple Access.
<b>TDD</b>	Time Division Duplexing.
<b>TD-SCDMA</b>	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access.
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access.
<b>TTI</b>	Transmission Time Interval.

**U**

<b>UE</b>	User Equipment.
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunication System.
<b>UpPTS</b>	Uplink Pilot Time Slot.
<b>UR</b>	Unité de Ressource.
<b>UTRAN</b>	UMTS Terrestrial Radio Access Network.

**V**

<b>VLR</b>	Visitor Location Register.
<b>VRB</b>	Virtual Resource Block.

**W**

<b>W-CDMA</b>	Wideband-CDMA.
<b>WFQ</b>	Weighted Fair Queuing.

# Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Bandes de fréquence utilisées en GSM-900.....	<b>4</b>
<b>Figure I.2</b> : Schéma des techniques FDMA et TDMA utilisées en GSM.....	<b>5</b>
<b>Figure I.3</b> : Principe des techniques FDMA, CDMA et TDMA.....	<b>5</b>
<b>Figure I.4</b> : Architecture globale du réseau GSM.....	<b>6</b>
<b>Figure I.5</b> : Architecture globale du réseau UMTS.....	<b>8</b>
<b>Figure I.6</b> : NodeB avec antenne omnidirectionnelle.....	<b>9</b>
<b>Figure I.7</b> : NodeB avec des antennes sectorielles.....	<b>9</b>
<b>Figure II.1</b> : Architecture globale du LTE.....	<b>19</b>
<b>Figure II.2</b> : Piles protocolaires des plans usager et plan de contrôle.....	<b>22</b>
<b>Figure II.3</b> : Interactions entre les couches protocolaires en LTE.....	<b>25</b>
<b>Figure II.4</b> : Modélisation en couches protocolaires de l'interface radio.....	<b>26</b>
<b>Figure II.5</b> : Structure d'une trame LTE adaptée au FDD.....	<b>25</b>
<b>Figure II.6</b> : Structure d'une trame LTE adaptée au TDD.....	<b>26</b>
<b>Figure II.7</b> : principe d'un modulateur OFDM en bande de base.....	<b>27</b>
<b>Figure II.8</b> : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.....	<b>28</b>
<b>Figure II.9</b> : Intervalle de garde introduit par un modulateur OFDM.....	<b>28</b>
<b>Figure II.10</b> : Grille de ressources temps-fréquence.....	<b>29</b>
<b>Figure II.11</b> : Structure des RB dans un système OFDMA.....	<b>30</b>
<b>Figure II.12</b> : Constellations des signaux pour différents ordres de modulation.....	<b>31</b>
<b>Figure II.13</b> : Schéma synoptique de la structure d'un émetteur récepteur SC-FDMA.....	<b>32</b>
<b>Figure II.14</b> : vue d'ensemble des diversités de SISO à MIMO.....	<b>33</b>
<b>Figure III.1</b> : Différents types d'allocation de ressources radios.....	<b>37</b>
<b>Figure III.2</b> : Types d'allocation localisé et distribué.....	<b>39</b>
<b>Figure III.3</b> : schéma représentatif de l'ordonnanceur Max C/I.....	<b>42</b>
<b>Figure III.4</b> : Problème d'iniquité du au positionnement des utilisateurs.....	<b>43</b>
<b>Figure III.5</b> : schéma représentatif de l'ordonnanceur Proportional Fair.....	<b>44</b>
<b>Figure III.6</b> : Matrice d'association UE-RB.....	<b>47</b>
<b>Figure III.7</b> : Exemple d'application de l'algorithme RME.....	<b>49</b>
<b>Figure IV.1</b> : signature du scénario Single Cell without Interference.....	<b>52</b>
<b>Figure IV.2</b> : signature du scénario Single Cell with Interference.....	<b>52</b>

<b>Figure IV.3</b> : signature du scénario Single Cell with Femto.....	<b>52</b>
<b>Figure IV.4</b> : signature du scénario Single Cell with Streets.....	<b>53</b>
<b>Figure IV.5</b> : signature du scénario Multi Cell.....	<b>53</b>
<b>Figure IV.6</b> : signature du scénario Multi Cell SinrPlot.....	<b>53</b>
<b>Figure IV.7</b> : Trace des résultats d'un exemple de simulation sous LTE-Sim.....	<b>54</b>
<b>Figure IV.8</b> : Accès au script doSim1.sh.....	<b>55</b>
<b>Figure IV.9</b> : Le script « doSim1.sh ».....	<b>56</b>
<b>Figure IV.10</b> : Trace d'exécution du script « doSim1.sh ».....	<b>56</b>
<b>Figure IV.11</b> : Paramètres 1 à implémenter dans le script « doSim1.sh ».....	<b>57</b>
<b>Figure IV.12</b> : Paramètres 2 à implémenter dans le script « doSim1.sh ».....	<b>58</b>
<b>Figure IV.13</b> : Graphe du débit VoIP dans Single Cell without Interference.....	<b>59</b>
<b>Figure IV.14</b> : Graphe du délai VoIP dans Single Cell without Interference.....	<b>59</b>
<b>Figure IV.15</b> : Graphe du PLR VoIP dans Single Cell without Interference.....	<b>60</b>
<b>Figure IV.16</b> : Graphe du débit VoIP dans Single Cell with Interference(Par1).....	<b>61</b>
<b>Figure IV.17</b> : Graphe du délai VoIP dans Single Cell with Interference(Par1).....	<b>61</b>
<b>Figure IV.18</b> : Graphe du PLR VoIP dans Single Cell with Interference(Par1).....	<b>62</b>
<b>Figure IV.16</b> : Graphe du débit VoIP dans Single Cell with Interference(Par2).....	<b>63</b>
<b>Figure IV.17</b> : Graphe du délai VoIP dans Single Cell with Interference(Par2).....	<b>63</b>
<b>Figure IV.18</b> : Graphe du PLR VoIP dans Single Cell with Interference(Par2).....	<b>64</b>
<b>Figure IV.19</b> : Graphe du débit VIDEO dans Single Cell without Interference.....	<b>65</b>
<b>Figure IV.20</b> : Graphe du délai VIDEO dans Single Cell without Interference.....	<b>65</b>
<b>Figure IV.21</b> : Graphe du PLR VIDEO dans Single Cell without Interference.....	<b>66</b>
<b>Figure IV.22</b> : Graphe du débit VIDEO dans Single Cell withInterference(Par1).....	<b>67</b>
<b>Figure IV.23</b> : Graphe du débit VIDEO dans Single Cell with Interference(Par1).....	<b>67</b>
<b>Figure IV.23</b> : Graphe du PLR VIDEO dans Single Cell with Interference(Par1).....	<b>68</b>
<b>Figure IV.22</b> : Graphe du débit VIDEO dans Single Cell withInterference(Par2).....	<b>69</b>
<b>Figure IV.23</b> : Graphe du débit VIDEO dans Single Cell with Interference(Par2).....	<b>69</b>
<b>Figure IV.23</b> : Graphe du PLR VIDEO dans Single Cell with Interference(Par2).....	<b>70</b>
<b>Figure IV.24</b> : Graphe du débit DATA dans Single Cell without Interference.....	<b>71</b>
<b>Figure IV.25</b> : Graphe du délai DATA dans Single Cell without Interference.....	<b>71</b>
<b>Figure IV.26</b> : Graphe du PLR DATA dans Single Cell without Interference.....	<b>72</b>

<b>Figure IV.27</b> : Graphe du débit DATA dans Single Cell with Interference(Par1).....	<b>73</b>
<b>Figure IV.28</b> : Graphe du délai DATA dans Single Cell with Interference(Par1).....	<b>73</b>
<b>Figure IV.29</b> : Graphe du PLR DATA dans Single Cell with Interference(Par1).....	<b>74</b>
<b>Figure IV.27</b> : Graphe du débit DATA dans Single Cell with Interference(Par2).....	<b>75</b>
<b>Figure IV.28</b> : Graphe du délai DATA dans Single Cell with Interference(Par2).....	<b>75</b>
<b>Figure IV.29</b> : Graphe du PLR DATA dans Single Cell with Interference(Par2).....	<b>76</b>



## Liste des tableaux

<b>Tableau I.I</b> : Caractéristiques des 3 générations de la téléphonie mobile.....	<b>13</b>
<b>Tableau II.I</b> : Exigences QoS pour différents services.....	<b>18</b>
<b>Tableau III.I</b> : Taille des RBG en fonction de la largeur de bande du système.....	<b>38</b>
<b>Tableau III.II</b> : Classification qualificative des ordonnanceurs.....	<b>46</b>
<b>Tableau IV.I</b> : Signification de l'information présente dans chaque colonne.....	<b>55</b>

# **Introduction générale**

# Introduction générale

Les communications mobiles débutèrent il y a presque vingt ans et durant cette période, les réseaux mobiles ont connu à travers leurs évolutions des étapes majeures communément appelées générations, nous parlons des première, deuxième et troisième générations de réseaux mobiles, généralement abrégées respectivement en 1G, 2G, 3G. Ces normes technologiques se distinguent par les différents aspects de la couche physique, à savoir les schémas de modulation et de codage essentiels à la transmission sans fil, ainsi que divers protocoles impliqués dans les couches supérieures. Ces générations ont connu une utilisation de plus en plus accrue aussi bien en nombre d'abonnés qu'en nombre de services, ceci a fait de ce domaine un véritable nouveau secteur de l'industrie mondiale, ce qui a poussé ses différents acteurs surtout les opérateurs de réseaux mobiles, à faire évoluer les systèmes utilisés afin de répondre à ces exigences tout en assurant une bonne qualité de service. Une piste a été suivie par le 3GPP qui est la définition d'une toute nouvelle génération appelée 4G LTE [1].

L'une des fonctions essentielles du réseau LTE permettant l'atteinte d'une certaine qualité de service (QoS) est la gestion efficace des ressources radio assurée par l'ordonnancement. Ce dernier a été laissé ouvert, de façon que chaque fournisseur de services peut décider sur la mise en œuvre des algorithmes de planification pour répondre aux exigences de qualité de service de chaque utilisateur à savoir, type de trafic, conditions canal.. Un algorithme d'ordonnancement efficace devrait ainsi fournir aux utilisateurs le service de qualité qu'ils désirent, avec garanties sur le débit, le retard et l'équité tout en faisant le meilleur usage des ressources radios disponibles. Les ordonnanceurs varient du plus simple au plus complexe et ont été conçus de façon à prendre en compte différentes mesures pour la qualité de service.

Notre travail est organisé de manière à présenter d'abord dans le chapitre 1, une rétrospective des différentes générations mobiles, puis dans le chapitre 2, une description du réseau LTE sous différents aspects à savoir, ses caractéristiques, son architecture physique et protocolaire ainsi que les techniques d'accès multiple utilisées, ensuite dans le chapitre 3, un état de l'art des ordonnanceurs les plus connus, finalement dans le chapitre 4, les résultats de la simulation de quelques ordonnanceurs dans des scénarios préalablement choisis.

# Chapitre 1

# Chapitre 1

## Rétrospective des générations mobiles

### I. Introduction

Tout a commencé avec la téléphonie 0G ou téléphonie radio-mobile qui était surtout présente dans les voitures avec des systèmes embarqués. L'exemple principal est le système ARP lancé en Finlande en 1971. Ce sont des téléphones analogiques assez conséquents, très gourmands en énergie et nécessitant une antenne de près de 1 mètre de long, d'où leur intégration dans les voitures, ces derniers n'auraient jamais pu être portatifs comme à l'heure actuelle [2].

### II. Histoire des réseaux de la téléphonie mobile

#### II.1. Les réseaux mobiles de 1<sup>ère</sup> génération

##### II.1.1. Définition de la 1G

Les premiers systèmes radio mobiles de cette génération ont été créés dans les années 1970. En effet, la liaison téléphonique entre le téléphone et le réseau téléphonique est relié par l'intermédiaire d'un relai. Chaque relai couvre une zone géographique appelée cellule [2].

La première génération utilise d'un point de vue technique, un codage et une modulation en fréquence analogique. Les réseaux analogiques utilisaient uniquement l'accès multiple à répartition de fréquences FDMA, mécanisme dans lequel un usager en cours de communication se voit attribuer un couple de fréquences qui lui est réservé pour toute la durée de l'appel, dans une bande de fréquences autour de 900 MHz pour les systèmes déployés aux états unis et 450 MHz pour ceux déployés en France.

##### II.1.2. Les standards mobiles de 1<sup>ère</sup> génération

La première génération des systèmes cellulaires (1G) utilisait les standards suivants :

- **AMPS**, lancé aux Etats-Unis par AT&T.
- **NMT**, utilisé par SFR en France, spécifié par les administrations des télécommunications nordiques à partir de 1970 [2].
- **Radiocom2000** mis en place par France Télécom en 1986 [3].

### II.1.3. Les inconvénients de la 1<sup>ère</sup> génération

Certes les systèmes de première génération offraient un service en mobilité, cependant ils ne parvenaient pas réellement d'une part, à franchir les frontières internationales du fait de l'incompatibilité de ces systèmes développés dans chaque pays, d'autre part, il n'y avait pas de continuité en se déplaçant d'une cellule à une autre donc la mobilité était fort limitée à une seule cellule [3] [1].

Ajoutons à cela que les fréquences sont une ressource rare, ce qui veut dire que la capacité de ces systèmes reste très dépendante de ces dernières donc très limitée. En parallèle, le nombre d'utilisateurs était restreint par le coût élevé des terminaux et des tarifs des communications ainsi que la portabilité limitée à cause des dimensions imposantes de ces terminaux, de plus, un grand nombre de standards n'étaient pas économiques et considérablement coûteux pour les constructeurs.

Tous ces inconvénients appellent à l'obligation de la mise en place d'une deuxième génération qui comblera les lacunes techniques, fonctionnelles et économiques des systèmes 1G [1].

## II.2. Les réseaux mobiles de 2<sup>ème</sup> génération

### II.2.1. Définition de la 2G

Voilà qu'arrive les réseaux mobiles 2G sans fil qui reposent sur un codage et une modulation numériques développés à la fin des années 80 et donnaient accès aux services voix, SMS et également le transfert de données à faibles débits.

Ce système apportait une meilleure qualité avec une plus grande capacité à moindre coût pour l'utilisateur ainsi qu'une réduction importante de la taille des terminaux grâce aux progrès dans le domaine de l'électronique qui permettait une réelle mobilité et une portabilité facile [1].

### II.2.2. Les standards mobiles de 2<sup>ème</sup> génération

La deuxième génération de systèmes cellulaires (2G) utilise les standards suivants :

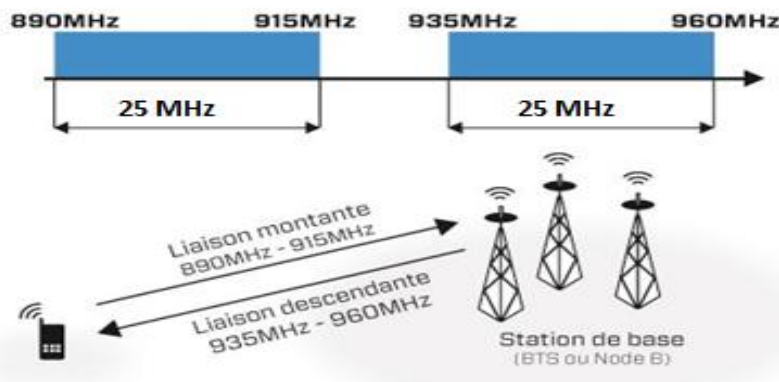
- **GSM**, développé en Europe.
- **PDC**, développé au Japon.
- **IS-95** développé aux états unis par l'entreprise américaine Qualcomm.

De ces trois systèmes précédents, le standard GSM est celui qui a rencontré le plus large succès et fut déployé dans un grand nombre de pays, permettant l'itinérance entre eux. [1] Des techniques d'accès multiple plus élaborées furent employées. GSM et PDC utilisent par exemple FDMA entre cellule, combinée à une TDMA dans une même cellule et les voies montante et descendante sont séparées en fréquence avec le mode FDD. L'IS-95 utilise l'accès multiple à répartition de codes CDMA. Toutes ces techniques accrurent largement l'efficacité spectrale des systèmes. A titre d'exemple, une cellule GSM peut supporter une cinquantaine d'appels voix simultanés [1].

### II.2.3. Les principales caractéristiques du GSM

La norme GSM occupe deux bandes de fréquences aux alentours des 900 MHz :

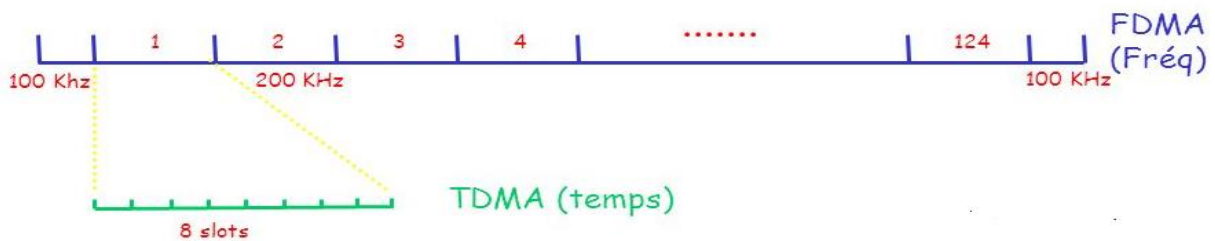
- La bande de fréquence 890 - 915 MHz pour les communications montantes (du mobile vers la station de base).
- La bande de fréquence 935 - 960 MHz pour les communications descendantes (de la station de base vers le mobile). (Fig.I.1)



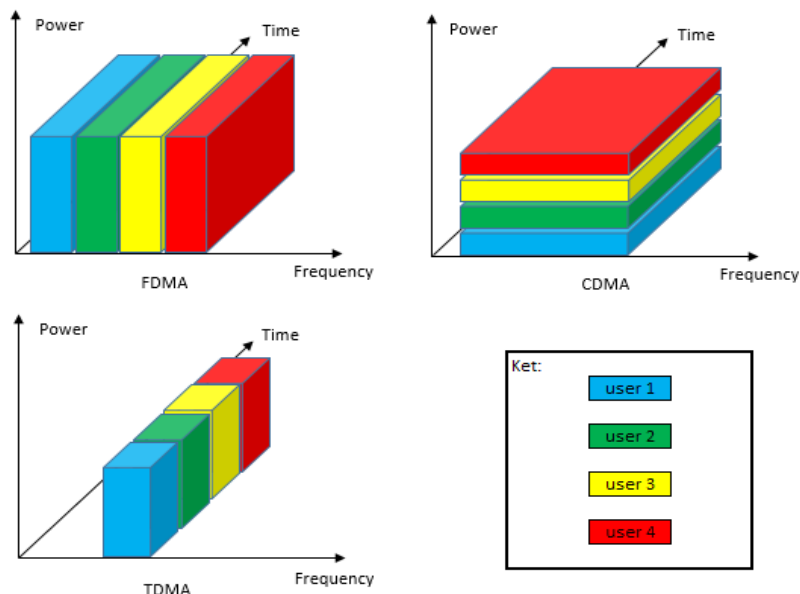
**Figure I.1** : Bandes de fréquence utilisées en GSM-900.

Comme chaque canal fréquentiel utilisé pour une communication a une largeur de bande de 200 KHz, cela laisse la place pour 124 canaux fréquentiels à répartir entre les différents opérateurs. Mais avec le nombre d'utilisateurs qui augmente, il s'est avéré nécessaire d'attribuer une bande supplémentaire aux alentours des 1800 MHz, c'est le système DCS-1800 dont les caractéristiques sont quasi identiques au GSM en termes de protocoles et de service, les communications montantes se font entre 1710 MHz et 1785 MHz et les communications descendantes entre 1805 et 1880 MHz. Connaissant les différents canaux disponibles, il est alors possible d'effectuer un multiplexage fréquentiel FDMA (Fig.I.2).

Un opérateur ne dédie pas pour autant une bande de fréquences par utilisateur, car cela conduirait à un gaspillage de ressources radio étant donné qu'un utilisateur émet par intermittence. De plus, avec un tel système, si une source parasite émet un bruit à une fréquence bien déterminée, le signal qui se trouve dans la bande de fréquence contenant le parasite sera perturbé. Pour résoudre ces problèmes, on combine le multiplexage en fréquence à un multiplexage temporel TDMA (Fig.I.2), consistant à diviser chaque canal de communication en trames de 8 intervalles de temps ou time slots, c'est-à-dire, faire parler huit utilisateurs l'un après l'autre dans le même canal. (Fig.I.2). Pour être complet, signalons qu'il existe encore une autre technique de multiplexage appelée CDMA et utilisée dans la norme américaine IS-95 et promue pour l'UMTS. (Fig.I.3) [4].



**Figure I.2 :** Schéma des techniques FDMA et TDMA utilisées en GSM.

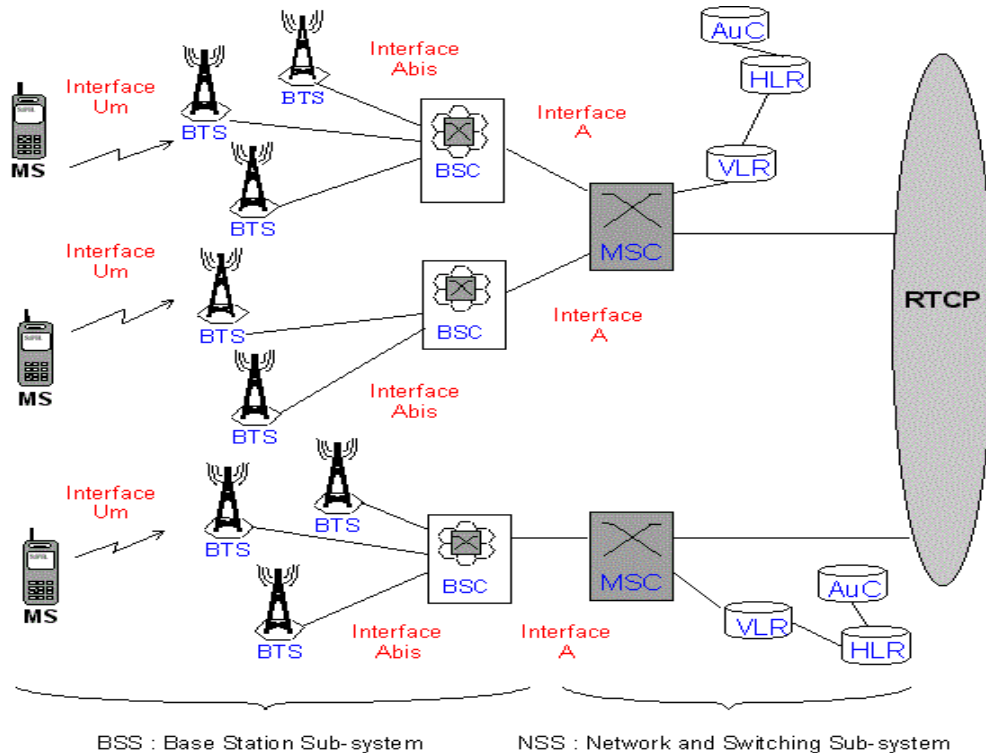


**Figure I.3 :** Principe des techniques FDMA, CDMA et TDMA.



## II.2.4. L'architecture du réseau GSM

Le réseau GSM est composé d'un sous-système radio BSS et d'un sous-système réseau NSS (Fig I.4.)



*Figure I.4 : Architecture globale du réseau GSM.*

### II.2.4.1. Le sous-système radio BSS

Il est composé de trois entités essentielles à savoir :

- **La MS** qui réfère au terminal mobile.
- **La BTS** qui est considérée comme un relai intermédiaire entre la MS et le BSC à travers l'interface Um.
- **Le BSC**, comme son nom l'indique, cet organe contrôle plusieurs BTS et gère l'allocation des fréquences, le contrôle de puissance, d'admission, décide et exécute le Handover. Il est relié aux BTS par l'interface Abis.

### II.2.4.2. Le sous-système réseau NSS

Il est composé principalement d'un MSC, un commutateur qui gère l'établissement des communications entre un mobile et un autre MSC ainsi que la transmission des messages courts (SMS) et l'exécution du Handover lorsqu'il y est impliqué. Il dialogue avec le VLR pour gérer

la mobilité des usagers : vérification des caractéristiques des abonnés visiteurs lors d'un appel départ, transfert des informations de localisation, etc. Il peut posséder une fonction passerelle GMSC qui est activée au début de chaque appel d'un abonné fixe vers un abonné mobile. Chaque MSC est relié à un VLR, HLR et un AuC [5].

### **II.2.5. Les inconvénients et les évolutions de la 2<sup>ème</sup> génération**

Les systèmes 2G présentent plusieurs limites. La plus importante est d'ordre capacitaire, impliquant des rejets d'appels aux heures les plus chargées de la journée. A ses débuts, le GSM utilisait un réseau cœur à commutation de circuit par lequel l'accès aux services de données était particulièrement lent. Afin d'accroître les débits fournis, le réseau d'accès GSM fut connecté à un réseau cœur appelé GPRS qui améliora la prise en charge des services de données. En complément de ce développement, la technologie d'accès radio EDGE rendit possible des débits de l'ordre de 240 Kbit/s par cellule grâce à l'amélioration des techniques d'accès au canal radio. Toutefois, à la fin des années 1990, les débits fournis par les réseaux 2G étaient encore trop limités pour que l'accès aux services de données soit fluide. Cette limitation fut à l'origine de la définition des technologies 3G [1].

## **II.3. Les réseaux mobiles de 3<sup>ème</sup> génération**

### **II.3.1. Définition de la 3G-UMTS**

La 3G a connu un succès commercial notable, seules deux grandes familles représentent cette dernière, le CDMA 2000 qui est une évolution du standards IS-95 qui fut déployé principalement en Amérique du nord et en Asie et l'UMTS qui est une évolution du standard GSM, largement déployé dans le monde et sur lequel nous nous focaliserons car c'est cette famille qui subira une évolution et qui donnera naissance au LTE.

L'UMTS a été développée par le 3 GPP à partir de 2004 avec la Release 99 et est compatible avec tous les réseaux du monde du fait de la possibilité de Roaming au niveau mondial. Sa bande de fréquence de fonctionnement est 1900MHz-2000 MHz et il contient les standards suivants :

- **IMT-DS** ou W-CDMA, utilisé dans les réseaux UMTS en Europe.
- **IMT-MC** ou CDMA2000, utilisé en Amérique.
- **IMT-TD** qui comprend TD-CDMA et TD-SCDMA utilisée en Chine [1].

### II.3.2. L'architecture du réseau UMTS

Le réseau UMTS est composé d'un réseau d'accès UTRAN et d'un réseau cœur CN comme c'est illustré dans la figure I.5 ci-après.

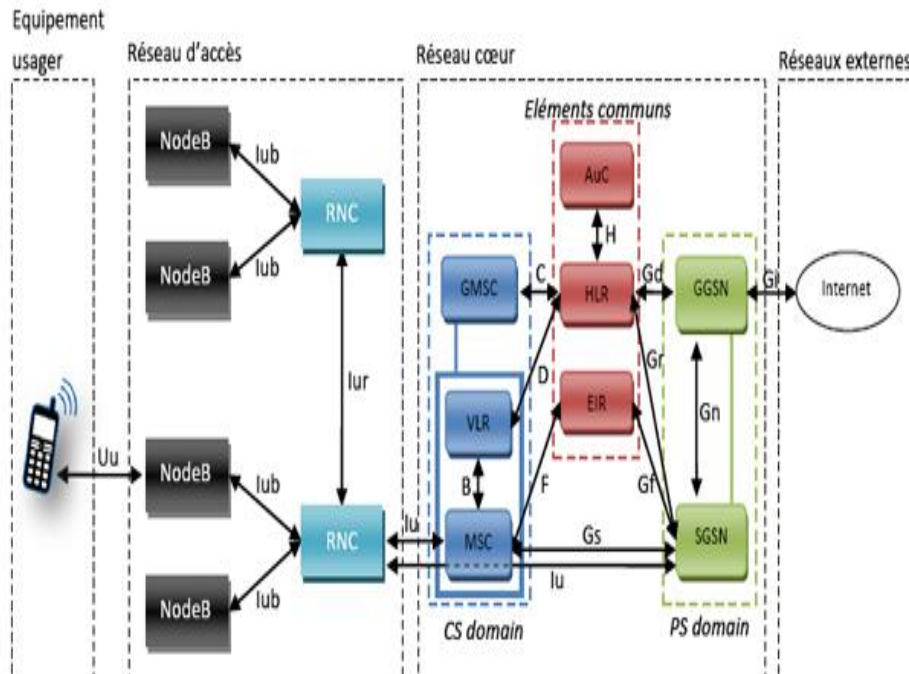


Figure I.5 : Architecture globale du réseau UMTS.

#### II.3.2.1. Le réseau d'accès UTRAN

Le réseau d'accès UTRAN est composé de plusieurs éléments :

- Une ou plusieurs stations de base appelées NodeB.
- Des contrôleurs radio RNC qui constituent le point d'accès pour l'ensemble des services vis-à-vis du réseau cœur, ils ont pour rôle, le routage des communications entre le NodeB et le réseau cœur de l'UMTS [6].

Le réseau UTRAN est doté de plusieurs fonctionnalités à savoir :

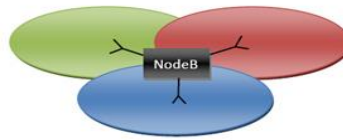
- Transférer les données générées par l'utilisateur et assurer la confidentialité et la protection des informations échangées par l'interface radio en utilisant des algorithmes de chiffrement et d'intégrité.
- L'estimation de la position géographique de l'utilisateur mobile.
- La gestion de l'allocation des ressources radio nécessaires à la communication [6].

### a) Le 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 UTRAN avec un équipement usager. Il travaille au niveau de la couche physique du modèle OSI (codage et décodage). Nous pouvons trouver deux types de NodeB : [6].



