

## Remerciements

Le seul moyen de se délivrer d'une tentation, c'est d'y céder paraît-il ! Alors j'y cède en disant en grand Merci aux personnes qui ont cru en moi et qui m'ont permis d'arriver au bout de cette thèse.

Je remercie très chaleureusement ma directrice de thèse, la professeure Mme **Najiba EL AMRANI EL IDRISSE**, qui, malgré ses nombreuses occupations, a accepté de prendre la direction de cette thèse en cours de route, transformant ainsi les difficultés rencontrées en une expérience enrichissante. Je lui suis également reconnaissant de m'avoir assuré un encadrement rigoureux tout au long de ces années, tout en me donnant toutefois la possibilité de trouver par moi-même mon cheminement personnel. Madame **EL AMRANI** a dirigé mes travaux avec beaucoup de disponibilité et d'intérêt. Elle n'a ménagé ni ses commentaires, judicieux et rigoureux, ni ses encouragements. J'ai particulièrement apprécié la confiance qu'elle a su garder en ma capacité à conduire à terme ce projet. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je suis également très honoré d'avoir à mon jury de thèse:

Madame **AKNIN Noura**, professeur à l'université Abdelmalek Essaâdi Tétouan. Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour avoir acceptée d'être présidente de mon jury de thèse.

Monsieur **EL MARKHI Hassane**, professeur à la faculté des sciences et techniques de Fès, en qualité de rapporteur de ce travail. Tous mes remerciements lui sont adressés pour les suggestions et les remarques judicieuses qu'il m'a prodiguées.

Monsieur **BRI Seddik**, professeur à l'école supérieure de technologie de Meknès, et monsieur **HABIBI Mohamed**, professeur à la faculté des sciences de Kenitra, pour leurs participations en qualité de rapporteurs.

Ma reconnaissance est destinée également à Monsieur **Mustapha MRABTI**, professeur à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être membre de mon jury de thèse.

Je remercie aussi professeur **Fatiha MRABTI**, enseignante à la faculté des sciences et techniques de Fès, pour sa contribution concrète à ce travail de recherche.

## **Dédicace**

Mes remerciements vont particulièrement à mon père, BALBOUL Abdelwahab, qui m'a élevé avec ce grand goût de dépassement. J'adresse des remerciements de même ordre à ma mère, BENNIS Najia, qui m'a constamment encouragée et soutenue tout au long de ces années. Je ne saurai passer sous silence l'apport inestimable des autres membres de ma famille (frère, sœurs, oncles, cousines et cousins, nièces, neveux, etc.) qui m'ont soutenue, de près ou de loin durant mes études doctorales.

Je remercie chaleureusement ma chère femme, Nadia, pour la grande patience, l'encouragement et la confiance qu'elle m'a témoignée dont elle a fait preuve à la relecture et la mise en page de mon manuscrit. Je tiens à la remercier surtout pour son soutien moral ininterrompu et ses nombreux conseils tout le long de ma thèse.

## Résumé

En concurrence avec la technologie filaire illustrée dans le développement des techniques de transmission sur la fibre optique, les systèmes de communication sans fils contemporains dits de 4<sup>ème</sup> génération présentent un grand pas vers des hauts débits similaires aux débits DSL. Ceci permet de subvenir aux besoins de mobilité des utilisateurs tout en restant connectés, productifs et bénéficiant de services personnalisés. Ceux-ci sont très consommateurs en bande passante et à grande qualité de service QoS. Pour préparer le terrain à un déploiement réel aux systèmes 4G, le 3G UMTS Long Term Evolution LTE apporte une nouvelle vision, de nouvelles technologies et une nouvelle architecture plate tout-IP. Ainsi, les opérateurs télécom comme les utilisateurs finaux seront satisfaits respectivement par la réduction des coûts du réseau et par un accès rapide, et efficace au réseau sans fil.

Lorsque la 3GPP a lancé les premiers tests de déploiement des systèmes 4G en 2011, notre thèse a pris pour objet d'évaluer les difficultés imposées par les interférences intercellulaires pour optimiser l'interface radio LTE en sens descendant. Le contexte était celui d'un environnement multicellulaire urbain plus réaliste par rapport au modèle de la 3GPP en termes de nombres et tailles des cellules, de distribution et vitesse des utilisateurs et en prenant comme référentiel les exigences du modèle de simulation de la 3GPP. Les résultats des simulations effectuées montrent que l'impact des interférences entre les cellules ne doit pas être sous-estimé. Ceci est particulièrement déterminant pour les zones de forte densité de population. La dégradation du débit de la transmission en sens descendant peut aller à 70% en zone interne et 96% en bordure par rapport à la capacité totale de la cellule. Les solutions récentes en matière de réduction des interférences dans le LTE sont basées sur les techniques de distribution de la bande passante et la gestion de la transmission de la puissance. Cependant si elles peuvent réduire l'impact des interférences, ces techniques ne fournissent pas une solution radicale.

Le travail de recherche mené sur l'optimisation radio a permis la proposition d'une nouvelle technique inter-couche pour gérer les interférences entre les cellules. Les résultats obtenus en simulation montrent une amélioration du débit de la transmission en sens descendant pour la zone interne avec un gain de 3dB et aussi en bordure des cellules avec un gain de 6dB ainsi qu'une augmentation du taux d'exploitation de la capacité de la cellule en sens descendant.

**Mots clés** : Réseaux de quatrième génération, environnement multicellulaire, interférences intercellulaires, optimisation Radio LTE.

## Table des matières

<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>5</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>6</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>10</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre.I.....</b>	<b>16</b>
I.1- Introduction.....	17
I.2- Motivations et Normalisation de la « Long Term Evolution » LTE.....	18
I.3- L'architecture du système de paquets évolué "EPS" : .....	30
I.4- Technologies d'accès Radio introduites par la spécification 8 (LTE). .....	37
I.5- Evolution des technologies d'accès radio de la spécification 9 à la spécification 13.....	48
I.6- Conclusion. ....	58
<b>Chapitre.II .....</b>	<b>59</b>
II.1- Introduction. ....	60
II.2- Etude théorique de l'impact des interférences intercellulaires en lien radio descendant LTE. ....	61
II.3- Simulateur de l'interface radio LTE et analyse de l'impact du SNR et du facteur « $\alpha$ » sur les interférences intercellulaires. ....	63
II.4- Simulations des interférences intercellulaires en lien radio descendant LTE dans un environnement multicellulaire Urbain. ....	84
II.5- Analyse des résultats des simulations détaillées. ....	97
II.6- Conclusion.....	103
<b>Chapitre.III.....</b>	<b>104</b>
III.1- Introduction.....	105
III.2- Les techniques de gestion des interférences intercellulaires. ....	105
III.3- Proposition d'une nouvelle technique de gestion des interférences intercellulaires en sens descendant. ....	111
III.4- Conclusion .....	125
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>126</b>
<b>Les références.....</b>	<b>128</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>132</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Résumé des principales exigences cibles de performance pour LTE spécification 8 en comparaison avec la spécification 6. ....	<b>29</b>
<b>Tableau 1.2</b> : Résumé des principales exigences cibles de performance pour LTE, LTE Advanced et l'IMT Advanced (de la spécification 8 à la spécification 13).....	<b>30</b>
<b>Tableau 1.3:</b> la table de la qualité du canal de transmission. ....	<b>47</b>
<b>Tableau 2.1:</b> Paramètres possibles en simulation des schémas de transmission en sens descendant.....	<b>68</b>
<b>Tableau 2.2:</b> Paramètres de simulation dans la bande 20MHz. ....	<b>73</b>
<b>Tableau 2.3:</b> Les paramètres de simulation simplifié du LTE. ....	<b>82</b>
<b>Tableau 2.4:</b> Les paramètres principaux des simulations LTE (A, B et C) en milieu urbain. <b>88</b>	
<b>Tableau 2.5:</b> L'expérience de l'utilisateur dans le système LTE en sens descendant par rapport au modèle A.....	<b>98</b>
<b>Tableau 2.6</b> : L'expérience de l'utilisateur dans le système LTE en sens descendant par rapport au modèle B.....	<b>99</b>
<b>Tableau 2.7.</b> L'expérience de l'utilisateur dans le système LTE en sens descendant par rapport au modèle C.....	<b>100</b>
<b>Tableau 2.8</b> : L'expérience de l'utilisateur dans le système LTE en sens descendant par rapport à la cellule Femto de l'id : 93 du modèle C.....	<b>100</b>
<b>Tableau 3.1:</b> Paramètres de simulation. ....	<b>116</b>
<b>Tableau 3.2</b> Les paramètres de simulation.....	<b>117</b>
<b>Tableau 3.3</b> : Les valeurs des paramètres de simulation.....	<b>121</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Augmentation des abonnés mobiles .....	<b>19</b>
<b>Figure 1.2</b> : Augmentation du trafic de données avec la 3G au Maroc.....	<b>19</b>
<b>Figure 1.3</b> : Décorrélation des coûts et la capacité en LTE.....	<b>22</b>
<b>Figure 1.4</b> : Comparaison des coûts/Mo entre WCDMA et LTE. ....	<b>24</b>
<b>Figure 1.5</b> : Les concurrents du LTE.....	<b>25</b>
<b>Figure 1.6</b> : L'architecture générale de l'EPS. ....	<b>32</b>
<b>Figure 1.7</b> : Architectures UTRAN et Evolved UTRAN .....	<b>33</b>
<b>Figure 1.8</b> : LTE/SAE le réseau cœur évolué. ....	<b>35</b>
<b>Figure 1.9</b> : Scénarios de déploiement du réseau Cœur EPC du EPS ou SAE .....	<b>37</b>
<b>Figure 1.10</b> : Aperçu du domaine fréquentiel des technologies d'accès multiple LTE.....	<b>38</b>
<b>Figure 1.11</b> : Aperçu du domaine fréquentiel des technologies d'accès multiple LTE. ....	<b>39</b>
<b>Figure 1.12</b> : Avantages fondamentaux du MIMO : gain : (a) diversité ; (b) regroupement ; (c) multiplexage spatial. ....	<b>42</b>
<b>Figure 1.13</b> : Planification et l'adaptation rapide de liaison .....	<b>43</b>
<b>Figure 1.14</b> : Les fonctionnalités des couches 1 & 2 pour l'ordonnancement rapide des paquets, l'adaptation du lien et HARQ. ....	<b>44</b>
<b>Figure 1.15</b> : L'opération LTE HARQ avec 8 processus.....	<b>45</b>
<b>Figure 1.16</b> : Calendrier du LTE HARQ pour un paquet en sens descendant. ....	<b>45</b>
<b>Figure 1.17</b> : Plan de travail de la IMT-2020 sur la 5G. ....	<b>56</b>
<b>Figure 2.1</b> : Exemple des interférences intercellulaires à deux cellules.....	<b>62</b>
<b>Figure 2.2</b> : Les pertes en débit dues aux interférences ICI. ....	<b>63</b>
<b>Figure 2.3</b> : Les différents Modes de transmission dans l'E-UTRAN.....	<b>64</b>
<b>Figure 2.4</b> : Trame LTE dans le cas d'une transmission FDD.....	<b>65</b>
<b>Figure 2.5</b> : Trame LTE dans le cas d'une transmission TDD.....	<b>65</b>

<b>Figure 2.6 :</b> Types du time Slot simulé selon la taille du Cyclique préfixe constituant le Symbole OFDM.....	<b>66</b>
<b>Figure 2.7 :</b> Structure d'un bloc de ressources simulé. ....	<b>67</b>
<b>Figure 2.8 :</b> Le modulateur OFDM. ....	<b>69</b>
<b>Figure 2.9 :</b> Forme des impulsions et le spectre d'une sous-porteuse OFDM. ....	<b>69</b>
<b>Figure 2.10 :</b> Espacement des sous porteuses OFDM. ....	<b>70</b>
<b>Figure 2.11 :</b> Schéma bloc des opérations numériques pour simuler l'émetteur, le canal et le récepteur OFDM. ....	<b>71</b>
<b>Figure 2.12 :</b> Les modules de l'opération de transmission d'un Symbole OFDM simulé.....	<b>73</b>
<b>Figure 2.13 :</b> Exemple de constellation. ....	<b>74</b>
<b>Figure 2.14:</b> Opération de Mappage.....	<b>75</b>
<b>Figure 2.15 :</b> Ajout du cyclique préfixe court pour un Symbole OFDM. ....	<b>77</b>
<b>Figure 2.16 :</b> Réponse impulsionnelle du canal de transmission radio simulé.....	<b>78</b>
<b>Figure 2.17 :</b> Modélisation du système de transmission radio simulé. ....	<b>79</b>
<b>Figure 2.18 :</b> Modèle du récepteur OFDM simulé.....	<b>80</b>
<b>Figure 2.19 :</b> Efficacité spectrale de la cellule dans de différentes répartitions cellulaires simulés. ....	<b>82</b>
<b>Figure 2.20 :</b> Modèle 3GPP pour simuler les performances du système LTE. ....	<b>83</b>
<b>Figure 2.21 :</b> Schéma du simulateur pour nos modèles des simulations en sens descendant. ....	<b>85</b>
<b>Figure 2.22 :</b> La Structure de l'émetteur implémenté dans le simulateur LTE-A Vienna. ....	<b>86</b>
<b>La Figure 2.23 :</b> La Structure du récepteur implémenté dans le simulateur LTE-A Vienna..	<b>87</b>
<b>Figure 2.24 :</b> Présentation des cellules et des utilisateurs à un instant donné des simulations du modèle A. ....	<b>90</b>
<b>Figure 2.25 :</b> Présentation des cellules et des utilisateurs à un instant donné des simulations du modèle B. ....	<b>91</b>
<b>Figure 2.26 :</b> Présentation des cellules et des utilisateurs à un instant donné des simulations du modèle C. ....	<b>92</b>

<b>Figure 2.27 :</b> Présentation des cellules Femto et des utilisateurs à un instant donné des simulations du modèle C.....	<b>92</b>
<b>Figure 2.28 :</b> Plan horizontal et vertical pour l'antenne kathrein 742 212 simulé. ....	<b>96</b>
<b>Figure 2.29 :</b> Modèle A : débit moyen descendant de l'utilisateur dans la cellule centrale en fonction de la variation du SINR à des vitesses de mobilité utilisateurs (5km/h, 30km/h et 60km/h). ....	<b>98</b>
<b>Figure 2.30 :</b> Modèle B : débit moyen descendant de l'utilisateur dans la cellule centrale en fonction de la variation du SINR à des vitesses de mobilité utilisateurs (5km/h, 30km/h et 60km/h). ....	<b>99</b>
<b>Figure 2.31 :</b> Modèle C : débit moyen descendant de l'utilisateur dans la cellule Femto avec l'id : 93 en fonction de la variation du SINR à une vitesse de mobilité utilisateur de 5km/h. ....	<b>100</b>
<b>Figure 2.32 :</b> Modèle C : débit moyen descendant de l'utilisateur dans la cellule Femto avec l'id : 93 en fonction de la variation du SINR à une vitesse de mobilité utilisateur de 5km/h. ....	<b>100</b>
<b>Figure 2.33 :</b> Débit descendant (Mb/s) Maximale, moyen et en bordure de la cellule de l'utilisateur dans les modèles A, B et C. ....	<b>101</b>
<b>Figure 2.34 :</b> Capacité Moyenne descendante de la cellule centrale LTE dans les modèles A, B et C. ....	<b>101</b>
<b>Figure 3.1 :</b> Facteur de réutilisation égale à 1. ....	<b>106</b>
<b>Figure 3.2 :</b> Facteur de réutilisation égale à 3. ....	<b>106</b>
<b>Figure 3.3 :</b> Soft Frequency Reuse à facteur de réutilisation égale à 3. ....	<b>107</b>
<b>Figure 3.4 :</b> Débits en fonction du rapport $\rho$ . ....	<b>107</b>
<b>Figure 3.5 :</b> La répartition fréquentielle partielle (Partial Frequency Reuse). ....	<b>108</b>
<b>Figure 3.6 :</b> Capacité de la cellule pour différents techniques de répartition cellulaire à trafic symétrique. ....	<b>109</b>
<b>Figure 3.7 :</b> Le principe de base de la nouvelle technique de gestion des interférences intercellulaires. ....	<b>112</b>
<b>Figure 3.8 :</b> Les trois propositions de répartition fréquentielle (A, B et C) ....	<b>113</b>
<b>Figure 3.9 :</b> Algorithme de gestion des ressources radio. ....	<b>114</b>
<b>Figure 3.10 :</b> Schéma bloc de la technique de pré codage linéaire LP-OFDM. ....	<b>114</b>

<b>Figure 3.11</b> : Pré codage d'ordre L. ....	<b>115</b>
<b>Figure 3.12</b> : LP-OFDM avec un récepteur ZF.....	<b>116</b>
<b>Figure 3.13</b> : Les performances en BER pour LP-OFDM pour un récepteur itératif avec un codage de taux $\frac{1}{2}$ .....	<b>118</b>
<b>Figure 3.14</b> : Scénario d'allocation des ressources physiques pour un utilisateur en bordure de la cellule. ....	<b>119</b>
<b>Figure 3.15</b> : Implémentation du MRC au niveau récepteur. ....	<b>120</b>
<b>Figure 3.16</b> : Simulation du BER en fonction du SNR pour 2 et 3 ressources allouées avec utilisation du MRC au niveau du récepteur. ....	<b>122</b>
<b>Figure 3.17</b> : Flux de données pour servir un utilisateur en bordure des cellules. ....	<b>124</b>
<b>Figure 3.18</b> : Propagation du flux de données via l'interface X2. ....	<b>124</b>

## Liste des abréviations

<b>2G</b>	2nd Generation	<b>DAB</b>	Digital Audio Broadcasting
<b>3G</b>	3rd Generation	<b>DFT</b>	Discrete Fourier Transform
<b>4G</b>	Fourth Generation	<b>DMB</b>	Digital Mobile Broadcasting
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project	<b>DSL</b>	Digital Subscriber Loop
<b>3GPP2</b>	3rd Generation Partnership Project 2	<b>DVB</b>	Digital Video Broadcasting
<b>ACK</b>	ACKnowledgment	<b>DwPTS</b>	Downlink pilot time slot
<b>ADSL</b>	Asymmetric digital subscriber line	<b>E<sub>b</sub></b>	Energy bit
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise	<b>eNodeB</b>	evolved NodeB
<b>BER</b>	Bit Error Rate	<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>BLER</b>	Block Error Rate	<b>EPS</b>	Evolved Packet System
<b>BS</b>	Base Station	<b>E<sub>s</sub></b>	Energy Symbol
<b>CAPEX</b>	CAPital EXpenditure	<b>E-UTRAN</b>	Evolved-UTRAN
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access	<b>EV-DO</b>	Evolution-Data Optimized
<b>CP</b>	Cyclic prefix	<b>EVM RMS</b>	Error Vector Magnitude in Root means Square
<b>CQI</b>	Channel Quality Indicator	<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check	<b>FDPS</b>	Frequency Domain Packet Scheduling
<b>CSP</b>	Communication Service Provider	<b>FMC</b>	Fixed Mobile Convergence
<b>COMP</b>	Coordinated Multipoint	<b>FTTH</b>	Fiber to the Home
<b>CLSM</b>	Closed Loop Spatial Multiplexing	<b>FD-MIMO</b>	Full-Dimension MIMO

<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform	<b>LAA</b>	Licensed-Assisted Aggregation
<b>GERAN</b>	GSM EDGE Radio Access Network	<b>LMMSE</b>	Linear Minimum Mean Squared Error
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat reQuest	<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>HLR</b>	Home Location Register	<b>MBMS</b>	Multimedia Broadcast Multicast Service
<b>HSDPA</b>	High-Speed Downlink Packet Access	<b>MCS</b>	Modulation and Coding Scheme
<b>HSPA</b>	High-Speed Packet Access	<b>MGW</b>	Media Gateway
<b>HSPA+</b>	High Speed Packet Access Evolution	<b>MIMO</b>	Multiple Input Multiple Output
<b>HSS</b>	Home Subscriber Server	<b>M-QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation order M
<b>ICI</b>	Inter Cellular interference	<b>MRC</b>	Maximum Ratio Combining
<b>IDFT</b>	Inverse Discrete Fourier Transform	<b>MU-MIMO</b>	Multi-User MIMO
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers	<b>MTC</b>	Machine-Type Communications
<b>IFFT</b>	Inverse Fast Fourier Transform	<b>NACK</b>	Negative ACKnowledgement
<b>IMS</b>	IP Multimedia Subsystem	<b>NAS</b>	Non-Access Stratum
<b>Inter-RAT</b>	Inter-Radio Access Technology	<b>No LP</b>	NO Linear Precoding OFDM
<b>IP</b>	Internet Protocol	<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>IR</b>	Incremental redundancy	<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>IMT</b>	International Mobile Telecommunications	<b>OPEX</b>	Operational Expenditure
<b>Ite 4 IC exact</b>	4 iteration with interference canceller optimized under the MMSE criterion exact method	<b>OMNI</b>	Omnidirectionnelle
<b>Ite 4 IC approx</b>	Iteration with interference canceller optimized under the MMSE criterion approximation method	<b>OLSM</b>	Open Loop Spatial Multiplexing
<b>LCID</b>	Logical Channel identification	<b>Opt</b>	Optimal OFDM transmission
<b>LP OFDM</b>	Linear Precoding OFDM	<b>P/S</b>	Parallel to serial
<b>LTE</b>	Long Term Evolution	<b>PAPR</b>	Peak-to-Average Power Ratio

<b>PDCCH</b>	Physical Downlink Control Channel	<b>SER</b>	Symbol Error Rate
<b>PDSCH</b>	Physical Downlink Shared Channel	<b>SINR</b>	Signal to interference and noise Ratio
<b>PMI</b>	Pre-coding Matrix Indicator	<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>PRB</b>	Physical Resource Block	<b>SON</b>	Self-Organizing Networks
<b>PS</b>	Packet Scheduler	<b>SRS</b>	Sounding Reference Signal
<b>PSTN</b>	Public Switched Telephone Network	<b>SSD</b>	Soft Sphere Decoding
<b>PUCCH</b>	Physical Uplink Control Channel	<b>SFR</b>	Soft frequency reuse
<b>PUSCH</b>	Physical Uplink Shared Channel	<b>TBS</b>	Transport Block Size
<b>PCRF</b>	Policy and Charging Rules Function	<b>TDD</b>	Time Division Duplex
<b>PDN</b>	Packet Data Network	<b>TTI</b>	Transmission Time Interval
<b>P-GW</b>	PDN Gateway	<b>TxD</b>	Transmission Time Interval
<b>PFR</b>	Partial Frequency Reuse	<b>TPS</b>	TRANSMISSION POINT SELECTION
<b>QoS</b>	Quality of service	<b>UE</b>	User Equipment
<b>RI</b>	Rank Indicator	<b>UMB</b>	Ultra-Mobile Broadband
<b>RNC</b>	Radio Network Controller	<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications
<b>RRC</b>	Radio Resource Control	<b>UpPTS</b>	Uplink Pilot Time Slot
<b>RRM</b>	Radio Resource management	<b>UTRAN</b>	Universal Terrestrial Radio Access Network
<b>RTT</b>	Round Trip Time	<b>VoIP</b>	Voice over IP
<b>S/P</b>	Serial to parallel	<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>SAE</b>	System Architecture Evolution	<b>Wi-Fi</b>	Wireless fidelity (WLAN based on IEEE 802.11)
<b>SC-FDM</b>	Single-Carrier Frequency Division Multiplexing	<b>WiMAX</b>	Worldwide interoperability for Microwave Access
<b>SC-FDMA</b>	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access	<b>ZF</b>	Zero Forcing
<b>SDMA</b>	Spatial Division Multiple Access		

## Introduction générale

En concurrence avec la technologie filaire illustrée dans le développement des techniques de transmission sur la fibre optique, les systèmes récents de communication sans fils dits de 4<sup>ème</sup> génération présentent un grand pas vers des hauts débits similaires aux débits DSL. Ceci permet de subvenir aux besoins de mobilité des utilisateurs tout en restant connectés, productifs et bénéficiant de services personnalisés ; qui sont ; très consommateurs en bande passante et à grande qualité de service QoS. Afin de mettre en place des systèmes sans fil de 4<sup>ème</sup> génération répondant aux exigences édictées par le marché, les trois organismes de standardisation à savoir : 3GPP, IEEE et 3GPP2 concourent pour mettre à la disposition des utilisateurs des systèmes à la fois rapides, efficaces, intelligents et surtout pas onéreux. L'objectif de l'évolution « LTE/SAE » est de fournir un accès, basé IP, à haut débit de données (100 Mbit/s à 1Gbit/s), à faible latence et à bande passante flexible. En parallèle, une nouvelle architecture est conçue dans le but de soutenir la commutation de paquets du trafic avec une transparence de la mobilité, une haute qualité de service et un temps de latence minimal. Le système est principalement optimisé pour les basses vitesses jusqu'à 15km/h. Toutefois, les spécifications du système permettent de favoriser la mobilité au-delà de 350 km/h. Le système LTE prend en charge en liaison descendante des débits max de 300 Mbps et de 75Mbps en liaison montante au sein de 20MHz de bande passante. Le système LTE offre une efficacité spectrale des cellules deux à quatre fois plus grande par rapport à la spécification 6 du système HSPA [1], [2]. Des améliorations similaires sont observées dans le débit des utilisateurs à la frontière des cellules tout en conservant le même emplacement des sites HSPA. En termes de temps de latence, l'interface radio LTE basée sur l'OFDMA et le réseau fournit des capacités de moins de 5 ms de latence pour la transmission d'un paquet à partir du réseau vers le terminal.