**Figure I.6 :** NodeB avec antenne omnidirectionnelle.



**Figure I.7 :** NodeB avec des antennes sectorielles.

### b) Le RNC

Le RNC contrôle les transmissions radio des stations de base NodeB. Il gère la répartition des ressources radios, le chiffrement des données avant l'envoi au téléphone mobile, ainsi qu'une partie de la localisation des terminaux mobiles des abonnés. C'est l'équivalent des BSC des réseaux 2G GSM [6].

### c) Les interfaces de communication en UTRAN

Plusieurs types d'interfaces de communication coexistent au sein du réseau UMTS :

- **Uu** : Interface entre un équipement usager et le réseau d'accès UTRAN.
- **Iu** : Interface entre le réseau d'accès UTRAN et le réseau cœur de l'UMTS qui permet au contrôleur radio RNC de communiquer avec le SGSN.
- **Iur** : Interface qui permet à deux contrôleurs radio RNC de communiquer.
- **Iub** : Interface entre un NodeB et un contrôleur radio RNC [6].

### II.3.2.2. Le réseau cœur CN

Le réseau cœur de l'UMTS est composé de deux parties distinctes avec une autre commune, qui sont :

- Le domaine **CS** qui est utilisé pour la téléphonie.
- Le domaine **PS** qui permet la commutation de paquets.
- Les éléments communs aux domaines **CS** et **PS** [6].

#### a) Le domaine CS

Le domaine CS est composé de plusieurs modules à savoir :

- **MSC** qui est en charge d'établir la communication avec l'équipement usager et de commuter les données.
- **GMSC** qui est une passerelle entre le réseau UMTS et le réseau téléphonique commuté PSTN. Si un équipement usager contacte un autre équipement depuis un réseau extérieur au réseau UMTS, la communication passe par le GMSC qui interroge le HLR pour récupérer les informations de l'utilisateur, ensuite, il route la communication vers le MSC dont dépend l'utilisateur destinataire.
- **VLR** qui est une base de données attachée à un ou plusieurs MSC et qui garde en mémoire l'identité temporaire de l'équipement usager et enregistre les usagers dans une zone géographique LA [6].

#### b) Le domaine PS

Le domaine PS est composé de plusieurs modules :

- **SGSN** qui est en charge d'enregistrer les usagers d'une zone géographique dans une zone de routage RA.
- **GGSN** qui est une passerelle vers les réseaux à commutation de paquets extérieurs tels que l'Internet [6].

### c) Les éléments communs entre CS et PS

Les éléments en commun entre CS et PS sont :

- **HLR** qui représente une base de données des informations de l'utilisateur : l'identité de l'équipement usager, le numéro d'appel de l'utilisateur, les informations relatives aux possibilités de l'abonnement souscrit par l'utilisateur.
- **AuC** qui est en charge de l'authentification de l'abonné, ainsi que du chiffrement de la communication. Si une de ces deux fonctions n'est pas respectée, la communication est rejetée. Il se base sur le HLR afin de récupérer les informations relatives à l'utilisateur et pour ainsi créer une clé d'identification.
- **EIR** qui est en charge de la gestion des vols des équipements usagers. Il est en possession d'une liste des mobiles « blacklistés » par un numéro unique propre à chaque équipement usager, le numéro IMEI [6].

### II.3.3. Le principe du W-CDMA en UMTS

L'UMTS R99 utilise la technologie W-CDMA ou bien CDMA large bande où le signal utile est étalé sur une largeur de bande de 3.84 MHz (d'où le nom de large bande) avant mise sur porteuse occupant un canal de 5 MHz. Pour cela, chaque bit d'information à transmettre est multiplié (OU exclusif) par un code pseudo aléatoire PN propre à cet utilisateur.

La séquence du code (constituée de  $N$  éléments appelés "chips") est unique pour ce dernier et constitue la clé de codage. Cette dernière est conservée si le symbole de donnée est égal à 1, sinon elle est inversée. La longueur  $L$  du code est appelée facteur d'étalement SF. Si chacun des symboles a une durée  $T_b$ , on a 1 chip toutes les  $T_b/N$  secondes. Le nouveau signal modulé à un débit  $N$  fois plus grand que le signal initialement envoyé par l'utilisateur utilisera donc une bande de fréquences  $N$  fois plus étendue.

Afin de pouvoir lire le message codé envoyé, le récepteur doit réaliser la même opération. En effet, ce dernier génère la même séquence d'étalement qu'il multiplie au signal reçu afin d'obtenir les données. Les données des autres utilisateurs (pas de multiplication avec la séquence d'étalement) restent étalées. Chaque appel est associé à un code spécifique connu de la station de base et du terminal, qui permet de le différencier des autres appels en cours sur la même porteuse.

Le W-CDMA autorise la connexion simultanée à plusieurs cellules, renforçant ainsi la qualité des communications lors du changement de cellule en mobilité et atteint un débit maximal de 384 Kbits/s dans les sens montant et descendant [6].

#### **II.3.4. Les inconvénients du W-CDMA**

L'inconvénient du W-CDMA se focalise sur l'effet appelé Near-far qui se produit lorsqu'un appareil mobile émet à une puissance trop élevée qui empêche tous les autres appareils mobiles du voisinage de transmettre. Le terminal mobile à forte puissance éblouit les mobiles environnants. Prenons par exemple un mobile émetteur qui se trouve au pied de la station de base et d'autres appareils mobiles en périphérie dont leurs puissances qui arrivent au pied de la station de base sont affaiblies par la distance. Ces dernières seront masquées par le signal de l'émetteur puissant. Pour remédier à ce problème, il est possible de mettre en place un système de contrôle de puissance permettant à la station de base de recevoir les signaux de même puissance de prendre en compte tout type de variation d'affaiblissement [6].

#### **II.3.5. Les évolutions de l'UMTS**

##### **II.3.5.1. Le HSPA**

Les évolutions HSPA, aujourd'hui connues commercialement sous le nom de 3G+ sont :

- HSDPA en voie descendante, Release 5 (2002).
- HSUPA en voie montante, Release 6 (2005).

L'innovation principale du HSPA concerne le passage d'une commutation circuit sur l'interface radio, 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. L'allocation dynamique des ressources est effectuée par la fonction d'ordonnancement ou scheduling. Cette fonction (sujet de notre travail) sera détaillée dans le chapitre suivant dans le cadre des réseaux 4G [1].

##### **II.3.5.2. Le HSPA+**

HSPA+, normalisé au cours des Releases 7 (2007) et 8 (2008), regroupe plusieurs évolutions techniques visant principalement à améliorer, les débits fournis aux utilisateurs, la capacité du système ainsi que la gestion des utilisateurs Always-on.

L'amélioration des débits et de la capacité est rendue possible par l'introduction de nouvelles techniques. En Downlink, la modulation 64QAM est désormais prise en charge, de même que la modulation 16QAM en Uplink. En complément, une cellule peut transmettre des données à un utilisateur sur deux porteuses simultanément en Downlink, à l'aide de la fonctionnalité DC- HSDPA. Le spectre supportant la transmission n'est donc plus limité à 5 MHz mais à 10 MHz. Les débits fournis à l'utilisateur sont potentiellement doublés. De plus, la largeur de bande plus élevée permet au système une gestion plus efficace des ressources spectrales. 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 [1].

Les caractéristiques des différentes générations sont résumées dans le tableau III.I :

	<b>GSM/GPRS/EDGE</b>	<b>UMTS R99</b>	<b>HSPA</b>	<b>HSPA+ R8</b>
<b>BW</b>	900-1800 MHz	900-2100 MHz	900-2100 MHz	900-2100 MHz
<b>Débit Max UL</b>	118 Kbps	384 Kbps	5.8 MHz	11.5 Mbps
<b>Débit Max DL</b>	236 Kbps	384 Kbps	14.4 MHz	42 Mbps
<b>Modulation UL</b>	8PSK	BPSK	BPSK/QPSK	BPSK/QPSK 16QAM
<b>Modulation DL</b>	GMSK	QPSK	QPSK/16QAM	QPSK/16QAM 64QAM
<b>Latence</b>	300 ms	250 ms	70 ms	30 ms
<b>Largeur de canal</b>	200 KHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz
<b>Multiplexage</b>	FDMA/TDMA	CDMA	CDMA/TDMA	CDMA/TDMA

*Tableau I.I : Caractéristiques des 3 générations de la téléphonie mobile.*



### **III. Conclusion**

Dans certains pays tels que le Japon et les Etats-Unis, la technologie UMTS et ses évolutions HSPA ont commencé à montrer leurs limites en termes de capacité à cause de la mise en marché des smartphones avec de nouveaux services impliquant une connexion quasi-continue au réseau, cela a mené à un essor brutal des usages et du trafic à écouler par les réseaux et avec l'augmentation de la charge des réseaux, la qualité de service fournie aux clients se dégrade, ce qui pose un véritable problème aux opérateurs de réseaux mobiles. Une piste a été suivie par le 3GPP afin de répondre à ces contraintes qui est la définition d'une toute nouvelle génération qui s'appelle LTE et qui est l'objet de discussion dans notre prochain chapitre [1].

# Chapitre 2

# Chapitre 2

## Caractéristiques et architecture du LTE

### I. Introduction

Le LTE a été envisagé dès novembre 2004 comme l'évolution à long terme de l'UMTS, lors d'un atelier organisé par le 3GPP appelé Future Evolution Work Shop. Cette évolution était alors destinée à maintenir la compétitivité de l'UMTS sur un horizon de dix ans et au-delà. Les travaux sur cette nouvelle norme ont débuté au 3GPP en janvier 2005 avec une étude de faisabilité, qui s'est conclue en septembre 2006 avec la définition des grands principes de la technologie LTE. Les travaux sur cette technologie se sont déroulés jusqu'à décembre 2008, date où la première version des spécifications a été approuvée. Le LTE est ainsi défini dans la Release 8 [1].

### II. Caractéristiques du réseau LTE

#### II.1. Motivations et exigences du LTE

L'émergence du LTE n'est due sûrement pas à un coup du hasard mais bien au contraire, à plusieurs facteurs techniques et industriels qui ont poussé cette technologie à naître, on parle alors des motivations pour l'introduction du LTE. Ces dernières se résument en ces points :

##### a) Augmentation de la capacité

Le terme capacité est dédié à une cellule d'un réseau mobile quelconque et traduit le trafic maximal (soit en nombre d'appels simultanés ou transmission de données par plusieurs utilisateurs en même temps) que la cellule peut écouler en situation de forte charge au cours d'une période donnée. En LTE. Il est attendu :

- Qu'au moins 200 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état actif pour une largeur de bande de 5 MHz.
- Qu'au moins 400 utilisateurs simultanés par cellule soient acceptés à l'état actif pour des largeurs de bande supérieures à 5 MHz [1].

**b) Augmentation du débit**

L'évolution des débits suit celle de la capacité, chaque nouvelle technologie de réseaux mobiles augmentant les débits et suscitant une attente de débits supérieurs. Les objectifs de débit maximal définis pour le LTE sont les suivants :

- 100 Mbps en voie descendante pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale de 5 bps/Hz.
- 50 Mbps en voie montante pour une largeur de bande allouée de 20 MHz, soit une efficacité spectrale de 2.5 bps/Hz [1].

**c) Diminution de la latence**

La latence est définie comme étant la capacité d'un système à réagir rapidement aux demandes et requêtes des utilisateurs. Une latence forte limite l'interactivité du système et s'avère pénalisante pour l'usage de certains services de données. On distingue deux types de latence :

- **La latence du plan de contrôle**

Elle représente le temps nécessaire pour établir une connexion et à accéder au service. L'objectif du LTE est d'améliorer cette dernière en visant un temps de transition inférieur à 100 ms entre un état de veille de l'UE et un état actif autorisant l'établissement du plan usager.

- **La latence du plan usager**

Elle représente le délai de transmission d'un paquet entre la couche IP de l'UE d'un nœud du réseau d'accès ou inversement au sein du réseau et cela une fois la connexion établie bien sûr. Elle est nettement améliorée si nous la comparons à celle de l'UMTS (qui est supérieure à 70 ms) et est inférieure à 5 ms dans des conditions de faible charge du réseau et pour des paquets IP de petite taille, soit un écart d'au moins 65 ms, ce qui est sûrement très bénéfique pour la technologie LTE [1].

**d) La flexibilité spectrale ou agilité en fréquence**

L'un des défis que le LTE se doit de relever est de pouvoir opérer sur des porteuses de différentes largeurs afin de s'adapter à des allocations spectrales variées. Les largeurs initialement requises sont : 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz dans le sens montant comme dans le sens descendant. Cette flexibilité est due à la modulation OFDM qui sera expliquée en détail prochainement [1].

### e) La mobilité

Le LTE vise à rester fonctionnel de façon optimale pour des UE se déplaçant à des vitesses trop élevées (jusqu'à 350 km/h et même 500 km/h) et même à des vitesses trop faibles (de 0 km/h à 15 km/h). En LTE, il est attendu que :

- les services temps-réel comme le service voix, soient au moins en même niveau de qualité que ceux offerts par les systèmes UMTS.
- L'effet du Handover intra-système entre deux cellules LTE sur la qualité vocale doit être moindre qu'en GSM, ou équivalent.
- Des mécanismes optimisant les délais et minimisant la perte de paquets lors d'un Handover intra-système soient intégrés.
- Une coexistence avec les autres technologies 3GPP à savoir GSM/GPRS et UMTS, doit être maintenue lors d'un Handover inter-système (le temps d'interruption de service doit rester inférieur à 300 ms pour les services temps-réel et inférieur à 500 ms pour les autres services) [1].

## II.2. Allocation de spectre pour le LTE

### II.2.1 Au niveau mondial

Les bandes de fréquences suivantes ont été identifiées au niveau mondial en LTE :

- 450-470 MHz (une largeur de 20 MHz).
- 790-960 MHz (une largeur de 170 MHz, appelée bande de fréquence 800 MHz).
- 1710-2025 MHz (une largeur de 315 MHz).
- 2110-2200 MHz (une largeur de 90 MHz).
- 2300-2400 MHz (une largeur de 100 MHz).
- 2500-2690 MHz (une largeur de 190 MHz, appelée bande de fréquence 2.6 GHz qui offre la possibilité d'utiliser des canaux fréquentiels contigus de 10, 15, 20 MHz) [1].

### II.2.2. Au niveau régional

Des bandes de fréquences au niveau régional ont également été identifiées à savoir :

- 610-790 MHz (soit une largeur de bande de 180 MHz), utilisée en chine, Corée du sud, l'inde, le japon et en d'autres pays.

- 698-790 MHz (soit une largeur de bande de 92 MHz), utilisée pour le continent Américain.
- 3400-3600 MHz (soit une largeur de bande de 200 MHz), utilisée par un grand nombre de pays d'Asie, d'Océanie, d'Europe, d'Afrique, du Moyen- Orient [1].

### II.3. Contrôle de la qualité de service dans un réseau LTE

Le LTE offre des mécanismes dits de qualité de service différenciée pour faciliter la prise en compte des contraintes de services différents : Le service est-il temps-réel ou non temps-réel ou bien encore, tolère-t-il des erreurs de transmission ? Les services temps-réel (appel voix ou appel de streaming vidéo) requièrent des délais de transmission courts mais peuvent tolérer des erreurs de transmission. En revanche, les services non temps-réel (un téléchargement de courrier électronique) revêtent des contraintes de délais relâchées mais ne tolèrent pas d'erreurs de transmission. Le LTE a ainsi été conçu pour distinguer les services nécessitant un débit garanti ou GBR, des services ne requérant pas de débit garanti (non-GBR). Voir le tableau ci-dessous [1].

QCI	Type de services	Priorité	Délai	PLR	Exemples
1	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	Appels voix
2		4	150 ms	$10^{-3}$	Appels vidéo
3		3	50 ms	$10^{-3}$	Jeux en ligne
4		5	300 ms	$10^{-6}$	Streaming vidéo
5	Non-GBR	1	100 ms	$10^{-6}$	Signalisation
6		7	100 ms	$10^{-3}$	Voix, vidéo, jeux
7		6	300 ms	$10^{-6}$	Streaming vidéo, web, E-mail
8		8	300 ms	$10^{-6}$	
9		9	300 ms	$10^{-6}$	

*Tableau II.1 : Exigences QoS pour différents services.*

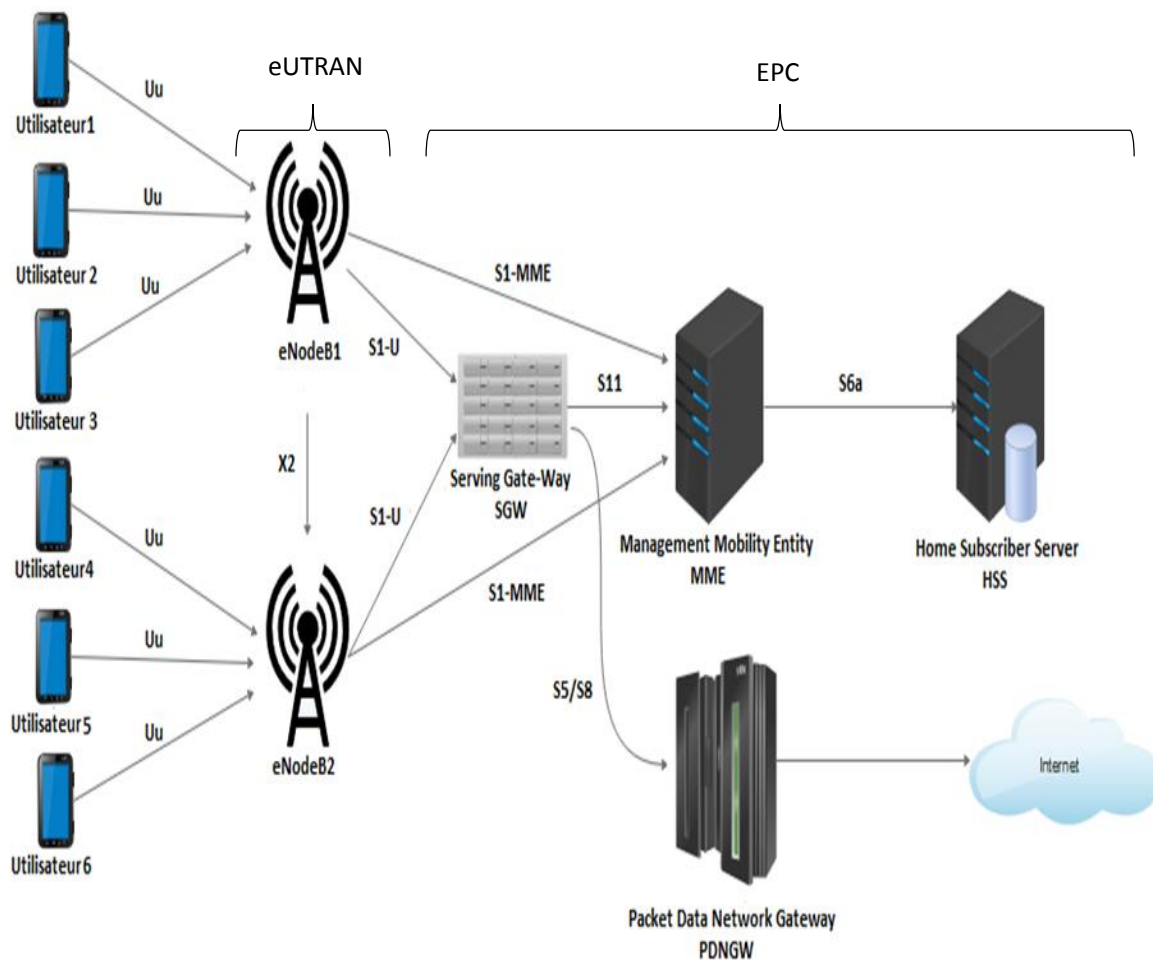
## II.4. Performance du Handover dans le LTE

La performance du Handover est mesurée par le temps d'interruption de la communication que peut subir un utilisateur lors d'un changement de cellule qui est très court (10.5 ms pour le FDD et 12.5 ms pour le TDD) et qui ne peuvent être décelés par l'utilisateur [1].

## III. Architecture du LTE

### III.1. Composants essentiels du réseau LTE

Un réseau LTE se compose d'un système EPS qui enveloppe le réseau E-UTRAN et le réseau de données cœur évolué EPC comme schématisé ci-dessous :



*Figure II.1 : Architecture globale du LTE.*

- a) **Domaine du UE** : il désigne la station mobile dans le réseau LTE et représente le vecteur qui permet à l'abonné d'accéder au réseau et également à ses services.
- b) **Domaine EUTRAN** : il permet à l'utilisateur d'accéder et d'acheminer les informations vers le cœur du réseau LTE.

- c) **Domaine de l'EPC** : il se compose des équipements supportant la connectivité tout-IP et regroupe le MME et les deux nœuds du plan usager ; SGW et PGW, sachant que l'EPC peut être connecté aux réseaux d'accès 3GPP comme aux non 3GPP et assure la gestion de la mobilité entre ces derniers ainsi que la gestion de la qualité de service et la sécurité [7].

Définissons les modules essentiels constituant le réseau LTE :

- **eNodeB**

C'est l'équivalent du NodeB et le RNC du réseau UMTS. Il constitue le réseau E-UTRAN et il a pour principales fonctions :

- La gestion des ressources radio.
- La compression d'entête et le chiffrement des données d'utilisateur.
- La sélection de l'entité MME lors de l'attachement du terminal mobile au réseau.
- Le routage des données usager vers la passerelle SGW.
- La minimisation des pertes de paquets.

- **PGW**

Il constitue le nœud qui relie l'utilisateur aux autres réseaux PDN et se charge de :

- Router les requêtes de l'utilisateur qui y transitent.
- L'allocation d'adresses IP et le filtrage des paquets de chaque UE.
- La création des Bearer (Support pour véhiculer les données) conformes avec les contrats des différents UE et le PCRF.
- Comptabiliser les octets échangés dans la session du PCRF pour la facturation.

- **SGW**

Il est l'une des entités d'appel du réseau LTE qui communique les données d'utilisateurs à partir des eNodeB en utilisant l'interface S1-U, il peut être connecté à plusieurs eNodeB, il est utilisé comme un point d'ancrage de la mobilité locale de l'utilisateur, en cas d'un Handover, il commute le chemin des données d'un utilisateur vers le nouveau eNodeB. Le SGW est contrôlé par un ou plusieurs MME, si le SGW qui sert un certain utilisateur a besoin d'être changé à cause d'un Handover, les MME reliés sélectionnent de nouveaux SGW et laissent les SGW précédents savoir quand est ce qu'ils doivent être libérés. Cependant quand un UE est dans un mode de veille, le SGW stocke l'adresse de ses données descendantes jusqu'à ce qu'il



devient actif pour les recevoir. Il classe les données entrantes sous forme de liaisons virtuelles basées sur la classification de la qualité de service QoS exigées par les différents types de services tels que la voix, les jeux... etc.

- **MME**

Il comporte les fonctionnalités de base de la signalisation dans la connexion du terminal mobile au réseau. Il fournit les informations nécessaires à l'identification de l'utilisateur au moment de son authentification dans le système en se servant des informations provenant du HSS et négocie la QoS à offrir. Il indique aussi la position de l'UE en état de veille.

- **HSS**

C'est la version améliorée du HLR. Il permet de stocker les informations d'abonnement servant au contrôle d'appels et à la gestion de session des utilisateurs réalisée par le MME et les informations concernant les services auxquels ils sont abonnés les UE.

- **PCRF**

C'est une entité qui gère la qualité de service que requiert le réseau et alloue par conséquent les Bearers appropriés et s'occupe aussi de la tarification (facturation) en fonction des actions de l'utilisateur [7].

### **III.2. Les interfaces du réseau LTE**

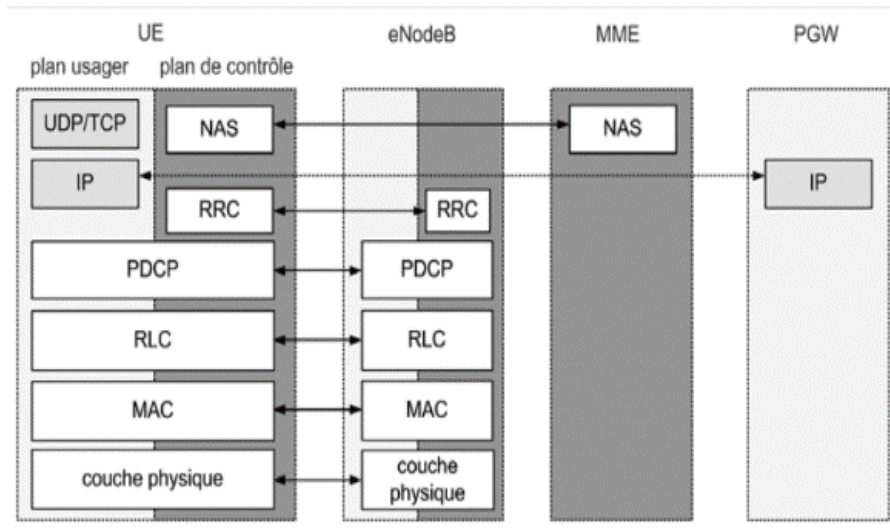
Les composants du réseau LTE sont reliés entre eux à travers différentes interfaces notamment :

- **Uu** : entre le terminal mobile et l'eNodeB.
- **X2** : entre les eNodeB du réseau d'accès E-UTRAN, elle se charge du Handover.
- **S** : entre le réseau d'accès E-UTRAN et le réseau cœur EPC.
- **S1-U** : entre l'eNodeB et le SGW, pour acheminer les données des UE.
- **S1-MME** : entre l'eNodeB et le MME.
- **S5/S8** : entre SGW et PGW.
- **S11** : entre SGW et MME.
- **S6a** : entre MME et HSS, utilisée par le MME pour chercher les souscriptions et les informations d'authentification dans le HSS.

### III.3. L'architecture protocolaire de l'interface radio du LTE

#### III.3.1. Présentation des piles protocolaires

En LTE comme en UMTS, les piles protocolaires sont représentées dans deux plans distincts, le plan usager et le plan de contrôle, ces piles correspondent aux deux premières couches du modèle OSI (la couche physique et la couche liaison de données) (*Fig II.2*).



*Figure II.2 : piles protocolaires des plans usager et plan de contrôle.*

Le PDCP, RLC, MAC et la couche physique traitent des données appartenant :

- Au plan de contrôle, si elles sont de signalisation communiquée par la couche RRC.
- Au plan usager, s'il s'agit de données IP [1].

#### III.3.2. Interactions logiques entre les couches protocolaires

Deux entités paires distantes d'une couche N échangent entre elles des unités de données appelées PDU formées d'un entête associé à cette couche et de blocs de données, ces PDU sont délivrées par la couche supérieure M et sont appelées SDU dans le contexte de la couche inférieure N, ainsi chaque PDU d'une couche N est une SDU pour la couche immédiatement inférieure N-1. Cet échange de SDU se fait verticalement (*Fig II.3*), des couches supérieures vers les couches inférieures, et ceci via des points d'accès logiques (canaux logiques) représentés par des ellipses sur la figure II.4 ci-après.

Ils portent des noms spécifiques selon le niveau considéré :

- Radio Bearer entre RLC et PDCP.
- Canal logique entre RLC et MAC.
- Canal de transport entre MAC et PHY. [1]

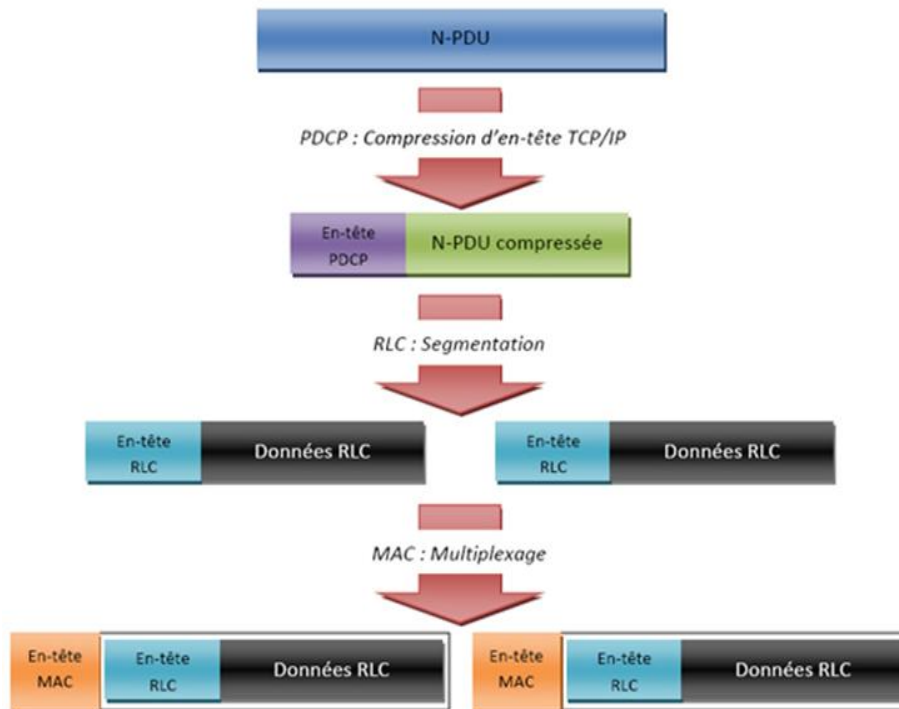


Figure II.3 : Interactions entre les couches protocolaires en LTE.

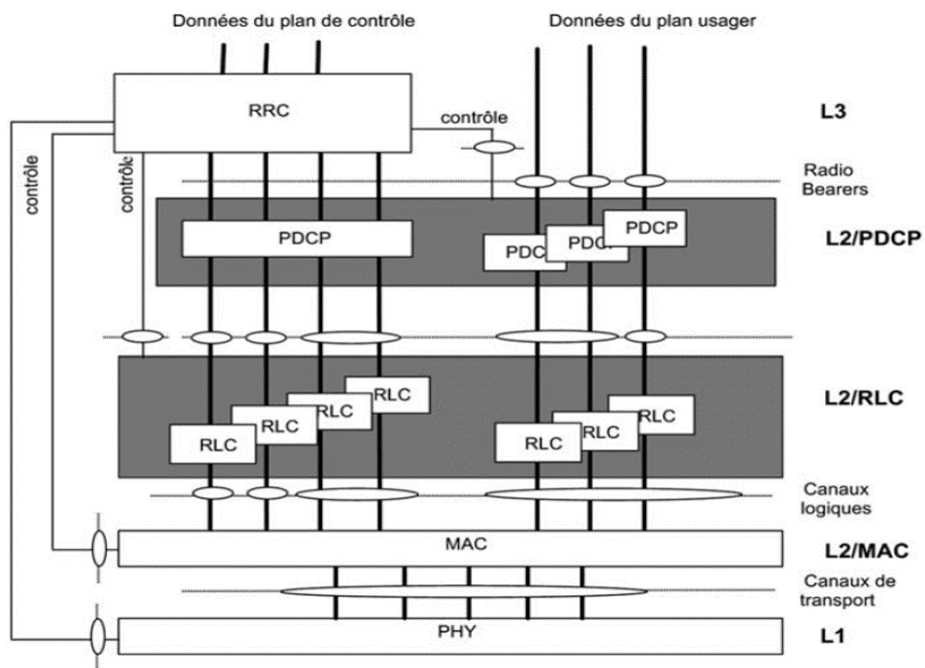


Figure II.4 : Modélisation en couches protocolaires de l'interface radio.

### III.3.3. Les couches de l'interface radio

#### III.3.3.1. La couche L1 (Physique)

La couche 1, aussi appelée Layer 1 (L1) ou couche PHY a comme rôle d'assurer la transmission des données sous une forme capable de se propager dans l'air et de résister aux différentes perturbations inhérentes au canal radio mobile et offre un service de transport sur l'interface air à la couche MAC. Les fonctions réalisées par la couche physique sont :

- **Codage de canal** : Protège les bits d'information contre les erreurs de transmission.
- **Traitements spatiaux MIMO** : pré-codage des symboles de modulation afin de les transmettre de plusieurs antennes.
- **Modulation multi-porteuse** : Utilisation de l'OFDM pour la voie descendante
- **Mesure radio** : Estimation du canal, la qualité du signal de la cellule servante et les niveaux de puissance reçus d'une autre cellule ou d'un autre système radio.
- **Synchronisation** : Acquérir et maintenir la synchronisation en temps et en fréquence avec la porteuse de l'émetteur.
- **Détection de cellule** : Afin de s'y connecter dans le cas de l'allumage de l'UE ou pour effectuer un Handover.
- **Signalisation d'informations de contrôle** : entre eNodeB et UE [1].

#### III.3.3.2. La couche L2 (Liaison de données)

Elle comprend trois sous-couches :

- **PDCP** : Compression d'entête, chiffrement des données de signalisation RRC, protection de l'intégrité de la signalisation RRC, détection et suppression des doublons PDCP.
- **RLC** : détection et retransmission des PDU manquantes, utilisation de fenêtres d'émission et de réception pour l'optimisation de la transmission IP.
- **MAC** : maintien de la synchronisation et priorisation des flux sur le lien montant [1].

#### III.3.3.3. La couche RRC

La couche RRC a pour but de configurer et de contrôler l'interface radio et est connectée aux quatre autres couches (L1 : PHY et L2 : MAC, RLC, PDCP) via des points d'accès de contrôle et assure essentiellement les fonctions suivantes :

- La gestion de la connexion RRC.

- Le contrôle des radios Bearers associés à des services ou à la signalisation.
- La mobilité en mode connecté.
- Le contrôle de la mobilité en mode veille [1].

### III.4. Structure de trames en LTE

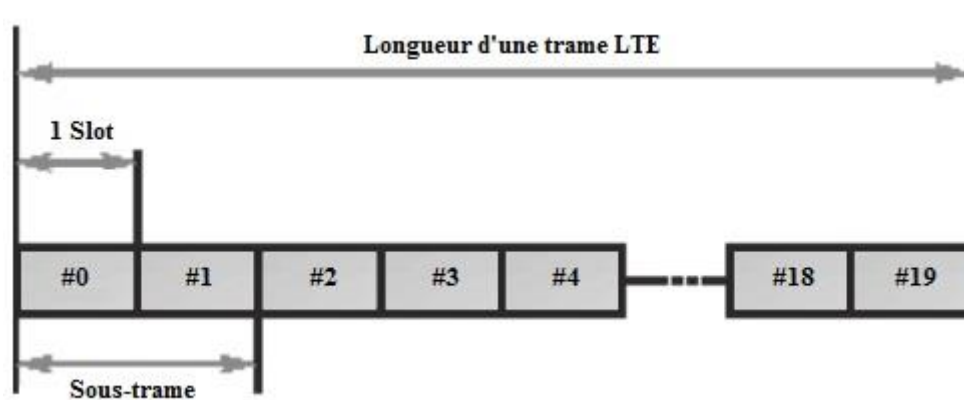
Une trame en LTE dure 10 ms, cette dernière est divisée en 10 sous-trames de 1ms chacune, numérotée de 0 à 9. Chaque sous-trame constitue ce qu'on appelle un TTI qui veut dire l'intervalle de temps de transmission élémentaire pouvant être alloué à un UE.

Il existe deux types de structure de trames qui sont le :

- Type adapté au FDD et au FDD Half-Duplex.
- Type adapté au TDD [1].

#### III.4.1. Trame adaptée au FDD :

Chaque sous-trame dans ce cas est divisée en deux slots de 0.5ms chacun, ce qui donne 20 slots sur les 10 sous-trames, numérotés de 0 à 19 [1].



*Figure II.5 : Structure d'une trame LTE adaptée au FDD.*

#### III.4.2. Trame adaptée au TDD :

Il existe des trames pour la voie montante et d'autres pour la voie descendante ainsi qu'une sous-trame spéciale contenant un temps de garde GP nécessaire au basculement entre la voie montante et la voie descendante et qui vaut 20  $\mu$ s, ajoutant à cela deux autres sous-trames pour limiter les pertes d'efficacité du système dues au temps de garde, ces dernières sont composées de trois champs qui sont :

- **DwPTS** qui est utilisé pour la synchronisation Download.
- **GP** qui assure la transmission des UE sans interférences entre UL et DL.
- **UpPTS** qui est utilisé par eNodeB pour déterminer le niveau de puissance reçu de l'UE [1].

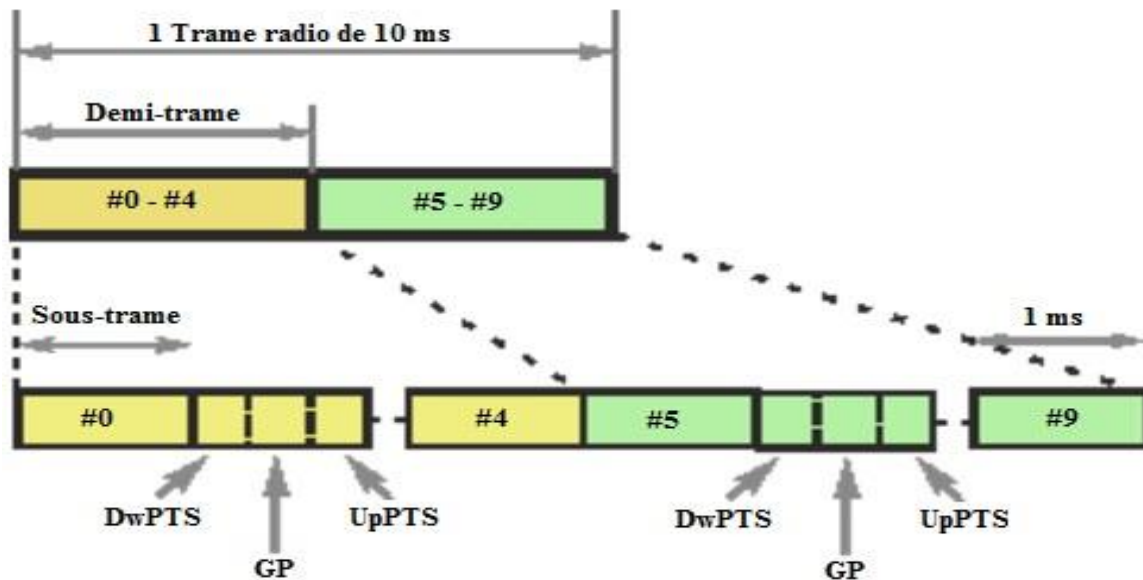
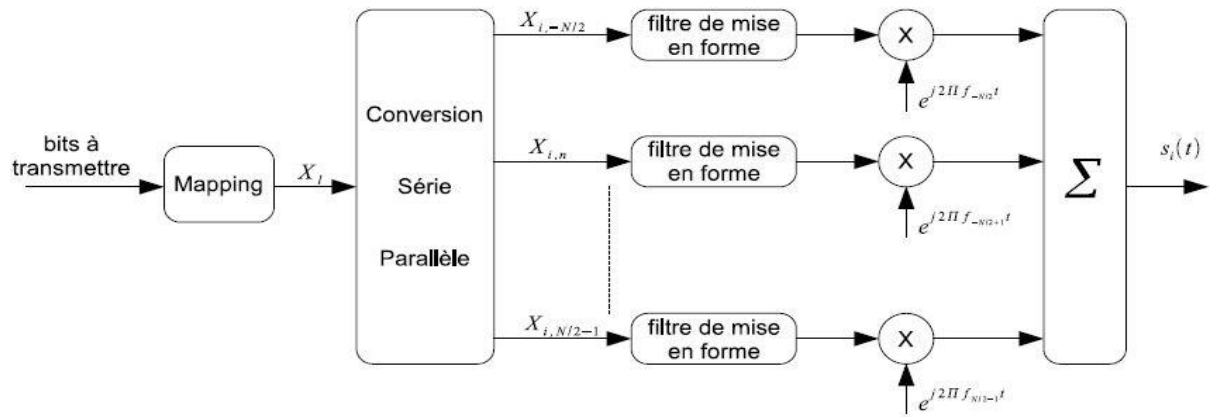


Figure II.6 : Structure d'une trame LTE adaptée au TDD.

#### IV. Principe de l'OFDM

Contrairement aux systèmes mono-porteuse qui modulent sur une porteuse unique à un débit  $R_s$ , le principe de la modulation multi-porteuse de type OFDM consiste à transmettre les données de manière simultanée sur  $N$  porteuses modulées à un débit  $\frac{R_s}{N}$ . Le débit global reste inchangé mais chaque porteuse est moins sensible à l'étalement des trajets sur le canal de propagation, le canal large bande est transformé en un ensemble de  $N$  canaux à bande étroite avec une orthogonalité entre canaux [8].

La figure II.7 décrit le schéma de principe d'un modulateur OFDM en bande de base.



**Figure II.7 :** Principe d'un modulateur OFDM en bande de base.

Après un codage Bit/Symboles des bits à transmettre, les symboles complexes sont successivement regroupés par blocs de N (conversion série/parallèle), mis en forme sur une durée T (forme d'onde g(t)) puis envoyés sur les N porteuses afin de former le signal de sortie. Durant l'intervalle de temps [iT, (i+1) T [, le signal OFDM généré s'écrit :

$$s_i(t) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} \dots \dots \dots (1)$$

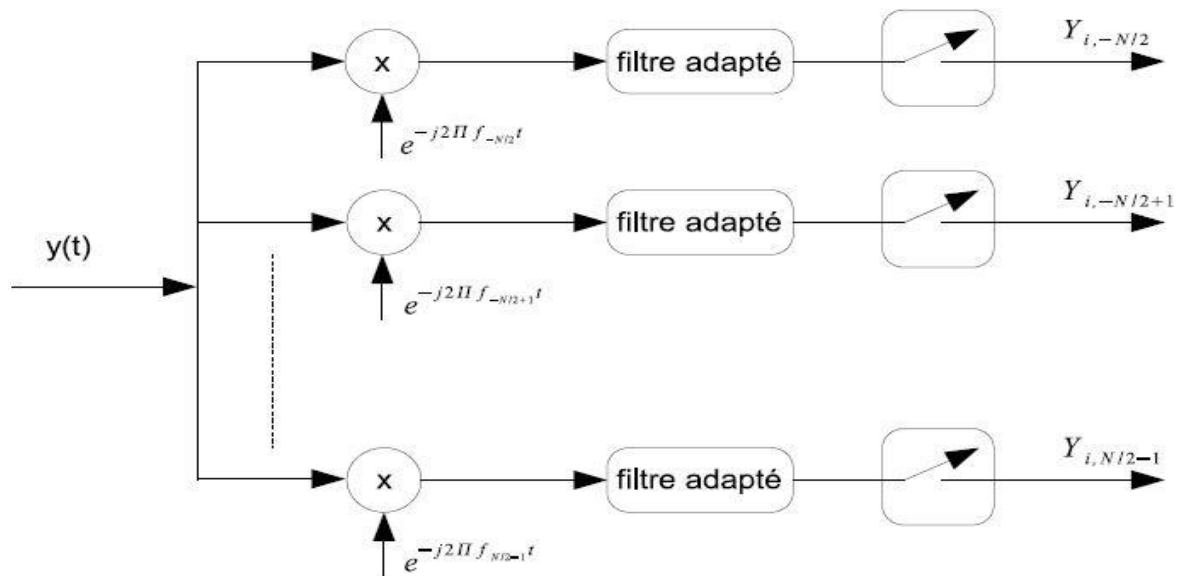
Il représente le i<sup>ème</sup> symbole OFDM, tant-dis que les  $\{X_{i,n}\}_{n=-\frac{N}{2} \dots \frac{N}{2}-1}$  représentent les N symboles complexes qu'il transporte.

Le signal reçu s'écrit de façon suivante :

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_{i,n} g\left(t - iT - \frac{T}{2}\right) e^{j2\pi f_n t} + n_n(t) \dots \dots \dots (2)$$

Où  $n_n(t)$  est le bruit blanc additif gaussien introduit par le canal sur la n<sup>ème</sup> porteuse. Les symboles transmis peuvent être retrouvés grâce à un filtre adapté suivi d'un échantillonneur [8].

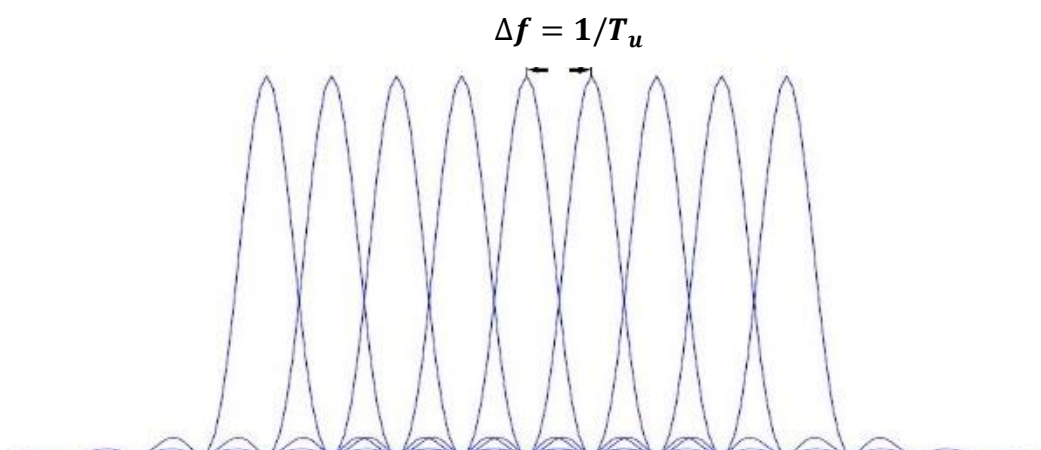
La démodulation se fait à la réception selon le schéma de la figure II.8 ci-dessous :



*Figure II.8 : Schéma de principe d'un démodulateur OFDM.*

#### IV.1. Intervalle de garde en OFDM

Pour des fins de synchronisation moins complexes, un délai est introduit entre deux symboles OFDM consécutifs comme c'est illustré dans la figure II.9 ci-dessous, pour absorber l'étalement des retards dus aux multi-trajets. Une copie du symbole OFDM à transmettre nommée préfixe cyclique (CP) est placée dans cet intervalle [8].

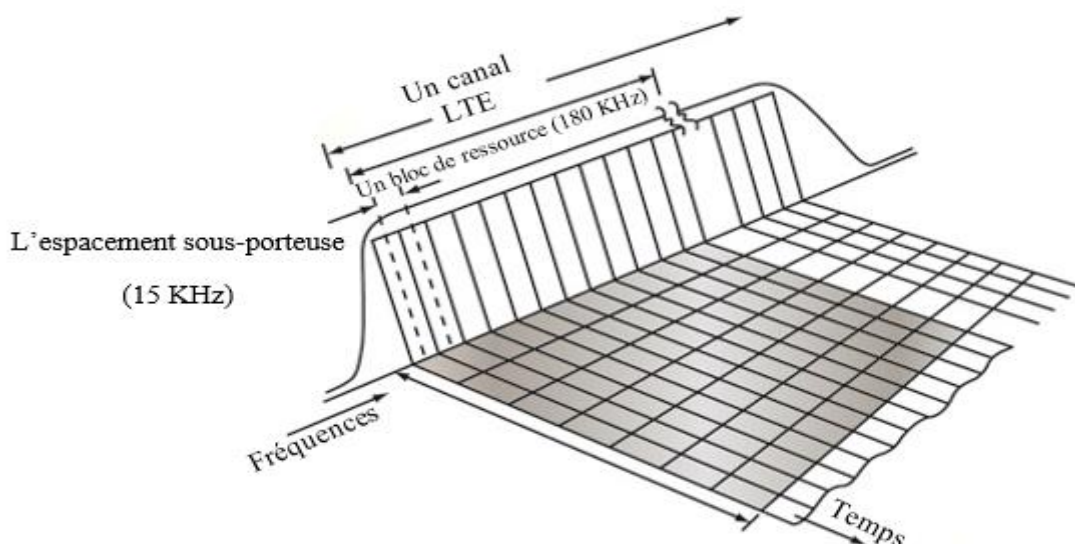


*Figure II.9 : Intervalle de garde introduit par un modulateur OFDM.*



## IV.2. Technique d'accès multiple OFDMA

Le LTE utilise l'OFDMA comme technique de transmission en sens descendant. Dans ce cas, une grille de ressources temps-fréquence est considérée avec des sous-porteuses dans l'axe des fréquences et des symboles dans l'axe des temps. Un élément de ressource (ressource élémentaire) représente une sous-porteuse et un symbole dans la grille considérée (Fig.II.10).



**Figure II.10 :** Grille de ressources temps-fréquence

Les données sont allouées aux UE en termes de blocs de ressources abrégés en RB (le bloc gris dans la figure II.10 ci-dessus). En temps, la longueur d'un RB est de 0,5 ms., le nombre de symboles dans un RB est 6 ou 7 pour le préfixe cyclique normal de durée de 4.7 $\mu$ s ou le préfixe cyclique étendu de durée de 16.6 $\mu$ s respectivement. En fréquence, Une fois l'espacement entre sous-porteuses est choisi, le nombre de sous-porteuses peut être décidé en se basant sur la bande passante globale de transmission assumée par le système ; par exemple, pour le 3GPP-LTE, l'espacement de base entre sous-porteuses est égal à 15 KHz, la longueur d'un RB sera donc de 180 KHz et le nombre total de sous-porteuses dans les 180 KHz est de 12 sous-porteuses comme c'est illustré dans la figure II.11.

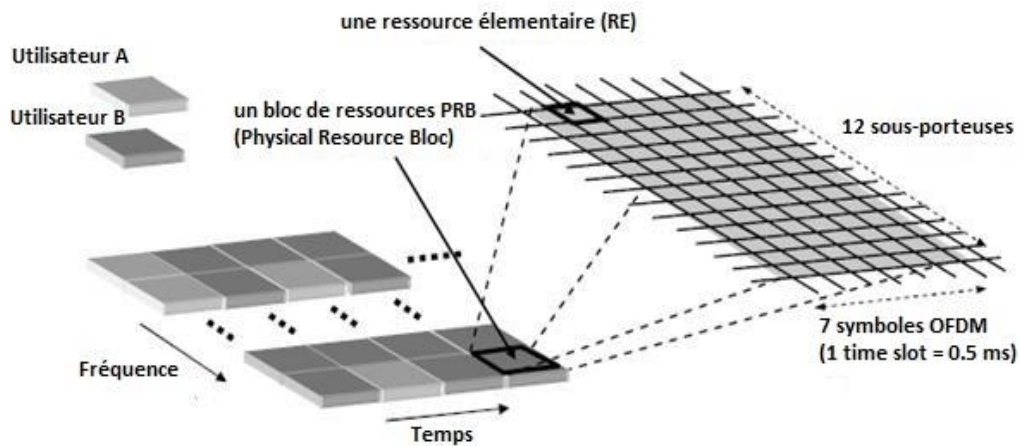


Figure II.11 : Structure des RB dans un système OFDMA.

### IV.3. Porteuses orthogonales

L'orthogonalité vient du fait que le produit scalaire pendant la durée de transmission d'un symbole entre chacune des porteuses est nul. Cela n'est possible que si l'espacement entre deux sous-porteuses consécutives est égal à l'inverse de la durée d'un symbole et qui est égal à 15 KHz en LTE [9].

En OFDM, pour que le signal modulé ait une grande efficacité spectrale, il faut optimiser le choix de l'écartement entre sous-porteuses. Plus l'espacement est grand, plus nous avons besoin de bande passante pour transmettre un même débit, plus l'efficacité spectrale diminue. Pour garantir une efficacité spectrale optimale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant une absence d'interférence entre les informations afin que le récepteur soit capable de les retrouver. Cette condition est vérifiée :

- Dans le temps, si les fonctions  $\Psi_{i,n}(t) = g(t - iT - \frac{T}{2})e^{j2\pi f_n t}$  sont orthogonales.
- Dans le domaine fréquentiel si le spectre de chaque sous-porteuse est nul aux fréquences des autres sous-porteuses. Ce dernier dépend de  $G(f) = TF [g(t)]$ .

L'orthogonalité temporelle des fonctions  $\Psi_{i,n}(t)$  est obtenue par l'utilisation de la fonction porte  $g(t) = \text{Rect} [0, T [$ . L'expression du signal modulé sur la sous-porteuse  $n$  s'écrit comme suit :

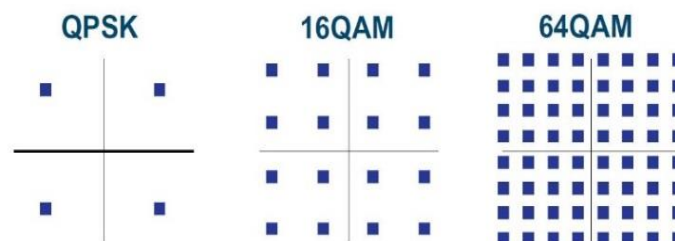
$$S_n(f) = \frac{\sigma^2}{T} \text{sinc}^2[\pi(f - f_n)T] \dots \dots \dots (3)$$

Ce spectre s'annule aux fréquences  $\{f = f_n + k/T\}$  pour tout entier  $k$ . par conséquent,  $1/T$  est l'espacement inter-porteuse minimal qui garantit l'orthogonalité entre sous-porteuses et une efficacité spectrale optimale.

#### IV.4. Modulation OFDM

Dans un signal OFDM, il est possible de choisir entre trois types de modulation (Fig.II.12):

- **QPSK (= 4QAM) :** 2 bits/symbole.
- **16QAM :** 4 bits/symbole.
- **64QAM :** 6 bits/symbole.



*Figure II.12 : Constellations des signaux pour différents ordres de modulation.*

Le format de la modulation exact est choisi selon les conditions dominantes. Les formes inférieures de modulation, (QPSK) n'exigent pas un si grand rapport signal sur bruit (SNR), mais ne peuvent pas envoyer les données aussi vite que les autres formes. Les modulations d'ordre plus haut sont utilisées seulement dans le cas de signaux à SNR suffisant.

#### IV.5. Avantages et inconvénients de l'OFDM

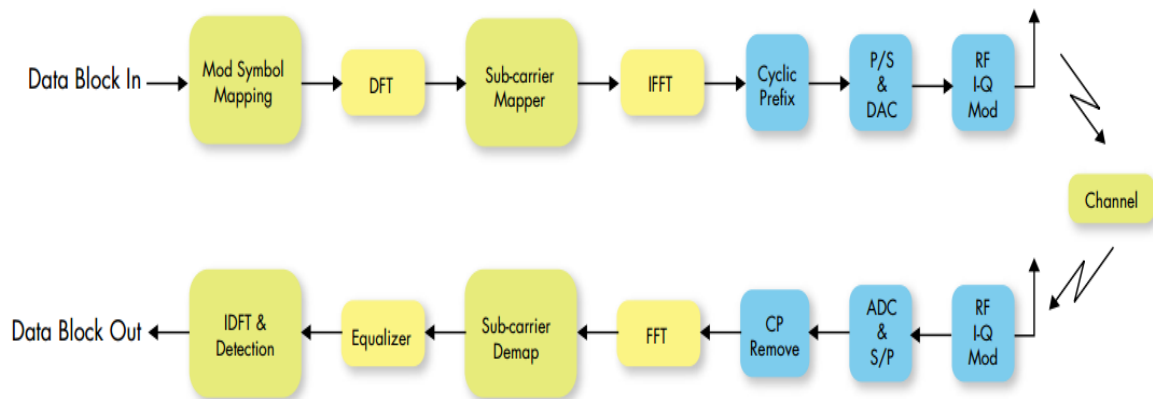
L'OFDM a pour avantages :

- L'immunité contre l'interférence entre symboles IES créée par les réflexions du signal sur les objets de l'environnement en choisissant une durée de l'intervalle de garde appropriée,
- La gestion des largeurs de bande spectrale variables et potentiellement grandes.
- Le partage aisé des ressources fréquentielles entre un nombre d'utilisateurs bénéficiant de débits divers.
- La simplicité de mise en œuvre par iFFT/FFT a conduit à son utilisation massive dans les standards terrestres.

Cependant, le problème de synchronisation est l'un des problèmes majeurs lors d'une transmission en OFDM. Ce point est beaucoup plus critique que pour une transmission mono-porteuse.

## V. SC-FDMA

Le SC-FDMA est une technique d'accès qui utilise la modulation mono-porteuse, plus précisément la DFTS-OFDM. Il possède une structure et des performances similaires à l'OFDM. Il est utilisé pour l'accès aux transmissions en voie montante dans les systèmes LTE. Le schéma synoptique de la structure d'un émetteur et récepteur SC-FDMA est représenté dans la figure II.13 ci-dessous.



**Figure II.13 :** Schéma synoptique de la structure d'un émetteur récepteur SC-FDMA.

Le SC-FDMA peut être considéré comme un système OFDM avec un bloc de plus appelé DFT Mapper. L'un des paramètres essentiels qui affecte tous les terminaux mobiles est la durée de vie de leur batterie qui doit être maintenue le plutôt possible en consommant moins d'énergie. Partant sur le principe que l'OFDM possède un PAPR élevé, ce qui n'est certainement pas un problème pour la station de base mais qui est fort inacceptable pour le terminal mobile. Le LTE a cherché une solution pour y remédier en utilisant la SC-FDMA en voie montante, qui offre d'une part un PAPR plus petit issu de l'utilisation d'une mono-porteuse et d'autre part sa résistance aux interférences dues aux multi-trajets. Le point de différence entre l'OFDMA et le SC-FDMA à part le PAPR est :

- L'OFDMA transmet les symboles OFDM d'un UE en parallèle, à travers de multiples sous-porteuses orthogonales.
- Le SC-FDMA transmet les symboles SC-FDM d'un UE en série, à travers de multiples sous-porteuses orthogonales.

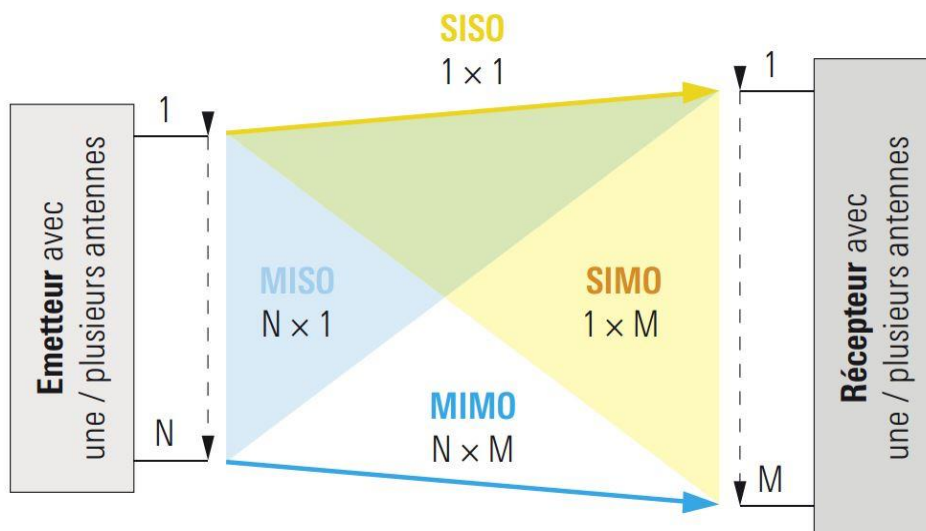
## VI. La technique MIMO en LTE

Les systèmes multi-antennes à l'émission et à la réception MIMO permettent théoriquement d'accroître la capacité des liens de communications sans fil par rapport aux systèmes composés d'une seule antenne à l'émission et à la réception SISO.