L'augmentation accrue des utilisateurs des services mobiles à large bande dans les milieux urbains et urbains denses ainsi que l'apparition des services mobiles de plus en plus consommateurs en ressources réseau et en traitements interactifs en temps réels, demande une amélioration de la qualité de transmission, et une grande capacité. Une approche classique à l'amélioration de l'efficacité du spectre est de réutiliser la même bande de fréquence dans de multiples zones géographiques ou des cellules. Cependant, pour le système d'accès radio LTE conçu initialement pour fonctionner à la fréquence de réutilisation ( $N = 1$ ), les interférences intercellulaires (ICI) seront inévitablement pénalisantes, lorsque les stations mobiles ou les

utilisateurs dans les cellules adjacentes partagent le même spectre. Ceci constitue l'un des problèmes majeurs limitant les performances du LTE (Long Term Evolution).

Ceci soulève différentes interrogations dont notamment. Quel est l'impact des interférences intercellulaires sur le système radio LTE descendant dans les milieux à forte densité de population ? Quelles sont les solutions possibles et sur la base de quelles données on peut optimiser la capacité descendante du système radio LTE ?

### **Motivations et objectifs**

C'est pour trouver des réponses à ces nouvelles questions que nous avons mené ce travail de recherche. Celui-ci s'est déroulé en partenariat avec l'Institut des télécommunications qui est une grande Faculté de génie électrique et informatique à l'Université de Technologie de Vienne. Cette collaboration a permis de travailler sur la base du code source Matlab du simulateur LTE de cet Institut et de faire la simulation de la qualité radio dans LTE sur plusieurs environnements de travail.

**La première motivation principale** de notre travail a été guidée par l'étude de l'impact des interférences intercellulaires qui sera inévitablement pénalisant sur la capacité des cellules et la qualité des services proposé par LTE. Avant un réel déploiement à grande échelle, les performances du réseau LTE sont estimées par les résultats des simulations conformément au modèle trop idéaliste de la 3GPP. Il existe plusieurs limites évidentes qui font que le modèle 3GPP est mal adapté pour évaluer la performance cellulaire d'un réseau réel. Dans cette optique notre travail étudie l'impact des interférences intercellulaires en lien descendant sur les performances des cellules LTE dans un environnement multicellulaire urbain plus réaliste en termes de nombres et tailles des cellules, la distribution ainsi que la vitesse des utilisateurs. Il prend comme référence les exigences du modèle de simulation de la 3GPP.

**La deuxième motivation principale** est de proposer des solutions de gestion des transmissions radio en lien descendant capable de lutter contre les interférences intercellulaires tout en permettant l'utilisation de toute la bande passante et d'améliorer les débits des utilisateurs en bordure des cellules. Ceci permettrait d'atteindre une grande capacité en lien descendant dans les cellules LTE et aux utilisateurs en bordure des cellules de bénéficier des hauts débits.

## **Organisation du mémoire de thèse :**

Ce mémoire de thèse est organisé en trois chapitres suivis d'une conclusion générale dans laquelle nous présentons aussi des perspectives à ce travail.

**Le premier chapitre** est consacré à la présentation des motivations à l'origine de l'implémentation des réseaux 4G puis à l'état de l'art sur l'évolution des réseaux de radiocommunications cellulaires. Nous avons rapporté l'évolution des réseaux radio et cœur de la 3G à la 4G bien que ce dernier standard ne soit pas encore complètement défini. L'optimisation au sein du réseau d'accès radio est abordée sous un angle général dans lequel nous tentons de référencer un ensemble de contrôles techniques spécifiques à la 4G et la 4G évoluée (Interface radio intelligent, technologies multi-antennes, amélioration de la MTC, capacités ...). A la fin de ce chapitre, nous présentons la vision des constructeurs en télécommunications à travers le monde pour la nouvelle génération 5G.

**Le deuxième chapitre constitue notre première contribution** dans lequel nous abordons en premier quelques notions sur les difficultés principales que posent les interférences intercellulaires pour optimiser l'interface radio LTE en sens descendant. Puis nous réalisons une étude détaillée de l'impact des interférences intercellulaires en sens descendant sur les performances des cellules LTE dans un environnement multicellulaire urbain plus réaliste par rapport au modèle de la 3GPP en termes de nombres et tailles des cellules, la distribution ainsi que la vitesse des utilisateurs. Notre travail prend comme référentiel les exigences du modèle de simulation de la 3GPP.

**Le troisième chapitre constitue la deuxième contribution essentielle de notre travail de recherche.** C'est dans ce chapitre que nous lions l'ensemble des éléments précédents et que nous tentons d'apporter une réponse aux objectifs préalablement définis. Il s'agit de la manière de gérer le problème des interférences intercellulaires pour garantir une bonne qualité de service avec une grande capacité et un minimum de perte de spectre. Dans cette partie nous examinons les principaux axes de recherche sur l'optimisation radio des interférences intercellulaires qui s'appliquent en fonction des contraintes et des objectifs. Nous comparons également leurs avantages et inconvénients.

Nous présentons en conclusion les résultats de notre travail de recherche sur l'optimisation radio. Les choix dans les solutions retenues expliquent les résultats obtenus en simulation.

**Chapitre.I**  
**Evolution du réseau d'accès**  
**radio LTE de la spécification**  
**8 à la Spécification 14 de la**  
**3GPP**

## I.1- Introduction

Avec l'apparition d'une nouvelle génération de services mobiles large bande, le haut débit mobile devient une nécessité. Sur les 3.2 billions d'abonnés à internet estimés à la fin de l'année 2015, 2 billions d'entre eux se trouvent dans les pays en développement et environ les deux tiers seraient des consommateurs mobiles. La majorité d'entre eux seraient ; par ailleurs ; servis par les réseaux des technologies HSPA (High Speed Packet Access) et LTE (Long Term Evolution) [3]. Les utilisateurs peuvent alors surfer sur Internet ou envoyer des e-mails, remplaçant leurs modems DSL fixes avec les modems HSPA, et d'échanger des vidéos ou la musique en utilisant les téléphones 3G. Avec LTE, la satisfaction sera améliorée. Elle permettra l'utilisation des applications les plus exigeantes comme la télévision interactive, les réseaux de conversations vidéo mobile, des jeux ou des services professionnels de pointe.

Cet aspect sera développé dans la première partie de ce chapitre, où les besoins et la standardisation seront traités. A cette fin, plusieurs techniques ont été introduites afin de subvenir aux dits besoins et aux exigences des parties prenantes. La forte capacité du LTE est due à l'ordonnement des paquets dans le domaine fréquentiel. Celui-ci est subdivisé en plusieurs sous-porteuses se basant sur la technologie OFDM. Ainsi, le LTE selon la spécification 8 ; permet une grande flexibilité du spectre où la bande passante de transmission peut être sélectionnée entre 1,4 MHz et 20 MHz en fonction du spectre disponible [1]. De même, pour permettre l'efficacité de l'amplificateur de l'émetteur en sens montant, et prolonger ainsi la vie de la batterie du terminal, la solution de la porteuse unique est conçue se basant sur la technologie SC-FDM. La bande passante 20 MHz peut offrir jusqu'à 300 Mbps comme débit pic de données utilisateur en liaison descendante avec 8×8 MIMO. Le débit max en liaison montante est de 75 Mbps. Ces techniques permettent de combiner robustesse, flexibilité et mobilité aux hauts débits [4], [5]. Elles seront traitées avec détail dans la deuxième partie.

Cette haute capacité du réseau exige également une architecture efficace en plus des fonctionnalités avancées de l'interface radio évolué E-UTRAN. L'utilisation de la 3GPP dans la spécification 8 a pour objectif d'améliorer l'évolutivité du réseau pour augmenter le trafic et de réduire la latence de bout en bout en réduisant le nombre d'éléments du réseau. Tous les protocoles radio sont situés dans la station de base intelligente appelée eNodeB, qui comprend tous les algorithmes du contrôleur du réseau radio RNC dans l'architecture 3GPP de la spécification 6. Aussi, le cœur du réseau est simplifié par la séparation des trafics utilisateurs

et signalisation. Ce réseau de transport de la spécification 8 est appelé le réseau cœur évolué EPC, tandis que le terme réseau de paquets évolué EPS est utilisé pour l'ensemble du système [6].

L'objet de ce chapitre est de donner une présentation globale du réseau d'accès radio LTE. Nous aborderons la normalisation, les exigences et l'architecture de base, puis nous rappellerons l'ensemble des techniques qui ont marqué le réseau d'accès radio LTE de la spécification 8 à la spécification 13

## **I.2- Motivations et Normalisation de la « Long Term Evolution » LTE.**

### **I.2.1- Les facteurs de motivation édictés par le marché.**

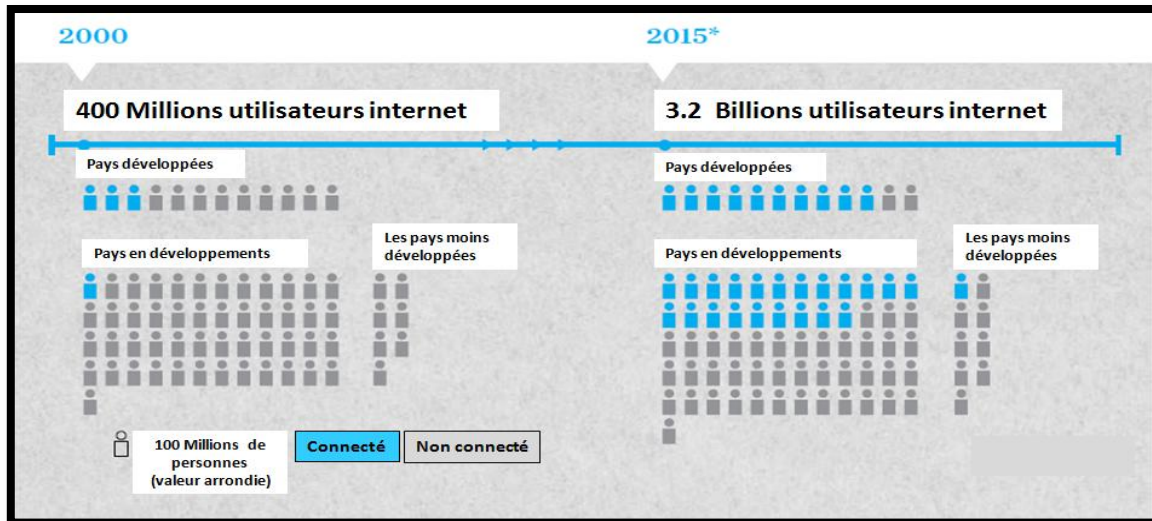
Avec la HSPA, l'utilisation de données a connu une croissance rapide dans les réseaux sans fil, indiquant que les utilisateurs apprécient les données à large bande sans fil. Le trafic moyen en données atteint des centaines de mégaoctets par abonné par mois. De plus, les utilisateurs souhaitent des performances semblables à des lignes fixes. Les opérateurs, à leur tour, requièrent une grande capacité de données à faible coût. La 3GPP LTE a été conçue pour répondre à ces objectifs.

Pour la plupart des fournisseurs de services de communication CSPs 3GPP, qui desservent déjà plus de 80% de la base mondiale d'abonnés, LTE est une étape naturelle d'évolution. Toutefois pour les CSPs 3GPP2 et avec l'abandon du projet UMB (Ultra Mobile Broadband), la migration vers la spécification 8 de la 3GPP se voit comme la solution performante pour unir les efforts vers une technologie sans fil unique.

Ainsi, des forces motrices faisant progresser le développement de la LTE peuvent être identifiées : l'exigence d'une capacité supplémentaire dans les technologies sans fil actuelles, la nécessité pour la livraison à moindre coût des données sans fil et la concurrence des autres technologies sans fil. Comme la technologie filaire ne cesse de s'améliorer, une évolution similaire est requise dans le domaine sans fil. Les technologies 3GPP doivent concorder et dépasser la concurrence.

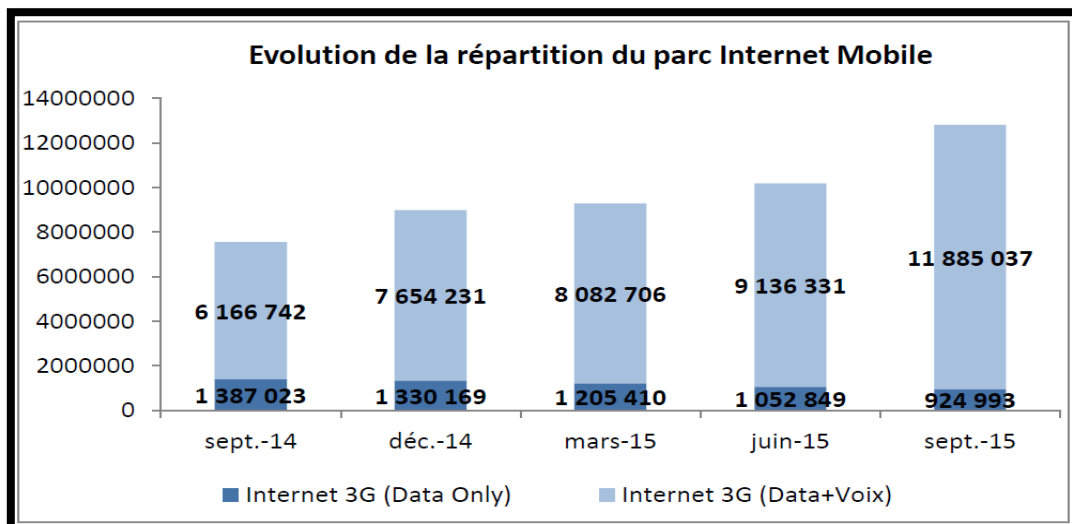
#### **I.2.1.1- La gestion efficace de l'augmentation du trafic de données.**

La figure 1.1 ci-dessous montre clairement l'augmentation des abonnés au service mobile et particulièrement dans les Pays en développement [3].



**Figure 1.1 :** Augmentation des abonnés mobiles

L'utilisation de données a aussi augmenté. Il a été également noté que le volume de trafic dans les réseaux de deuxième génération (2G) est nettement dominé par le trafic voix. La mise en place de réseaux de troisième génération (3G) avec High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) a renforcé considérablement l'utilisation des données. La Figure 1.2 représente les statistiques d'exploitation de la liaison descendante HSDPA pour 12 mois entre septembre 2014 et septembre 2015 pour les opérateurs de télécommunications au Maroc [7]. Le nombre des utilisateurs du trafic des données (solution 3G Data + Voix) a quasi doublé en une année (passant de 6 à 12 millions environ). La croissance rapide des utilisateurs des services (data + voix) démontre que les utilisateurs finaux ont trouvé de la valeur dans l'accès haut débit sans fil.



**Figure 1.2 :** Augmentation du trafic de données avec la 3G au Maroc.

Un abonné voix typique utilise en moyenne 300 minutes par mois, ce qui est équivalent à environ 30 méga-octets de données avec un débit de 12,2 kbps. Tandis qu'un

utilisateur de données à large bande peut facilement consommer plus de (1 Go) de données par mois. Une forte utilisation des données à large bande a besoin de 10 à 100 fois plus de capacité que l'utilisation de la voix. Ceci fixe des exigences élevées pour la capacité et l'efficacité des réseaux de données [8].

A l'échelle mondiale ; il est prévu que d'ici la fin de l'année 2016, 3.2 billions de personnes seront connectés à l'internet. Les connexions large bande à l'internet seront disponibles presque partout dans le monde. Déjà aujourd'hui, l'installation filaire actuelle peut atteindre environ 1 milliard de foyers et les réseaux mobiles comptent plus de 3 milliards d'abonnés. Ces installations ont besoin d'évoluer vers un accès large bande à l'Internet doté d'une technologie plus prometteuse. En outre, l'utilisation extensive de l'accès sans fil requiert un renforcement de la capacité et l'efficacité pour offrir une connectivité à la large bande réelle pour les 3.2 billions de clients [3].

#### **I.2.1.2- L'évolution des services utilisateurs.**

Les technologies 3GPP n'apportent pas seulement des améliorations continues dans les capacités et les performances. Ils font également évoluer les capacités qui élargissent les services offerts aux abonnés. Les services avancés comprennent la FMC (Fixed Mobile Convergence), IMS (IP Multimedia Subsystem) et des technologies de radiodiffusion. FMC fait référence à l'intégration des services fixes (tels que la téléphonie filaire ou fournis par Wi-Fi) avec les services des réseaux mobiles. Bien que la FMC soit encore à ses premiers stades de déploiement par les opérateurs, elle promet d'offrir des avantages significatifs aux opérateurs et utilisateurs.

Pour ces derniers, la FMC permettra de simplifier la façon dont ils communiquent. Elle permet aux abonnés d'utiliser un appareil (par exemple un téléphone cellulaire) au travail et à la maison, où ils pourraient se connecter via un réseau Wi-Fi ou d'un femtocell, ou via un réseau cellulaire lorsqu'ils sont mobiles. Les utilisateurs bénéficieront également de boîte vocale unique et des numéros de téléphone uniques ainsi que de la possibilité de contrôler comment et avec qui communiquer.

Pour les opérateurs, la FMC permet la consolidation des services de base à travers plusieurs réseaux d'accès. Par exemple, un opérateur peut offrir un service complet de voix sur IP en se basant sur l'accès DSL via Wi-Fi ou 3G. Une alternative à l'emploi du Wi-Fi pour la partie «fixe» du FMC porte sur l'utilisation des femto-cellules. Ce sont de minuscules

stations de bases coûtant un peu plus cher qu'un point d'accès Wi-Fi. Les femto-cellules profitent ; comme le Wi-Fi ; des connexions filaires à large bande existantes (par exemple, DSL). Au lieu d'opérer sur les bandes sans licence, les femto-cellules utilisent des bandes licenciées de l'opérateur à des niveaux de puissance très faible.

IMS est une autre technologie clé pour la convergence. Elle permet l'accès aux services de base et applications au moyen de réseaux d'accès multiple. A travers le monde, des opérateurs (y compris les nationaux), se sont engagés dans une approche IMS et ont déjà déployé un service de partage vidéo. Même étant défini par la 3GPP, l'IMS a été adopté par la (3GPP2) et WiMAX. Il permet le mélange créatif de différents types de communication et d'information y compris la voix, la vidéo, la messagerie instantanée, la localisation et les documents. Il fournit aux développeurs la possibilité de créer des applications qui n'ont jamais été possibles auparavant et permet aux utilisateurs de communiquer avec des façons entièrement nouvelles et dynamiques à l'aide de multiples services. Une personne peut ; par exemple, au cours d'une session de discussion interactive ; lancer un appel vocal, ou pendant un appel vocal, établir simultanément une connexion vidéo ou un transfert de fichiers. De même elle pourrait ; tout en naviguant sur le Web, décider de parler à un représentant du service clients. IMS sera une plate-forme clé pour la vision toute IP pour les deux architectures HSPA et LTE.

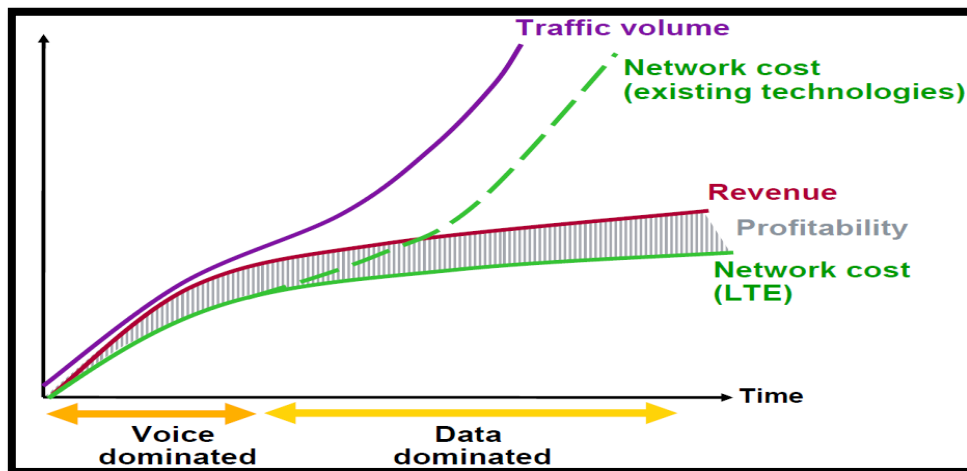
L'annonce de la 3GPP en juin 2007 sur les technologies de la spécification 8 était un jalon important dans le développement de l'IMS, vis-à-vis de plusieurs plateformes, sur la façon commune dont l'IMS tacherait de répondre aux besoins des utilisateurs des techniques d'accès fixes et mobiles. Pour se faire, la 3GPP précise ; dans la spécification 8 ; les exigences de la politique IMS commun et le développement de l'IMS.

La télévision mobile représente un autre nouveau service important. La spécification 8 de la 3GPP a intégré ce nouveau service pour les deux technologies HSPA et LTE par l'introduction du standard de base de la technologie (EMBMS) [9].

### **I.2.1.3- Réduction des coûts des opérateurs.**

De nombreux opérateurs consacrent actuellement plus de ressources à leurs réseaux de transport, principalement sur la location de la ligne et la maintenance, qu'ils ne le font sur les autres postes de charge pour toute l'organisation (y compris les salaires). Optimiser le coût des liaisons constitue désormais un enjeu crucial pour la plupart des opérateurs. Un

investissement opportun dans les réseaux haut débit apportera beaucoup en termes de réduction des coûts opérationnels à long terme. Une grande partie des infrastructures des liaisons existantes reste ancrée dans la technologie des lignes louées et de réseaux auto-construits, en utilisant uniquement une agrégation limitée de la couche 2 (typiquement ATM). Cette architecture ne permet pas de fournir une capacité plus élevée de façon économique. En outre, l'augmentation de la capacité est tributaire de l'ajout des lignes louées ; ce qui augmente les coûts de façon vertigineuse et par suite n'est pas du tout économiquement viable. Une alternative serait de trouver une solution pour dissocier le coût et la capacité.