Les systèmes MIMO présentent deux avantages majeurs par rapport aux systèmes SISO :

- Grâce à l'apport de la diversité spatiale, ils permettent d'améliorer la qualité du lien en s'affranchissant des évanouissements des canaux.
- Par multiplexage spatial, ils permettent d'augmenter le débit d'information sans augmenter la bande passante ou la puissance transmise [9].

Il existe plusieurs types de techniques de multiplexage spatial et ces diversités sont représentées dans la figure II.14 ci-dessous et décrites juste après.



*Figure II.14 : Vue d'ensemble des diversités de SISO à MIMO.*

- **SISO** : une antenne en émission et une autre en réception.
- **SIMO** : Une antenne en émission et plusieurs antennes en réception. Par rapport au Downlink, cela correspond à une antenne d'émission pour la station de base et à plusieurs antennes de réception pour le téléphone mobile.
- **MISO** : Plusieurs antennes d'émission et une antenne de réception. Par rapport au Downlink, cela signifie plusieurs antennes d'émission pour la station de base et une antenne de réception pour le téléphone mobile.
- **MIMO** : Version complète avec N antennes d'émission qui servent M antennes de réception [10].

## VII. Conclusion

L'évolution des systèmes 3G en 4G a été entraînée par la création et le développement de nouveaux services pour les appareils mobiles et a été rendue possible par l'avancement technologique dans les domaines de l'électronique et des télécommunications.

L'augmentation rapide de l'utilisation d'internet pour fournir toutes sortes de services depuis les années 90, a commencé en même temps que les systèmes mobiles 2G et 3G et ce qui a mené à la prochaine étape naturelle qui est la 4G LTE qui utilise un système tout IP.

Nous avons défini dans ce chapitre, différents aspects de cette nouvelle génération à savoir, son architecture, ses couches protocolaires et physiques, les techniques d'accès en Uplink et en Downlink qu'elle utilise ainsi que son spectre d'allocation.

# Chapitre 3

# Chapitre 3

## Algorithmes d'allocation en LTE

### I. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'allocation de ressources radio autrement appelée scheduling ou ordonnancement dans un réseau LTE. Il est considéré comme l'une des fonctions essentielles de ce dernier et forme une fonctionnalité clé de l'interface radio pour ses performances et pour le maintien de la qualité de service envers l'utilisateur.

Un état de l'art des différents algorithmes d'ordonnancement définis en littérature est ainsi présenté mais cela, juste après l'introduction des objectifs, des facteurs influants ainsi que les méthodes permettant la simulation de cette fonction.

### II. Principe et paramètres du Scheduling

La transmission en LTE repose sur des canaux partagés dont l'accès est géré d'une façon dynamique en fonction des paramètres de qualité de service (QoS) et celle du canal perçue par l'UE. L'accès au canal est déterminé par le scheduler en fonction des décisions suivantes :

- Quels sont les UE qui peuvent être servis à chaque TTI ?
- Quel est le nombre ainsi que la position des ressources en fréquence ou PRB qui doivent être allouées à chaque UE servi ? [1].

### III. Objectifs du Scheduling

L'ordonnanceur hébergé par la couche MAC de l'eNodeB tente d'établir une répartition appropriée des ressources avec certains objectifs tels que :

- Acheminer le maximum d'informations vers leurs destinataires.
- Optimisation de l'efficacité spectrale afin de maximiser le débit global du système.
- Assurer l'équité et la différenciation de services entre les utilisateurs et garantir la QoS requise pour les différentes applications.
- L'exploitation optimale des possibilités de transmission offertes par l'OFDM.
- Permettre une allocation d'unités de ressources aux utilisateurs avec un débit plus élevé que possible et une certaine équité entre utilisateurs (trouver un compromis entre équité et débit) [11].



## IV. Facteurs influant sur la fonction du Scheduling

- La prise en charge des classes de services telles que : la classe conversationnelle, la classe streaming (Diffusion), la classe interactive, la classe Background, ainsi que les contraintes imposées afin d'offrir une meilleure QoS (BER, délai, etc.)
- La minimisation de la puissance de transmission en Uplink afin de maximiser la durée de vie des batteries des UE, et les RB alloués à un seul utilisateur doivent être contigus.
- Les conditions de propagation radio spécifiques à chaque unité de ressource (les pertes de propagation (path loss), l'effet de masque (shadowing) et les évanouissements rapides (fast fading) du signal à transmettre).

## V. Types d'allocation de ressources en LTE

### V.1. Allocation de ressources en temps

- **Scheduling dynamique**

En LTE, le scheduler dynamique doit prendre des décisions à chaque milliseconde en fonction des informations d'entrée, il peut ainsi tirer parti de la connaissance du CQI quasi-instantanée des UE, afin d'optimiser les débits utilisateur ainsi que le débit total de la cellule. Il peut être adaptatif en fréquence pour une efficacité maximale. Pour la voie descendante, un CQI par sous-bande doit alors être retourné par l'UE [1].

- **Scheduling semi-persistant**

Contrairement au scheduling dynamique, le scheduling semi-persistant SPS réserve des PRB pour une durée donnée, avec une période prédéfinie entre chaque allocation. Ce mode d'allocation est adapté à des flux réguliers, dont les unités de données sont produites et émises périodiquement (voix et visiophonie) et les besoins en ressources de ces services sont prévisibles [1].

### V.2. Allocation de ressources en fréquence

#### V.2.1. En voie descendante

Trois types d'allocation sont possibles en voie descendante, chacun étant associé à une manière de positionner les PRB assignés dans la grille d'allocation temps-fréquence. Les différents types d'allocation sont illustrés sur la figure III.1 ci-après.

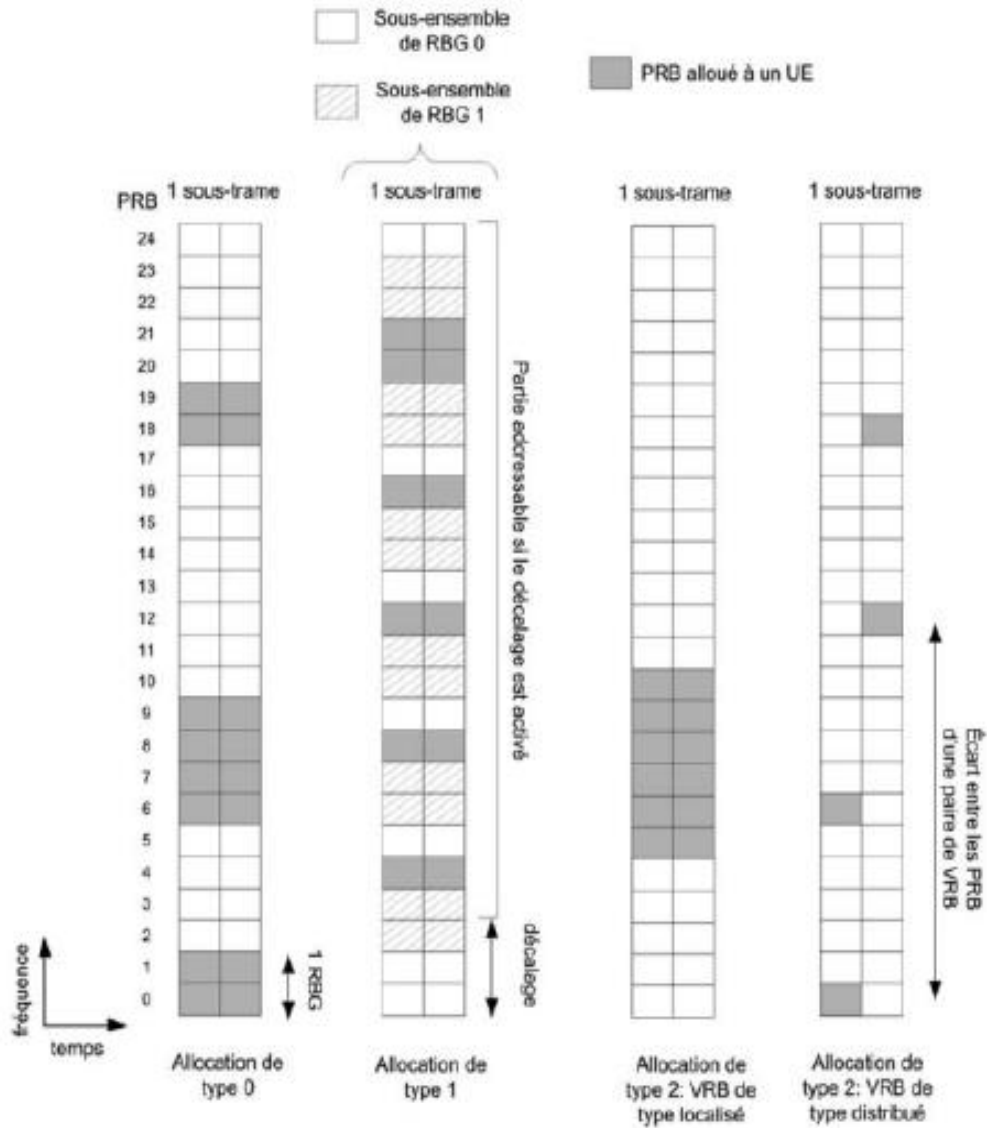


Figure III.1 : Différents types d'allocation de ressources radios.

- Allocation de ressource de type 0

L'allocation de type 0 est adaptée aux mots de code de taille moyenne à grande. Le type 0 alloue des groupes disjoints de PRB consécutifs en fréquence appelés groupes de blocs de ressources RBG où les PRB alloués sur les deux slots sont identiques.

La taille des RBG en nombre de PRB en fréquence dépend de la largeur de bande du système, comme décrit au tableau ci-après [1].

<b>La largeur de bande du système (du canal)</b>	<b>Taille des RBG (Resource Bloc Group)</b>
1.4 MHz (6 PRB)	1 PRB
3 MHz (15 PRB)	2 PRB
5 MHz (25 PRB)	2 PRB
10 MHz (50 PRB)	3 PRB
15 MHz (75 PRB)	4 PRB
20 MHz (100 PRB)	4 PRB

*Tableau III.1 : Taille des RBG en fonction de la largeur de bande du système.*

Les RBG alloués à l'UE sont signalés par un message appelé bitmap où chaque bit représente un RBG : si le bit vaut 1, le RBG correspondant est alloué à l'UE. Prenons l'exemple d'une largeur de bande de 1,4 MHz (6 PRB) : le message « 010100 » signifie que les deuxième et quatrième RBG de la bande sont alloués à l'UE [1].

- **Allocation de ressource de type 1**

Le type 1 est bien adapté à une allocation distribuée sur la bande du système, notons qu'il n'est pas possible d'allouer l'ensemble de la bande à un UE avec ce type d'allocation.

Les allocations de type 0 et 1 sont réservées aux formats de DCI 1, 2, 2A et sont codées sur le même nombre de bits. Un bit dans le PDCCH indique quel type d'allocation est effectivement utilisé [1].

- **Allocation de ressource de type 2**

Le type 2 alloue un ensemble de blocs de ressources virtuels ou VRB possédant les mêmes dimensions qu'un PRB. Ils sont dits virtuels car ils ne forment qu'une représentation des PRB effectivement alloués. Des VRB alloués de manière contiguë peuvent correspondre à des PRB effectivement contigus et localisés en fréquence (VRB de type localisé) ou à des PRB distribués sur la bande du système (VRB de type distribué) (Fig III.2 ci-après).

Les VRB de type localisé correspondent directement aux PRB, quant à ceux de type distribué, ils sont alloués de telle manière que les deux PRB d'une paire de VRB des deux slots d'une même sous-trame, soient séparés d'un écart égal approximativement à la moitié de la largeur de bande du système. On parle alors de saut de fréquence entre les deux slots [1].



*Figure III.2 : Type d'allocation localisée et distribuée.*

### V.2.2. En voie montante

En voie montante, seul un ensemble de VRB de type contigu peut être alloué, de manière similaire à l'allocation de type 2 pour la voie descendante. En effet, la voie montante se doit de respecter la propriété de transmission mono-porteuse, ce qui implique que les ressources d'un UE soient contiguës en fréquence.

## VI. Les algorithmes d'ordonnement

En littérature, il existe 3 grandes familles d'algorithmes d'ordonnement dont chaque type est utilisé soit en Uplink ou en Downlink : Algorithmes Classiques dits algorithmes de référence, algorithmes équitables et algorithmes opportunistes.

### VI.1. Les algorithmes d'ordonnement en Downlink

#### VI.1.1. Algorithmes classiques (Round Robin)

Le Round Robin est extrêmement populaire pour les processus de planification sur un système d'exploitation. Dans ce dernier, des tranches de temps sont attribuées à chaque processus en portions égales et dans un ordre circulaire, sans aucune priorité. Cet ordonnanceur est simple et facile à utiliser, il peut également être utilisé pour la commutation de paquets de données à files d'attente, il se base sur le principe du « premier arrivé, premier servi ». Dans ce mécanisme, les files d'attente séparées sont maintenues pour chaque écoulement de données.

Cet ordonnanceur fonctionne mieux lorsque tous les paquets sont de longueur égale et atteint l'équité maximale. Le Round Robin peut être vu comme un ordonnanceur équitable vu sous l'angle que la même quantité de ressources radio (en même laps de temps) est donnée à chaque liaison de communication. Cependant, Si la taille des paquets varie grandement d'un utilisateur à un autre, l'utilisateur avec une taille de paquet plus grande est favorisé au détriment de l'autre qui a un faible débit, ce qui conduit à une perte de l'équité [12].

### VI.1.2. Algorithmes équitables

Davantage efforts ont été effectués afin de concevoir des algorithmes d'ordonnancement plus améliorés comparés aux ordonnanceurs précédents. Certes ils sont plus complexes mais ils permettent une meilleure efficacité en procurant une meilleure équité et surtout une différenciation de service.

#### VI.1.2.1. Fair Queuing (FQ)

Le principe de fonctionnement de l'algorithme FQ consiste en une distribution égale du débit entre tous les utilisateurs, en effet pour  $K$  utilisateurs et pour un lien qui supporte un débit  $D$ , chaque utilisateur est servi avec un débit  $D/K$ . Le FQ assure une meilleure équité que le Round Robin. Cependant, les besoins des utilisateurs sont toujours négligés, les utilisateurs qui ont besoin d'un haut débit restent toujours pénalisés face aux autres, par conséquent, la qualité de service reste inexistante [12].

#### VI.1.2.2. Weighted Fair Queuing (WFQ)

L'algorithme WFQ est une amélioration de l'algorithme FQ. Il tient en compte une différenciation entre les services en donnant la priorité aux utilisateurs qui ont besoin d'un débit plus élevé. L'algorithme permet de privilégier certains flux en leur accordant davantage de bande passante. Ce principe permet de contrôler la qualité de service. Ainsi, le WFQ peut garantir différents débits entre les utilisateurs et assurer une potentielle équité en termes de satisfaction des contraintes de qualité de service permettant par conséquent d'atteindre une satisfaction globale plus élevée.

Cependant cet ordonnanceur ne tient pas compte de l'état du canal qui sépare la station de base des utilisateurs. Les atténuations présentes dans le support radio induisent une mauvaise exploitation des ressources disponibles, de ce fait la bande passante est très mal exploitée, ce qui introduit une perte significative de débit pour le système, critère de performance pourtant essentiel dans les réseaux d'accès [12].

#### VI.1.2.3. Max-Min Fair (MMF)

Le Max-Min Fair permet une augmentation progressive du débit global offert à chaque utilisateur à travers le temps. L'attribution des ressources est faite d'une manière successive et cyclique jusqu'à satisfaire tous les utilisateurs ou que les ressources soient épuisées. En effet, après avoir distribué des débits égaux entre les utilisateurs, ceux demandant de faibles débits

seront pratiquement toujours satisfaits et le reste des ressources non consommées par ces derniers seront à leur tour équitablement partagées entre les utilisateurs non satisfaits qui demandent plus de débit mais elles restent toujours insuffisantes à leur satisfaction (notons que dans le cas où tous les utilisateurs auraient les mêmes besoins, l'ordonnancement Round Robin équivaldrait au Max- Min Fair).

L'algorithme Max-Min Fair est considéré comme satisfaisant. Cependant, sachant qu'il satisfait en priorité les utilisateurs qui demandent peu tirant ainsi la QoS vers le bas, cela fait de lui un ordonnanceur non équitable et surtout qu'il ne fournit pas une utilisation efficace de la bande passante. En effet, n'accorder à un utilisateur qu'une partie du débit qu'il demande conduit généralement à une impossibilité pour lui d'accéder complètement et correctement au service demandé. Cela amène à s'interroger sur l'intérêt réel de lui attribuer des URs inutilement puisqu'elles seront au final gâchées et ne déboucheront sur aucun service réel. Enfin, compte tenu de ce qui précède, cet ordonnanceur est considéré comme inefficace malgré la réputation dont il jouit généralement [12].

### **VI.1.3. Algorithmes opportunistes**

Bâtis sur une approche inter-couches (PHY/MAC), des ordonnanceurs particulièrement efficaces appelés ordonnanceurs opportunistes sont apparus. Principalement. Deux classes d'algorithmes ont émergé à savoir le Max C/I et le PF, tirant profit de la diversité fréquentielle et multi-utilisateurs pour allouer prioritairement les ressources aux mobiles qui ont les conditions de transmission/réception les plus favorables (le meilleur rapport signal/bruit) maximisant ainsi les débits des réseaux OFDM.

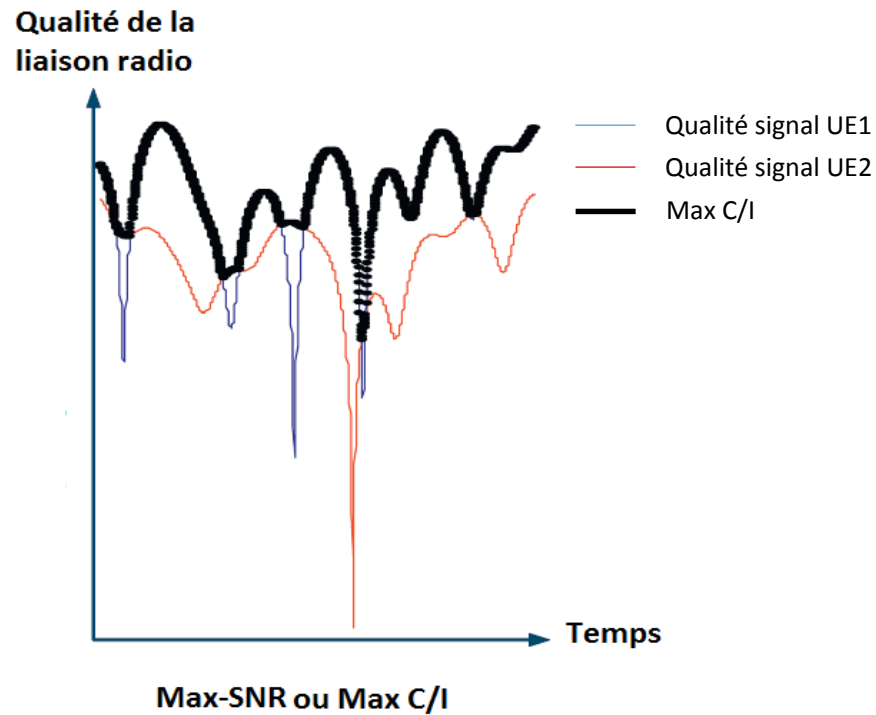
#### **VI.1.3.1. L'algorithme Max C/I**

Le Max C/I (également connu sous le nom de Max SNR) priorise l'utilisateur actif qui a le plus grand rapport signal sur bruit SNR). Mathématiquement, l'ordonnancement max C/I suit la formule suivante :

$$K = \arg \max R_i \dots \dots \dots (4)$$

Où  $R_i$  est le débit instantané de l'utilisateur  $i$ , ce qui veut dire que l'allocation Max C/I consiste à allouer l'unité de ressource à l'utilisateur  $i$  qui a le plus grand  $R_i$ .

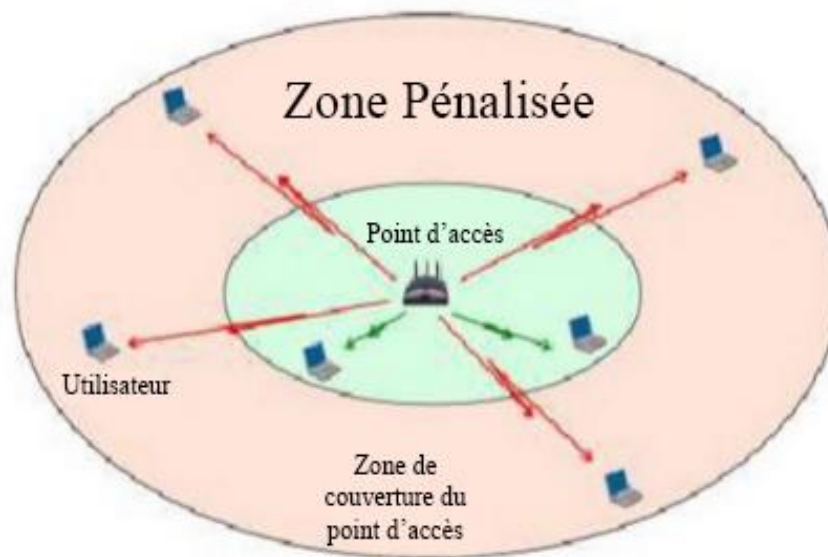
L'algorithme *Max C/I* est illustré dans la figure III.3 ci-après.



*Figure III.3 : Schéma représentatif de l'ordonnanceur Max C/I.*

Le gain obtenu est généralement connu sous le nom de diversité multi-utilisateurs. Avec une adaptation dynamique de la modulation, un usage extrêmement efficace de la ressource radio est permis, par conséquent, le débit du système est très fortement élevé. Cependant, ce type d'ordonnement présente une faille du fait que les utilisateurs proches du point d'accès ont toujours une priorité disproportionnée sur les utilisateurs plus éloignés. Bénéficiant d'une atténuation de propagation plus faible et donc d'un SNR plus grand, les mobiles proches seront souvent, voire toujours, sélectionnés avant les mobiles éloignés qui ne se verront alors allouer que les résidus. Le prix de la maximisation du débit via le Max C/I est donc une accentuation de l'iniquité du système [12].

La figure III.4 ci-dessous illustre ce phénomène :



*Figure III.4 : Problème d'iniquité avec le Max C/I.*

Dans la zone verte les mobiles accèdent à la ressource radio en priorité et voient leurs besoins comblés, dans la zone périphérique en revanche les mobiles sont pénalisés et ne se voient attribuer que la bande passante résiduelle une fois les mobiles de la zone prioritaire servis.

Lorsque le réseau est congestionné, il sera fréquent que les mobiles éloignés n'accèdent plus du tout à la ressource radio. Dans ce cas, il est impossible de garantir une qualité de service ne serait-ce que minime puisque cette dernière va exclusivement ou presque dépendre de la position relative des mobiles.

Ajoutant à cela, le Max C/I ne tient pas compte des besoins des utilisateurs lors de l'attribution des priorités. Etant incapable d'assurer une quelconque différenciation de service, l'intérêt de son utilisation dans les contextes multimédias reste donc limité. Pour ces raisons, le Max C/I est actuellement considéré comme l'ordonnanceur le plus efficace du point de vue de la maximisation du débit mais en même temps le moins équitable [12].

### **VI.1.3.2. Proportional Fair (PF)**

L'ordonnanceur PF permet d'incorporer un certain degré d'équité tout en gardant les bénéfices du Max C/I en termes de maximisation du débit. Reconnu pour sa simplicité et ses très bonnes performances, de très nombreux travaux de recherche portent sur cet ordonnanceur.

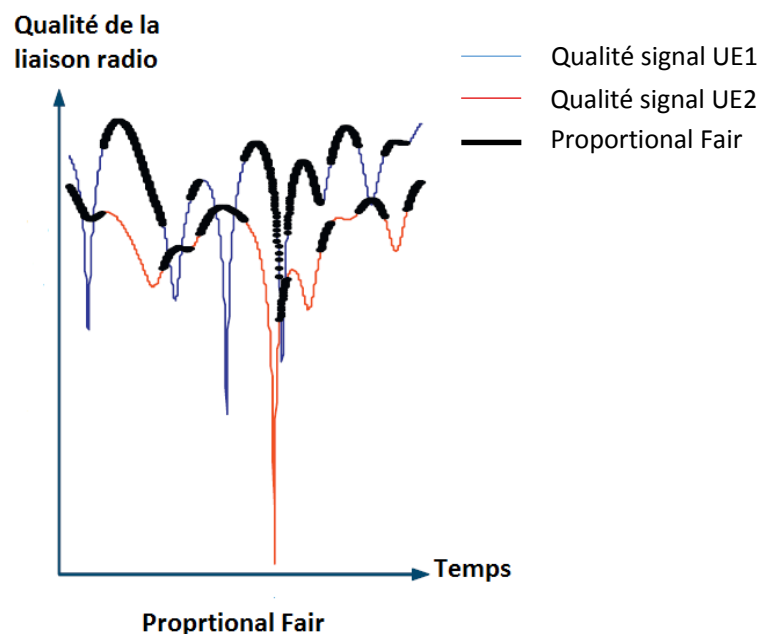


Les ressources communes sont affectées relativement et à chaque instant, à l'utilisateur  $k$  ayant les meilleures conditions radio et ceci selon la formule suivante :

$$K = \arg \max_i \frac{R_i}{\bar{R}_i} \dots \dots \dots (5)$$

Où  $R_i$  est le débit instantané de l' $i$ ème utilisateur et  $\bar{R}_i$  est le débit moyen du même utilisateur qui est calculé sur une certaine période  $T_{PF}$ , typiquement réglé à l'ordre d'une milliseconde.

Grâce à cette stratégie d'allocation, les mobiles ne sont sélectionnés que lorsqu'ils bénéficient de conditions radio exceptionnellement bonnes, voir la figure III.5 :



**Figure III.5 :** schéma représentatif de l'ordonnanceur *Proportional Fair*.

Cependant, le PF ne prend pas en compte la différenciation de service, ce qui rend impossible de traiter les mobiles ayant des trafics comportant des débits variables et des contraintes de qualité de services spécifiques. Le PF n'est donc pas bien adapté à la gestion des services multimédias.

En conclusion, malgré ces limites et grâce à l'utilisation de l'approche opportuniste, le haut débit obtenu dans le système est comparable au Max C/I et l'équité est équivalente à celle procurée par le Round Robin. Combinant les avantages de ces derniers, le Proportional Fair apparaît donc comme la meilleure stratégie d'allocation de ressource actuelle pour les réseaux sans fil notamment le LTE [12].

### VI.1.3.3. L'algorithme M-LWDF

Cet algorithme prend en charge et supporte plusieurs utilisateurs avec différents types de services ou flux ayant des exigences de QoS différentes. En ce qui concerne le trafic temps réel, il essaye de pondérer les retards des paquets transmis en se basant sur l'état du canal qui doit éventuellement connaître à un instant  $t$  et choisi l'utilisateur  $k$  selon la formule suivante :

$$K = \max_i \left( a_i \frac{R_i(t)}{R_i^-} W_i(t) \right) \dots \dots \dots (6)$$

Où :

- $a_i$  est un paramètre strictement positif pour tout utilisateur  $i$  défini par la formule :

$$a_i = -\log(p_i)T_i \dots \dots \dots (7)$$

Avec :  $p_i$  : La probabilité que le délai ne soit pas respecté.

$T_i$  : Le délai toléré par l'utilisateur.

- $W_i(t)$  est le délai toléré par le flux.

Pour les flux non temps réel où le délai n'est pas un paramètre important, cet algorithme s'avère inutile.

### VI.1.3.4. L'algorithme EXP PF

Cet algorithme affecte une priorité supérieure au trafic temps réel (Multimédia) en gardant un minimum de garantie pour l'autre type de trafic. La priorité d'un utilisateur  $k$  sur les autres est déterminée suivant la relation ci-dessous :

$$k = \max_i a_i \frac{d_i(t)}{\bar{d}_i} e^{\left( \frac{a_i W_i(t) - X}{1 + \sqrt{X}} \right)} \dots \dots \dots (8)$$

Sachant que :

$$X = \frac{1}{N} \sum_i a_i W_i(t) \dots \dots \dots (9)$$

## VII. Récapitulatif des performances des ordonnanceurs en Downlink

La comparaison entre les différents algorithmes d'ordonnancement n'est pas évidente, du fait que plusieurs critères interviennent dans l'évaluation des performances de ces algorithmes. Notamment le débit offert, la qualité de service (différentiation de service), l'équité qu'il offre entre les différents utilisateurs et enfin la simplicité de son implémentation. Le tableau III.II ci-dessous tente de résumer le niveau de performance des ordonnanceurs présentés dans ce chapitre. Les critères de performance sont: le débit, l'équité et la simplicité. On suppose trois classes de performance ; « 3 » représente la classe des plus faibles performances de l'ordonnanceur, « 1 » représente la classe des performances objectives maximum atteignables vers lesquelles il est souhaitable de tendre et « 2 » représente la classe intermédiaire.

Type d'ordonnanceur	Débit	Indice d'utilisateurs servi ou pas	Différentiation de service	Simplicité de l'implémentation
Round Robin	3	2	N'existe pas	1
Fair Queuing	3	1	N'existe pas	1
Max-Min Fair	3	1	N'existe pas	1
Weighted FQ	3	1	Existe	2
MaxC/I	1	3	N'existe pas	2
Proportional Fair	1	2	N'existe pas	2
M-LWDF	1	2	Existe	2
Exponential PF	1	2	Existe	2

**Tableau III.II :** Classification qualitative des ordonnanceurs.

Du tableau III.II ci-dessus, nous pouvons classer les ordonnanceurs en trois catégories :

- L'ordonnanceur classique Round Robin, facile à mettre en œuvre mais n'offre pas de bonnes performances.
- Les ordonnanceurs relativement équitables (en termes du taux d'utilisateurs servis) mais offrant des débits insuffisants tels que FQ, Max-Min Fair et WFQ.

- Les ordonnanceurs qui permettent la maximisation du débit, mais qui sont toujours relativement inéquitables en termes d'utilisateurs servis tels que Max C/I, PF, M-LWDF, EXPPF.

En conclusion, nous déduisons que la différenciation de service est l'objectif le plus important pour pouvoir supporter les besoins de trafic temps réel à haut débit, offrir une équité entre les utilisateurs et garantir un taux de perte de données très faible. Il faut trouver un compromis entre ces critères selon le besoin en termes de type et qualité de service et degré de satisfaction des utilisateurs.

### VIII. Les algorithmes d'ordonnement en Uplink

SC-FDMA a été choisi comme le régime d'accès de la liaison montante en LTE en raison de ses propriétés de rapport de puissance crête à puissance moyenne faible (PAPR faible). Néanmoins, afin de parvenir à une telle prestation, il faut une répartition localisée des blocs de ressources RBs, qui impose une contrainte sévère sur la conception de l'ordonnanceur. Dans cette section, nous allons nous intéresser aux ordonnanceurs : FME, RME et IRME.

Les algorithmes d'ordonnements en Uplink prennent en entrée une matrice avec  $K$  lignes (Nombre d'UE actifs) et  $N$  colonnes (Nombre de RB).  $M_{i,n}$  est la valeur associée à un  $UE_i$  et un  $RB_n$ . Suivant le paradigme utilisé CD (canal dépendant) ou PF (équité proportionnelle), cette valeur représente le CSI ou l'état du canal de chaque RB pour chaque UE.

Le paradigme CD prend en considération le CSI dans le processus de la création de la matrice, donc les UE qui ont les plus grandes valeurs CSI auront la chance d'allouer plus de ressources, cette approche atteint les meilleures valeurs en débit, mais elle souffre de problème de famine. Tandis que le PF, quant à lui, il prend le rapport CSI sur le débit pour chaque UE. Cette approche atteint de bons débits en résolvant en même temps le problème de famine [12].

	RB <sub>1</sub>	RB <sub>2</sub>	...	RB <sub>M</sub>
UE <sub>1</sub>	$M_{1,1}$	$M_{1,2}$	...	$M_{1,M}$
UE <sub>2</sub>	$M_{2,1}$	$M_{2,2}$	...	$M_{2,M}$
⋮	⋮	...	⋮	⋮
UE <sub>K</sub>	$M_{K,1}$	$M_{K,2}$	...	$M_{K,M}$

**Figure III.6 :** Matrice d'association UE-RB.

### VIII.1. L'algorithme FME

L'idée de cet algorithme est de commencer l'allocation des ressources à partir de la plus grande valeur dans la matrice, puis faire élargir le processus d'allocation des ressources à droite et à gauche. Les étapes de l'algorithme FME sont :

**Etape 1 :** Trouver le couple  $(UE_0, RB_0)$  ayant la plus grande valeur dans la matrice.

**Etape 2 :** Allouer  $RB_0$  à  $UE_0$ .

**Etape 3 :** Pour cet utilisateur  $UE_0$ , comparer les valeurs de la matrice pour  $RB+1$  et celle du  $RB-1$ .

**Etape 4 :** Si la valeur à droite est supérieure à celle de gauche alors, élargir l'allocation vers  $RB+1$ , sinon aller vers  $RB-1$ .

**Etape 5 :** Pour chaque colonne trouver la valeur maximale, allouer ce  $RB$  à l'utilisateur sélectionné s'il correspond à la valeur maximale de la colonne, mais l'allocation ne peut être effectuée sans que la contrainte de contiguïté soit respectée.

**Etape 6 :** Répéter étape 5 jusqu'à épuisement de tous les RBs.

L'algorithme FME est considéré comme complexe à cause du nombre d'opérations de recherche effectuées à chaque étape [12].

### VIII.2. L'algorithme RME

La même démarche de l'algorithme précédent est utilisée dans celui-là, mais RME réalise une recherche récursive du maximum. Les étapes de l'algorithme RME sont :

**Etape 1 :** Sélectionner le couple  $(UR_0, RB_0)$  ayant la plus grande valeur dans la matrice  $M$ . (voir la figure a ci-après).

**Etape 2 :** Allouer  $RB_0$  à  $UR_0$ .

**Etape 3 :** Elargir l'allocation de l'étape 2 dans les deux côtés (droite et gauche), jusqu'à ce qu'on trouve un autre UE ayant une plus grande valeur. ( $UE_1$  de la figure « b » ci-après).

**Etape 4 :** Marquer  $UR_0$  comme servi.

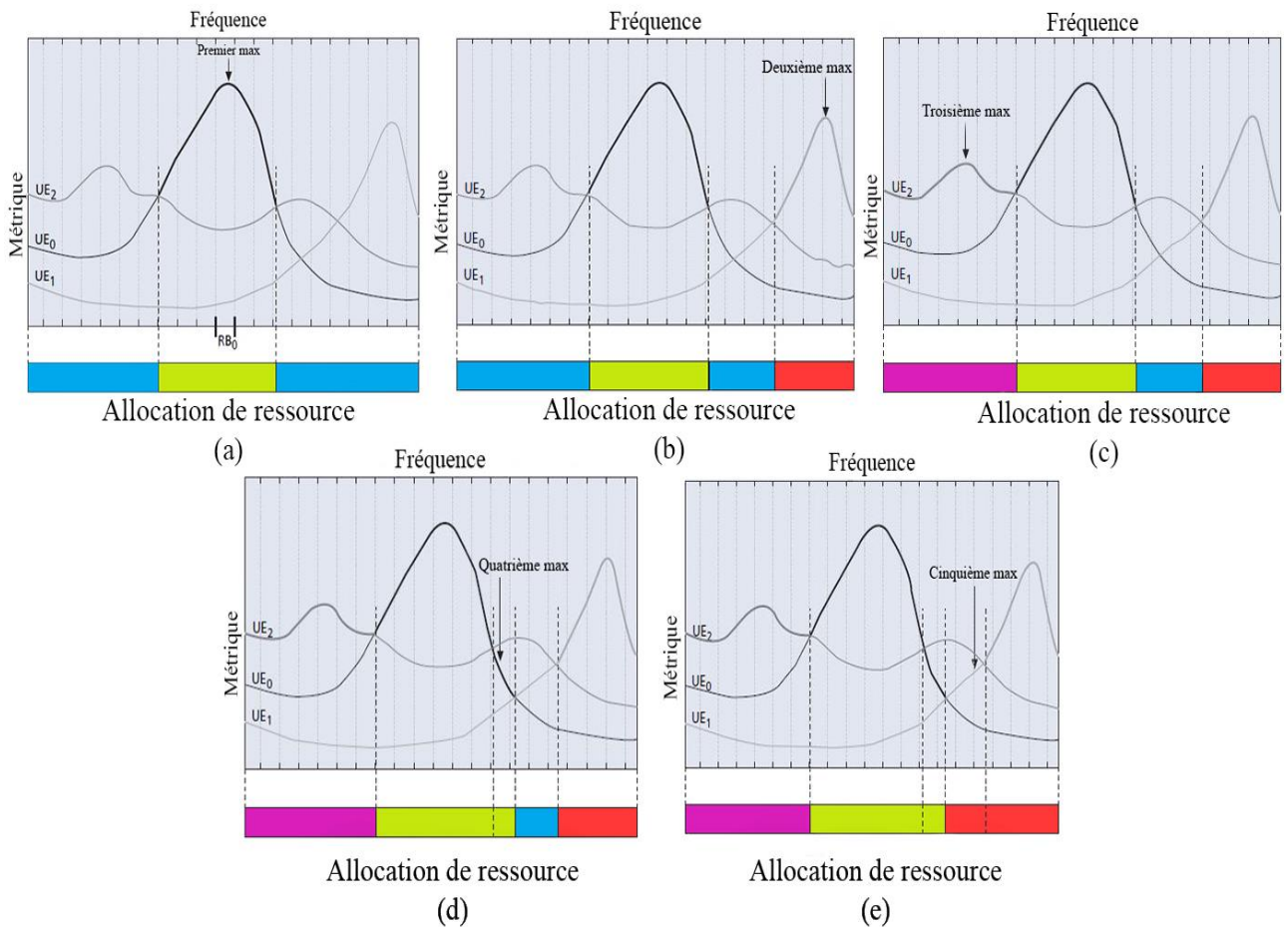
**Etape 5 :** Répéter les étapes 1 à 4 pour chercher à nouveau le maximum parmi les UEs non servis, arrêter lorsque tous les UEs sont servis ou tous les RBs sont alloués. (Fig « b-c » ci-après)

**Étape 6 :** S'il reste des RBs non alloués alors, chercher l'UE qui a la plus grande valeur parmi l'ensemble des RB restants.

**Étape 7 :** Vérifier si l'un des RBs adjacents déjà assignés appartient à l'UE trouvé lors de l'étape 6.

**Étape 8 :** Si l'UE n'est pas le même, supprimer ce maximum de la matrice M et répéter l'étape 6. Sinon, élargir l'allocation jusqu'à ce qu'une autre valeur plus grande soit trouvée. (Fig d)

**Étape 9 :** Répéter les étapes 6 à 8 jusqu'à épuisement de tous les RBs. (Fig e) [12].



**Figure III.7 :** Exemple d'application de l'algorithme RME.

### VIII.3. L'algorithme IRME

A l'inverse du RME qui élargit l'allocation des ressources aux voisins (droite et gauche) ayant la valeur maximale dans la colonne correspondante, IRME utilise un seuil « r » de telle sorte qu'il élargit l'allocation dans les deux côtés (colonne) gauche et droit ayant la valeur parmi les « r » meilleures valeurs et non pas la valeur maximale.

L'algorithme IRME suit les étapes suivantes :

**Etape 1 :** Trouver le couple  $(UE_0, RB_0)$  ayant la plus grande valeur dans la matrice.

**Etape 2 :** Allouer  $RB_0$  à  $UE_0$ .

**Etape 3 :** Elargir l'allocation dans les deux côtés (droite et gauche) ayant la valeur parmi les « r » valeurs maximales dans la colonne correspondante en même temps jusqu'à ce qu'on dépasse le seuil fixé (r).

**Etape 4 :** Marquer  $UE_0$  comme servi et répéter les étapes de 1 à 4 pour chercher à nouveau le maximum parmi les UEs non servis.

**Etape 5 :** S'il reste des RBs non alloués, alors allouer ces RBs aux UEs ayant la valeur maximale en respectant la contrainte de contiguïté.

**Etape 6 :** Répéter étape 5 jusqu'à épuisement des RBs [12].

## IX. Conclusion

L'allocation des ressources en LTE est d'une importance cruciale pour le bon fonctionnement du réseau ainsi que pour satisfaire la clientèle. Afin de voir comment fonctionnent de tels ordonnanceurs en pratique, nous allons étudier le comportement de quelques algorithmes d'allocation précédemment définis dans différents scénarios tirés du cas réel et en tirer les meilleurs ordonnanceurs dans les cas (scénarios) correspondants à l'aide d'une simulation avec le logiciel LTE-Sim.

# Chapitre 4



# Chapitre 4

## Simulation d'algorithmes d'allocation

### I. Introduction

De nos jours, des simulateurs complets gratuits du réseau LTE n'existent pas réellement. En fait, la plupart des fournisseurs d'équipements de communications mobiles ont mis en œuvre leurs propres simulateurs. Par ailleurs, d'autres simulateurs, développés en coopérations universitaires-industrielles peuvent être achetés au moyen d'une licence commerciale et leurs codes sources ne sont pas accessibles au public. Le LTE-Sim a ainsi été créé pour simuler les réseaux LTE et fournir une vérification complète de leurs performances.

#### I.1. Présentation du logiciel LTE-Sim

Le LTE-Sim est un logiciel open source conçu pour simuler les réseaux LTE, principalement développé par G. Piro et F. Capozzi à l'école polytechnique de Bari, Italie. Le simulateur a été présenté au moyen d'un article scientifique [13].

Il prend en charge les environnements simples et hétérogènes multi-cellules, la gestion QoS, environnement multi utilisateurs, la mobilité des utilisateurs.

##### I.1.1. Présentation de l'ensemble des algorithmes prédéfinis dans le LTE-Sim

LTE-Sim prend en charge les stratégies d'ordonnancement les plus répandues telles que :

- Proportional Fair (PF).
- Modified Largest Weighted Delay First (MLWDF).
- Exponential Proportional Fair (Ex PF).
- Optimized EXP Rule.
- Optimized LOG Rule.

### I.1.2. Présentation de l'ensemble des scénarios prédéfinis dans le LTE-Sim

#### a) Single Cell without Interference

Cette fonction permet la simulation d'un réseau LTE dans un environnement monocellulaire sans interférences, sa signature est illustrée dans la figure IV.1 ci-dessous :

```
static void SingleCellWithoutInterference (double radius,
                                           int nbUE,
                                           int nbVoIP, int nbVideo, int nbBE, int nbCBR,
                                           int sched_type,
                                           int frame_struct,
                                           int speed,
                                           double maxDelay, int videoBitRate,
                                           int seed)
```

*Figure IV.1: Signature du scénario Single Cell without Interference.*

#### b) Single Cell with Interference

Cette fonction permet la simulation d'une cellule avec des interférences, sa signature est illustrée dans la figure IV.2 :

```
static void SingleCellWithInterference (int nbCells, double radius,
                                        int nbUE,
                                        int nbVoIP, int nbVideo, int nbBE, int nbCBR,
                                        int sched_type,
                                        int frame_struct,
                                        int speed,
                                        double maxDelay, int videoBitRate,
                                        int seed)
```

*Figure IV.2: Signature du scénario Single Cell with Interference.*

#### c) Single Cell with Femto

Cette fonction permet de simuler un réseau avec une cellule femto, sa signature est illustrée dans la figure IV.3 :

```
static void SingleCellWithFemto (double radius, int nbBuildings, int buildingType, double activityRatio,
                                 int nbUE, int nbFemtoUE,
                                 int nbVoIP, int nbVideo, int nbBE, int nbCBR,
                                 int sched_type,
                                 int frame_struct,
                                 int speed, int accessPolicy,
                                 double maxDelay, int videoBitRate,
                                 int seed)
```

*Figure IV.3 : Signature du scénario Single Cell With Femto.*

**d) Single Cell with Streets**

Cette fonction permet la simulation d'un réseau avec une cellule et des rues, sa signature est illustrée dans la figure IV.4 ci-dessous :

```
static void SingleCellWithStreets ( double radius, int nbStreets,
                                   int nbUE, int nbFemtoUE,
                                   int nbVoIP, int nbVideo, int nbBE, int nbCBR,
                                   int sched_type,
                                   int frame_struct,
                                   int speed,
                                   double maxDelay, int videoBitRate,
                                   int seed)
```

*Figure IV.4: Signature du scénario Single Cell with Streets.*

**e) Multi Cell**

Cette fonction permet la simulation d'un réseau LTE dans un environnement multi cellulaire, sa signature est illustrée dans la figure IV.5 ci-dessous :

```
static void SingleCellWithStreets ( double radius, int nbStreets,
                                   int nbUE, int nbFemtoUE,
                                   int nbVoIP, int nbVideo, int nbBE, int nbCBR,
                                   int sched_type,
                                   int frame_struct,
                                   int speed,
                                   double maxDelay, int videoBitRate,
                                   int seed)
```

*Figure IV.5 : Signature du scénario Multi Cell.*

**f) Multi Cell SinrPlot**

Cette fonction permet la simulation d'un réseau LTE dans un environnement multicellulaire avec la gestion de la mobilité, sa signature est :

```
static void MultiCellSinrPlot (int nbCell, double radius,
                               int nbUE,
                               int sched_type,
                               int frame_struct,
                               int speed,
                               int mobility_model,
                               int seed)
```

*Figure IV.6 : Signature du scénario Multi Cell SinrPlot.*

Avec :

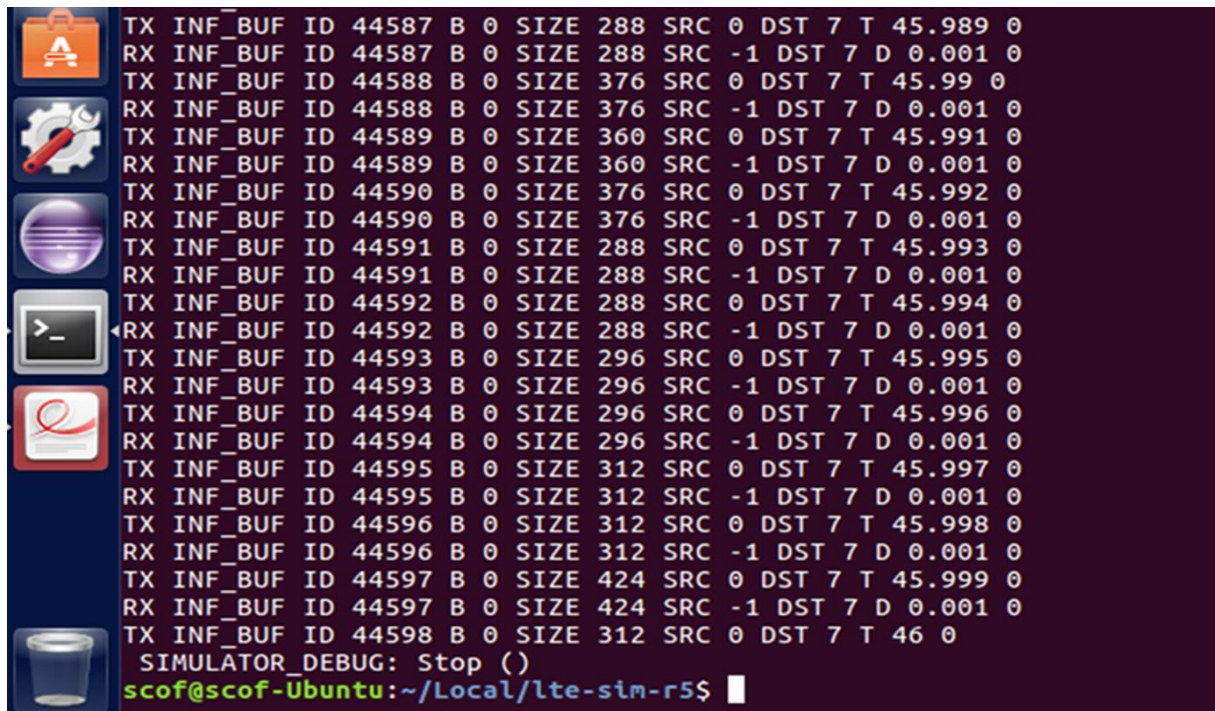
- **Raduis** : le rayon de couverture de la cellule en km.
- **nbUE** : le nombre d'équipements utilisateurs.
- **nbVoIP** : le nombre d'applications voix sur IP.
- **nbVideo** : le nombre d'applications vidéo.
- **nbBE** : le nombre d'applications "best Effort".
- **nbCBR** : le nombre d'applications concernant les fichiers archivés.
- **sched\_type** : le type de l'algorithme d'ordonnancement.
- **frame\_struct** : la structure de trame.
- **Speed** : la vitesse de déplacement.
- **maxDelay** : le délai maximal.

### I.1.3 Interprétation et exploitation des résultats de simulation

#### I.1.3.1. Interprétation des résultats de simulation

L'exécution d'un exemple de scénario nous donne un résultat qui se présente sous forme de trace qui comporte 8 colonnes.

En exécutant l'exemple de simulation, `/LTE-Sim SingleCellWithI 7 1 1 0 0 1 0 1 1 0.1`  
I28 la trace obtenue est la suivante :



```

TX INF_BUF ID 44587 B 0 SIZE 288 SRC 0 DST 7 T 45.989 0
RX INF_BUF ID 44587 B 0 SIZE 288 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44588 B 0 SIZE 376 SRC 0 DST 7 T 45.99 0
RX INF_BUF ID 44588 B 0 SIZE 376 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44589 B 0 SIZE 360 SRC 0 DST 7 T 45.991 0
RX INF_BUF ID 44589 B 0 SIZE 360 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44590 B 0 SIZE 376 SRC 0 DST 7 T 45.992 0
RX INF_BUF ID 44590 B 0 SIZE 376 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44591 B 0 SIZE 288 SRC 0 DST 7 T 45.993 0
RX INF_BUF ID 44591 B 0 SIZE 288 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44592 B 0 SIZE 288 SRC 0 DST 7 T 45.994 0
RX INF_BUF ID 44592 B 0 SIZE 288 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44593 B 0 SIZE 296 SRC 0 DST 7 T 45.995 0
RX INF_BUF ID 44593 B 0 SIZE 296 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44594 B 0 SIZE 296 SRC 0 DST 7 T 45.996 0
RX INF_BUF ID 44594 B 0 SIZE 296 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44595 B 0 SIZE 312 SRC 0 DST 7 T 45.997 0
RX INF_BUF ID 44595 B 0 SIZE 312 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44596 B 0 SIZE 312 SRC 0 DST 7 T 45.998 0
RX INF_BUF ID 44596 B 0 SIZE 312 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44597 B 0 SIZE 424 SRC 0 DST 7 T 45.999 0
RX INF_BUF ID 44597 B 0 SIZE 424 SRC -1 DST 7 D 0.001 0
TX INF_BUF ID 44598 B 0 SIZE 312 SRC 0 DST 7 T 46 0
SIMULATOR_DEBUG: Stop ()
scof@scof-Ubuntu:~/Local/lte-sim-r5$

```

Figure IV.7 : Trace des résultats d'un exemple de simulation sous LTE-Sim.

Chacune de ces huit colonnes est dédiée à des informations précises qui sont détaillées dans le tableau IV.I qui suit.

N° de colonne	Information contenu
1	TX, RX : sont associés à des paquets qui ont été envoyés, reçus.
2	Décrit le type de paquet auquel la trace se réfère.
3	ID = identificateur du paquet unique.
4	B = ID porteur. Il identifie le support utilisé pour cartographier le paquet.
5	SRC = ID Source. Il identifie le nœud qui envoie le paquet.
6	DES = ID Destination. Il identifie le nœud qui reçoit le paquet.
7	T = temps. Il représente l'instant où le paquet a été créé.
8	D = Délai. Il représente le retard du paquet reçu.

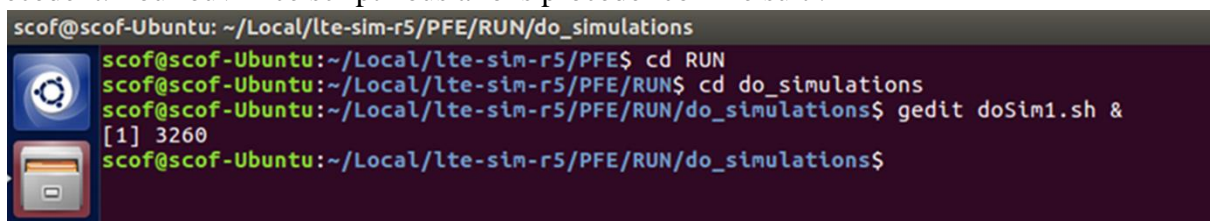
*Tableau IV.I : Signification de l'information présente dans chaque colonne.*

### I.1.3.2. Exploitation des résultats de simulation

Les résultats obtenus pourront être interprétés une fois récupérés et mis sous forme de courbes, on peut récupérer les résultats sous forme de document texte en ajoutant la commande `>>Nom_du_fichier.out`, ensuite nous pouvons implémenter ces derniers sous Matlab ou un autre logiciel qui permet de tracer des courbes afin de pouvoir faire des études sur ces données recueillies.

Dans notre étude et comme nous sommes sous Linux, nous avons installé le logiciel « Gnuplot », ce qui permet de récupérer directement les résultats et les traduire en graphes. Pour cela nous allons utiliser le script « `doSim1.sh` » présent dans le répertoire « `lte-sim-r5/RUN/do_simulations` ».

Cependant, afin de pouvoir modifier les paramètres de simulation, nous allons créer une copie du contenu du dossier « `lte-sim-r5` » et le mettre dans un nouveau dossier qu'on appellera « `PFE` ». Ainsi nous allons pouvoir changer les paramètres sur le script « `doSim1.sh` » précédent. Pour ouvrir ce script nous allons procéder comme suit :



```

scof@scof-Ubuntu: ~/Local/lte-sim-r5/PFE/RUN/do_simulations
scof@scof-Ubuntu:~/Local/lte-sim-r5/PFE$ cd RUN
scof@scof-Ubuntu:~/Local/lte-sim-r5/PFE/RUN$ cd do_simulations
scof@scof-Ubuntu:~/Local/lte-sim-r5/PFE/RUN/do_simulations$ gedit doSim1.sh &
[1] 3260
scof@scof-Ubuntu:~/Local/lte-sim-r5/PFE/RUN/do_simulations$

```

*Figure IV.8 : Accès au script `doSim1.sh`.*

Le script ouvert à modifier est montré dans la figure IV.9 ci-dessous :

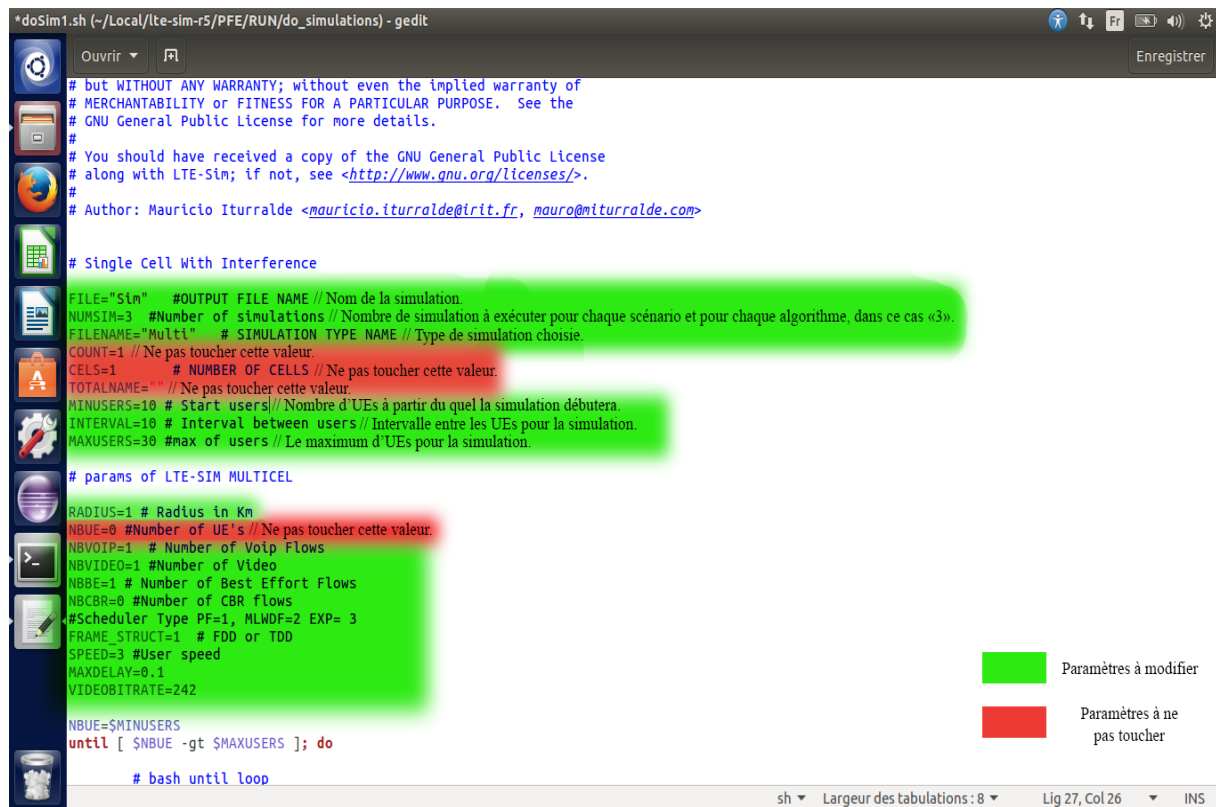


Figure IV.9 : Le script « doSim1.sh ».

Une fois qu'on a saisi les paramètres qu'on veut, on enregistre la version modifiée de « doSim1.sh », on programme également le temps de la simulation dans le script « single-cell-with-interference.h » présent dans le répertoire « lte-sim-r5/PFE/src/scenarios », puis on exécute « doSim1.sh » dans le terminal comme le montre la figure IV.10 ci-après.

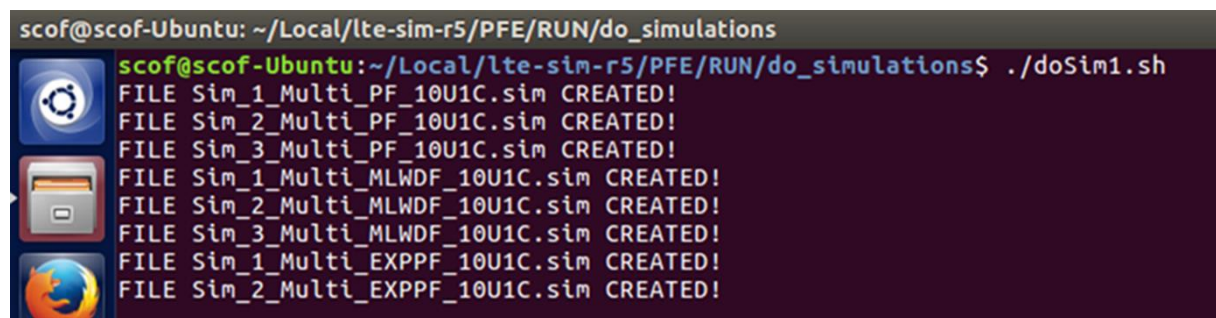


Figure IV.10 : trace d'exécution du script « doSim1.sh ».