**Figure 1.3 :** Décorrélation des coûts et la capacité en LTE.

Selon la figure 1.3 [10], la réalisation de la séparation des coûts et la capacité ; pour permettre une croissance flexible et rentable des capacités ; exige en fin de compte que les architectures traditionnelles migrent à un réseau à base de paquets. Un tel réseau unifié permet également de simplifier l'architecture, en supprimant la complexité des infrastructures et des processus d'affaires. Toutefois, il est essentiel que cette évolution soit réalisée en douceur pour assurer un service ininterrompu pour les utilisateurs finaux. Pour de nombreux fournisseurs de services actuels, les solutions les plus rentables permettront d'évoluer vers un réseau hybride comme une étape intermédiaire à l'ensemble du réseau de commutation par paquets. Il faut ainsi évoluer avec des liaisons optimisées, tant que le secteur des communications mobiles continue ses expansions persistantes avec plus d'abonnés et plus de services de pointe générant des volumes de trafic toujours en croissance. De ce fait, les opérateurs doivent d'avantage investir dans leurs infrastructures réseaux afin de fournir la bande passante nécessaire pour répondre à la demande. Le réseau de transport est le plus coûteux pour les opérateurs mobiles. Ce dernier compte habituellement l'une des plus fortes proportions du total des coûts d'exploitation que n'importe quelle autre composante de

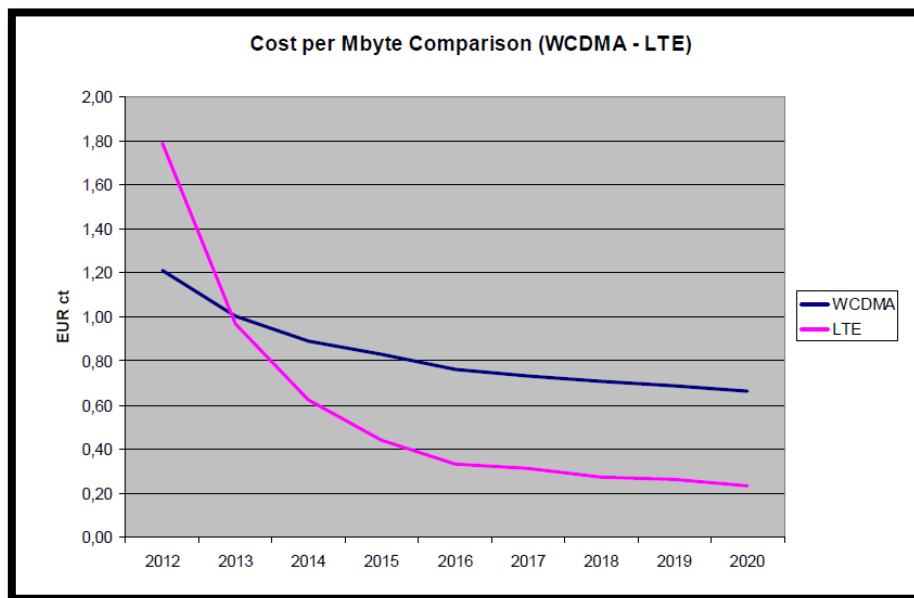
l'entreprise. L'optimisation des coûts de transport constitue un défi crucial pour permettre aux opérateurs d'être en mesure de maintenir la rentabilité dans un marché concurrentiel dominé par la baisse des tarifs.

L'évolution du réseau de transport vers un seul et unique réseau de commutation de paquets conjuguée à la simplification du réseau et des processus d'affaires apporte une nouvelle flexibilité aux prestataires de services. Toutefois, il y a lieu de souligner une mise en garde à ce niveau car une croissance substantielle du potentiel des réseaux s'impose. La croissance des utilisateurs et du trafic dépassera de loin l'accroissement des revenus, obligeant de ce fait les fournisseurs de services de communications (CSP) à transporter les données de plus en plus sur leurs réseaux qui fournissent le moins des recettes par data transportées. Pour préserver la rentabilité, les CSPs introduisent de nouvelles technologies qui réduisent fortement les coûts par Mégaoctets de données transmises. Bien qu'actuellement, de nombreux besoins puissent être satisfaits par les réseaux HSPA, la hausse de la demande du marché pour la bande passante et la baisse des prix va inévitablement nécessiter des investissements dans les réseaux, afin d'améliorer le service à l'utilisateur final. En plus de réduire les coûts, il est crucial pour les opérateurs de prendre en considération les attentes des utilisateurs finaux. Comprendre et assurer la meilleure expérience de l'utilisateur final est donc vital pour les CSP afin de maintenir l'activité, augmenter le revenu moyen et, finalement, demeurer rentables. La technologie Long Term Evolution (LTE) couvrira à la fois les besoins actuels et futurs. Il répond ainsi à la nécessité de l'efficacité et l'innovation. En assurant le transport de l'énorme trafic de données prévu.

Apportant une expérience « tout IP » pour le monde mobile - celui où la voix et les données sont transportées à travers le même réseau IP- et un interfonctionnement harmonieux avec les réseaux existants, le système LTE peut accéder à un très grand marché mondial, non seulement des opérateurs GSM / UMTS, mais aussi des opérateurs CDMA et éventuellement, des fournisseurs de services réseau fixe. Le potentiel marché attire un grand nombre d'entreprises et avec les économies d'échelle il y a une extension d'adoption du LTE de part le monde. Par exemple, Nokia Siemens Networks propose une solution LTE avec une architecture système évolué qui apporte les performances suivantes [10], [11]. :

- 25% d'économie sur les dépenses en capital des sites.
- 55% d'économie d'énergie.
- 70% moins de matériel.

La figure 1.4 [10] montre le gain en coûts/Mo que peut apporter le LTE par rapport à la WCDMA.



**Figure 1.4 :** Comparaison des coûts/Mo entre WCDMA et LTE.

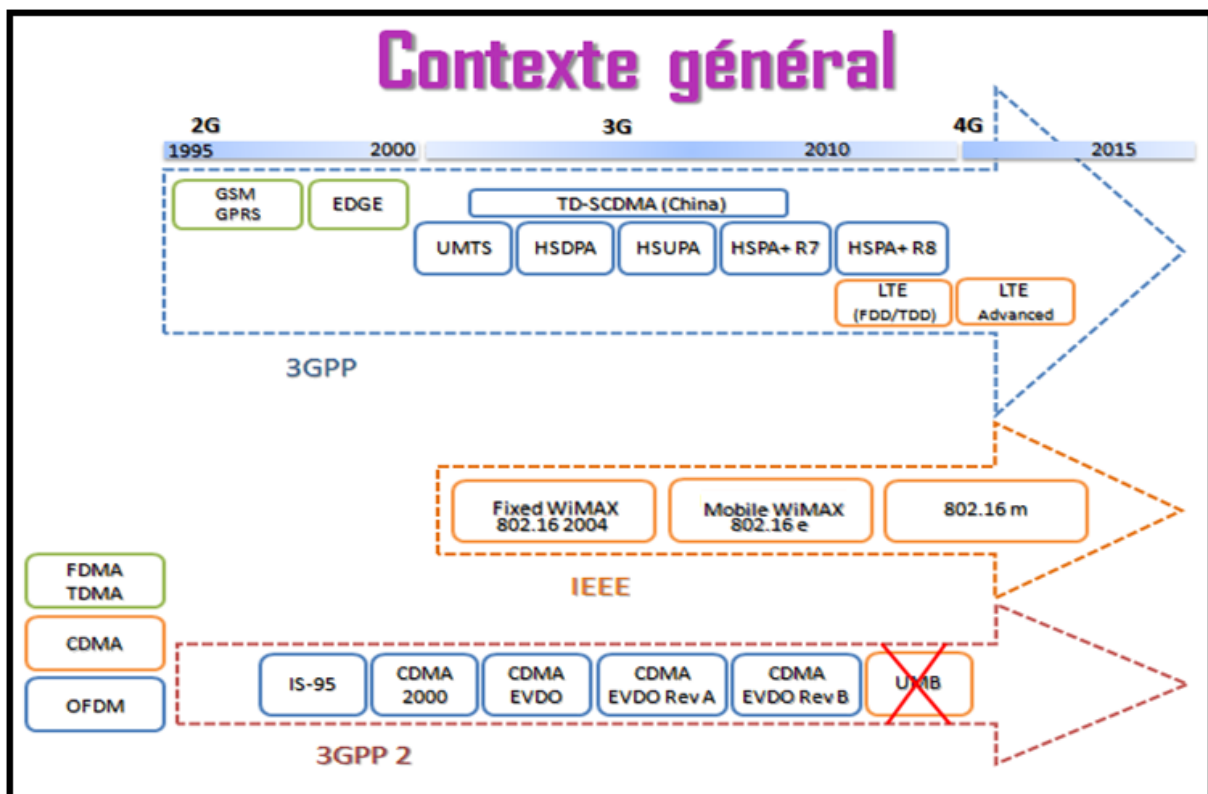
#### **1.2.1.4- La pression de la concurrence.**

Etant la voie d'amélioration des performances des systèmes sans fil standardisés sous l'égide de la 3GPP, la technologie LTE/SAE compte d'autres voies concurrentes.

La première voie d'évolution concurrente a émergé des normes IEEE 802 pour les réseaux locaux et les réseaux Métropolitains : soit la famille 802.16 comme une norme d'accès sans fil à large bande. Cette famille est entièrement orientée paquet aussi. Elle est souvent désignée par le WiMAX, promue par le forum de WiMAX. Cette organisation assure également la certification du produit correspondant. Bien que la première version, connue sous le nom 802.16-2004, ait été limitée à l'accès fixe, la version suivante 802.16e inclut le support de base de la mobilité, dénommée ainsi le WiMAX mobile. Toutefois, il convient de noter que, la famille générale du WiMAX n'a pas été conçue avec la même insistance sur la mobilité et la compatibilité avec les réseaux de base des opérateurs comme la famille des technologies 3GPP. Celle-ci comprend les évolutions du réseau cœur, en plus de l'évolution du réseau d'accès sans fils. Néanmoins, la dernière génération en cours de développement par l'IEEE, connue sous le nom 802.16m, a des objectifs similaires à l'amélioration future probable du LTE.

La deuxième piste de concurrence, illustrée sur la Figure 1.5, est dirigée par une organisation similaire à 3GPP ; appelée 3GPP2. Basée sur le standard américain IS95, qui a été le premier système mobile de communication cellulaire à utiliser la technologie CDMA. Ensuite CDMA2000 a été développée et déployée principalement aux États-Unis, la Corée et le Japon. La normalisation dans 3GPP2 a continué avec des évolutions parallèles vers des systèmes axés sur les données (EV-DO), en tenant un chemin semblable à l'évolution des 3GPP. La mise en miroir du 3GPP/LTE a donné naissance à la dernière évolution 3GPP2, soit un système OFDM appelé UMB (Ultra-Mobile Broadband), abandonné actuellement.

La tendance générale de l'évolution de la radio mobile se fait vers des systèmes flexibles, orientés-paquet et multiservices. Le but de tous ces systèmes est d'offrir à l'utilisateur une technologie mobile à haut débit dont les performances peuvent concurrencer celles des réseaux d'accès fixes actuels, tels que la Ligne d'abonné numérique asymétrique (ADSL) et de la fibre jusqu'au domicile (FTTH) [12].



**Figure 1.5 : Les concurrents du LTE**

## **I.2.2- La normalisation par la 3GPP.**

### **I.2.2.1- Les exigences techniques pour la conception du système LTE.**

LTE est axé sur un soutien optimal des Services à commutation de paquets (PS). Les exigences principales pour la conception d'un système LTE ont été identifiées dans le début des travaux de normalisation sur LTE. Elles ont été capturées dans la spécification «3GPP TR 25.913» mise à jour dans chaque spécification [1].

Elles peuvent être résumées comme suit :

✓ **Les débits maximums des données** : Les débits maximums cibles sont de 100 Mbits/s (liaison descendante) et 50 Mbit/s (liaison ascendante) pour une bande de 20 MHz, en supposant deux antennes de réception et une antenne d'émission sur le terminal. Il est à noter que ces valeurs exigées sont dépassées. Avec du MIMO 8x8 : 300 Mbps, ou avec l'utilisation de l'agrégation de spectre le débit peut atteindre 1Gbps dans le cas du LTE Advanced.

✓ **Le débit moyen** : Le débit moyen cible de l'utilisateur en liaison descendante par MHz est 3-4 fois meilleur que la spécification 6. Il est également 2-3 fois supérieur à celle de spécification 6 en liaison montante. (Voir tableau 1.1).

✓ **L'efficacité Spectrale** : L'objectif est d'avoir une efficacité spectrale 2-3 fois meilleure que celle de la spécification 6, en sens montant et 3-4 fois mieux en sens descendant. (Voir tableau 1.1).

✓ **Latence** : Le temps de transit moyen d'un paquet de l'utilisateur entre la couche IP du terminal mobile et la couche IP de la station de base doit être inférieur à 5 ms ; soit un aller-retour moyen RTT (Round Trip Time) de 10 ms. de même la latence du plan de contrôle doit être réduite, par exemple pour permettre un temps de transition rapide de moins de 100 ms à partir de l'État « en veille » à l'état « actif ». En plus, un passage vertical à travers la pile protocolaire d'un nœud TTI (l'intervalle de temps de transmission) de 1ms doit être pris en charge, soit un TTI plus court que celui du HSPA (2ms).

✓ **Bande passante** : des Bandes passantes évolutives de 5, 10, 15, 20 MHz sont prises en charge dans la spécification 8. Aussi de plus petites largeurs de bande de 5 MHz sont soutenues pour plus de flexibilité, à savoir 1.4 MHz et 3 MHz. L'utilisation de l'agrégation du spectre dans le LTE Advanced (LTE évolué) permettra l'utilisation d'un spectre de bande allant à 100 MHz.

✓ **Interfonctionnement avec toutes les technologies radio d'accès :**  
L'Interfonctionnement avec les systèmes existants UTRAN / GERAN et les systèmes non-3GPP doit être assuré. Les terminaux multi modes doivent soutenir le transfert de et vers UTRAN et GERAN, L'interruption de temps de transfert entre le E-UTRAN et UTRAN / GERAN doit être inférieure à 300 ms pour les services temps réel et moins de 500 ms pour les services en temps non réel.

✓ **Service Multimédia de diffusion des données (Broadcast ou Multicast) (MBMS) :** la MBMS est une spécification point-à-multipoint d'une interface pour les réseaux cellulaires, qui est conçu pour fournir la prestation efficace des services de diffusion et de multidiffusion. Les applications cibles comprennent la télévision mobile et de radiodiffusion, ainsi que des alertes de livraison de fichiers et des urgences.

✓ **Coûts :** la 3GPP vise comme objectif la réduction des dépenses d'investissement de capital CAPEX et les dépenses d'exploitation OPEX. Aussi, le Coût des migrations de l'interface radio UTRAN et de l'architecture de la spécification 6 doit être le plus efficace possible. Ensuite, la complexité du système et son administration doivent être raisonnables. En s'inscrivant dans l'initiative mondiale du respect de l'environnement, une faible consommation d'énergie doit être assurée. Enfin, toutes les interfaces spécifiées sont ouvertes pour l'interopérabilité des équipements multifournisseurs.

✓ **Mobilité :** Le système doit être optimisé pour les mobiles à faible vitesse (0-15 km/h). Des vitesses très grandes allant à 500 km/h doivent aussi être prises en charge comme celles des environnements TGV en tant que cas particulier.

✓ **L'affectation du spectre :** les deux modes de duplexage entre la liaison ascendante et descendante sont pris en charge à savoir : La répartition en fréquence (le Mode FDD) et la répartition en temps (le Mode TDD).

✓ **Coexistence :** la coexistence dans la même zone géographique et la colocation avec GERAN / UTRAN doit être assurée. En outre, la coexistence entre les opérateurs dans des bandes adjacentes, ainsi que la coexistence transfrontière constitue une exigence.

✓ **Qualité de service :** La qualité de service (QoS) de bout en bout est prise en charge. La voix sur IP (VoIP) devrait être soutenue par au moins une bonne efficacité et latence radio et réseau cœur similaire à celles du trafic voix sur les réseaux à commutation de circuit de l'UMTS.

### **I.2.2.2- Les exigences de la spécification 6 à la spécification 13.**

Le tableau 1.1 consigne les changements majeurs en exigences de la spécification 6 à la spécification 8 [1] ; Le tableau 1.2 ; quand à lui ; compare les objectifs des exigences du LTE, LTE Advanced et l'IMT Advanced de la spécification 8 à la spécification 13 [13], [14].

**Tableau 1.1** : Résumé des principales exigences cibles de performance pour LTE spécification 8 en comparaison avec la spécification 6.

		Exigence absolue	Comparaison avec la spécification 6	Commentaire
<b>Sens descendant</b>	Débit de transmission pic	> 100 Mbps	7 x 14.4 Mbps	LTE avec la bande 20 MHz FDD,
	Efficacité spectrale pic	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz	2x2 MIMO : HSDPA avec 5 MHz FDD, une seule antenne de transmission
	Efficacité spectrale moyenne par cellule	> 1.6- 2.1 bps/Hz/cellule	3-4x0.53 bps/Hz/cellule	LTE: 2x2 avec multiplexage spatiale. Interference Rejection Combining (IRC) sur le récepteur.
	Efficacité spectrale en bordure de la cellule.	> 0.04 - 0.06 bps/Hz	2-3 x 0.02 bps/Hz	10 utilisateurs supposés par cellule.
	Efficacité spectrale du mode broadcast	>1 bps/Hz	N/A	Une bande dédiée pour le mode broadcast
<b>Sens montant</b>	Débit de transmission pic	> 50 Mbps	5x11 Mbps	LTE avec la bande 20 MHz FDD,
	Efficacité spectrale pic	>2.5 bps/Hz	2 bps/Hz	2x2 MIMO : HSDPA avec 5 MHz FDD, une seule antenne de transmission
	Efficacité spectrale moyenne par cellule	>0.66-1.0 bps/Hz/cellule	2-3 x 0.33 bps/Hz	LTE: 2x2 avec multiplexage spatiale. Interference Rejection Combining (IRC) sur le récepteur.
	Efficacité spectrale en bordure de la cellule.	> 0.02 - 0.03 bps/Hz/utilisateur	2-3 x 0.01 bps/Hz	10 utilisateurs supposés par cellule.
<b>Système</b>	Le temps de latence dans le plan utilisateur (deux types de relai radio)	<10 ms	1/5	
	Temps de latence de démarrage	< 100 ms		Etat de repos - Etat active
	Bande passante opérationnelle	1.4-20 MHz	5 MHz	(début de la spécification avec 1.25MHz)
	Capacité VoIP	Le but préférer est > 60 sessions/MHz/cellule		

**Tableau 1.2 :** Résumé des principales exigences cibles de performance pour LTE, LTE Advanced et l'IMT Advanced (de la spécification 8 à la spécification 13).

	Sens de transmission	Configuration de l'antenne	LTE (spé. 8)	LTE-Advanced	IMT-Advanced
<b>Débit de données pic</b>	Sens descendant	8x8	300 Mbps	1 Gbps	1 Gbps
	Sens montant	4x4	75 Mbps	500 Mbps	—
<b>Efficacité spectrale pic (bps/Hz)</b>	Sens descendant	8x8	15	30	15
	Sens montant	4x4	3.75	15	6.75
<b>Capacité (bps/Hz/cellule)</b>	Sens descendant	2x2	1.69	2.4	—
		4x2	1.87	2.6	2.2
		4x4	2.67	3.7	-
	Sens montant	1 x 2	0.74	1.2	-
		2x4	-	2.0	1.4
<b>Débit de transmission par utilisateur en bordure de la cellule (bps/Hz/cellule/utilisateur)</b>	Sens descendant	2x2	0.05	0.07	—
		4x2	0.06	0.09	0.06
		4x4	0.08	0.12	-
	Sens montant	1 x 2	0.024	0.04	-
		2x4	-	0.07	0.03

### I.3- L'architecture du système de paquets évolué "EPS" :

A côté du LTE qui s'applique plus à la technologie d'accès radio du système de télécommunication cellulaire, il y a une évolution du réseau de transport. Connue sous le nom SAE - évolution de l'architecture du système, cette nouvelle architecture a été développée pour fournir un niveau plus élevé de performance conforme aux exigences de la LTE. Ce nouveau concept a également été développé de sorte qu'il soit entièrement compatible avec le LTE Advanced, la nouvelle technologie 4G. Par conséquent, lorsque LTE Advanced est introduit, le réseau est capable de gérer les augmentations du trafic de données avec peu de changements [15], [16], [17], [18].

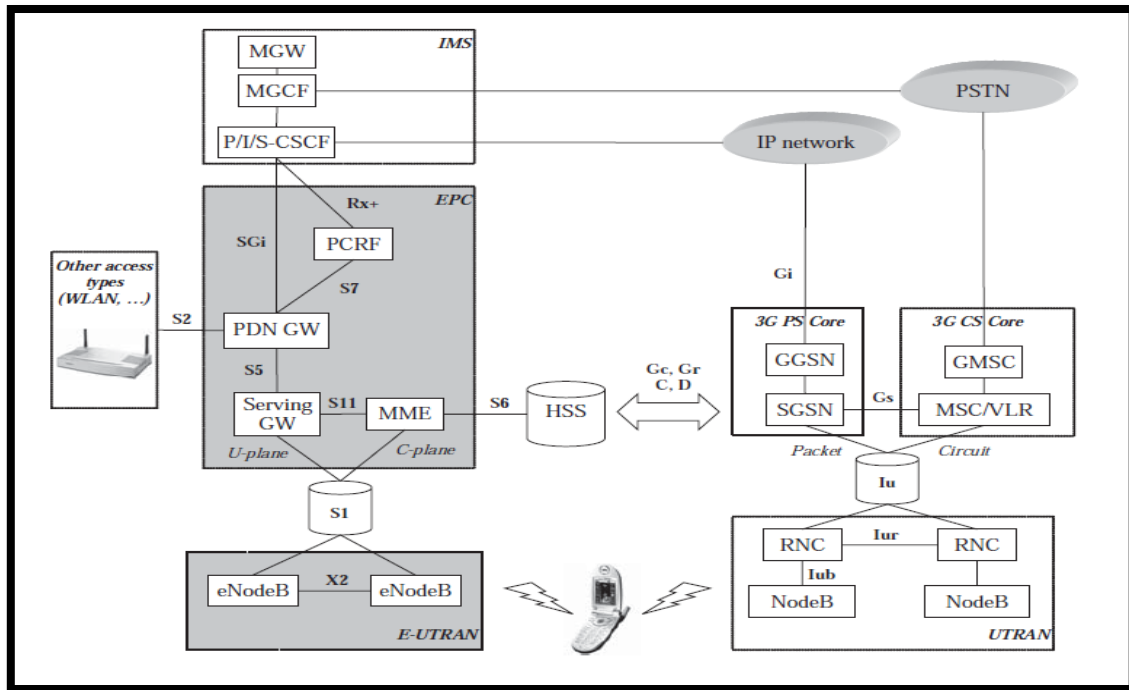
Comparée aux topologies des réseaux cellulaires précédents, le SAE offre de nombreux avantages clés, tels que :

- ✓ Amélioration de la capacité des données ;
- ✓ Architecture Tout-IP ;
- ✓ Latence réduite d'environ 10 ms ;
- ✓ Réduction des OPEX et CAPEX. Seuls deux types de nœuds sont utilisés et configurés automatiquement par la technique SON (Self-Organising Networks).

### **I.3.1- Architecture générale : SAE**

La Figure 1.6 [18], décrit l'architecture globale du réseau SAE. Elle comprend non seulement les réseaux de transport EPC (le réseau de paquet cœur évolué) et d'accès E-UTRAN du système EPS, mais aussi d'autres blocs, afin de montrer la relation entre eux. D'autres blocs de l'architecture classique UMTS sont également schématisés, tels que l'UTRAN (L'accès au réseau UMTS), le PS (le système de paquets) et les Réseaux cœur à commutation de circuits CS Core. Pour des raisons de simplification, l'image ne montre que les interfaces de signalisation. Dans certains cas, les données de l'utilisateur et de signalisation sont prises en charge par l'interface (comme les interfaces S1, S2 ou 3G Gi-PS). Dans d'autres cas, les interfaces sont consacrées au plan de contrôle, et ne prennent pas en charge la signalisation (comme la S6 et S7).

L'IMS (IP Multimedia Subsystem) est situé au-dessus des blocs de paquets de base donnant accès aux réseaux IP public ou privé, et le réseau téléphonique public via des passerelles Media MGW. Le HSS (ex HLR), gestionnaire de l'information d'abonnement des utilisateurs, est représenté par un nœud central, offrant des services à tous les blocs du réseau cœur de la 3G et la 3G évolué [18].