La simulation est alors en cours, le logiciel LTE-Sim exécute les scénarios et les algorithmes en tenant compte des paramètres qu'on a saisi. A la fin de cette simulation des graphes seront créés à partir des résultats de simulation.

## II. Simulation et résultats

Notre simulation est basée sur trois critères de comparaison à savoir, le débit, le taux de perte des paquets PLR et le délai de transmission, en utilisant trois algorithmes d'ordonnancement en Downlink : PF, M-LWDF et EXP PF, dans deux différents scénarios (environnements) : Single Cell Without Interference et Single Cell With Interference.

Cette simulation concerne deux types de services :

- **Service Temps Réel (RT)** : VoIP et VIDEO.
- **Services Non Temps Réel (NRT)** : Best Effort (DATA).

Après avoir appliqué les paramètres 1 et 2 illustrés dans les figures IV.11 et IV.12 ci-dessous, nous obtenons les résultats décrit dans à partir de la page suivante :

```
# Single Cell With / Without Interference

FILE="Sim" #OUTPUT FILE NAME
NUMSIM=5 #Number of simulations
FILENAME="SingleCell" # SIMULATION TYPE NAME
COUNT=1
CELS=1 # NUMBER OF CELLS
TOTALNAME=""
MINUSERS=5 # Start users
INTERVAL=5 # Interval between users
MAXUSERS=20 #max of users

# params of LTE-SIM SingleCell

RADIUS=1 # Radius in Km
NBUE=0 #Number of UE's
NBVOIP=1 # Number of Voip Flows
NBVIDEO=1 #Number of Video
NBBE=1 # Number of Best Effort Flows
NBCBR=0 #Number of CBR flows
#Scheduler Type PF=1, MLWDF=2 EXP= 3
FRAME_STRUCT=1 # FDD or TDD
SPEED=3 #User speed
MAXDELAY=0.1
VIDEOBITRATE=242
```

**Figure IV.11** : Paramètres 1 à implémenter dans le script « doSim1.sh ».

```
# Single Cell With Interference

FILE="Sim" #OUTPUT FILE NAME
NUMSIM=5 #Number of simulations
FILENAME="SingleCellWithI" # SIMULATION TYPE NAME
COUNT=1
CELS=1 # NUMBER OF CELLS
TOTALNAME=""
MINUSERS=10 # Start users
INTERVAL=10 # Interval between users
MAXUSERS=40 #max of users

# params of LTE-SIM SingleCellWithI

RADIUS=1 # Radius in Km
NBUE=0 #Number of UE's
NBVOIP=1 # Number of Voip Flows
NBVIDEO=1 #Number of Video
NBBE=1 # Number of Best Effort Flows
NBCBR=0 #Number of CBR flows
#Scheduler Type PF=1, MLWDF=2 EXP= 3
FRAME_STRUCT=1 # FDD or TDD
SPEED=3 #User speed
MAXDELAY=0.1
VIDEOBITRATE=242
```

*Figure IV.12 : Paramètres 2 à implémenter dans le script « doSim1.sh ».*

## II.1. Services Temps Réel (RT)

### II.1.1. VoIP

La problématique de qualité de la voix sur IP est particulière car la voix attend de son transporteur autre chose que les données. La transmission de données classique (fichiers, messages, transactions ...) ne supporte aucune perte en ligne sous peine de graves conséquences pour l'interprétation et l'utilisation de ces données par l'équipement récepteur, mais elle supporte en revanche une dérive importante en termes de durée d'acheminement. Peu importe qu'un paquet arrive avec 100 ms de retard. Le comportement attendu pour la voix est exactement inverse : 1% ou 2% de perte de données de voix en ligne ne sont pas trop gênants pour la qualité du service de VoIP, mais en revanche une variation fréquente de 100 ms sur le délai de transit est catastrophique et rend le service inutilisable [14].



II.1.1.1. Simulation Single Cell without Interference (Paramètres 1)

a) Débit en VoIP

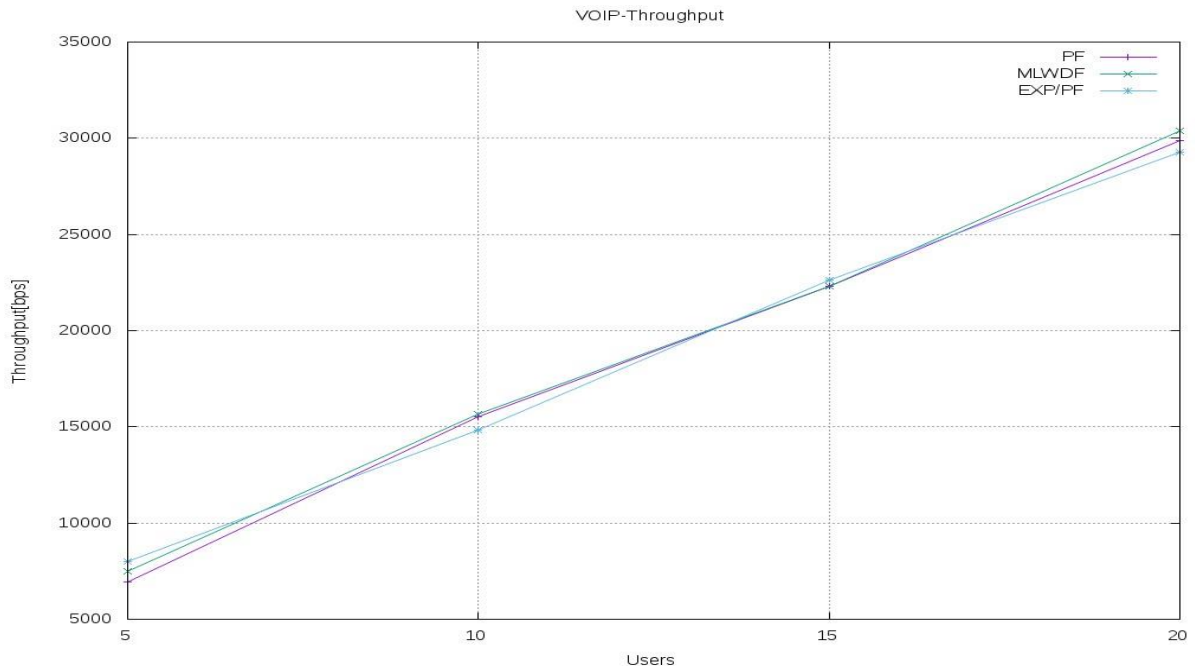


Figure IV.13 : Graphe du débit VoIP dans Single Cell without Interference.

b) Délai en VoIP

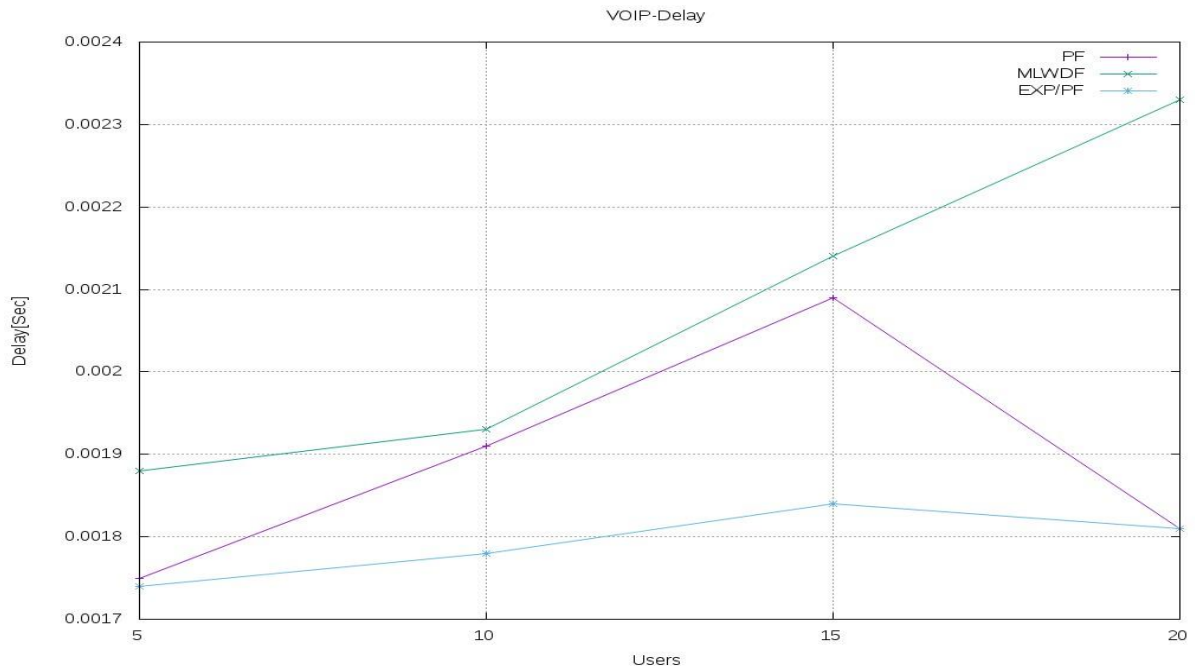
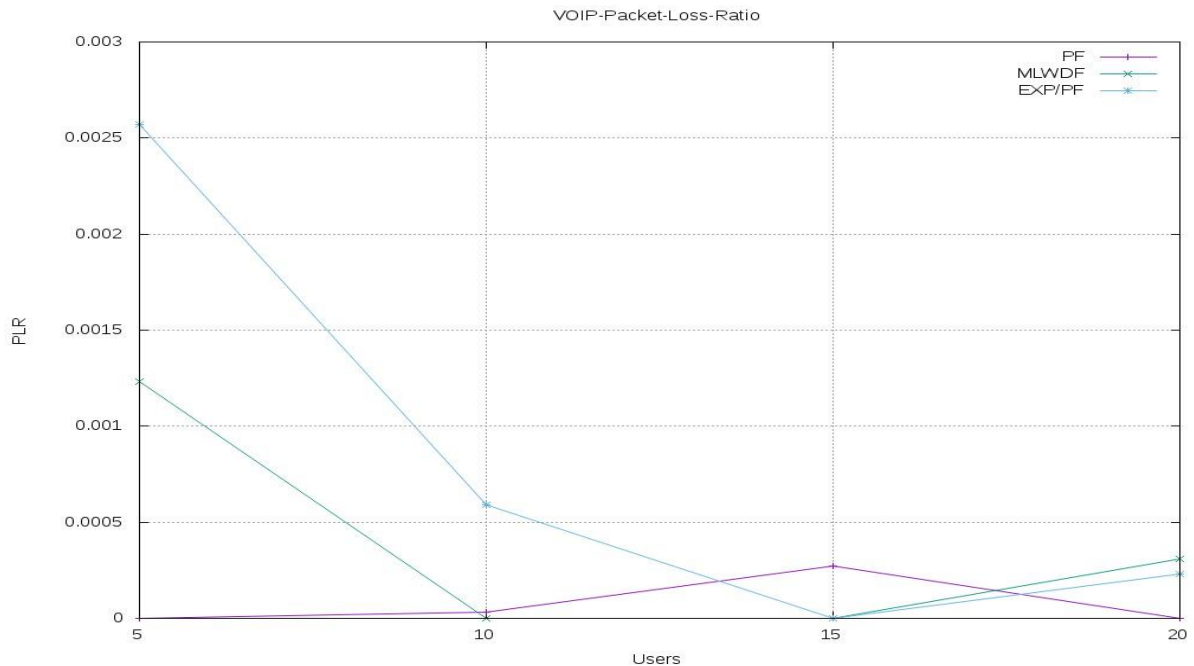


Figure IV.14 : Graphe du délai VoIP dans Single Cell without Interference.

## c) Taux de paquets perdus en VoIP



*Figure IV.15 : Graphe du PLR VoIP dans Single Cell without Interference.*

- Dans le graphe traduisant le débit VoIP, nous constatons que les trois algorithmes réagissent approximativement d'une manière identique, ce qui veut dire qu'ils ont presque les mêmes performances.
- Dans le graphe traduisant le délai VoIP, nous constatons que l'EXP PF est le meilleur ordonnanceur suivi par le PF puis le MLWDF.
- Dans le graphe traduisant le PLR VoIP, nous constatons que :
  - De 5 à 10 utilisateurs simultanés, le PF possède le PLR le plus bas.
  - De 10 à 15 utilisateurs simultanés, le MLWDF possède un PLR nul.
  - De 15 à 17 utilisateurs simultanés, l'EXP PF possède le PLR le plus bas.
  - De 17 à 20 utilisateurs simultanés, le PF possède le PLR le plus bas.

II.1.1.2. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 1)

a) Débit en VoIP

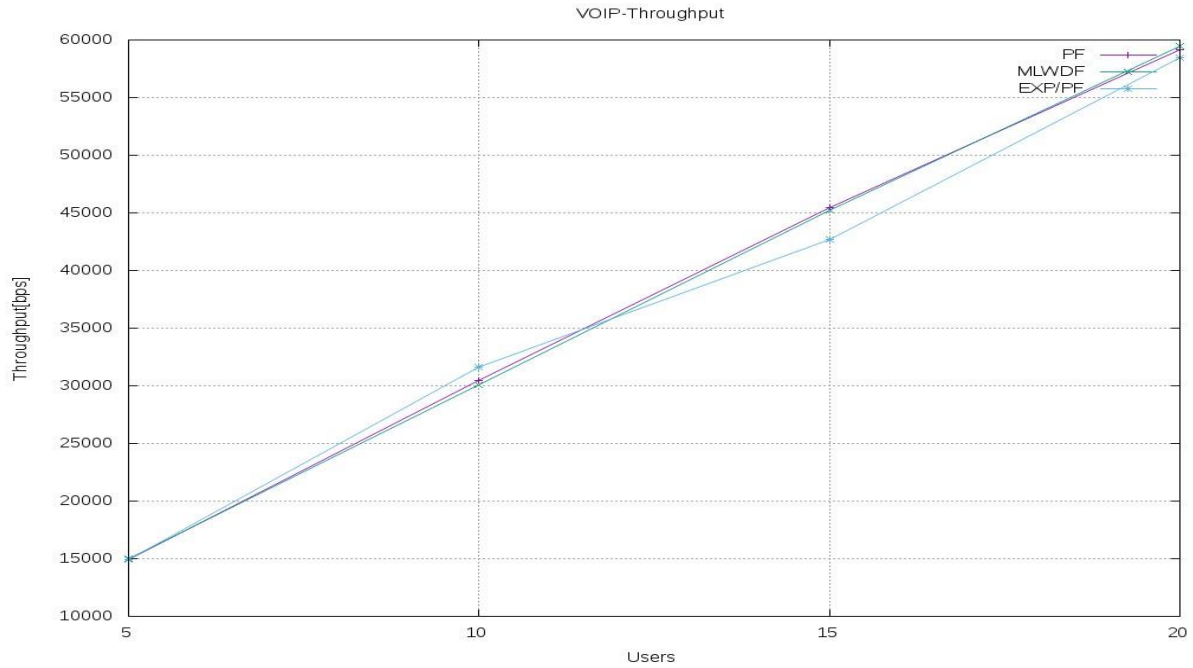


Figure IV.16 : Graphe du débit VoIP dans Single Cell with Interference(Par1).

b) Délai VoIP

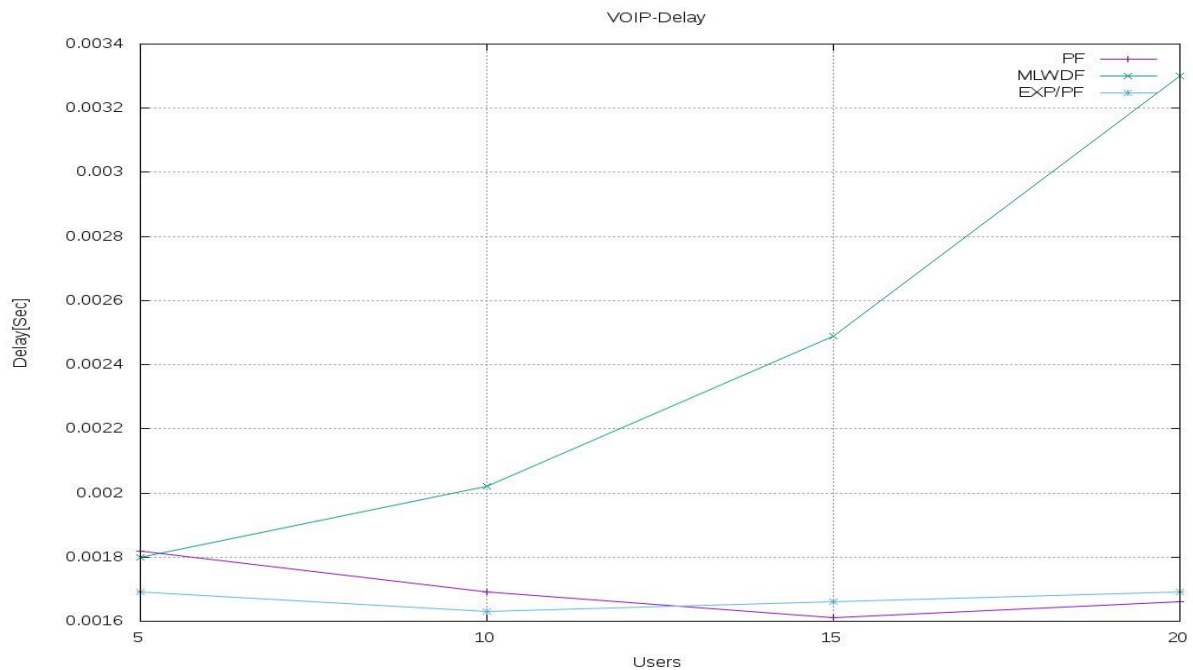
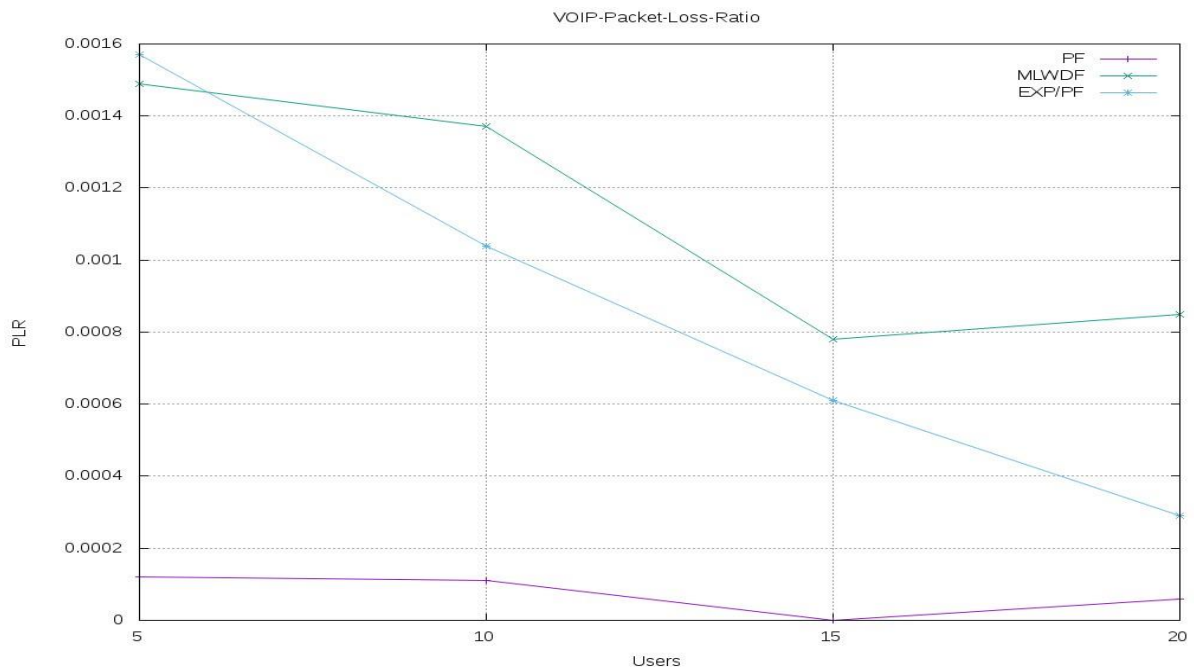


Figure IV.17 : Graphe du délai VoIP dans Single Cell with Interference(Par1).

## c) Taux de paquets perdus VoIP



**Figure IV.18 :** Graphe du PLR VoIP dans Single Cell with Interference(Par1).

- Dans le graphe traduisant le débit VoIP, nous constatons que les trois algorithmes réagissent approximativement d'une manière identique, ce qui veut dire qu'ils ont presque les mêmes performances.
- Dans le graphe traduisant le délai VoIP, nous constatons que :
  - De 5 à 13 utilisateurs simultanés, l'EXP PF a le délai le plus bas.
  - De 13 à 20 utilisateurs simultanés, le PF a le délai le plus bas.
- Dans le graphe traduisant le PLR VoIP, nous constatons que le PF a le PLR le plus bas.

II.1.1.3. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 2)

a) Débit VoIP

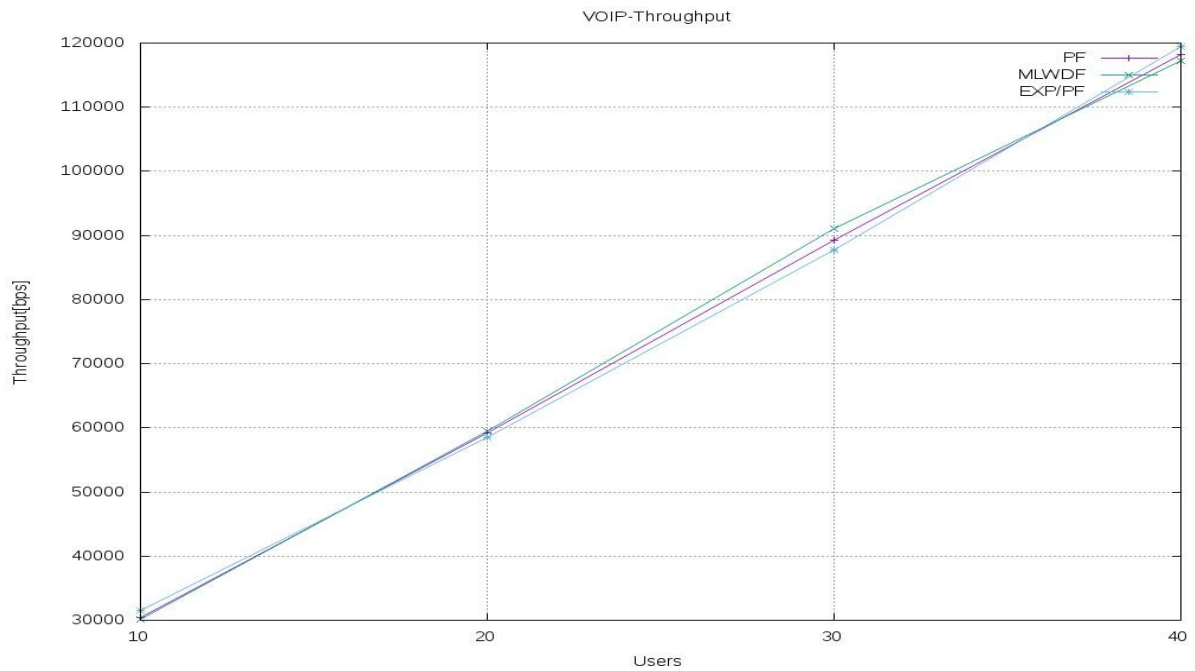


Figure IV.19 : Graphe du débit VoIP dans Single Cell with Interference(Par2).

b) Délai VoIP

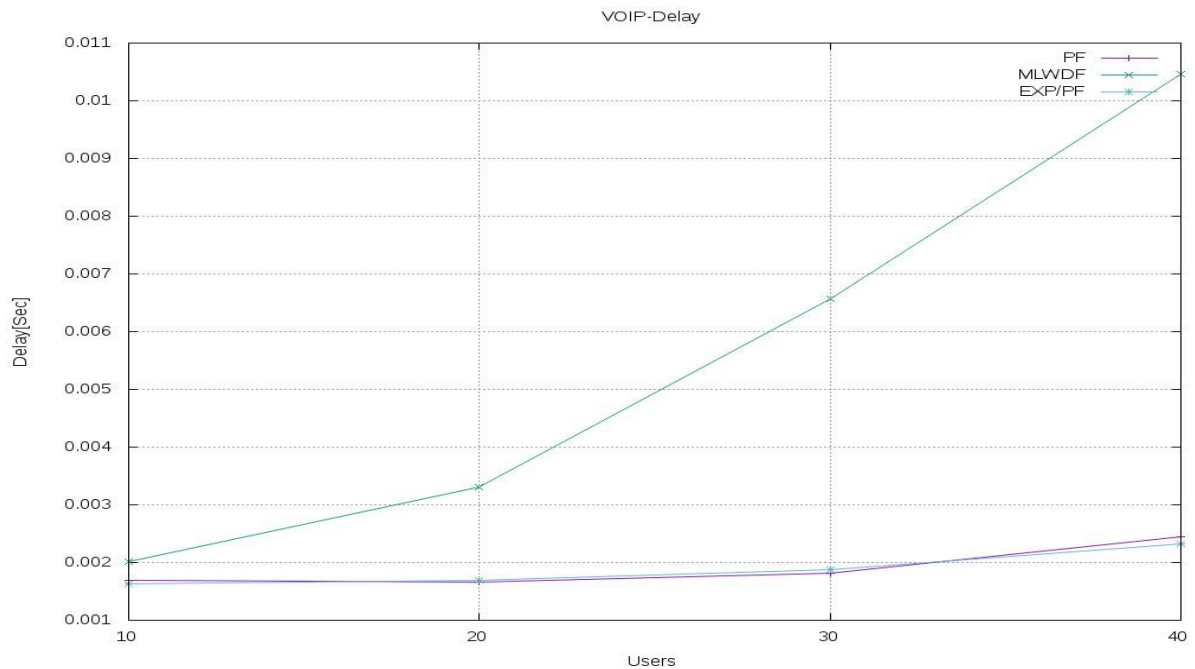
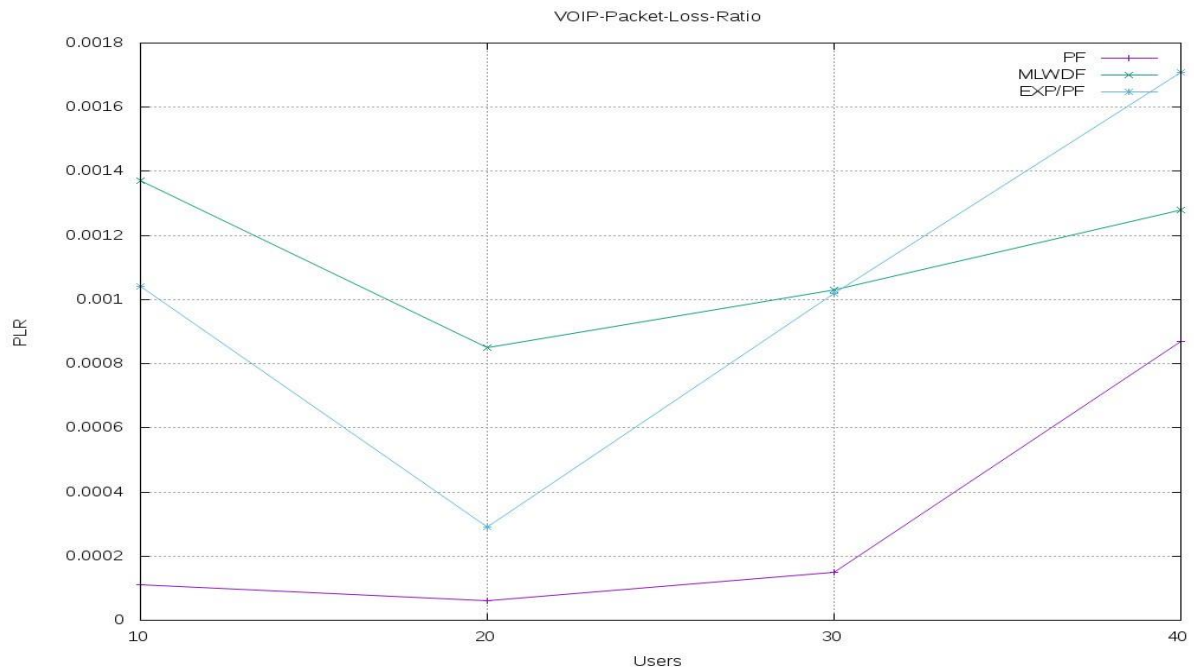


Figure IV.20 : Graphe du délai VoIP dans Single Cell with Interference(Par2).

## c) Taux de paquets perdus VoIP



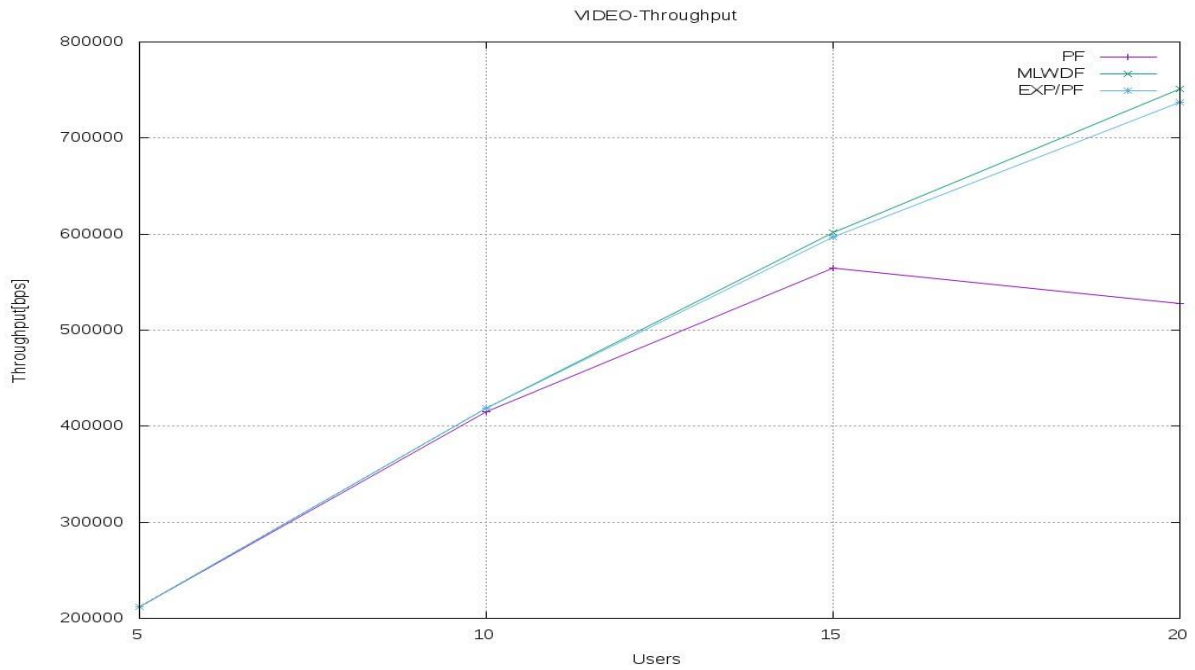
*Figure IV.21 : Graphe du PLR VoIP dans Single Cell with Interference(Par2).*

- Dans le graphe traduisant le débit VoIP, nous constatons que les trois algorithmes réagissent approximativement d'une manière identique, ce qui veut dire qu'ils ont presque les mêmes performances.
- Dans le graphe traduisant le délai VoIP, nous constatons que l'EXP PF et le PF sont les meilleurs ordonnanceurs.
- Dans le graphe traduisant le PLR VoIP, nous constatons que le PF possède le PLR le plus bas.

**II.1.2. VIDEO**

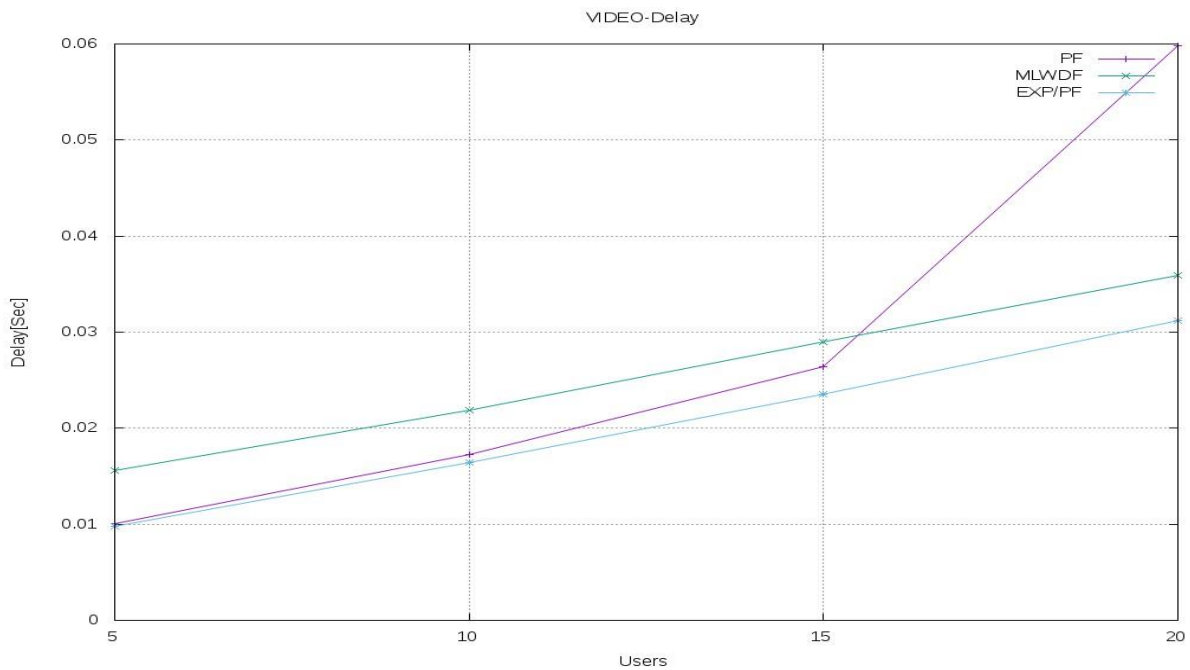
**II.1.2.1. Simulation Single Cell without Interference (Paramètres 1)**

**a) Débit VIDEO**



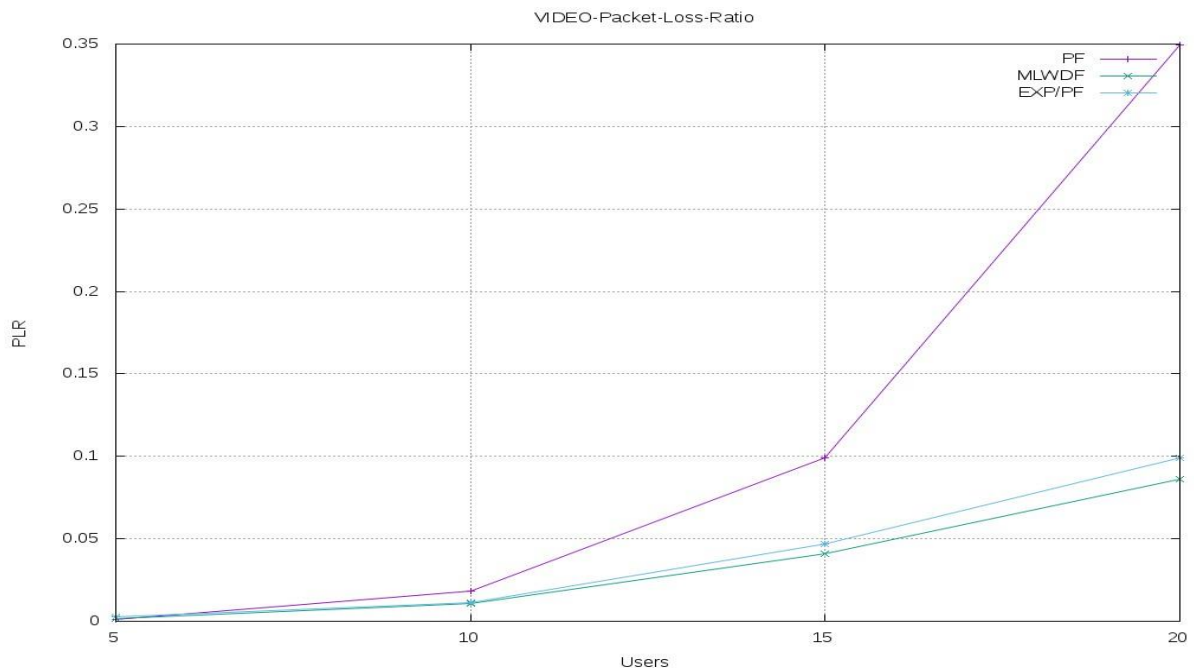
*Figure IV.22: Graphe du débit VIDEO dans Single Cell without Interference.*

**b) Délai VIDEO**



*Figure IV.23: Graphe du délai VIDEO dans Single Cell without Interference.*

## c) Taux de paquets perdus VIDEO



**Figure IV.24 :** Graphe du PLR VIDEO dans Single Cell without Interference.

- Dans le graphe traduisant le débit VIDEO, nous constatons que :
  - De 5 à 10 utilisateurs simultanés, les trois algorithmes offrent le même débit.
  - De 10 à 20 utilisateurs simultanés, le MLWDF et l'EXP PF offrent le meilleur débit.
- Dans le graphe traduisant le délai VIDEO, nous constatons que l'EXP PF a le délai le plus court.
- Dans le graphe traduisant le PLR VIDEO, nous constatons que le MLWDF a le PLR le plus bas.



II.1.2.2. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 1)

a) Débit VIDEO

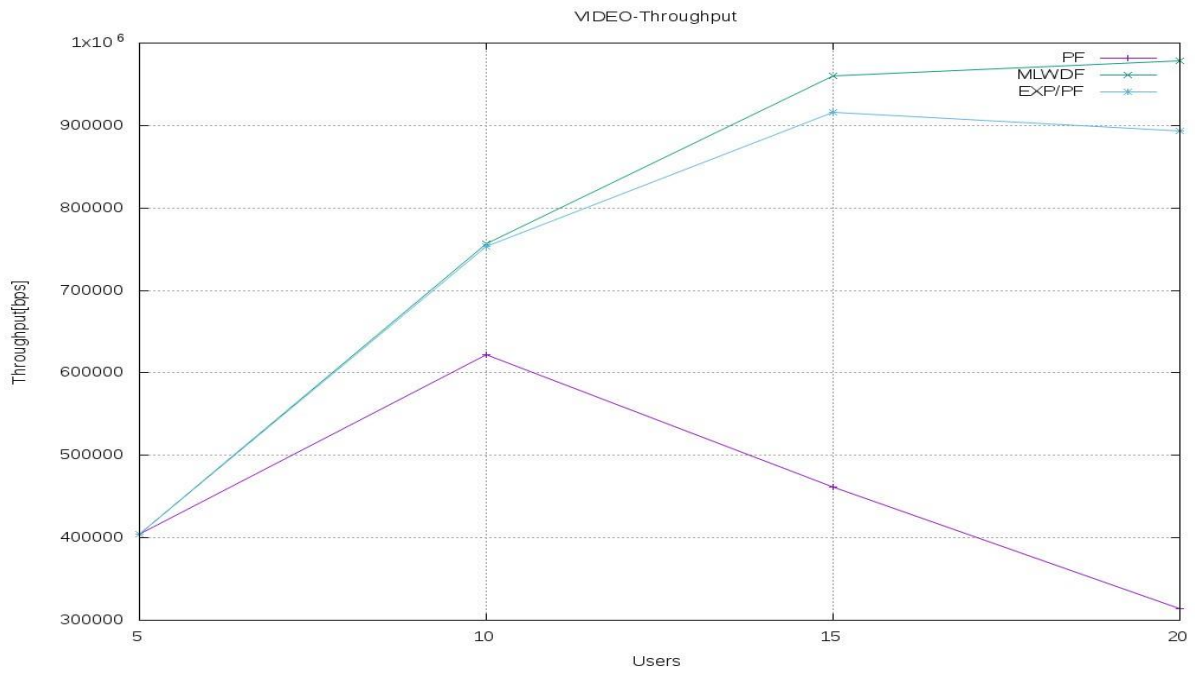


Figure IV.25 : Graphe du débit VIDEO dans Single Cell with Interference(Par1).

b) Délai VIDEO

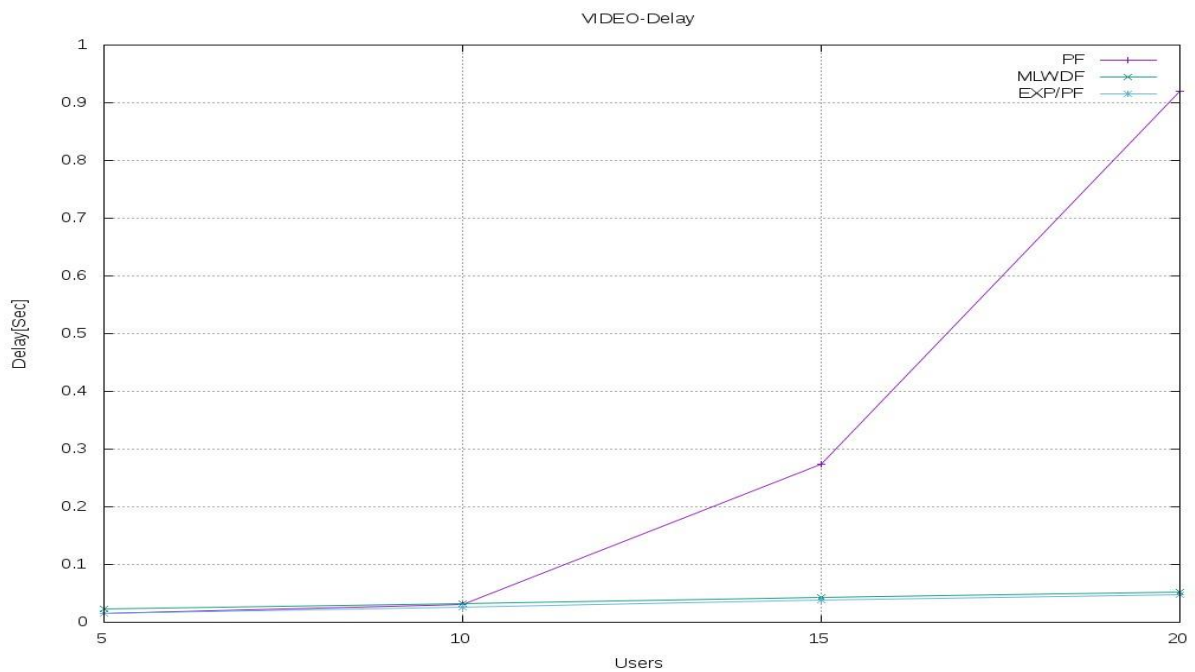
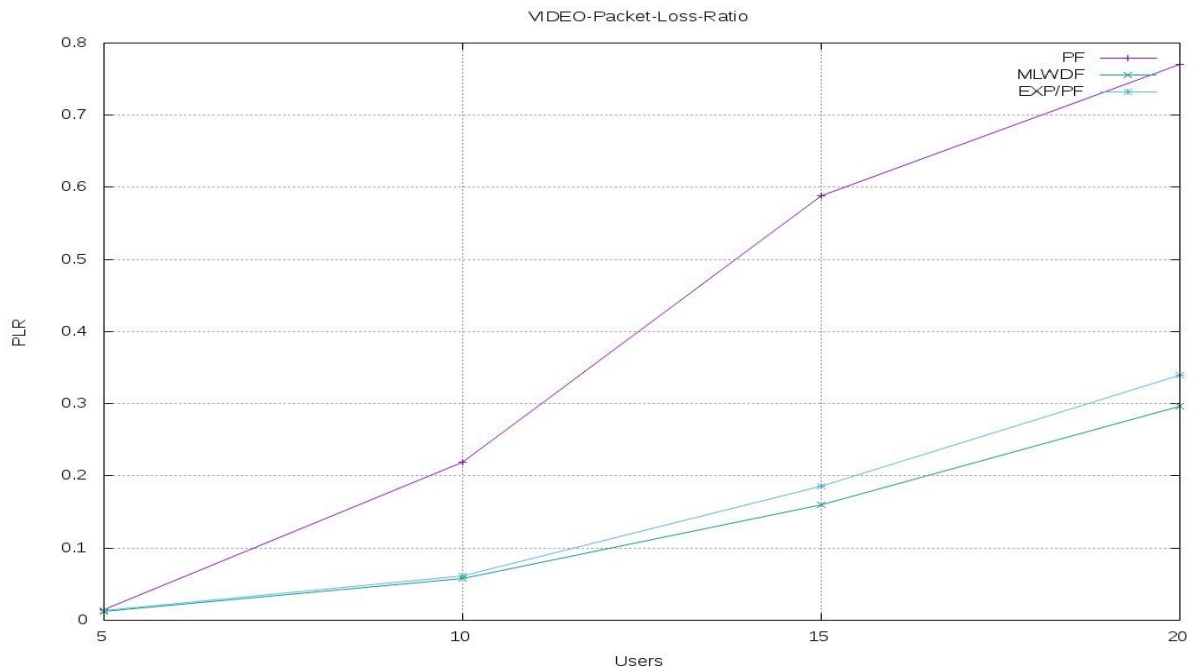


Figure IV.26 : Graphe du délai VIDEO dans Single Cell with Interference(Par1).

## c) Taux de paquets perdus VIDEO

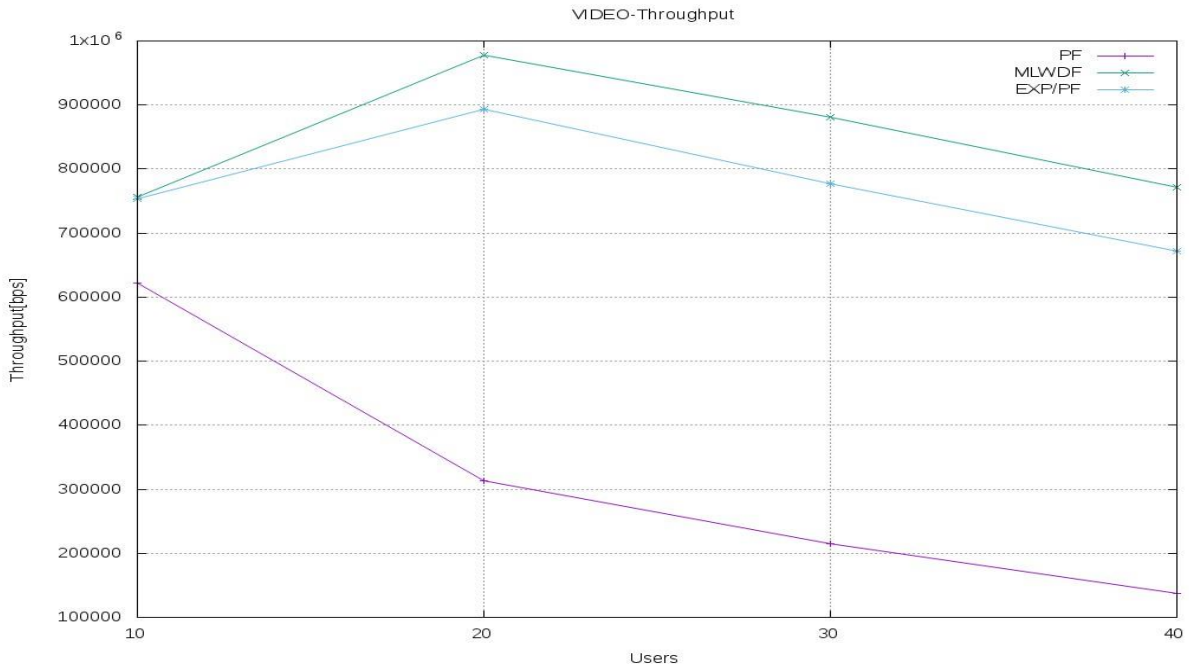


**Figure IV.27 :** Graphe du PLR VIDEO dans Single Cell with Interference(Par1).

- Dans le graphe traduisant le débit VIDEO, nous constatons que le MLWDF offre le meilleur débit.
- Dans le graphe traduisant le délai VIDEO, nous constatons que :
  - De 5 à 10 utilisateurs simultanés, les trois algorithmes ont approximativement le même délai.
  - De 10 à 20 utilisateurs simultanés, le MLWDF et l'EXP PF ont le délai le plus court comparé au PF.
- Dans le graphe traduisant le PLR VIDEO, nous constatons que :
  - De 5 à 10 utilisateurs simultanés, le MLWDF et l'EXP PF ont le PLR le plus bas.
  - De 10 à 20 utilisateurs simultanés, le MLWDF a le PLR le plus bas.

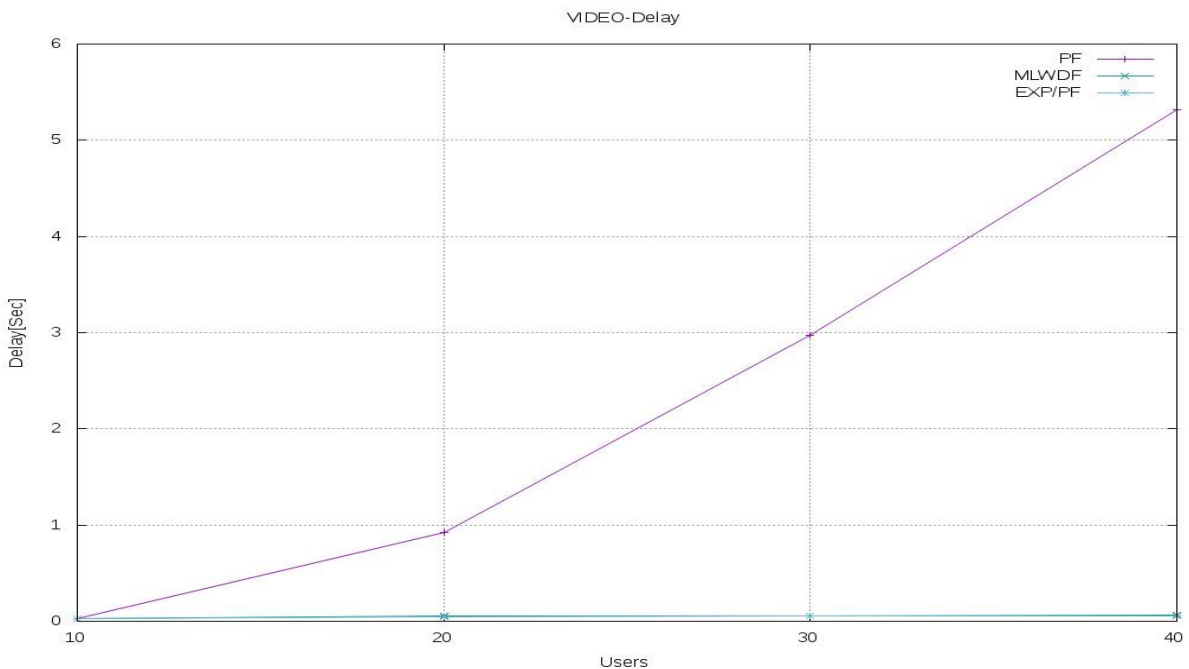
**II.1.2.3. Simulation Single Cell with Interference (Paramètres 2)**

**a) Débit VIDEO**

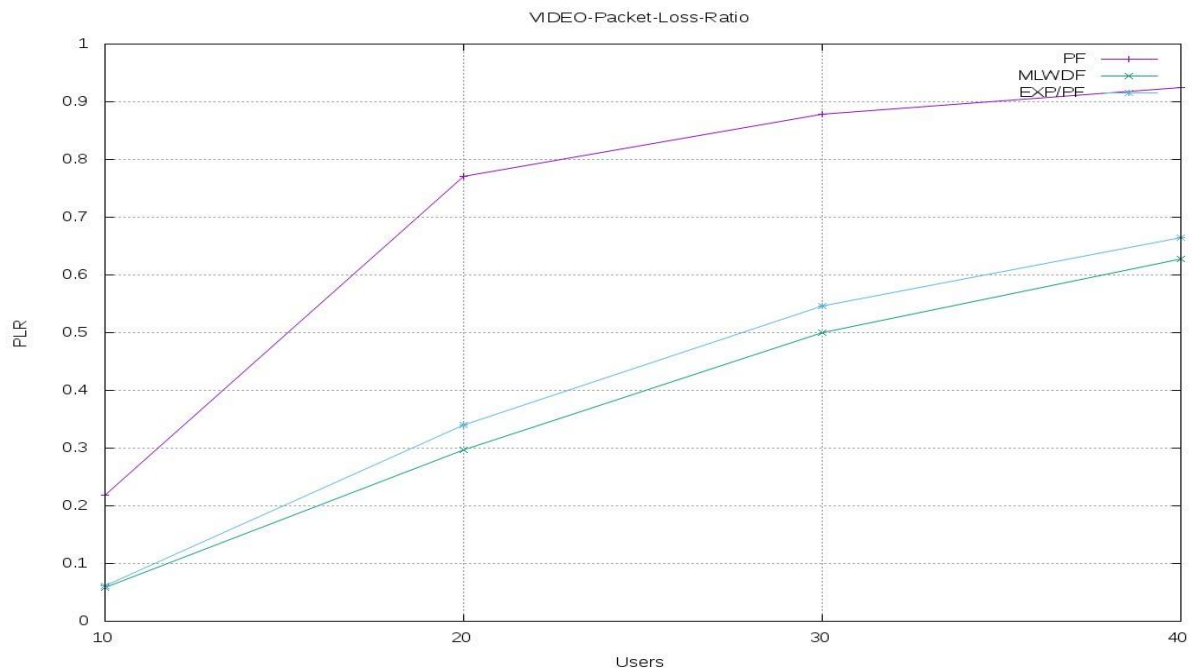


*Figure IV.28 : Graphe du débit VIDEO dans Single Cell with Interference(Par2).*

**b) Délai VIDEO**



*Figure IV.29 : Graphe du délai VIDEO dans Single Cell with Interference(Par2).*

**c) Taux de paquets perdus en VIDEO**

**Figure IV.30 :** Graphe du PLR VIDEO dans Single Cell with Interference(Par2).

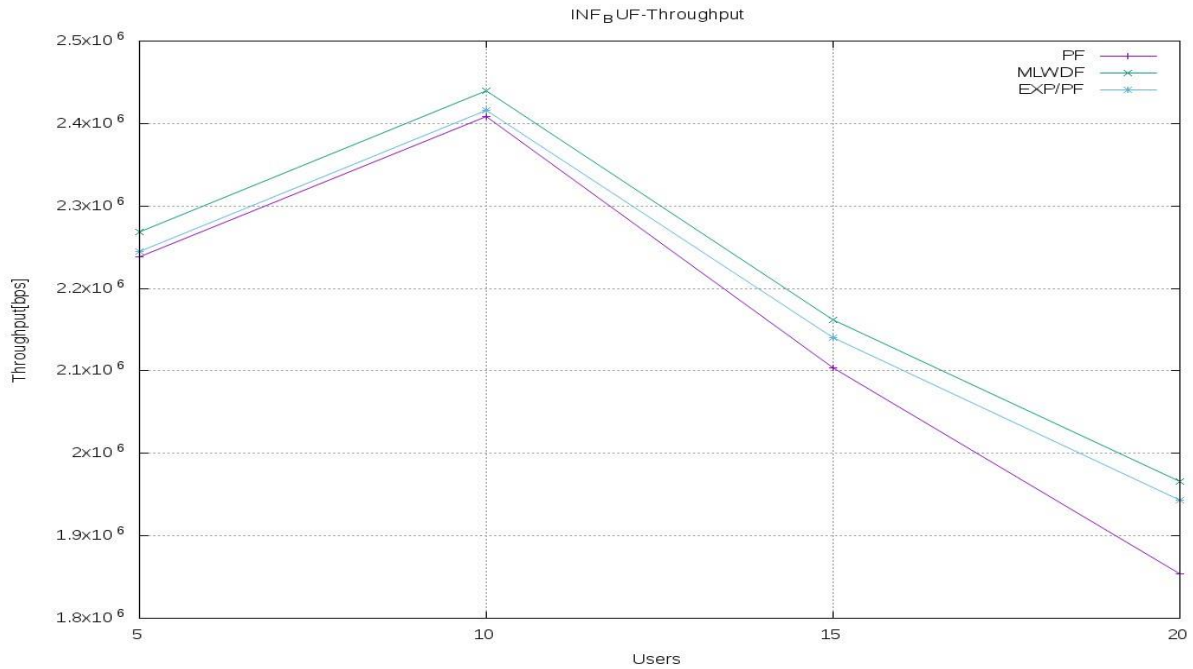
- Dans le graphe traduisant le débit VIDEO, nous constatons que le MLWDF offre le meilleur débit.
- Dans le graphe traduisant le délai VIDEO, nous constatons que l'EXP PF ainsi que le MLWDF ont le délai le plus court, presque nul.
- Dans le graphe traduisant le PLR VIDEO, nous constatons que le MLWDF a le PLR le plus bas.