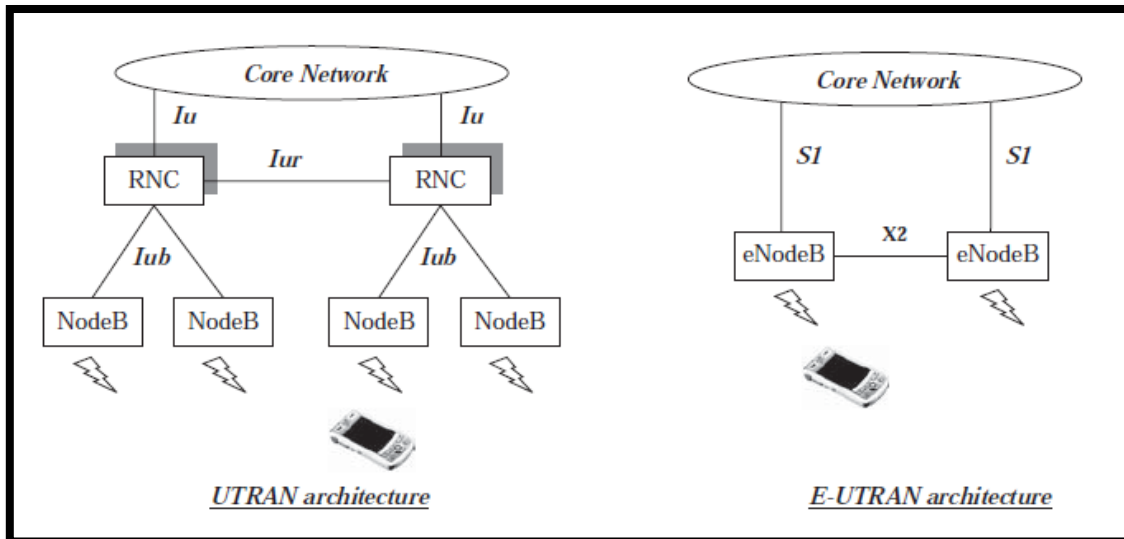


**Figure 1.6 :** L'architecture générale de l'EPS.

Les sections suivantes donnent un aperçu sur le réseau d'accès E-UTRAN et le réseau de paquets cœur EPC, ainsi que le sous-système IMS et les interfaces et les nœuds correspondants.

### **I.3.2- Le réseau d'accès évolué : E-UTRAN.**

Pour revenir aux premières versions de la norme UMTS, l'architecture UTRAN a été initialement alignée avec les concepts 2G/GSM d'accès au réseau. Tel qu'illustré dans la Figure 1.7, le réseau UTRAN est composé d'équipements de radio (connu sous le nom NodeB) en charge de la transmission et la réception sur l'interface radio et un nœud spécifique ; le RNC (Radio Network Controller) qui est en charge de la configuration de la NodeB et l'allocation des ressources radio. L'architecture générale suit le vieux modèle en étoile de 2G/GSM. Ceci signifie qu'un seul contrôleur radio (RNC) pourrait contrôler un grand nombre de NodeB. Le nombre typique dans les réseaux commerciaux est de plusieurs centaines de Stations de base (NodeB) sur l'interface Iub [18].



**Figure 1.7 :** Architectures UTRAN et Evolved UTRAN

Par rapport à UTRAN, la structure E-UTRAN basée sur l'OFDM est assez simple. Elle est composée seulement d'un élément de réseau : l'eNodeB (pour « evolved NodeB »). Le RNC 3G (contrôleur du réseau radio) hérité de la BSC 2G (contrôleur de la station de base) a disparu de l'E-UTRAN et les eNodeBs sont directement reliées au Réseau cœur en utilisant l'interface S1. En conséquence, les fonctions offertes par le RNC ont été réparties entre les eNodeBs ou l'entité de gestion du réseau cœur (MME) ou la passerelle desservante S-GW.

En fait ; la nouvelle architecture E-UTRAN est une évolution vers les structures de réseau WLAN et WiMAX ; où l'eNodeB, comme les points d'accès WLAN comporte toutes les fonctionnalités de la couche 1 et 2 précisées dans la Figure 1.14. Par ailleurs, l'eNodeB inclut des fonctionnalités supplémentaires, venant du fait qu'il n'existe pas de nœud de plus dans l'architecture E-UTRAN (voir Figure 1.7).

Ces caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ **Contrôle des ressources radio (RRC)** : il s'agit de l'attribution, la modification et la libération des ressources pour la transmission sur l'interface radio entre le terminal utilisateur et l'eNodeB.

- ✓ **Gestion radio de la mobilité** : Dans LTE la gestion de la mobilité est distribuée, les eNodeB prennent la décision de Handover d'une façon autonome sans intervention des autres équipements : MME et S-GW. Les informations nécessaires au Handover sont échangées entre les eNodeB via une interface X2. Le MME et le S-GW recevront une notification avec un message de Handover après que la nouvelle connexion aura été effectuée entre l'UE et le nouveau eNodeB.

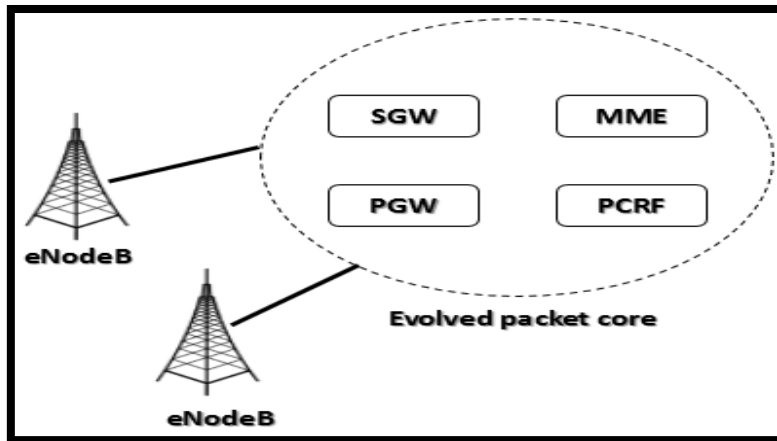
✓ **Protocole complet de la couche 2 (MAC et RLC) :** dans le modèle OSI, la couche 2 a pour but d'assurer le transfert de données entre les entités du réseau. Cela implique la détection et éventuellement la correction des erreurs qui peuvent survenir dans la couche physique.

### **I.3.3- Le réseau Cœur : Evolved Packet Core.**

Dans sa conception, le réseau SAE est fondé sur les réseaux de base GSM/WCDMA pour permettre des opérations de déploiement simplifiées et faciles. Malgré cela, il apporte des changements importants et permet beaucoup d'efficacité dans le transfert de données.

Il existe plusieurs principes communs utilisés dans le développement du réseau LTE/SAE :

- ✓ Un nœud commun pour toutes les autres technologies.
- ✓ Une architecture optimisée pour le plan de l'utilisateur avec seulement deux types de nœuds.
- ✓ Un système tout IP : des protocoles basés sur IP utilisés sur toutes les interfaces.
- ✓ Une scission dans le plan de contrôle et utilisateur entre la MME, entité de gestion de la mobilité et la passerelle.
- ✓ Une scission fonctionnelle entre le réseau d'accès radio et le réseau cœur similaire à celle utilisée sur WCDMA / HSPA.
- ✓ L'intégration des technologies d'accès non-3GPP (par exemple, CDMA2000, WiMAX, etc.)
- ✓ Le principal élément du système EPS est appelé le réseau de paquets cœur évolué ou EPC, connecté aux eNodeB d'un côté et à l'IMS de l'autre comme le montre la Figure 1.6.



**Figure 1.8 : LTE/SAE le réseau cœur évolué.**

Comme on le voit dans la Figure 1.8, L'EPC est composé de plusieurs entités fonctionnelles dont :

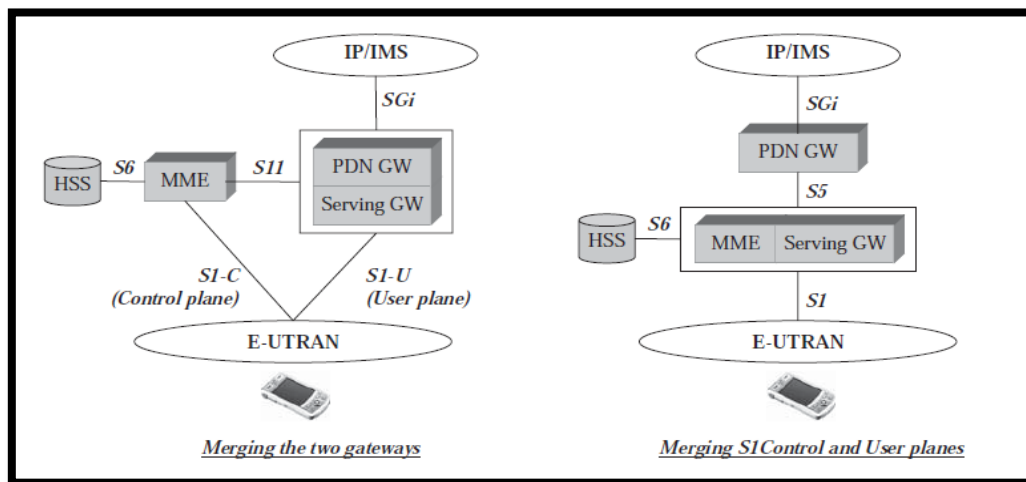
- L'entité de gestion de la mobilité : MME ;
  - La passerelle de desserte : SGW ;
  - La passerelle de desserte des données paquets : PGW;
  - La fonction de politiques et règles de tarification : Le PCRF.
- **L'entité de gestion de la mobilité, MME :** Le MME est le nœud de contrôle principal pour le réseau d'accès du LTE/SAE. Elle prend en charge un certain nombre de d'actions :
- Suivi des utilisateurs en mode veille ;
  - Activation/désactivation du bloc de ressources (RB) ;
  - Choix de la passerelle de service pour un utilisateur ;
  - Passage intra-LTE des utilisateurs impliquant l'emplacement du nœud de l'EPC ;
  - Interaction avec le HSS pour authentifier et autoriser ou restreindre l'utilisateur à faire la procédure du Roaming ;
  - Action de chiffrement et protection de la signalisation en plus de la gestion des clés de sécurité.
  - Fournir des identités temporaires pour les utilisateurs ;

- Gestion de la procédure de recherche des utilisateurs : (Paging) ;
- L'interface S3 se termine dans la MME fournissant ainsi la fonction du plan de contrôle de mobilité entre le LTE et les réseaux d'accès 2G/3G ;
- Le MME termine également l'interface S6 en liaison avec le HSS (HLR) pour les utilisateurs en Roaming.

Etant le point d'interception légale de signalisation et en fournissant un niveau considérable de fonctionnalités de contrôle global, la MME SAE peut être considérée comme le cerveau du système EPS. Elle peut être déployée isolément ou en cohabitation avec la passerelle de service S-GW, comme illustré dans la Figure 1.6.

- **La passerelle de service, S-GW** : ou la passerelle de desserte, est un élément du plan de données dans le LTE. Son objectif principal est de gérer la mobilité des utilisateurs. Elle agit également comme la frontière principale entre le réseau d'accès radio, RAN et le réseau de transport. La S-GW soutient également les chemins de données entre les eNodeBs et les passerelles PDN. De cette façon, la S-GW forme une interface pour le réseau de données par paquets à l'E-UTRAN. De même, lorsque l'utilisateur se déplace dans les régions desservies par des eNodeBs différents, le S-GW sert de point d'ancrage de mobilité pour veiller à ce que le chemin de données soit maintenu.
- **La passerelle PDN, P-GW** : La passerelle PDN du LTE/SAE assure la connectivité pour l'utilisateur à l'extérieur des réseaux de données par paquets, remplissant la fonction d'entrée et de sortie pour les données L'utilisateur peut avoir une connectivité avec plus d'un P-GW pour accéder à plusieurs PDN.
- **Fonction des politiques et règles de tarification, PCRF** : C'est le nom générique de l'entité au sein de l'EPC LTE/SAE qui détecte le flux de services et applique la politique de tarification. Pour les applications qui nécessitent une politique dynamique ou un contrôle de la charge, un élément de réseau intitulé : la fonction des Applications, AF est utilisé.

Enfin ; comme le montre la figure 1.9 deux scénarios sont possibles pour le déploiement du réseau cœur EPC [18] :



**Figure 1.9** : Scénarios de déploiement du réseau Cœur EPC du EPS ou SAE

### I.3.4- Le sous-système IMS.

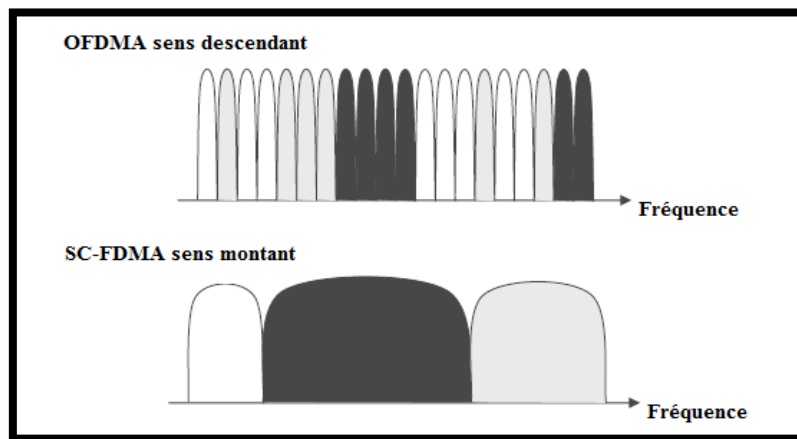
L'IMS (Le sous-système IP multimédias) est une plate-forme générique qui offre des services multimédias sur IP. IMS offre des fonctions et des procédures communes pour le contrôle de session, le contrôle des porteurs RB et la politique de tarification. Du point de vue architecture de réseau, IMS doit être considérée comme un accès qui ignore l'EPC. Mais l'IMS peut être déployé au-dessus de l'accès UTRAN ainsi que l'accès au réseau 2G GPRS/EDGE. Le nouveau réseau d'accès évolué E-UTRAN orienté vers la transmission rapide des paquets va ajouter beaucoup de valeur à l'IMS et permettra aussi un soutien efficace à la prise en charge des services exigeant en qualité.

## I.4- Technologies d'accès Radio introduites par la spécification 8 (LTE).

### I.4.1- La technologie Multi-porteuses : OFDM.

Adopter une approche multi porteuse d'accès multiples à la LTE a été le premier grand choix de conception. Après la consolidation initiale des demandes, les candidats de la liaison descendante étaient OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) et WCDMA multiples, alors que ceux de la liaison montante étaient SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access), OFDMA et WCDMA multiples. Le choix des régimes d'accès multiple a été fait en décembre 2005, avec l'OFDMA pour la liaison descendante, et SC-FDMA pour la liaison montante [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]. Ces deux régimes

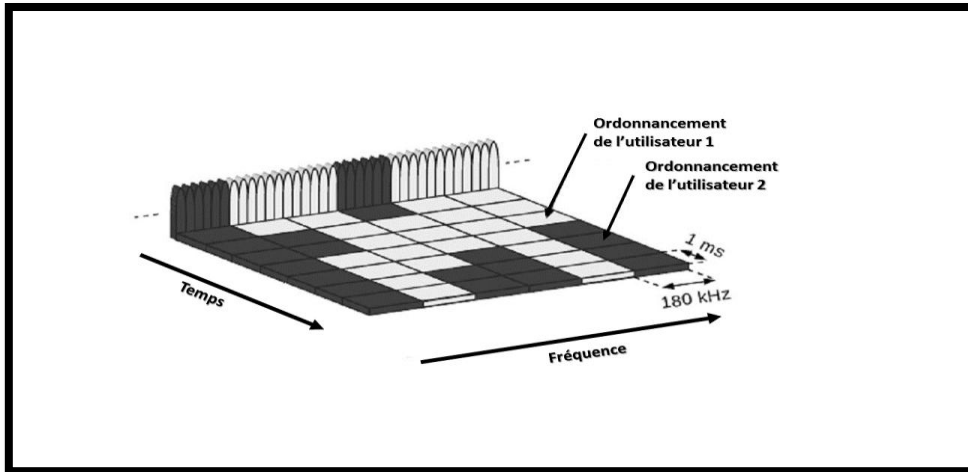
ont ouvert le domaine fréquentiel comme une nouvelle dimension de la flexibilité dans le système, comme illustré schématiquement dans la figure suivante :



**Figure 1.10** : Aperçu du domaine fréquentiel des technologies d'accès multiple LTE.

L'OFDMA élargit la technologie multi porteuse OFDM pour fournir un système à accès multiple très flexible. OFDM divise la bande passante disponible pour la transmission du signal en une multitude de sous-porteuses à bande étroite, conçu pour être mutuellement orthogonales, qui soit individuellement ou en groupe peut transporter des informations indépendantes en OFDMA, cette subdivision de la bande passante disponible est exploitée dans le partage des sous-porteuses entre les multiples utilisateurs. Cette souplesse qui en résulte peut-être valorisée de diverses manières :

- ✓ Différentes largeurs de bande peuvent être utilisées sans changer les paramètres fondamentaux du système ou la conception des équipements ; soit des bandes allant de 1,4 Mhz à 20 Mhz.
- ✓ Les ressources de transmission de la bande passante variable peuvent être attribuées à différents utilisateurs (comme illustré dans la figure 1.11) et ordonnancer librement dans le domaine fréquentiel.
- ✓ La réutilisation des fractions des fréquences et la coordination des interférences entre les cellules sont facilitées.



**Figure 1.11** : Aperçu du domaine fréquentiel des technologies d'accès multiple LTE.

En outre, une vaste expérience avec l'OFDM a été acquise ces dernières années avec le déploiement de l'audio et la vidéo numérique tels que les systèmes de radiodiffusion DAB, DVB et DMB. Cette expérience a mis en lumière des avantages importants de l'OFDM, qui comprennent :

- Une robustesse à la dispersion en temps des canaux radio, grâce à la subdivision du signal à large bande en plusieurs sous-porteuses transmises à bande étroite, permettant une large limitation des interférences entre symboles par l'insertion d'un intervalle de garde au début de chaque symbole ;
- Des récepteurs à faible complexité, en tirant profit de l'égalisation dans le domaine fréquentiel.
- Une simple combinaison de signaux provenant d'émetteurs multiples dans les réseaux de diffusion.

En revanche, le design de l'émetteur OFDM est plus coûteux, à cause d'un grand rapport entre la puissance maximale et moyenne (PAPR) d'un signal OFDM. Ceci entraîne le besoin d'un amplificateur de puissance RF très linéaire. Toutefois, cette limitation n'est pas incompatible avec l'utilisation de l'OFDM pour des transmissions en liaison descendante. De même ; la mise en œuvre à faible coût a une priorité moindre pour la station de base que pour le terminal mobile dans le sens montant. Toutefois, le PAPR élevé de l'OFDM est difficile à tolérer pour l'émetteur du terminal mobile, car il est nécessaire de trouver un compromis entre la puissance de sortie nécessaire pour une bonne couverture extérieure, la consommation d'énergie et le coût de l'amplificateur de puissance. La SC-FDMA offre une technologie

d'accès multiple qui a beaucoup de caractéristiques en commun avec OFDMA. Il s'agit en particulier de la souplesse dans le domaine fréquentiel, l'incorporation d'un intervalle de garde au début de chaque symbole OFDM transmis pour diminuer la complexité d'égalisation dans le domaine fréquentiel au niveau du récepteur. En même temps, la SC-FDMA a un PAPR significativement plus faible. Ainsi le dilemme de la façon dont la liaison montante peut bénéficier des avantages de la technologie multi-porteuse se trouve résolu, tout en évitant les coûts excessifs pour l'émetteur du terminal mobile et en conservant un degré raisonnable de points communs entre les technologies de la liaison montante et descendante.

Pendant les premiers stades du développement de LTE, une autre solution multi-porteuse fondée sur le régime d'accès multiples a été sérieusement considérée - à savoir la multi-porteuse WCDMA. Cela aurait pu avoir l'avantage de réutiliser la technologie existante des systèmes UMTS établis. Toutefois, comme le système LTE est destiné à rester compétitif pour de nombreuses années, les avantages initiaux de réutilisation de la technologie de l'UMTS deviennent moins profitables à long terme, car le maintien de la même technologie n'aurait pas permis d'embrasser de nouvelles possibilités et de bénéficier de la souplesse de l'OFDM, de la faible complexité du récepteur et de la haute performance dans les canaux radios.

Finalement, l'OFDMA a été adoptée comme la liaison descendante du système de transmission pour le LTE. Elle est également utilisée pour plusieurs autres technologies radio, par exemple, WiMAX et la technologie de diffusion DVB.

A côté du LTE ; la MIMO, (La technique multi-antennes pour la transmission et la réception) est une autre des innovations technologiques majeures utilisées pour améliorer les performances du système. Elle offre au LTE la possibilité d'améliorer davantage son débit de données et l'efficacité spectrale obtenue par l'utilisation de l'OFDM.

#### **I.4.2- La technologie multi-antennes : MIMO.**

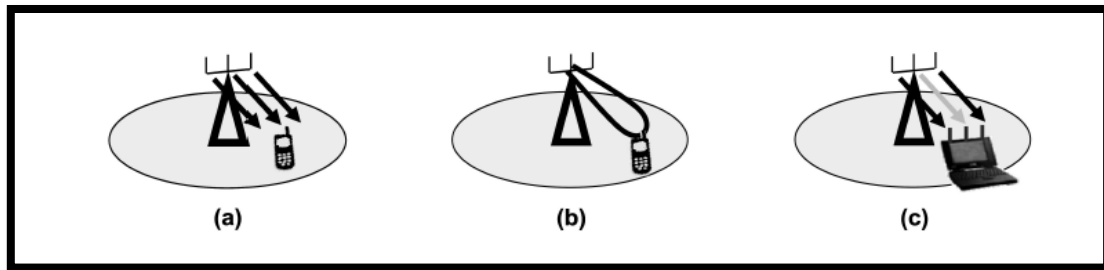
Le principe de base de MIMO utilise la propagation du signal par trajets multiples qui est présent dans toutes les communications terrestres. Plutôt que de produire des interférences, ces voies peuvent être mises à profit. Certes, les interférences multiples et les limitations de débit de données conformément à la loi de Shannon peuvent constituer deux limitations importantes dans les canaux de communication. Toutefois MIMO offre un moyen d'utiliser les voies de signaux multiples qui existent entre un émetteur et un récepteur pour améliorer sensiblement le débit des données disponibles sur un canal donné avec une largeur de bande définie. En utilisant plusieurs antennes à l'émetteur et au récepteur avec certains traitements des signaux numériques complexes, la technologie MIMO permet au système de créer plusieurs flux de données sur le même canal, augmentant ainsi sa capacité.

L'utilisation de la technologie d'antennes multiples permet l'exploitation du domaine de l'espace comme une nouvelle dimension. Cela devient indispensable dans la quête d'une meilleure efficacité spectrale. Avec l'utilisation d'antennes multiples, l'efficacité spectrale théoriquement réalisable augmente linéairement avec le minimum d'émetteurs et de récepteurs des antennes employées, au moins dans des environnements adaptés à la propagation des ondes radio. La technologie des antennes multiples ouvre la porte à une grande variété de fonctionnalités. Toutefois elles n'honorent pas facilement toutes leurs potentialités théoriques quand il s'agit de la mise en œuvre dans les systèmes pratiques. Les antennes multiples peuvent être utilisées dans une variété de dispositifs, principalement basées sur trois principes fondamentaux, schématiquement illustrés dans la Figure 1.12 (a), (b) et (c) il s'agit de :

✓ **Gain en diversité** : L'utilisation de la diversité de l'espace fournie par les antennes multiples donne une amélioration de la robustesse de transmission contre la détérioration par trajets multiples.