**II.2. Service Non Temps Réel (NRT)**

**II.2.1. Best Effort**

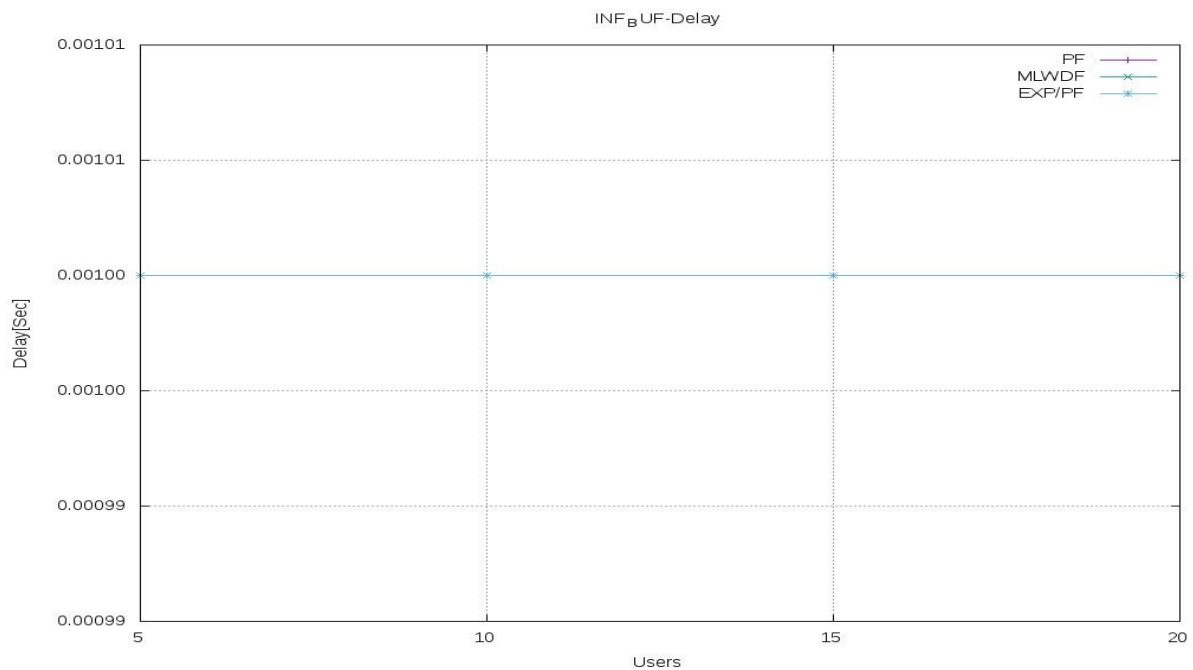
**II.2.1.1. Simulation Single Cell without Interference (paramètres 1)**

**a) Débit en Best Effort**



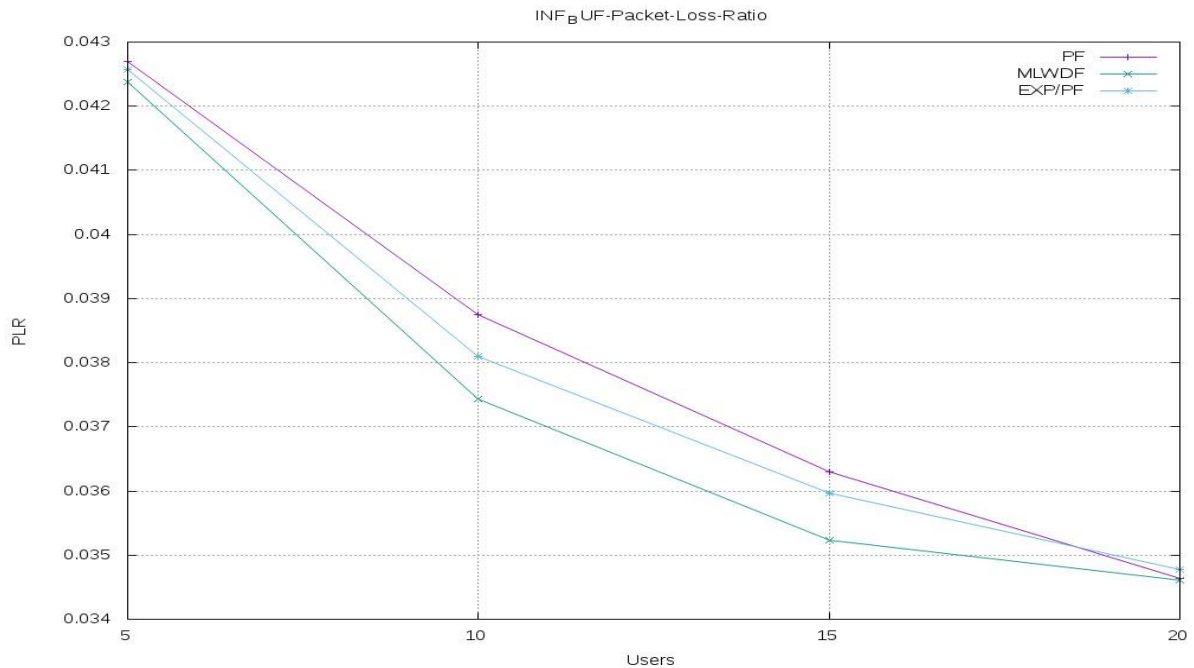
*Figure IV.31 : Graphe du débit Best Effort dans Single Cell without Interference.*

**b) Délai en Best Effort**



*Figure IV.32 : Graphe du délai Best Effort dans Single Cell without Interference.*

### c) Taux de paquets perdus en Best Effort

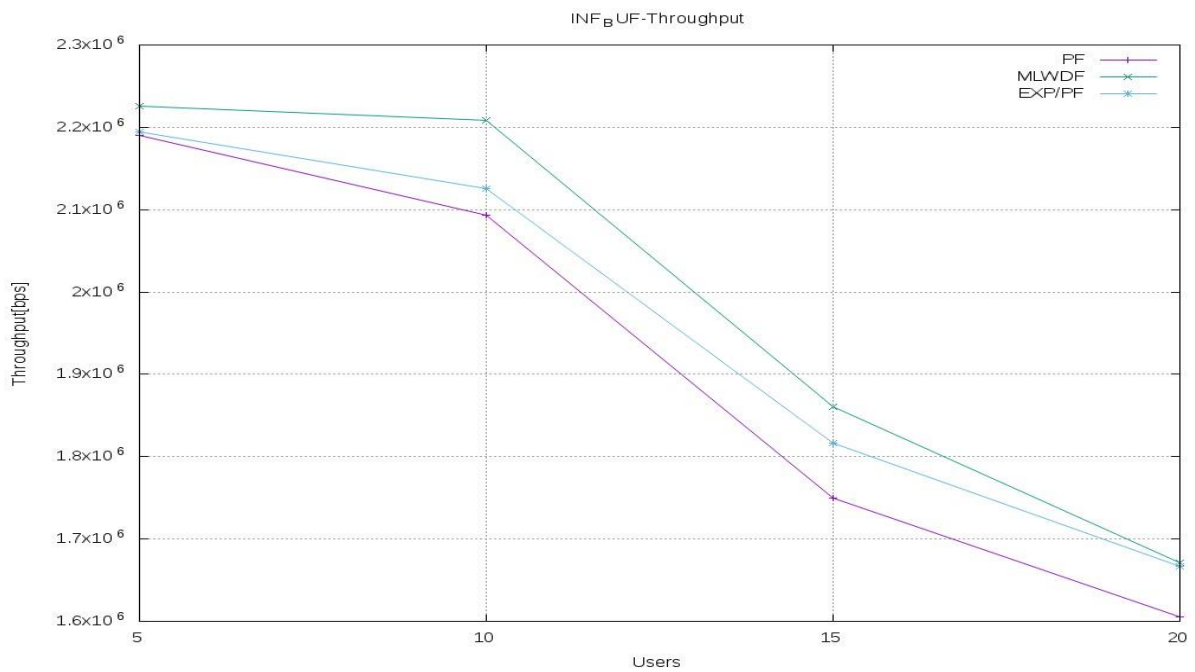


**Figure IV.33 :** Graphe du PLR Best Effort dans Single Cell without Interference.

- Dans le graphe traduisant le débit Best Effort, nous constatons que le MLWDF offre le meilleur débit.
- Dans le graphe traduisant le délai Best Effort, nous constatons que les trois algorithmes ont le même délai qui est de 1ms.
- Dans le graphe traduisant le PLR Best Effort, nous constatons que le MLWDF a le PLR le plus bas.

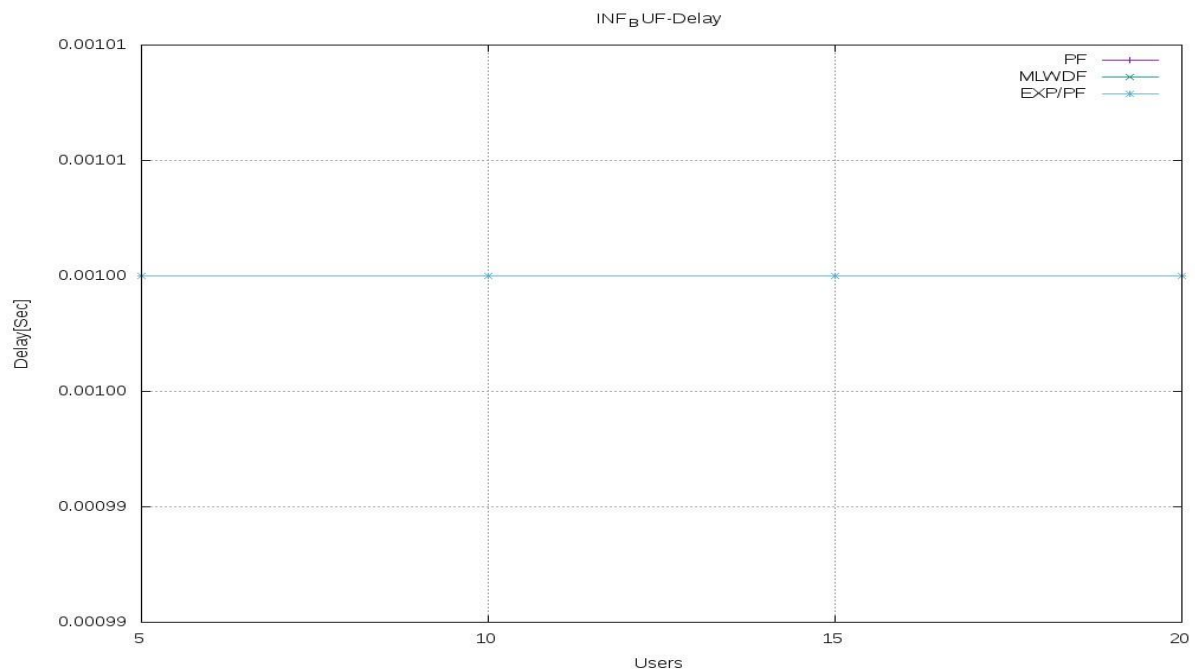
**II.2.1.2. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 1)**

**a) Débit en Best Effort**



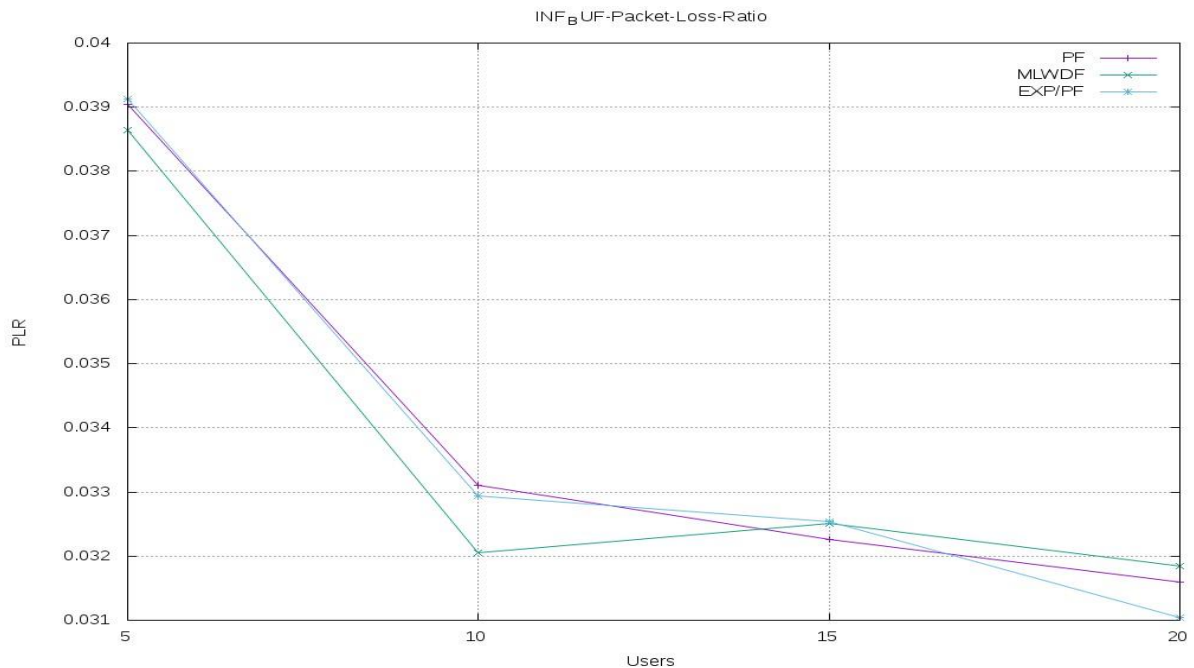
*Figure IV.34 : Graphe du débit Best Effort dans Single Cell with Interference(Par1).*

**b) Délai en Best Effort**



*Figure IV.35 : Graphe du délai Best Effort dans Single Cell with Interference(Par1).*

## c) Taux de paquets perdus en Best Effort



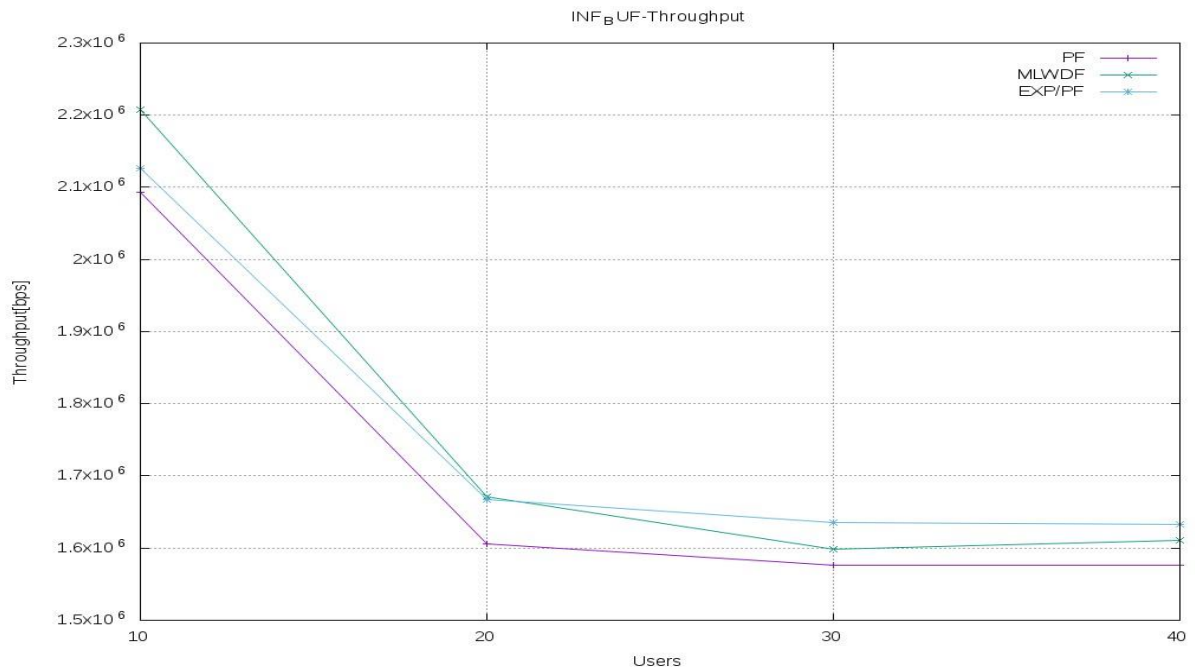
**Figure IV.36 :** Graphe du PLR Best Effort dans Single Cell with Interference(Par1).

- Dans le graphe traduisant le débit Best Effort, nous constatons que le MLWDF offre le meilleur débit.
- Dans le graphe traduisant le délai Best Effort, nous constatons que les trois algorithmes ont le même délai qui est de 1ms.
- Dans le graphe traduisant le PLR Best Effort, nous constatons que :
  - De 5 à 14 utilisateurs simultanés, le MLWDF a le PLR le plus bas.
  - De 14 à 16 utilisateurs simultanés, le PF a le PLR le plus bas.
  - De 16 à 20 utilisateurs simultanés, l'EXP PF a le PLR le plus bas.



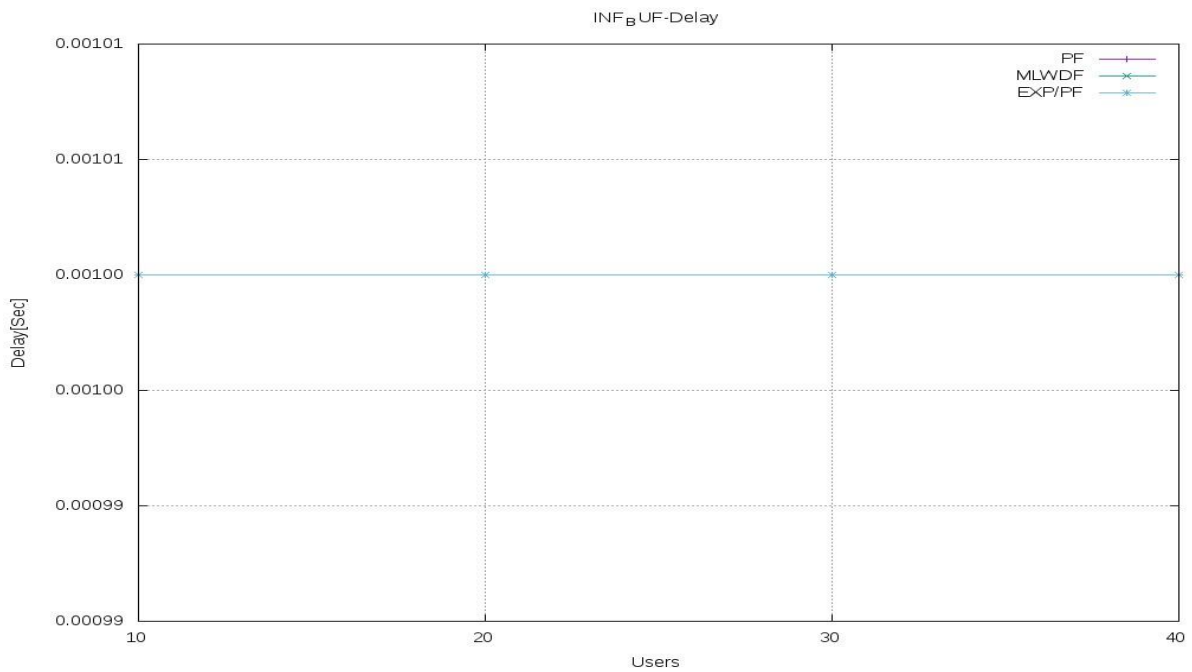
**II.2.1.3. Simulation Single Cell with Interference (paramètres 2)**

**a) Débit en Best Effort**



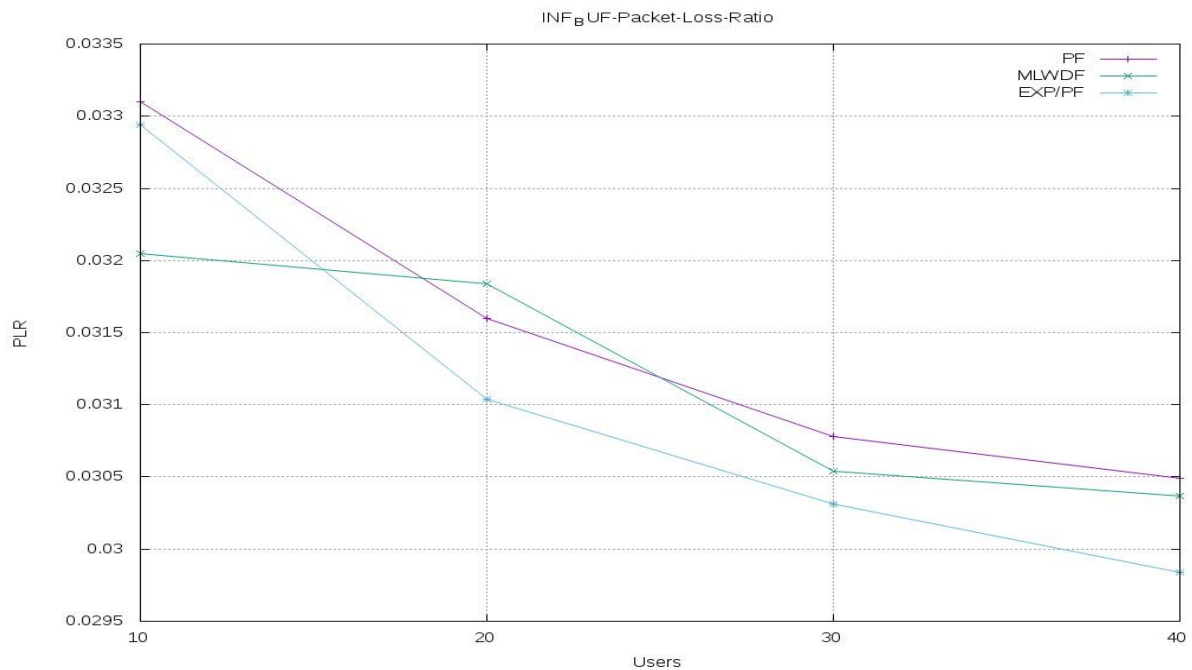
*Figure IV.37 : Graphe du débit Best Effort dans Single Cell with Interference(Par2).*

**b) Délai en Best Effort**



*Figure IV.38 : Graphe du délai Best Effort dans Single Cell with Interference(Par2).*

## c) Taux de paquets perdus en Best Effort



**Figure IV.39 :** Graphe du PLR Best Effort dans Single Cell with Interference(Par2).

- Dans le graphe traduisant le débit Best Effort, nous constatons que le MLWDF offre le meilleur débit.
  - De 10 à 20 utilisateurs simultanés, le MLWDF offre le débit le plus grand.
  - De 20 à 40 utilisateurs simultanés, l'EXP PF offre le débit le plus grand.
- Dans le graphe traduisant le délai Best Effort, nous constatons que les trois algorithmes ont le même délai qui est de 1ms.
- Dans le graphe traduisant le PLR Best Effort, nous constatons que le MLWDF a le PLR le plus bas.

### **III. Conclusion**

Dans ce chapitre, une étude de trois algorithmes d'allocation de ressources opportunistes en Downlink est faite en considérant les trafics (services) temps réel et non temps réel concernant le débit, délai et PLR.

Les résultats de simulation obtenus confirment la complexité de la fonction d'allocation de ressources vu le nombre de facteurs à prendre en considération et montrent que chaque algorithme réagit différemment dans chaque cas (scénario) et type de trafic présentant par conséquent, des avantages et des inconvénients.

D'après les graphes obtenus, nous déduisons que dans les deux scénarios Single Cell with Interference et Single Cell without Interference, l'ordonnanceur PF est le plus approprié au trafic temps réel VoIP et l'ordonnanceur MLWDF gère mieux le trafic temps réel VIDEO ainsi que le trafic non temps réel DATA.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

Les communications mobiles sont devenues un produit de tous les jours utilisées par la majorité de la population mondiale, ce domaine a connu des évolutions à travers plusieurs générations visant à atteindre des performances de plus en plus accrues vu le progrès technologique existant en parallèle dans les domaines technique et informatique.

Cette évolution a débouché sur l'émergence de la technologie LTE aussi connue sous le nom de 4G. En cours de son déploiement, le LTE représente une évolution majeure dans le domaine des réseaux mobiles. Le LTE constitue le prolongement du GSM (2G) et de l'UMTS/HSPA (3G/3G+), avec pour objectifs d'accroître les débits offerts aux utilisateurs, d'augmenter la capacité des réseaux et enfin d'améliorer l'interactivité grâce à une réduction de la latence.

Ce travail propose une synthèse des spécifications techniques du LTE. Il présente notamment les motivations et les caractéristiques de cette nouvelle technologie, l'architecture LTE/EPC, les principes techniques de l'accès multiple OFDMA et SC-FDMA visant à assurer un partage efficace des ressources fréquentielles entre un nombre variable d'utilisateurs bénéficiant de débits divers. Pour cela, le LTE met en évidence des algorithmes d'ordonnancement.

Afin de respecter un partage équitable des ressources radios disponibles, ces ordonnanceurs se basent sur différents facteurs à savoir, la priorisation de certains flux de données par rapport à d'autres, le respect de délai de transmission et la minimisation des pertes de données lors de la transmission etc.

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats de simulation sous un logiciel appelé LTE-SIM, de trois algorithmes en Downlink parmi une multitude d'algorithmes qui sont le PF, EXP PF et le MLWDF et nous avons conclu que l'EXP PF gère mieux les services temps réel (RT) et le MLWDF gère mieux les services non temps réel (NRT).

# **Annexes**

# Annexe A

## Le concept de canal

Le système LTE, de manière similaire à l'UMTS, utilise le concept de canal afin d'identifier les types des données transportées sur l'interface radio, les caractéristiques de qualité de service associées, ainsi que les paramètres physiques liés à la transmission. Ces canaux sont des composantes de l'architecture du système et sont donc à distinguer du canal de transmission (qui capture les effets de la propagation radio) et du canal fréquentiel (ou porteuse).

Les canaux de l'interface radio sont des points d'accès aux services proposés par une couche N : ils permettent à la couche N+1 de délivrer à cette couche A des données qui devront être traitées (et éventuellement marquées) selon les spécificités du canal.

On distingue trois classes de canaux, selon les couches du modèle OSI auxquelles ils sont attachés.

- **les canaux logiques**, qui opèrent entre les couches RLC et MAC et sont définis selon le type d'information qu'ils transportent (par exemple : signalisation du plan de contrôle ou données du plan usager) ;
- **les canaux de transport**, qui opèrent entre la couche MAC et la couche physique et sont définis par la manière et les caractéristiques selon lesquelles les données sont transportées par l'interface radio (par exemple la méthode d'accès aux ressources radio) ;
- **les canaux physiques**, qui sont utilisés par la couche physique et sont définis par les caractéristiques physiques de leur transmission (par exemple leur placement dans la trame).

## Les canaux logiques

Un canal logique est associé à un ou plusieurs flux de données (ou de signalisation) qui possèdent des caractéristiques communes : typologie des données transportées (plan usager ou plan de contrôle), priorité du flux, débit nominal (garanti ou non). Un canal logique est donc caractérisé par ce qu'il transporte, et non par la façon dont ces données sont véhiculées.

Les canaux logiques se séparent en canaux de contrôle et canaux de trafic. Les canaux de contrôle transportent uniquement des informations du plan de contrôle, tandis que les canaux de trafic véhiculent exclusivement les données du plan usager.

## **Les canaux de transport**

Un canal de transport est caractérisé par la façon dont les données sont transportées sur les ressources physiques, notamment :

- la méthode d'accès aux ressources radio (scheduling dynamique, semi-persistant ou statique) ;
- les formats de transport autorisés, qui définissent les traitements de la couche physique à appliquer (type de codage de canal, schéma de transmission MIMO, etc.) ;
- la possibilité d'effectuer des retransmissions d'HARQ, et si oui, de quel type

## **Les canaux physiques**

Les canaux physiques fournissent le moyen de transmettre par radio les données des canaux de transport. Une SDU reçue de la couche MAC via un canal de transport donné est appelée un bloc de transport. Un canal physique correspond à un ensemble d'éléments de ressource temps-fréquence (un élément de ressource est une sous-porteuse d'un symbole OFDM) dans la sous-trame. De plus, il est associé à des caractéristiques physiques particulières, comme une séquence d'embrouillage, des schémas de codage et modulation, des schémas MIMO (en voie descendante uniquement). Le format des canaux physiques sera détaillé au chapitre 8 pour la voie descendante et au chapitre 9 pour la voie montante [1]



## Références

- [1] Yannick Bourguen, Éric Hardouin, François-Xavier Wolff, « LTE et les réseaux 4G », 2012, 548p.
- [2] C DEMOULIN Marc, VAN DROOGENBROECK, « Principes de base du fonctionnement du réseau GSM », Revue de l'AIM, pages 3-18, Numéro 4, 2004.
- [3] Julien Chambille, François Pontvianne, Dominique Tran, « TELEPHONIE : LA TROISIEME GENERATION (3G) UMTS », IUT DE CACHAN, UNIVERSITE PARIS-SUD 11, 30/03/2007.
- [4] Dominique Nusbaum, « L'histoire du téléphone portable, des années 80 à nos jours », Dominique Nusbaum, FUTURA SCIENCES, 02/04/2012.
- [5] Leon BEYA KALAMBA, « Interconnexion entre deux réseaux cellulaires des normes GSM par faisceau hertziens cas de CCT et Vodacom », Radio Transmission 2010.
- [6] [http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/eric\\_meurisse/umts.php](http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/eric_meurisse/umts.php).
- [7] G. SEIDE, « Planification d'un réseau de quatrième à partir d'un réseau de troisième génération », thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées, Génie Informatique, Université de Montréal, 2011.
- [8] HO Anh Tai, « Application des techniques multiporteuses de type OFDM pour les futurs systèmes de télécommunications par satellite », thèse doctorat en Réseaux, Télécommunication, Système et Architecture, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [9] <http://blogs.univ-poitiers.fr/f-launay/2012/04/24/pourquoi-la-4g-utilise-lofdma/>.
- [10] Didier Le Ruyet et Berna Özbek, « Systèmes MIMO et codage spatio-temporel », P1-8.
- [11] Mr. Mohamed Amine GRAMI, « Allocation des Ressources Radio dans les réseaux 4G-LTE », Rapport de Projet de Fin d'Etudes, 2011/2012.
- [12] F.Bendaoud, M.Abdennebi, F.Didi, « Performances des algorithmes d'ordonnancement dans LTE Uplink », Octobre 2014, P53-57.

[13] Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, Francesco Capozzi, and Pietro Camarda, « Simulating LTE Cellular Systems : an Open Source Framework », IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 2, Feb, 2011.

[14] « La Qualité de Service la Voix sur IP Principes et Assurance », accellent, Le Descartes I 29, Promenade Michel Simon 93160 Noisy le Grand.

## **Résumé**

Le LTE a été envisagé comme l'évolution à long terme de l'UMTS lors d'un atelier organisé par le 3GPP. Du fait du saut technologique qu'il représente, le LTE est considéré comme constituant une quatrième étape de l'évolution des réseaux d'accès mobiles ou 4G et une révolution de l'UMTS, plutôt que d'une évolution. A l'instar de chaque nouvelle génération, le LTE a pour objectif de proposer une capacité accrue et fait appel à une nouvelle technique d'accès à la ressource fréquentielle.

Ce mémoire décrit la norme LTE, ses caractéristiques et son architecture physique et protocolaire. En particulier, la fonction d'allocation ou d'ordonnancement assurée par ce dernier pour un partage efficace des ressources radio afin d'atteindre les exigences et de répondre à la demande sans cesse croissante de services multimédia à haut débit en assurant une bonne qualité de service.

## **Abstract**

LTE has been considered as long-term evolution of UMTS at a workshop organized by the 3GPP. Due to the technological leap that it represents, LTE is considered as a fourth step in the evolution of mobile access networks or 4G and an UMTS revolution rather than an evolution. Like every new generation access network, LTE aims to provide increased capacity and uses a new access technology to the frequency resource.

This paper describes the LTE standard, its characteristics and its physical and protocol architecture. In particular, the allocation function or scheduling provided by this latest for efficient sharing of radio resources to reach the requirements and respond to the constantly increasing demand for broadband multimedia services maintaining good quality of service.