✓ **Gain de groupement** : La concentration de l'énergie dans une ou plusieurs directions données par la technique du beamforming permet à plusieurs utilisateurs situés dans des directions différentes d'être servis en même temps par les mêmes ressources radio (MIMO dits multi-utilisateurs).

✓ **Gain de multiplexage spatial** : Transmission du signal de plusieurs flux de données à un seul utilisateur sur plusieurs couches spatiales créées par la combinaison des antennes disponibles.



**Figure 1.12:** Avantages fondamentaux du MIMO :

(a) gain diversité ; (b) gain regroupement ; (c) gain multiplexage spatial.

La technologie MIMO est de plus en plus utilisée dans de nombreuses technologies de hauts débits de données, y compris Wi-Fi et d'autres technologies sans fil et cellulaires pour fournir des gains d'efficacité. Toutefois ; une disparité des régimes d'implémentation dans le LTE varie légèrement entre les liaisons montantes et descendantes. L'enjeu est au niveau du coût et la taille des terminaux. Pour la liaison descendante, une configuration de deux antennes d'émission à la station de base et de deux antennes de réception sur le terminal mobile est utilisée comme référence, même si les configurations avec quatre antennes sont également envisagées. Pour la liaison montante à partir du terminal mobile vers la station de base, un programme appelé MU-MIMO (MIMO multi-utilisateurs) doit être employée. Même si la station de base nécessite des antennes multiples, les mobiles n'ont qu'une seule antenne d'émission, ce qui réduit considérablement le coût et les dimensions physiques de la téléphonie mobile. En fonctionnement, plusieurs terminaux mobiles peuvent émettre simultanément sur le même canal ou des canaux, sans provoquer des interférences à l'autre car une orthogonalité mutuelle est utilisée. Cette technique est aussi appelée : le domaine spatial à l'accès multiple (SDMA).

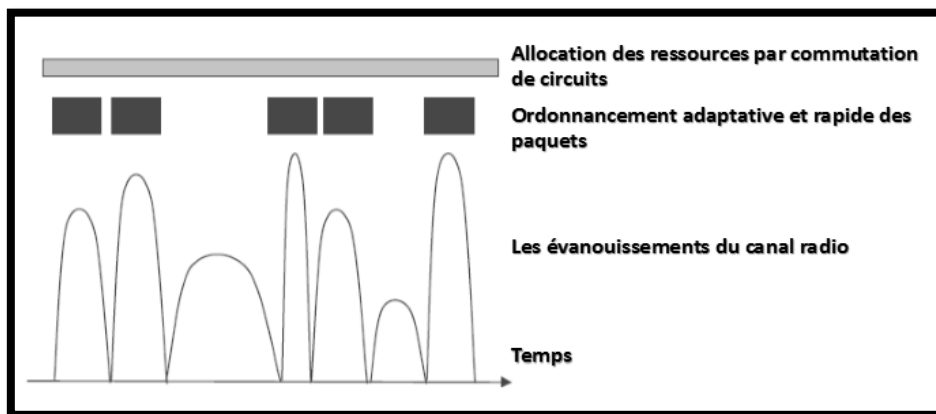
Une grande partie de la "phase d'étude" du LTE a été consacrée à la sélection et la conception des différentes caractéristiques des antennes multiples pour être incluses dans LTE. Par ailleurs, le système final comprend plusieurs fonctionnalités complémentaires qui permettent une adaptabilité en fonction du déploiement et les conditions de propagation des différents utilisateurs.

#### **I.4.3- Une interface radio intelligente basée sur la commutation de paquet.**

LTE a été conçu comme un système multiservice entièrement orienté paquet, sans recourir aux protocoles orientés commutation de circuits répandus dans ses prédécesseurs. En LTE, cette approche est appliquée à travers toutes les couches de la pile protocolaire.

La voie vers l'ordonnancement rapide des paquets sur l'interface radio a déjà été ouverte par le HSDPA et utilisé par LTE. Ceci a permis ; comme illustré sur la figure 1.13 ; la transmission de paquets dont la durée est du même ordre de grandeur que le temps de cohérence du canal à évanouissement rapide. Cela nécessite une optimisation conjointe de la configuration de la couche physique et la gestion des ressources réalisées par les protocoles des couches liaison selon les conditions de propagation en vigueur.

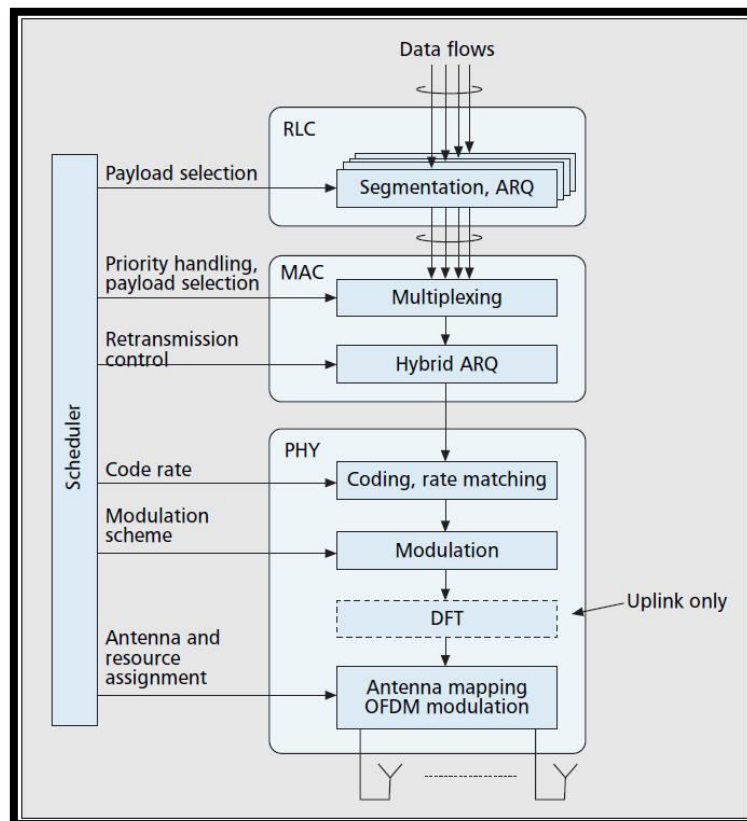
Cet aspect de la technologie HSDPA utilisé pour LTE implique un couplage étroit entre deux couches de la partie inférieure de la pile protocolaire – la couche MAC (Medium Access Control) et la couche physique. En HSDPA. Ce couplage comprend déjà des fonctionnalités telles que les informations rapides de l'état du canal, l'adaptation dynamique du lien, l'ordonnancement rapide multiutilisateurs et le protocole de retransmission rapide H-ARQ.



**Figure 1.13 :** Planification et l'adaptation rapide de liaison

❖ **Ordonnancement à la couche 2 et adaptation du lien :** L'entité de contrôle et de gestion des ressources radio RRM à la couche 2 effectue l'ordonnancement des paquets dynamique et l'allocation des ressources physique PRB aux utilisateurs chaque TTI=0,5ms comme défini dans la Figure 1.1. Cette entité gère aussi les paramètres de transmission, y compris l'adaptation de la modulation et le taux de codage. Cette procédure est dénommée l'adaptation du lien. Les PRB alloués, et le schéma de modulation et de codage sélectionnés sont signalés aux utilisateurs réguliers sur le canal physique PDCCH. L'objectif global de l'ordonnancement de paquets est de maximiser la capacité de la cellule, tout en s'assurant que la qualité de service minimale requise pour les porteuses de l'EPS est garantie et qu'il y a aussi des ressources suffisantes pour les services titulaires du best-effort sans de strictes exigences de qualité de service. Les décisions d'ordonnancement sont effectuées sur la base de l'utilisateur, même si un utilisateur dispose de plusieurs flux de données. En fait,

chaque utilisateur actif avec un porteur EPS a au moins deux flux de données de la couches 2, à savoir un ensemble de données du plan de contrôle pour le protocole RRC et un ou plusieurs sur le plan utilisateurs pour les titulaires de flux EPS. Chacun des flux de données est identifié avec un champ unique de 5-bit canal logique d'identification (LCID). Compte tenu de la taille de l'édifice de services de transport (TBS) pour un utilisateur particulier, le protocole MAC décide du nombre de données qui sont envoyées à partir de chaque LCID. Comme le montre la Figure 1.14, l'ordonnanceur de paquets est en relation étroite avec le gestionnaire de HARQ car il est responsable de la planification des retransmissions [20].



**Figure 1.14 :** Les fonctionnalités des couches 1 & 2 pour l'ordonnancement rapide des paquets, l'adaptation du lien et HARQ.

❖ **La Procédure HARQ :** Le HARQ dans LTE est basé sur l'utilisation d'une procédure stop-and-wait HARQ. Une fois le paquet est transmis de l'eNodeB, l'utilisateur le décode et fournit un feedback dans le PUCCH. Pour répondre à un accusé de réception négatif (NACK), l'eNodeB envoie une retransmission. L'utilisateur va combiner la retransmission avec la transmission d'origine puis le décodage turbo se déroulera à nouveau. Après un décodage réussi l'utilisateur envoie un accusé de réception positif (ACK) pour l'eNode. Par la suite, l'eNodeB envoie un nouveau paquet. En raison du mode de fonctionnement stop-and-wait, il faut avoir des multiples de processus HARQ pour permettre un flux de données

continu. En LTE le nombre de processus est fixé à 8 dans les deux processus de liaison montante et descendante. Un exemple de transmission d'un seul utilisateur en continu est illustré dans la Figure 1.15. L'opération HARQ dans LTE supporte à la fois la combinaison douce « chase combining » et l'utilisation de la redondance incrémentale « IR ». L'utilisation de la méthode soft correspond à la retransmission exacte de la transmission d'origine, donc les mêmes symboles sont retransmis. Pour la redondance incrémentale IR, la retransmission peut avoir des taux différents correspondant aux paramètres de la transmission. Le délai minimum entre la fin d'un paquet et le début d'une retransmission est de 7 ms. Ensuite, L'utilisateur envoie le ACK/NACK pour un paquet de trame n, dans le sens montant n+4. Cela laisse un temps d'environ 3 ms : Voir figures 1.15 et 1.16.

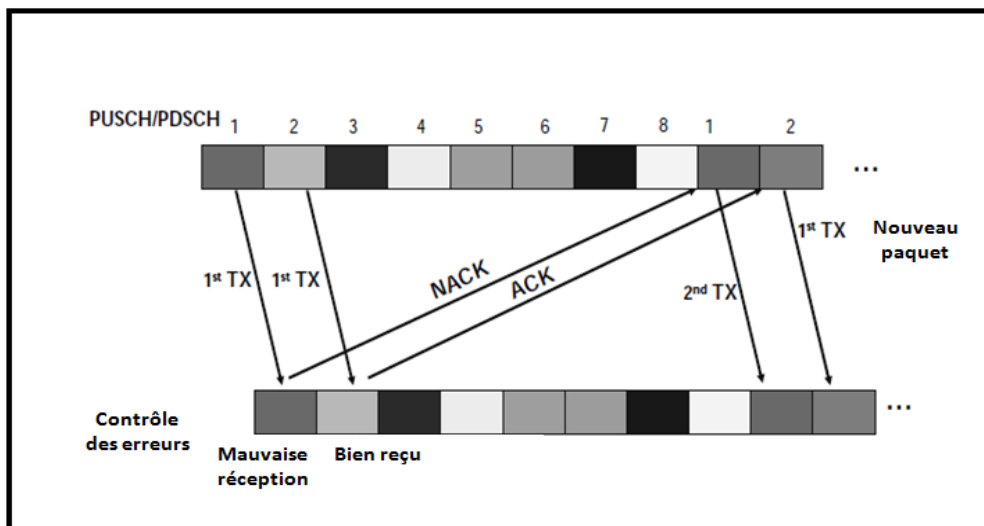


Figure 1.15 : L'opération LTE HARQ avec 8 processus.

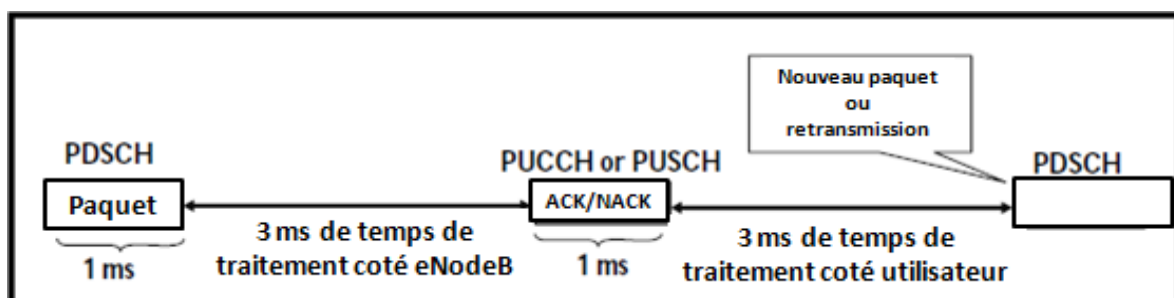


Figure 1.16 : Calendrier du LTE HARQ pour un paquet en sens descendant.

❖ **Informations rapides de l'Etat du canal :** Le but de la déclaration des informations de l'Etat du canal est de fournir aux eNodeBs la possibilité d'optimiser la décision d'ordonnancement des paquets. L'état du canal est estimé par l'utilisateur sur la base des transmissions en liaison descendante et rapportées à l'eNodeB en utilisant le canal PUCCH ou PUSCH. Les rapports envoyés de l'état du canal contiennent des informations

d'ordonnement, d'adaptation de liaison et MIMO ; soit des paramètres liés à l'utilisateur pour soutenir la réception des données. L'eNodeB peut alors profiter de ces informations dans la décision d'ordonnement afin d'optimiser l'utilisation des ressources en fréquences.

En général, le retour de l'état du canal rapporté par l'utilisateur n'est qu'une recommandation et l'eNodeB n'est pas obligé de le suivre dans la propagation descendante. En LTE, la déclaration du retour du canal est entièrement contrôlée par l'eNodeB et l'utilisateur ne peut pas envoyer ces rapports sans avoir l'autorisation de l'eNodeB. La procédure d'information sur l'état du canal de la liaison montante est appelée le sondage du canal. Elle est réalisée en utilisant les signaux de Sondage de référence (SRS). La principale différence entre les informations du retour du canal dans LTE par rapport à WCDMA /HSDPA est la sélectivité en fréquence des rapports. Les informations concernant la distribution de l'état du canal sur le domaine fréquentiel sont fournies par l'utilisateur dans LTE. Il s'agit d'un facilitateur FDPS pour (Frequency Domain Packet Scheduling), une méthode qui vise à diviser les ressources radio dans le domaine fréquentiel pour différents utilisateurs afin que les performances du système soient optimisées. Quand la vitesse de l'utilisateur augmente, les rapports CSI deviennent imprécis et s'usent plus rapidement, entraînant des gains très réduits avec une grande mobilité.

Il y a lieu de souligner qu'en LTE, l'utilisateur peut envoyer trois types d'informations sur le canal :

❖ **Indicateur de la qualité du canal (CQI):** soit l'information la plus importante, fournit à l'eNodeB, sur les paramètres d'adaptation du lien que l'utilisateur peut prendre en charge (en tenant compte du mode de transmission, type du récepteur utilisateur, nombre d'antennes et situation d'interférence vécue à un moment donné). Le CQI est défini comme une table contenant 16 entrées (voir Tableau 1.3 [24]) avec une modulation et un taux de codage. L'utilisateur rapporte à l'eNodeB l'indice CQI le plus élevé correspondant à la modulation, le taux de codage et le débit par élément de ressource utilisé. Ceci est fait pour que le taux d'erreur binaire estimé en sens descendant ne dépasse pas 10%.

**Tableau 1.3:** la table de la qualité du canal de transmission.

CQI index	Modulation	Coding rate × 1024	Bits per resource element
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

❖ **Indicateur du rang (RI) :** est la recommandation de l'utilisateur pour le nombre de couches, c'est à dire les antennes à utiliser dans le multiplexage spatial. RI n'est déclarée que lorsque l'utilisateur fonctionne en modes MIMO. Il n'est pas indiqué en fonctionnement antenne unique ou TX diversité. Le RI peut avoir des valeurs 1 ou 2 avec la configuration MIMO 2x2 et de 1 à 4 avec la configuration 4x4. Le RI est toujours associé à un rapport CQI ou plus, ce qui signifie que le rapport de CQI est calculé en connaissant certaines valeurs RI. Puisque le RI varie généralement plus lentement que le CQI, il est normalement moins signalé.

❖ **Indicateur de la matrice de pré-codage :** Le PMI fournit des informations sur la matrice de pré-codage préférée, basé sur un dictionnaire de pré-codage. Comme le RI, le PMI est également pertinent pour le MIMO. Le fonctionnement MIMO avec le retour PMI est appelé le MIMO en boucle fermée. Le nombre de matrices de pré-codage dans le dictionnaire dépend du nombre de ports d'antenne à l'eNodeB : Dans le cas de deux ports d'antenne il y a au total six matrices à utiliser, tandis que pour quatre ports d'antenne, le nombre total est de 64 en fonction de la RI et la capacité de l'utilisateur. Les rapports PMI peuvent être à large bande ou sélectif en fréquence en fonction du mode de retour CSI.

En LTE, et afin d'améliorer la latence du système ; la durée d'envoi des paquets a été encore réduite ; de 2 ms utilisée par le HSDPA à 1 ms ou 0,5 ms. Les nouvelles dimensions de la fréquence et de l'espace, ont élargi le travail sur les techniques de

communication des inter-couches « cross-layer » entre les couches MAC et physique afin d'inclure les techniques suivantes à la LTE :

- Adaptation de la configuration MIMO, y compris la sélection du nombre de couches spatiales transmises simultanément ;
- Adaptation du lien par la modulation et le taux de codage, y compris le nombre de mots de code transmis : taille du bloc TBS ;
- Plusieurs modes de rapport rapide de l'Etat du canal ;
- Un mode de gestion des interférences intercellulaires qui est l'un des problèmes de la LTE.

Ces différents niveaux d'optimisation sont combinés avec la signalisation de contrôle très sophistiqués, qui s'est avéré être l'un des défis importants dans la transformation du concept LTE dans un système de travail réel.

## **I.5- Evolution des technologies d'accès radio de la spécification 9 à la spécification 13.**

### **I.5.1- Le réseau d'accès radio LTE avec la spécification 9.**

Lorsque la première version de la technologie LTE fut achevée, les travaux se sont poursuivis par les comités scientifiques et la 3GPP avec l'introduction de plusieurs fonctionnalités supplémentaires dans la seconde version des spécifications LTE. La spécification 9 a été achevée à la fin de 2009 [25]. Les principales nouveautés introduites dans le cadre de cette spécification, étaient un soutien pour la transmission multicast et broadcast, un soutien pour les services de positionnement assisté au réseau, et l'amélioration du Dual-layer beam-forming.

#### **✓ Le soutien pour la transmission multicast et broadcast :**

La diffusion multicellulaire implique la transmission de la même information à partir de plusieurs cellules. En utilisant efficacement la puissance du signal en émission et en transmettant non seulement des signaux identiques à partir des cellules (codage et modulation identique), mais également la synchronisation du temps de la transmission entre les cellules, le signal à la borne apparaît exactement comme un signal émis à partir d'une seule cellule [26].

✓ **Les services de positionnement assisté au réseau :**

Le service de positionnement, se réfère à une fonctionnalité dans le réseau d'accès radio pour déterminer l'emplacement des terminaux individuels. La détermination de la position d'un terminal peut, en principe, être réalisée en incluant un récepteur GPS dans le terminal. Bien que ce soit une caractéristique assez commune, tous les terminaux ne comprennent pas le récepteur GPS nécessaire. Il peut aussi y avoir des cas où le service GPS ne soit pas disponible. LTE version 9 introduit donc le support de positionnement inhérent dans le réseau d'accès radio. En mesurant des signaux de référence spécifiques transmis régulièrement à partir de différentes cellules, l'emplacement du terminal peut être déterminé [27].

✓ **Dual-layer beam-forming :**

La spécification 9 a amélioré le support pour combiner le multiplexage spatial avec le beam-forming. Bien que cette fonction ait déjà été possible dans la version 8, elle est restée limitée à ce qu'on appelle le précodage basé dictionnaire. Dans la version 9, le support de multiplexage spatial combiné avec soi-disant un précodage non fondée dictionnaire a été introduit, permettant une plus grande souplesse dans le déploiement de différents schémas de transmission multi antennes.

**I.5.2- Le réseau d'accès radio LTE avec la spécification 10.**

L'un des principaux objectifs de la spécification 10 est d'assurer que la technologie d'accès radio LTE soit entièrement compatible avec les exigences IMT-Advanced. A partir de cette spécification la dénomination LTE Advanced sera utilisée [28].

Les principales nouveautés de la spécification 10 sont :

- La flexibilité accrue du spectre LTE par la notion de l'agrégation des porteuses,
- De nouvelles améliorations dans la technique de transmission multi-antenne,
- L'introduction de la technique des relais,
- Les améliorations dans le domaine de la coordination d'interférence inter-cellule dans les déploiements des réseaux hétérogènes.

➤ **L'agrégation des porteuses :**

Avec la spécification 10 la bande passante de transmission peut être étendue au moyen de l'agrégation de porteuses, où de multiples supports de composants sont agrégés et conjointement utilisés pour la transmission de et vers le terminal mobile. Ainsi peuvent être agrégés jusqu'à cinq composants, éventuellement chacune des différentes largeurs de bande, permettant par conséquent des bandes passantes de transmission allant jusqu'à 100 MHz [29].

➤ **Amélioration de la technique de transmission multi-antenne :**

Dans la spécification 10, le multiplexage spatial en liaison descendante est amélioré pour prendre en charge jusqu'à huit antennes. Le soutien de l'agrégation des porteuses permet des débits de données jusqu'à 3 Gbit/s à 100 MHz de spectre en liaison descendante. En liaison montante jusqu'à quatre antennes a également été introduit dans le cadre de la technologie LTE dans la spécification 10. En collaboration avec l'agrégation des porteuses de la liaison montante, le débit de données pourra atteindre 1,5 Gbit / s à 100 MHz de spectre.

➤ **Le relai :**

Dans le contexte de la technologie LTE, le relai implique que le terminal communique avec le réseau par l'intermédiaire d'un nœud relai qui est connecté par radio à une cellule de donneur en utilisant la technologie de l'interface radio LTE. D'un point de vue terminal, le nœud de relai apparaîtra comme une cellule ordinaire de faible puissance reliée à la partie restante du réseau.

➤ **La coordination d'interférence inter-cellule dans les déploiements des réseaux hétérogènes :**

Les réseaux hétérogènes se réfèrent à des déploiements avec un mélange de nœuds de réseau avec des puissances d'émission différentes et chevauchement de la couverture géographique. Un exemple typique est un nœud pico placé à l'intérieur de la zone de couverture d'une cellule macro. Bien que ces déploiements soient déjà pris en charge dans la version 8, la spécification 10 apporte de nouveaux moyens mis en place pour gérer les interférences qui peuvent se produire entre les cellules hétérogènes.

### **I.5.3- Le réseau d'accès radio LTE avec la spécification 11.**

La spécification 11 finalisée à la fin de l'année 2012, a étendu les performances et les capacités de la technologie LTE. Ainsi elle se distingue avec l'amélioration de l'interface radio par la coordination et la transmission multipoint, une nouvelle structure du canal de contrôle, l'amélioration de l'agrégation multi-porteuses et la détermination des exigences de performance pour plusieurs récepteurs de terminaux avancés [30].

#### **❖ La coordination et la transmission multipoint :**

La spécification 8, a été limitée à la définition de certains messages sur l'interface X2 pour soutenir la coordination entre les cellules. A l'opposé ; la spécification 11 a focalisé ses efforts sur les fonctionnalités de l'interface radio et des terminaux mobiles en ajoutant le retour sur le canal radio pour les points de transmission multiples. Conjointement ces fonctionnalités s'intègrent sous le nom (COMP) dans la transmission et la réception.

La transmission à un terminal peut être effectuée à partir de points de transmission multiples soit de telle manière que cette transmission peut basculer dynamiquement entre les différents points de transmission (Sélection du point dynamique) ou être menée conjointement à partir de plusieurs joints de transmission (transmission mixte).

#### **❖ Une nouvelle structure du canal de contrôle :**

Dans la spécification 11, une nouvelle structure de canal de contrôle complémentaire a été introduite afin de soutenir la coordination d'interférence intercellulaires et d'exploiter la flexibilité supplémentaire de la nouvelle structure de signal de référence. Ceci a été fait non seulement pour la transmission de données, ce qui était le cas dans la spécification 10, mais aussi pour le contrôle de la signalisation. La nouvelle structure du canal de contrôle peut donc être considérée comme une condition préalable à de nombreux régimes **COMP**, mais il est également bénéfique pour le beam-forming et dans la coordination d'interférence dans le domaine des fréquences.

#### **❖ L'amélioration de l'agrégation multi-porteuse :**

L'agrégation de porteuses a été introduite dans la version 10, mais pour La TDD elle a été limitée à ce que toutes les porteuses aient les mêmes allocations en liaison descendante-liaison montante. Dans la version 11, cette restriction a été supprimée, et

l'agrégation de plusieurs transporteurs TDD avec différentes répartitions en lien descendant et montant est supportée [29].

❖ **Les exigences de performance pour les récepteurs des terminaux avancés :**

Le déploiement des réseaux doit être fondé sur les exigences minimales de performance pour les récepteurs des terminaux. Dans les spécifications 11 l'introduction des terminaux de catégories 7 et 8 avec la possibilité de support des débits de 3Gbit/s en sens descendant et 1.5 Gbit/s en sens montant. Ce genre d'exigence n'aura aucune signification dans le cas où le réseau ne permet pas de telle performance.

**I.5.4- Le réseau d'accès radio LTE avec la spécification 12.**

La spécification 12 (finalisé en Mars 2015), comprend un ensemble de domaines de développement de l'interface radio, qui sont d'une importance cruciale pour l'évolution des réseaux mobiles en raison de leurs potentiels de permettre la réutilisation massive de spectre. Les domaines de développements les plus importants de l'interface radio sont l'étude de l'interface radio des petites cellules et l'amélioration de la technique de transmission multi antennes, ainsi que l'agrégation des porteuses [31].

❖ **L'étude de l'interface radio des petites cellules :**

La 3GPP a introduit le concept de l'utilisation d'une petite cellule qui permettra à un terminal mobile connecté simultanément à une macro cellule (qui fournit une vaste zone de connexion) et une petite cellule ; la livraison efficace du trafic utilisateur dans sa zone de couverture locale à un point donné dans le temps. La 3GPP a introduit également le problème de la synchronisation entre les cellules [32], [33].

❖ **Amélioration de la technique de transmission multi antennes (elevation beam-forming et massive MIMO ou FD-MIMO) :**

**Elevation beam-forming** : est l'utilisation des antennes de la station de base pour fournir des faisceaux dans la dimension verticale et horizontale. Ces techniques peuvent être particulièrement utiles dans les environnements urbains, où les utilisateurs mobiles peuvent être répartis dans les bâtiments de grande hauteur, en permettant aux opérateurs de réseau

d'augmenter le nombre d'utilisateurs pris en charge dans une cellule et d'améliorer la qualité du service fourni.

Le principe de **MIMO massive** est d'utiliser un grand nombre (potentiellement des centaines) d'éléments d'antenne de station de base pour créer des faisceaux très étroits de rayonnement, qui maximisent les rapports signal sur bruit rencontrés par les terminaux mobiles individuels. Cette technique sera essentielle dans le cas des systèmes mobiles qui se déplacent dans des plages de fréquences élevées, afin de compenser les pertes de trajet des signaux radio à ces fréquences.

#### ❖ **Amélioration de l'agrégation des porteuses :**

La spécification 12 LTE est en mesure de soutenir le regroupement des porteuses de Cinq fois la bande 20MHz, ce qui permettra d'améliorer la capacité du système et le débit de l'utilisateur [29].

#### **I.5.5- Les projets futurs de la spécification 13.**

Alors que la spécification 12 est achevée, la 3GPP commence à travailler sur les améliorations LTE de la prochaine génération (spécification 13). Les grands projets déjà approuvés sont l'étude du fonctionnement de LTE dans le spectre sans licence, l'amélioration de la LTE Machine-Type Communications (MTC), l'avancement des travaux introduits dans la spécification 12 de l'amélioration de la technique de transmission multi antennes (Elevation Beam forming et Full-Dimension MIMO) et à la fin ; l'étude de la localisation de la position dans un environnement LTE indoor. Bien sûr d'autres projets peuvent être ajoutés en fonction de l'évolution de la spécification 13 prévue en début 2016 [34], [35].

#### ❖ **Etude du fonctionnement de LTE dans le spectre sans licence :**

L'objectif est d'étudier les possibilités pour LTE de fonctionner dans le spectre sans licence. Alors que le spectre sous licence demeure la priorité des opérateurs 3GPP pour fournir des services de pointe et améliorer l'expérience utilisateur, l'utilisation opportuniste du spectre sans licence devient un complément important pour répondre à la demande croissante du trafic. Cette fonction peut alors devenir une option attrayante pour les opérateurs pour faire usage du spectre sans licence avec un réseau unifié, offrant des économies de coûts d'exploitation potentielle, une amélioration de l'efficacité spectrale et une meilleure expérience utilisateur.

Une composante essentielle de l'étude est d'assurer la coexistence entre LTE avec Wifi et de fournir une possibilité équitable de l'accès au spectre sans licence en termes de scénarios de déploiement. L'accent sera mis sur l'agrégation (LAA) Licensed-Assisted Aggregation. La cellule primaire pourra utiliser le spectre sous licence pour fournir des informations cruciales et garantir la qualité de service, et une cellule secondaire utilisera le spectre sans licence pour garantir un débit de données élevés. L'objectif de l'utilisation de ces techniques est de contourner le problème des interférences intercellulaires qui dégrade considérablement la qualité de système LTE par la recherche de plus de ressources radio dans le spectre sans licence.

#### ❖ **Amélioration du LTE Machine-Type Communications (MTC) :**

Le principal objectif de ce projet est de définir une nouvelle catégorie d'équipement utilisateur de faible complexité qui prend en charge une bande passante réduite, une puissance d'émission réduite, davantage d'optimisation pour les modes de transmission de la liaison descendante, une vie ultra-longue de la batterie basée sur des techniques de réduction de la consommation d'énergie et le fonctionnement étendue de la couverture.

L'étude des fonctionnements à 1.4 MHz des terminaux à n'importe quelle bande passante du système LTE permettra aux opérateurs de multiples possibilités pour l'utilisation du MTC dans une bande passante réduite ainsi que des dispositifs réguliers dans leurs déploiements LTE.

#### ❖ **Amélioration de la technique de transmission multi antennes (Elevation Beam forming et Full-Dimension MIMO) :**

Ce projet se base sur la modélisation de canal 3D complété dans la spécification 12. 3GPP va maintenant étudier les changements nécessaires pour permettre aux systèmes beam forming et MIMO d'ordre élevé FD-MIMO de répondre à la demande future des capacités. Pour améliorer encore l'efficacité spectrale LTE ; l'étude se base maintenant sur les réseaux d'antennes à deux dimensions qui peut également exploiter la dimension verticale. La nouvelle étude se penchera aussi sur les systèmes MIMO d'ordre élevé jusqu'à 64 ports d'antenne à l'eNodeB, pour rendre à l'avenir ; plus efficace l'utilisation de fréquences plus élevées.

## ❖ Etude des techniques de positionnement indoor dans le LTE :

L'objectif de la localisation de la position intérieur (indoor) est d'abord de déterminer les performances des méthodes de positionnement déjà spécifiés dans les environnements intérieurs. Elle vise ; plus tard ; à évaluer les améliorations possibles aux méthodes existantes, ou de nouvelles méthodes, afin de parvenir à un meilleur positionnement. Le travail peut en outre étendre la capacité de la plateforme LTE-permettant aux opérateurs d'exploiter le marché croissant de positionnement à l'intérieur.

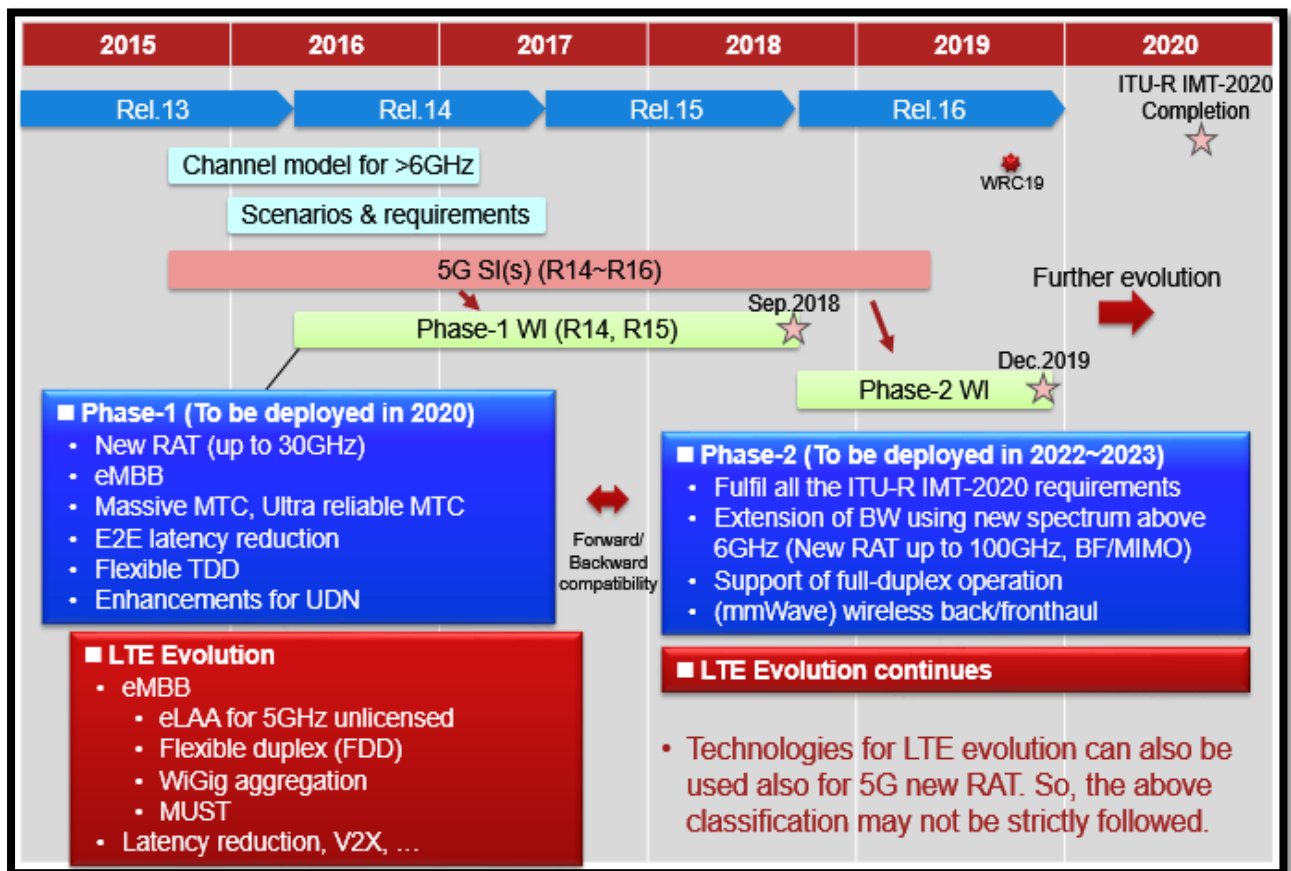
La plupart des améliorations du LTE dans la spécification 13 s'intègrent dans la politique de la 3GPP afin de trouver des solutions de contournement aux problèmes des interférences intercellulaires en proposant aux opérateurs plusieurs possibilités de déploiements dans le but d'éviter la réutilisation de la bande et donc les interférences intercellulaires.

### **I.5.6- Les premiers pas vers la 5G.**

En septembre 2015, la 3GPP a lancé un atelier de travail sous le nom « Start of Something », [36] qui regroupe l'ensemble des constructeurs en télécommunications afin d'établir la vision de la 3GPP du réseau 5G vers l'année 2020.

La discussion autour de la 5G se divise entre deux grands axes, une pensée qui voit 5G comme une consolidation de la 2G, 3G, 4G, Wi-fi et d'autres innovations fournissant une couverture beaucoup plus grande avec plus de fiabilité, la seconde pensée entraînée par le besoin d'un grand changement dans la vitesse de données et la réduction de l'ordre de grandeur de la latence de bout en bout.

La figure 1.17, présente le plan de travail de la IMT-2020 sur la 5G en prenant en considération les deux grandes visions des constructeurs à travers le monde [36] :



**Figure 1.17** : Plan de travail de l'IMT-2020 sur la 5 G.

Le travail vers la 5G est organisé en deux phases :

**La phase 1 : étude entre 2015 et 2017 et déploiement prévu en 2020 :**

Cette phase a déjà démarré avec la spécification 13, et continué avec la naissance de la spécification 14, dans cette étape les technologies utilisées ont partie été relaté dans la partie précédente reste a abordé les technologies suivantes :

❖ **Extension de la bande passante (4400 et 4900 MHz) :**

**Une nouvelle interface radio :** La recherche sur une nouvelle interface radio capable de travailler simultanément sur les bandes de base du LTE évolué jusqu'à 5 GHz et pour les bandes supérieures à 6 GHz jusqu'à 30 GHz.

**Amélioration de LTE et LTE évolué :** L'étude des possibilités de multiples combinaisons radios pour le LTE et LTE évolué avec additions de plusieurs bandes de fréquences.

❖ **Un mode TDD flexible (Flexible TDD) pour la 5G :**

L'étude des différents modes de transmissions en TDD pour la 5G et l'adapté aux différents types de trafics utilisateurs.

❖ **La recherche sur la réduction du temps de latence et sur la MTC :**

Recherches sur des solutions de réduction du temps de latence pour les modes (connectés et en attente). Aussi la recherche sur le MTC massif et le MTC à temps critique.

❖ **Les réseaux à grande densité de population : Ultra Dense Network (UDN) :**

En juin 2014, les résultats obtenus dans le cadre de nos travaux sur l'impact des interférences intercellulaires en milieu urbain; sujet du chapitre deux de ce document ; ont fait l'objet d'une publication au journal International de l'Innovation en ingénierie et technologie (IJIET) ont prouvé l'impacte problématique des interférences intercellulaires sur la 4G [37]. En septembre 2015 dans l'atelier de travail « Start of Something », un ensemble de grands constructeurs tels que ZTE, Coolpad et Qualcomm [38],[39],[40], ont révélé le même problème souligné dans notre article, et mis l'accent sur la nécessité de trouver une solution pour le déploiement multicellulaire du LTE, dans les milieux urbain et urbain dense connaissant un effet d'interférences intercellulaires dévastateur sur la capacité des cellules 4G.

Actuellement, l'appel à projet sur la spécification 14 ; toujours ouvert ; vise à trouver des solutions pour réduire les interférences dans les environnements urbain et urbain dense, telle que la coordination entre les cellules et le feedback pour le contrôle des interférences. Notre thèse propose une des solutions envisageables pour ce problème [41], [42].

**La phase 2 : (étude prévue entre 2018 et 2020 et déploiement entre 2022 et 2023) :**

La phase deux de la 5G prévoit d'aborder les points suivants :

- ❖ **Description technique de la nouvelle interface radio :** Le travail sur la description technique de la nouvelle interface radio 5G.

❖ **Une nouvelle extension de la bande passante** : Optimisation de la nouvelle interface radio de la 5G pour un fonctionnement de la bande jusqu'à 100 GHz. En ajout à cela le support de la coexistence des opérations FULL-Duplex et non FULL-Duplex pour l'allocation des ressources radio.

## **I.6- Conclusion.**

La nouvelle vision du LTE /SAE fournit une nouvelle approche pour le réseau Cœur et accès, permettant de transporter les données à des débits très élevés, subvenant au besoin des débits de données élevés qui sont promis avec LTE. En plus de cela, d'autres caractéristiques qui réduisent le CAPEX et l'OPEX par rapport aux systèmes existants, permettent ainsi d'atteindre des niveaux plus élevés d'efficacité. Ceci est recherché sans négliger l'expérience des utilisateurs qui sera améliorée via les nouveaux services et technologies.

Mais une interrogation est soulevée sur la capacité de LTE de gagner le défi et satisfaire les performances cibles dans des milieux d'utilisation réalistes. Afin d'y répondre, le chapitre 2 traitera l'impact des interférences intercellulaires dans un environnement urbain réaliste.

**Chapitre.II**  
**Impact des interférences**  
**intercellulaires en lien**  
**descendant L.T.E dans un**  
**environnement**  
**multicellulaire**

## II.1- Introduction.

Le système Long Term Evolution (LTE), a pour objet d'apporter la communication cellulaire à la quatrième génération (4G). Il a comme avantage de fournir des temps de latence significativement plus faibles, l'amélioration de la capacité et de la couverture, et un moindre coût de fonctionnement. Mais avec l'augmentation des utilisateurs de haut débit mobile et l'émergence des services mobiles nécessitant une connexion permanente au réseau Internet comme les réseaux sociaux ou les réseaux des jeux, le volume de trafic est en augmentation constante, en particulier dans les zones de haute densité de population. La réutilisation de la bande passante est le moyen efficace d'augmenter la capacité dans le système LTE. Dans ce cas, les interférences inter-cellules (ICI) seront inévitablement désavantageuses dans le cas des stations mobiles où les utilisateurs dans des cellules adjacentes partagent le même spectre. La grande mobilité ne fait qu'aggraver la situation. Le SINR en bordure des cellules serait si pauvre que même le canal de commande (PDCCH) le plus robuste ne peut fonctionner correctement [43].

Normalement la performance du réseau LTE est estimée par les résultats des simulations selon le modèle de la norme 3GPP [2], [44]. Dans les réseaux de test, les performances trouvées avec les simulations semblent très prometteuses. Cependant après déploiement à grande échelle les performances réelles peuvent être plus faibles que prévues en particulier pour les zones de forte densité de population.

En considérant ce contexte, le chapitre deux se focalise sur l'étude de l'impact des interférences inter-cellules et le rendement de la transmission LTE en lien descendant dans un milieu multicellulaire urbain. Notre objectif, pour cette étude consiste à étudier l'impact des interférences intercellulaires en lien descendant sur les performances des cellules LTE dans un environnement multicellulaires urbain réaliste en termes de nombres et tailles des cellules, de la distribution et la vitesse des utilisateurs et ce en prenant comme référence les exigences du modèle de simulation de la 3GPP.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter l'étude théorique qui nous a permis de définir le débit perdu de la cellule LTE en fonction des facteurs clés de notre étude qui sont le SIR et le SNR. Ensuite nous présenterons les caractéristiques techniques de l'interface radio LTE ; que le simulateur développé dans le cadre de cette étude sera en mesure de reproduire en temps réel, les schémas blocs constituant notre simulateur, avant de

donner un aperçu sur les premiers résultats ; montrant l'impact du facteur SIR (interférence des cellules voisine) sur la capacité de la cellule LTE.

Soucieux de donner une analyse détaillée de l'impact du SINR sur le système LTE, nous avons effectué une nouvelle simulation détaillée qui s'intéresse aux aspects de la densité, la répartition et la vitesse de déplacement des utilisateurs dans le respect des exigences du modèle de simulation de la 3GPP pour le milieu urbain, nous avons travaillé sur un nouveau simulateur à la base du code source Matlab « LTE Advanced Vienna simulator » [45], pour conclure sur l'impact réel du SINR sur la qualité de transmission en sens descendant pour les cellules LTE.

## II.2- Etude théorique de l'impact des interférences intercellulaires en lien radio descendant LTE.

Les interférences intercellulaires limitent les performances du débit du système dans les réseaux cellulaires, en particulier pour les utilisateurs au bord des cellules.

Pour étudier l'impact des interférences intercellulaires, il est primordial de déterminer la formule analytique du débit perdu  $D_{k,perte}$  à cause des interférences en fonction des facteurs SIR et SNR [46].

L'impact des interférences sur le débit de données possibles pour un utilisateur donné, peut être exprimé de la manière analytique suivante :

Dans le cas où il n'y a pas d'interférences le débit de l'utilisateur k peut être exprimé comme suit :

$$D_{k,pas-interference} = W \log \left[ 1 + \frac{P^s(m,f) |H_k^s(m,f)|^2}{N_0} \right] \quad (1)$$

Où

- m est l'indice du bloc de ressource
- f est l'indice de la semi-trame (subframe).
- W est la bande des ressources allouées,
- $H_k^s(m, f)$  est le gain du canal de la cellule s qui dessert l'utilisateur k,
- P (m, f) est la puissance de transmission de la cellule s
- $N_0$  est la puissance du bruit.

Toutefois, si les cellules voisines à la cellule « s » émettent, alors il est fort probable que les mêmes ressources seront utilisées. Ainsi le débit réalisable pour l'utilisateur k se réduit à :

$$D_{k,avec\ interference} = W \log \left[ 1 + \frac{P^S(m,f)|H_k^S(m,f)|^2}{N_0 + \sum_{i \neq s} P^i(m,f)|H_k^i(m,f)|^2} \right] \quad (2)$$

Avec  $\sum_{i \neq s} P^i(m,f)|H_k^i(m,f)|^2$  la somme des puissances d'interférences et l'indice « i » représente les cellules interférentes.

La perte du débit dû aux interférences expérimentées par l'utilisateur « k » s'écrit alors :

$$D_{k,perte} = D_{k,pas-interference} - D_{k,avec\ interference} \quad (3)$$

Par développement de l'équation 3, en utilisant les équations 1 et 2, on démontre que le débit perdu  $D_{k,perte}$  est :

$$D_{k,perte} = W \log \left[ \frac{1+SNR}{1 + \left[ \frac{1}{SNR} + \frac{\sum_{i \neq s} P^i(m,f)|H_k^i(m,f)|^2}{P^S(m,f)|H_k^S(m,f)|^2} \right]^{-1}} \right] \quad (4)$$

$$D_{k,perte} = W \log \left[ \frac{1+SNR}{1 + \left[ \frac{1}{SNR} + \frac{1}{SIR} \right]^{-1}} \right] \quad (5)$$

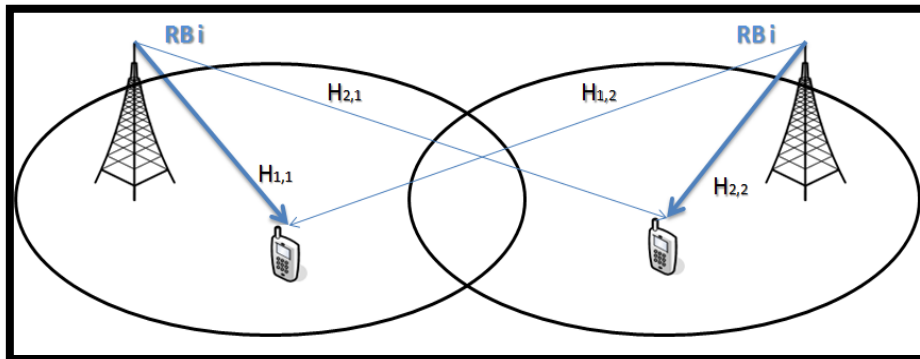
Avec :

$$SNR = \frac{P^S(m,f)|H_k^S(m,f)|^2}{N_0} \quad (6) \text{ le rapport signal sur bruit à l'entrée du récepteur.}$$

$$SIR = \frac{1}{\gamma} = \frac{P_{utilisateur\ k}}{P_{interference}} \quad (7) \text{ avec } \gamma = \frac{\sum_{i \neq s} P^i(m,f)|H_k^i(m,f)|^2}{P^S(m,f)|H_k^S(m,f)|^2} = \frac{P_{interference}}{P_{utilisateur\ k}} \quad (8).$$

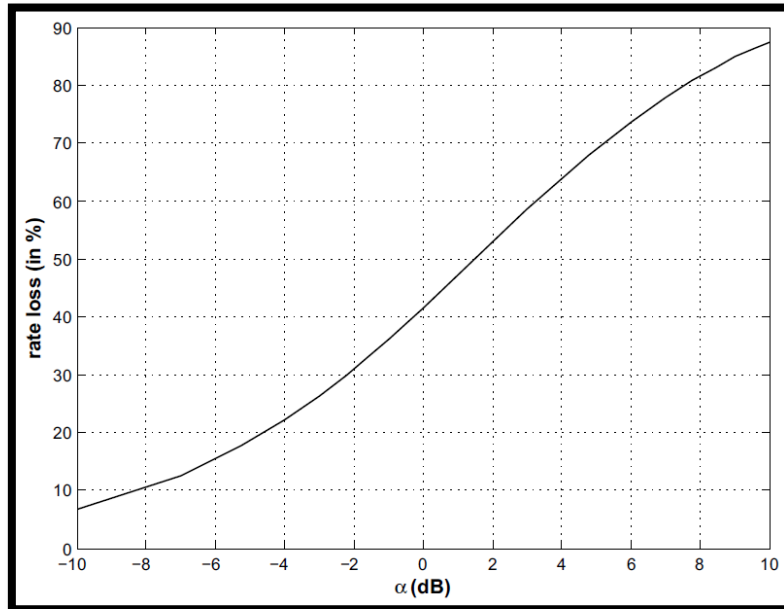
$\alpha = 10 \log_{10}(\gamma)$  le facteur des interférences intercellulaires.

La figure 2.1, donne une illustration simplifiée des interférences dans le cas de deux cellules avec un utilisateur par cellule :



**Figure 2.1 :** Exemple des interférences intercellulaires à deux cellules.

Une première analyse du débit perdu  $D_{k,perte}$ , peut être faite à partir de la figure 2.2. elle représente le taux de perte en pourcentage pour l'utilisateur « k » en fonction du facteur des interférences intercellulaires  $\alpha = 10\log_{10}(\gamma)$  à SNR = 0 dB.



**Figure 2.2 :** Les pertes en débit dues aux interférences ICI.

Avec un SNR nul, on peut voir facilement que pour un niveau d'interférence égal au niveau signal reçu (facteur  $\alpha \approx 0$  dB), l'utilisateur « k » subit un taux de perte d'environ 40%.

Il apparaît, à partir de la figure 2.2 [46], que pour le système LTE à répartition cellulaire d'ordre 1 (utilisation de toute la bande dans chaque cellule), le taux de perte des données au niveau des utilisateurs au bord des cellules ( $\alpha \approx 0$  dB), sera supérieur à 40 % et peut atteindre jusqu'à 90%. Ceci est inacceptable dans un système offrant du haut débit.

### **II.3- Simulateur de l'interface radio LTE et analyse de l'impact du SNR et du facteur « $\alpha$ » sur les interférences intercellulaires.**

Ce paragraphe offre une description des caractéristiques physiques de l'interface radio implémenté dans le simulateur développé à cette fin et des blocs simulés, suivi par une présentation - analyse des résultats obtenus.

#### **II.3.1- Caractéristiques physiques de l'interface radio E-UTRAN simulée.**

L'amélioration de la 3GPP qui a intégrée l'HSPA+ avec la spécification 7, devait fournir une technologie d'accès concurrentielle à haut niveau. Cela n'a pas été suffisant car la

3GPP vise à définir un plus long chemin de l'évolution pour assurer la compétitivité. Un tel objectif doit être atteint par l'introduction de la nouvelle technologie LTE, qui se base sur la technique d'accès Multiple OFDMA pour le sens descendant et l'SC-FDMA en sens montant appuyées par une grande flexibilité au niveau de la couche physique.

Dans le contexte de cette recherche, nous avons pris le soin de réaliser un simulateur du lien descendant de l'interface radio E-UTRAN, par le développement de plusieurs scripts sous Matlab qui est un langage de programmation utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche.

Notre simulateur est modulaire ; il peut réaliser plusieurs configurations possibles sous forme de scripts (modules) pour faciliter l'intégration des différentes fonctionnalités possible de l'interface E-UTRAN en sens descendant. Dans la suite de cette partie nous présentons l'ensemble des configurations possibles intégrées dans notre simulateur.

### II.3.1.1- Les modes de transmission TDD et FDD simulé pour l'E-UTRAN.

Une partie des exigences pour l'E-UTRAN, concerne la capacité de faire face à diverses modes de transmissions dans différentes bandes. C'est ainsi que l'E-UTRAN, comme illustré par la figure 2.3 [47], supporte le fonctionnement dans des bandes allant de 1,4 Mhz jusqu'à 20 Mhz, en différents modes de transmissions (FDD, TDD, le TDD & FDD combiné ou FDD half duplex), notre simulateur permet de reproduire l'ensemble des combinaisons possibles de la figure suivante :

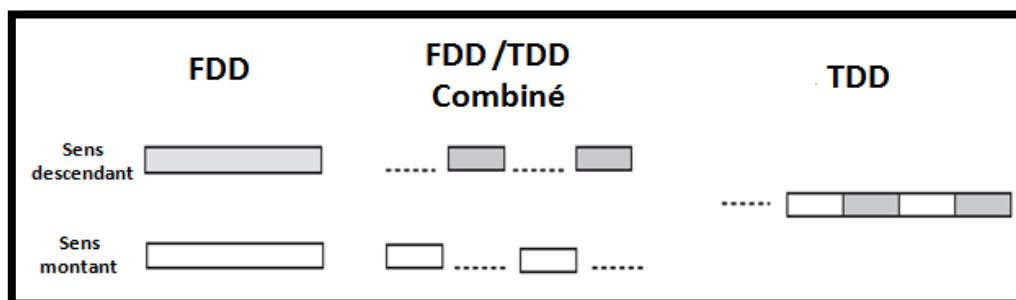
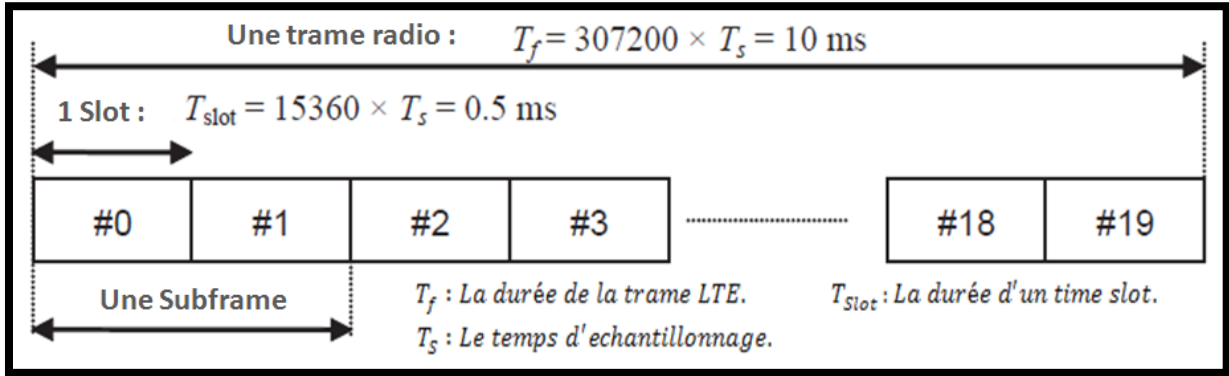


Figure 2.3 : Les différents Modes de transmission dans l'E-UTRAN.

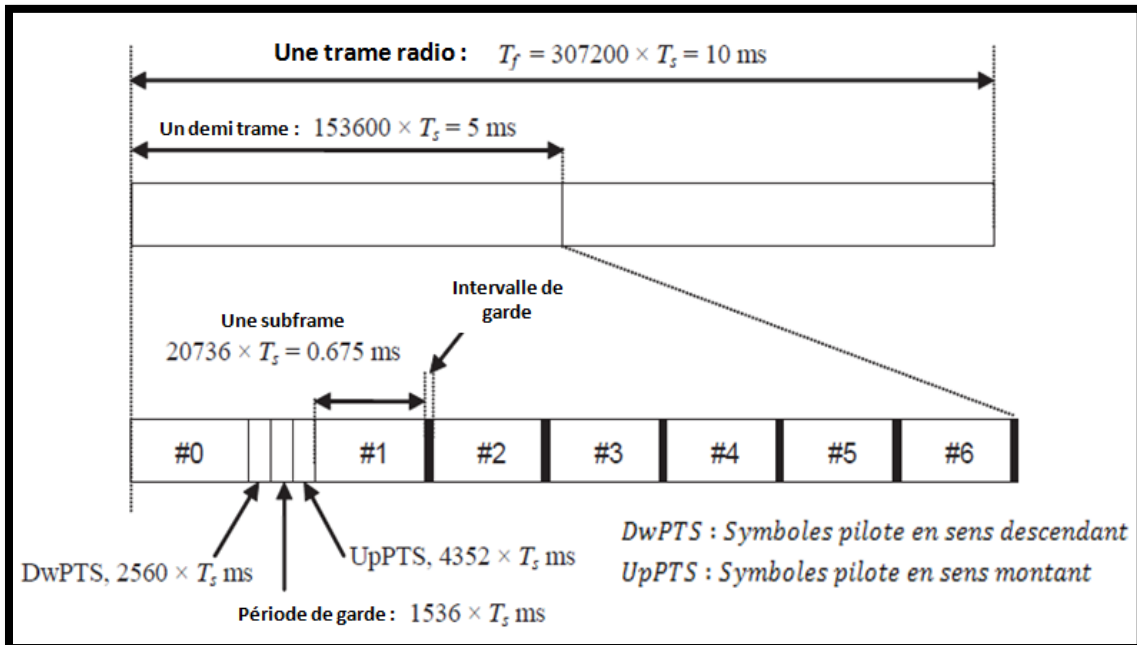
### II.3.1.2- La structure de la trame simulée en LTE.

La structure de la trame en LTE diffère selon le mode de transmission. Dans le mode ‘Pure FDD’, la transmission des données, en sens montant et descendant, se fait dans deux bandes différentes. La structure de la trame dans ce cas correspond à celle schématisée dans la figure 2.4, [48].



**Figure 2.4 :** Trame LTE dans le cas d’une transmission FDD.

Dans le cas d’une transmission en Mode ‘Pure TDD’, les transactions de données en sens montant et descendant se font sur la même bande. La structure de la trame en mode TDD est illustrée par la figure 2.5 [48].



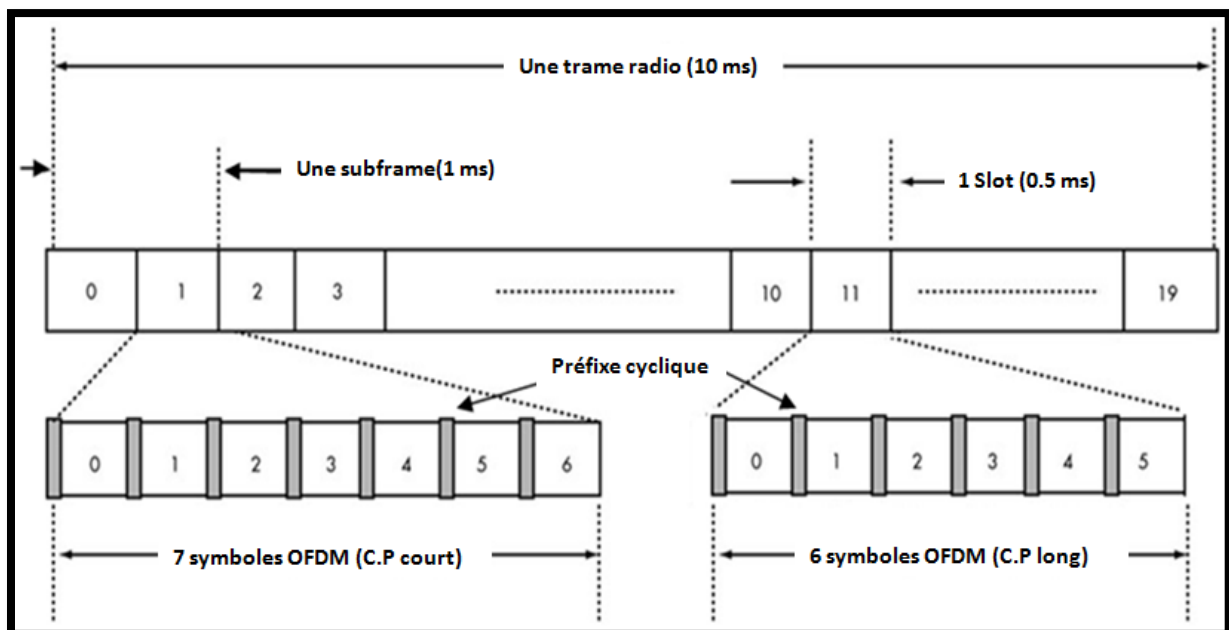
**Figure 2.5 :** Trame LTE dans le cas d’une transmission TDD.

Les deux types de trame LTE ont une durée 10 ms et elles sont divisés en 20 times slots, chaque 2 times slot constituent une Subframe. La différence entre les deux types réside dans le fait que durant la transmission en mode TDD le passage de l’envoi, en sens montant à

celui en sens descendant ou inversement, nécessite l'émission d'une Subframe spéciale. Cette dernière est constituée de trois périodes de temps bien définies. La première et la troisième période marquent la fin d'une période de transmission dans un sens (montant ou descendant) et le début d'une nouvelle période dans le sens inverse de la précédente, tandis que la deuxième période (Période de garde) assure un inversement de mode de transmission (montant ou descendant) sans interférence. Nous avons simulé les modes FDD, TDD et FDD/TDD combiné en sens descendant vu que notre sujet de recherche s'intéresse à la transmission en sens descendant uniquement.

La structure d'un time Slot en LTE, peut prendre deux formes selon la taille (court ou long) du cyclique préfixe constituant le symbole OFDM, correspondant à la somme d'un ensemble de sinusoides 'Subporteur' orthogonales entre elles portant chacune une information (symbole M-QAM).

La figure 2.6 présente, la structure simulée de la trame avec la représentation des deux types de time slot, que notre simulateur peut prendre en charge [48] :



**Figure 2.6 :** Types du time Slot simulé selon la taille du Cyclique préfixe constituant le Symbole OFDM.

### II.3.1.3- Simulation de l'ordonnement des utilisateurs.

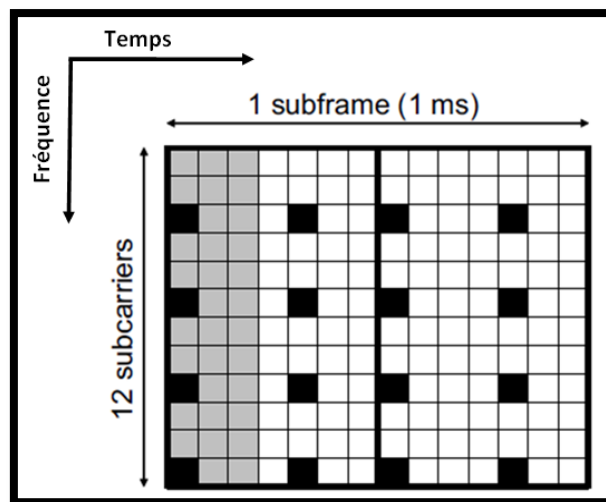
Dans la technique d'accès OFDMA ; simulée en sens descendant LTE ; le signal OFDM comporte un max de 2048 sous porteuses présentant un espacement de 15 kHz (pour respecter l'orthogonalité entre porteuses). Le signal OFDM peut être modulé par des symboles 4-QAM, 16-QAM ou 64-QAM.

En OFDMA, les utilisateurs se voient attribuer un nombre précis de sous-porteuses pour un time slot prédéterminé, appelées PRBs, (Physical Resource Blocks) ressources physiques.

Chaque PRBs a une dimension en temps et une autre en fréquence. Son affectation est gérée par une fonction de planification à la station de base (Algorithme d'ordonnancement).

La division des sous-porteuses en PRBs permet de compartimenter les données à travers des numéros standards de sous-porteuses. Comme le montre la figure 2.7 les PRBs sont composés d'une durée Subframe (1 ms) et de 12 sous-porteuses (bande de 180 KHz) et ce indépendamment de la bande passante globale du signal. Cela signifie que les différentes largeurs de bande des signaux LTE auront différents nombres de blocs de ressources.

Il y'a plusieurs types d'algorithmes d'ordonnancement, dans notre simulateur, nous avons adopté l'algorithme d'ordonnancement « round robin » car c'est l'ordonnanceur choisi par la 3GPP pour le milieu urbain en LTE.



**Figure 2.7 :** Structure d'un bloc de ressources simulé.

Le tableau suivant consigne l'ensemble des possibilités que notre simulateur peut prendre en charge, pour les paramètres physiques de transmission dans les bandes utilisées par LTE sans la technique d'agrégation du spectre [49].

**Tableau 2.1:** Paramètres possibles en simulation des schémas de transmission en sens descendant.

Bonde de transmission BW	1.4 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	
La durée du Sub-frame	0.5ms						
Espacement entre Sub-carrier	15 kHz						
Fréquence d'échantionnage	1.92 MHz (1/2 × 3.84 MHz)	3.84 MHz	7.68 MHz (2 × 3.84 MHz)	15.36 MHz (4 × 3.84 MHz)	23.04 MHz (6 × 3.84 MHz)	30.72 MHz (8 × 3.84 MHz)	
FFT size	128	256	512	1024	1536	2048	
Nombre de sub-carriers, occupés	76	151	301	601	901	1201	
Nombre de PRBs	6	12	25	50	75	100	
Nombre de symbole OFDM par sub frame (court (short)/Long CP)	7/6						
longueur du CP (µs/samples)	Court	(4.69/9)×6, (5.21/10) ×1	(4.69/18) ×6, (5.21/20) ×1	(4.69/36) × 6, (5.21/40) × 1	(4.69/72) ×6, (5.21/80) ×1	(4.69/108) ×6, (5.21/120) × 1	(4.69/144) × 6, (5.21/160) ×1
	Long	(16.67/32)	(16.67/64)	(16.67/128)	(16.67/256)	(16.67/384)	(16.67/512)

### II.3.1.4- Description du symbole OFDM simulé.

Le principe de simulation du symbole OFDM, consiste à répartir sur un grand nombre de sous-porteuses le signal numérique que l'on veut transmettre ; comme si l'on répartissait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (des émetteurs par exemple) indépendants et à des fréquences différentes.

Une description d'un modulateur OFDM de base est fournie à la figure 2.8. Il se compose d'une banque  $N_c$  de modulateurs complexes, où chaque modulateur correspond à une sous-porteuse OFDM. En bande de base, un signal OFDM  $x(t)$ , peut donc être exprimée en notation complexe, au cours de l'intervalle de temps  $(m T_u \leq t < (m + 1) T_u)$  par l'équation:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(m)} e^{j2\pi k\Delta f t} \quad (9)$$

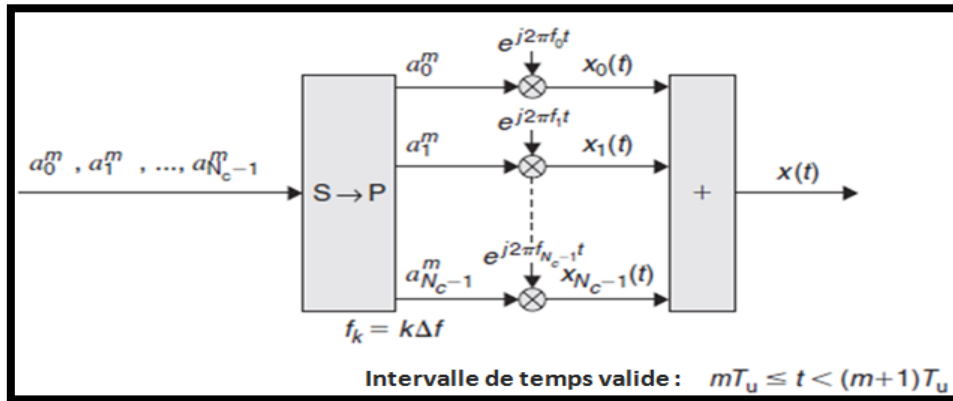
Où  $X_k(t)$  est la sous-porteuse modulée avec la fréquence  $f_k = k \cdot \Delta f$

Et  $a_k$  le symbole de modulation, complexe en général, appliquée à la sous-porteuse d'ordre  $k$  durant l'intervalle  $m$  du symbole OFDM, c'est à dire pendant l'intervalle de temps :

$(m T_u \leq t < (m+1) T_u)$ .

$T_u$  : est le temps de modulation d'un symbole par sous-porteuse.

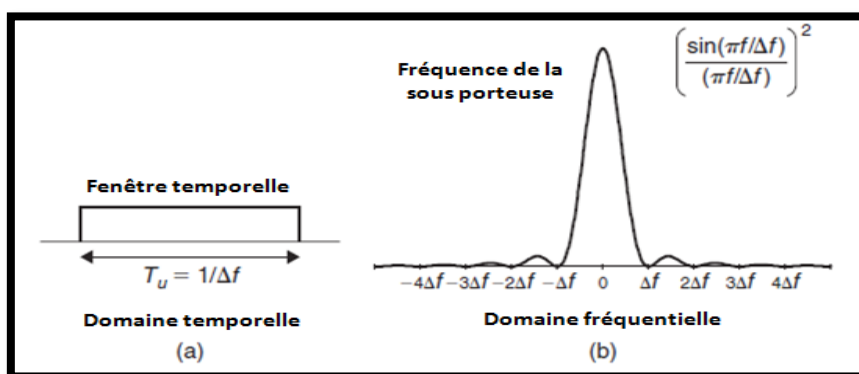
La transmission du symbole OFDM est basée sur des blocs. Ceci implique que, au cours de chaque intervalle d'un symbole OFDM, il y a  $N_c$  symboles de modulation qui sont transmis en parallèle. Les symboles de modulation gérées par notre simulateur peuvent être de n'importe quel ordre de modulation, tels que QPSK, 16QAM, ou 64QAM [2].



**Figure 2.8 :** Le modulateur OFDM.

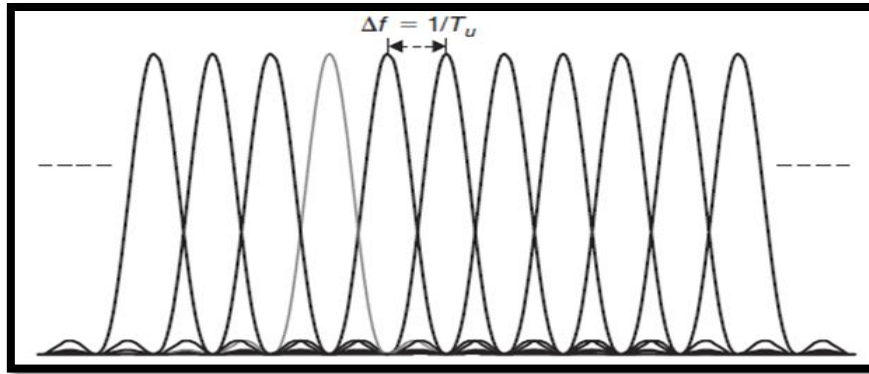
Les caractéristiques de base de la transmission OFDM, qui la distinguent d'une simple extension multi-porteuses d'une transmission à régime étroit, sont les suivantes :

- ✓ Une impulsion simple de forme rectangulaire (comme illustré dans la figure 2.9 a) correspond à un spectre sin-carré par sous-porteuse, (comme illustré dans la figure 2.9 b) [2].



**Figure 2.9 :** Forme des impulsions et le spectre d'une sous-porteuse OFDM.

- ✓ Les sous-porteuses sont serrées dans le domaine fréquentiel ; soit un espacement de  $f = 1/T_u$ , où  $T_u$  est le temps de modulation d'un symbole par sous-porteuse. La figure 2.10 en donne une illustration.



**Figure 2.10 :** Espacement des sous porteuses OFDM.

Pour 3GPP LTE et notre simulateur, l'espacement sous-porteuses de base est de 15 kHz. Par ailleurs, le nombre de sous-porteuses dépend de la largeur de bande de transmission, avec dans l'ordre de 1200 sous-porteuses en cas de fonctionnement dans un spectre de 20MHz comme déjà expliqué dans le tableau 2.1. Le terme Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence est dû au fait que deux sous-porteuses OFDM modulées  $x_{k1}(t)$  et  $x_{k2}(t)$  sont orthogonales entre elles au cours de l'intervalle de temps  $m T_u \leq t < (m+1) T_u$  [48].

Les signaux des différentes sous-porteuses se chevauchent mais grâce à l'orthogonalité n'interfèrent que faiblement.

En codage orthogonal, l'espacement entre chaque sous-porteuse doit être égal à :

$$\Delta f = (f_q - f_{q+1}) = \frac{n}{T} \text{ Hz} \quad (10)$$

Cela implique que l'interaction entre sous porteuses est approximativement nulle telle que :

$$\int_0^T \cos(2\pi f_q t + \varphi) * \cos(2\pi f_{q+1} t) dt \approx 0 \quad (11)$$

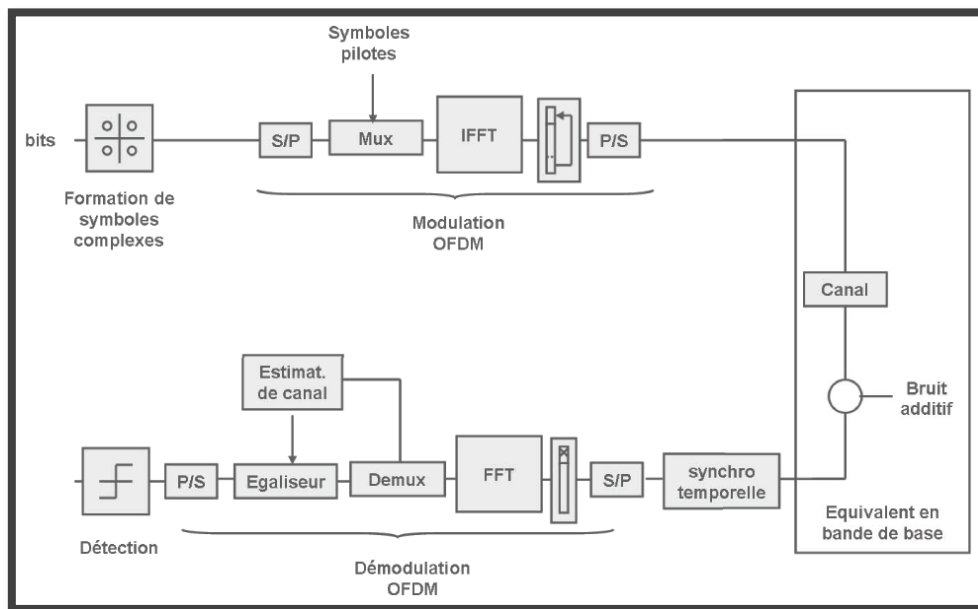
Où T est la durée utile d'un symbole (c.à.d. la taille de la fenêtre de capture du récepteur), et n est un entier positif, généralement égal à 1. Par conséquent, avec N sous-porteuses la largeur totale de la bande passante sera de  $B \approx N \cdot \Delta f$  (Hz).

La pseudo-orthogonalité produit un spectre de fréquence presque plat, ce qui entraîne le minimum d'interférences avec les canaux adjacents. Un filtrage séparé de chaque sous-porteuse n'est pas nécessaire pour le décodage. Une transformée de fourrier FFT étant suffisante pour séparer les porteuses entre elles, ce qui justifie l'utilisation de la FFT dans le script développé du schéma bloc du récepteur de notre simulateur. (Voir II.3.4).

### II.3.1.5- Les opérations réalisées pour simuler la transmission et la réception dans l'interface E-UTRAN.

L'OFDM divise une bande de fréquence en plusieurs sous-canaux espacés par des zones libres de tailles fixes. Par la suite, un algorithme, de Transformée de Fourier Rapide Inverse (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT), véhicule le signal par le biais des différents sous-canaux. Cet algorithme s'occupe également de la recombinaison du message chez le récepteur par l'utilisation d'une FFT inverse.

Le schéma de la figure 2.11 [2], donne une vision globale sur l'ensemble des opérations numériques simulées, pour générer un symbole OFDM à partir de l'émetteur puis le récupérer au récepteur :



**Figure 2.11** : Schéma bloc des opérations numériques pour simuler l'émission, le canal et le récepteur OFDM.

Au transmetteur, sont appliquées les opérations numériques suivantes :

- Formation de la séquence de symboles complexes, M-QAM.
- Formation de blocs de symboles (« serial-to-parallel - S/P »).
- Multiplexage (formation de paquets d'information et insertion des symboles pilotes).
- Transformée de Fourier inverse discrète ("Inverse fast Fourier transform - IFFT").
- Addition d'un préfixe cyclique.
- Formation d'une séquence d'échantillons ("parallel-to-serial - P/S").

Au canal radio mobile :

- Ajout de l'effet multi trajets pour chaque symbole envoyé.
- Ajout du bruit SINR pour chaque symbole envoyé en fonction du facteur des interférences «  $\alpha$  ».
- Les évanouissements de parcours ne sont pas intégrés dans notre simulateur. Vue que dans nos simulations le signal de l'utilisateur est calculé par rapport aux facteurs SNR et «  $\alpha$  ». (Voir II.3.2.2)

Au récepteur, les opérations numériques suivantes sont appliquées :

- Synchronisation temporelle.
- Formation de blocs d'échantillons reçus ("serial-to-parallel - S/P").
- Suppression du préfixe cyclique.
- Transformée de Fourier discrète ("fast Fourier transform - FFT").
- Démultiplexage (séparation des échantillons reçus correspondants aux symboles d'informations et aux symboles pilotes).
- Estimation et égalisation du canal.
- Formation d'une séquence de symboles estimés ("parallel-to-serial - P/S").
- Détection des symboles.

Après une vue d'ensemble sur les paramétrages possibles que peut fournir notre simulateur, la partie II.3.2, donne une présentation détaillée des modules développés et utilisés dans nos simulations, utilisés pour déterminer l'impact du SINR sur la capacité du LTE en sens descendant.

### **II.3.2- Modèle et scripts de simulation.**

Dans notre étude nous avons opté pour la simulation de la transmission FDD dans toute la bande passante 20Mhz et l'utilisation du préfixe cyclique court. Le canal de propagation radio mobile sera modélisé par effet multi trajets (modèle de Rayleigh), et par l'intégration des interférences rapport aux facteurs SNR et le facteur des interférences «  $\alpha$  ». Le choix de ces paramètres se justifie par le besoin de voir l'impact du facteur «  $\alpha$  », sur la capacité maximale que peut offrir le système LTE pour un milieu urbain.

Dans la suite de cette partie, nous allons présenter les opérations réalisées par les modules (scripts Matlab) utilisés pour nos simulations.

### II.3.2.1- Modèle de l'émetteur OFDM simulé :

L'opération de simulation de la transmission d'un symbole OFDM dans l'interface E-UTRAN, passe par un ensemble d'étapes (modules) développés sous forme de scripts Matlab schématisées par la figure 2.12 :

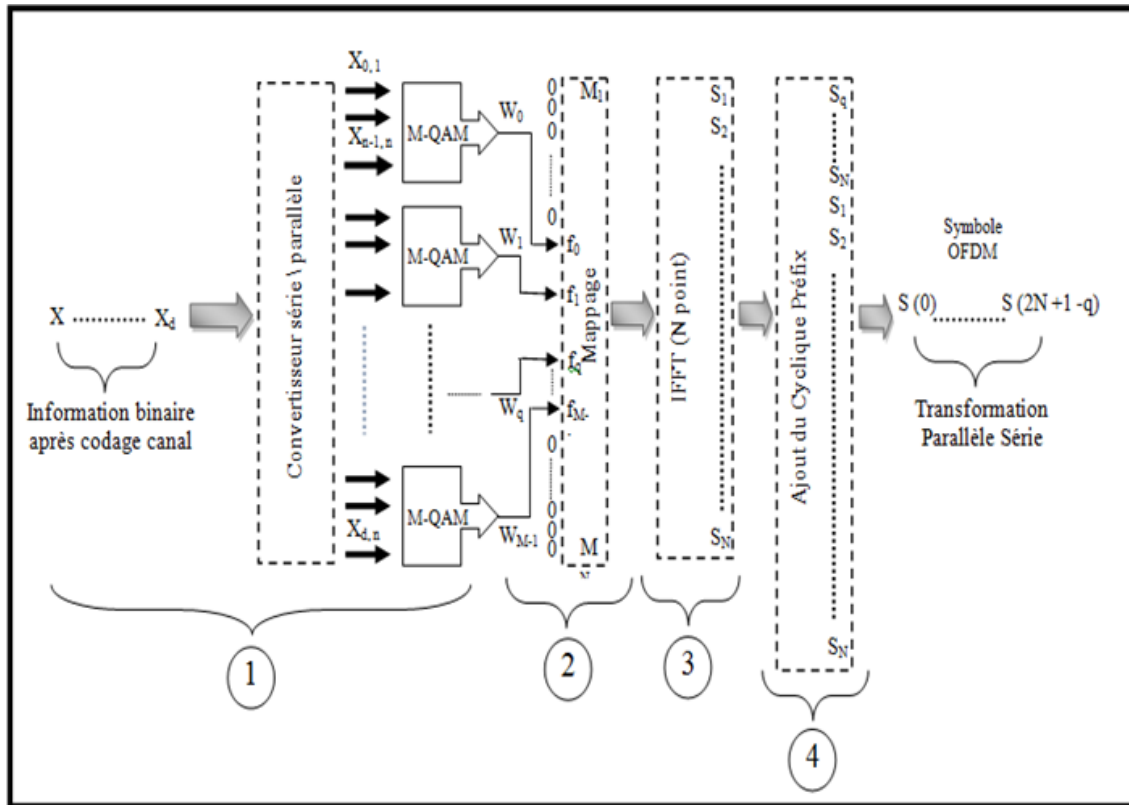


Figure 2.12 : Les modules de l'opération de transmission d'un Symbole OFDM simulé.

Dans le Tableau 2.2, nous avons regroupé les paramètres initiaux de simulation de l'émetteur OFDM dans la bande 20MHz.

Tableau 2.2: Paramètres de simulation dans la bande 20MHz.

<b>Bande de transmissions BW</b>	20 MHz	<b>Nombre des sous-porteuses occupées</b>	1201
<b>Durée du sub-frame</b>	0.5ms	<b>Nombre des PRBs</b>	100
<b>Espacement des sous-porteuses</b>	15 kHz	<b>Nombre des symboles OFDM par sub-frame (Court/Long CP)</b>	7/6
<b>Fréquence d'échantillonnage</b>	30.72 MHz (8 × 3.84 MHz)	<b>Taille CP (µs/échantillon)</b>	144 (court)
<b>Taille de la FFT</b>	2048		

### Étape 1 : module de Bufférisassions, conversion série parallèle puis Modulation :

Le premier script effectue les opérations suivantes :

La première consiste à générer aléatoirement les données utilisateur telle que :

$x_u = (x_0, \dots, x_d)$  avec  $x_i = 0$  ou  $1$  (information binaire de l'utilisateur)

$$d = (\text{nb}_{\text{symb}} * \text{nb}_{\text{bit}_{\text{psym}}} * n) - 1$$

avec :

$\text{nb}_{\text{symb}}$  : nombre de symboles OFDM affecté a l'utilisateur.

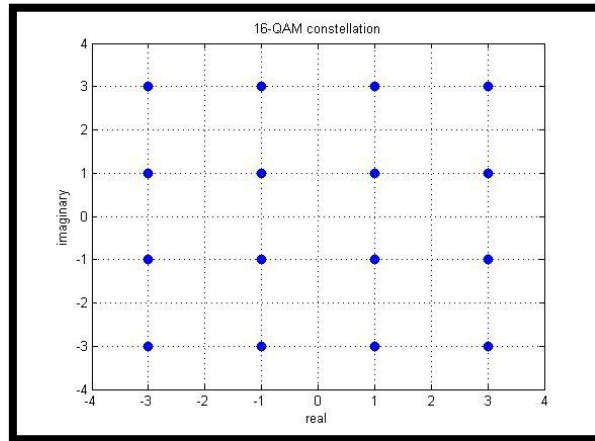
$\text{nb}_{\text{bit}_{\text{psym}}}$  : nombre de sous – porteuses occupées (1201).

$n = \log_2(M)$  ou  $M$  représente l'ordre de la constellation M – QAM.

L'opération suivante consiste à moduler le vecteur  $x_u$  selon la constellation choisie :

4-QAM ( $n = 2$ ) /16-QAM ( $n = 4$ ) ou 64-QAM ( $n = 6$ ), l'énergie de chaque symbole M-QAM ( $M = 2^n$ ) est normalisée à 1 par multiplication avec un facteur de normalisation  $\beta$  qui est déterminé comme suit :

On considère la constellation M-QAM telle que :



**Figure 2.13** : Exemple de constellation.

$$\alpha_{M-QAM} = \{\pm(2m - 1) + \pm(2m - 1)j\}$$

$$tq : m \in \left\{1, \dots, \frac{\sqrt{M}}{2}\right\}$$

Pour déterminer l'énergie d'un symbole M-QAM on considère les informations suivantes :

1. Chaque quadrant a  $\frac{M}{4}$  point de constellation.

2. L'énergie des parties réelle et imaginaire est la même vu la symétrie de la constellation.
3. Dans chaque quadrant les valeurs des points de constellation sont indiquées par  $\frac{\sqrt{M}}{2}$  valeurs réelle et imaginaire.

D'où l'expression de l'énergie d'un symbole :

$$E_{M-QAM} = 2E \left[ \left| \text{Real}(\alpha_{M-QAM}) \right|^2 \right] \quad (12)$$

Ce qui donne :

$$E_{M-QAM} = \frac{2\sqrt{M}}{M} \sum_{m=1}^{\frac{\sqrt{M}}{2}} (2m - 1)^2 \quad (13)$$

$$E_{M-QAM} = \frac{2}{3} (M - 1) \quad (14)$$

Donc pour normaliser l'énergie du symbole à 1 on multiplie par :  $\beta = \frac{1}{\sqrt{\frac{2(M-1)}{3}}}$

La 3ème opération réside dans le procédé de normalisation des symboles M-QAM, qui conduit à un vecteur  $W_u$  de taille  $M = (\text{nb}_{\text{symb}} * \text{nb}_{\text{bit}_{\text{psym}}})$  de symboles M-QAM.

### Étape 2 : Module de mappage des symboles M-QAM :

Le script de mappage affecte à chaque sous-porteuse un Symbole (M-QAM) et laisse une bande de garde contre les interférences inter-Symboles OFDM.

La figure 2.14, donne un schéma de l'opération de mappage réalisé par le script pour la bande 20Mhz.

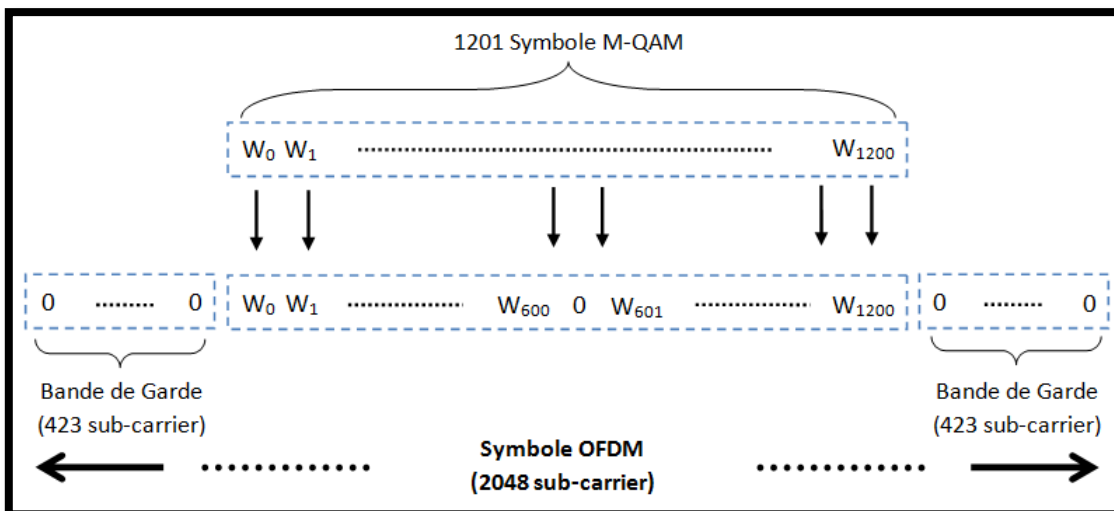


Figure 2.14: Opération de Mappage.

### Étape 3 : Module de génération du signal par une IFFT (passage des composantes fréquentielles au temporelles) :

Les composantes temporelles du signal sont générées par l'application du script IFFT.

Le signal en sortie est égal à :

$$s(n) = \sum_{k=1}^N M(k) e^{j2\pi \frac{(k-1)(n-1)}{N}} \text{ avec } 1 \leq n \leq N \quad (15)$$

Où  $M(k)$  désigne les composantes fréquentielles du symbole OFDM.

$N = 2048$  (Nombre des sous porteuses).

$N_p$  : Nombre de sous porteuses portant l'information utile.

L'énergie de  $S(n)$  est égale à :

$$E[S(n)] = \sum_{i=1}^N |M(i)|^2 E_{M-QAM} \quad (16)$$

Alors :

$$E[S(n)] = N * E_{M-QAM} \text{ avec } |M(k)| = 1 \text{ pour } 1 \leq k \leq N_p \quad (17)$$

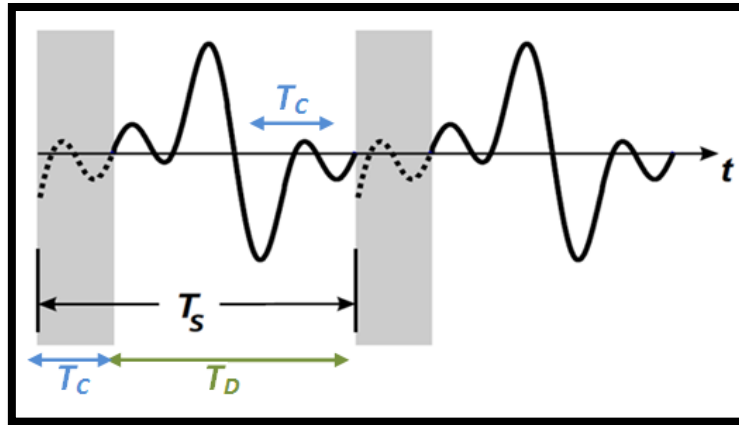
Afin de normaliser l'énergie du Symbole OFDM à l'unité, le script utilisé multiplie  $S(n)$  par un facteur :  $\theta = \frac{1}{\sqrt{N_p E_{M-QAM}}}$

L'objectif de la normalisation du symbole OFDM par le facteur «  $\theta$  » est de produire un symbole OFDM de puissance normalisée à l'unité, afin de réduire la complexité des calculs en fonction des puissances dans les simulations.

### Étape 4 : Module d'ajout du préfixe cyclique :

L'ajout d'un préfixe cyclique consiste à augmenter la durée du Symbole transmit par addition d'un nombre prédéterminé de composante du signal à transmettre au début de chaque symbole. Une telle opération a pour effet de combattre les interférences inter-symboles permettant au récepteur de choisir sur un large intervalle de temps la partie du signal non affectée par les interférences inter symboles à choisir pour le décodage.

La figure suivante donne une illustration de l'opération effectuée par le script pour ajouter  $T_C$



**Figure 2.15 :** Ajout du court préfixe cyclique pour un Symbole OFDM.

Afin de réaliser la procédure d'ajout du préfixe cyclique court, le script procède comme suite :

Il considère comme entrée le symbole initial de durée  $T_D$  avec :

$$T_D = 66,67 \mu s \text{ soit } T_D = 2048 \text{ point}$$

Puis prend les derniers points du symbole initial " $T_C$ " et les ajoutes au début de ce dernier :

$$T_C(\text{préfixe Court}) = 4,6875 \mu s = 144 \text{ points}$$

L'objectif étant de construire le nouveau symbole de durée  $T_S$ .

$$T_S (\text{Temps du nouveau symbole OFDM})$$

$$T_S = T_D + T_C = 71,3575 \mu s$$

A la sortie de l'émetteur, le symbole OFDM est envoyé au script qui modélise le canal de transmission radio mobile.

### **II.3.2.2- Modèle du canal de transmission radio mobile simulé.**

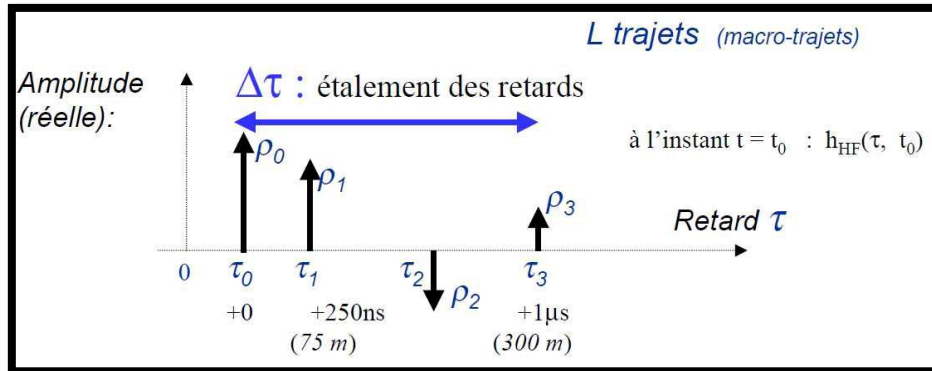
Le canal radio-mobile est modélisé par le canal de Rayleigh, qui a deux effets principaux : Effet des multi-trajets et le Modèle du Bruit dans le milieu de transmission.

#### **II.3.2.2.1- Effet des multi-trajets.**

Le signal transmis peut suivre un ou plusieurs trajets différents indépendants entre eux avec des atténuations différentes ; telle que la somme des énergies des différents signaux issus des différents trajets soit égale à l'énergie du signal émis.

Le canal considéré dans nos simulations est un canal de Rayleigh à L trajets avec des retards fixes, dont le profil est similaire à celui représenté dans le schéma de la figure 2.16

Il est à noter que les coefficients d'atténuation sont complexes (atténuation et déphasage).



**Figure 2.16 :** Réponse impulsionnelle du canal de transmission radio simulé.

Le script du modèle de Rayleigh confère au canal de transmission les propriétés suivantes :

- La transmission du signal s'effectue suivant un nombre de trajets L.
- Le signal transmis suivant chaque trajet marque un retard  $\tau_i$
- Le signal suivant chaque trajet subit aussi un affaiblissement et un déphasage. On quantifie cette modification par des coefficients de Rayleigh  $\alpha_i$  complexes et indépendants pour chaque trajet.

On suppose aussi une conservation de la puissance au niveau du canal (en considérant qu'il n'y a pas de phénomène de perte de parcours (PathLoss, d'absorption, ...)).

Cela se traduit par la contrainte :  $\sum_{i=1}^L |\alpha_i|^2 = 1$

### II.3.2.2.2- Modèle du Bruit dans le milieu de transmission.

Après effets multi-trajets, le script bruit ajoute au signal un bruit blanc SNR et les bruits des interférences caractérisées par le SIR (facteur  $\alpha$ ) comme présenté dans les étapes a et b suivantes :

a) Ajout de bruit blanc gaussien de variance :

$$\sigma = \sqrt{\text{SNR}} \text{ où } \text{SNR} = \frac{E_S}{N_0}$$

Pour ajouter le bruit blanc il faut déterminer l'énergie bit  $E_b$  du symbole OFDM en fonction du SNR : (voir la démonstration en annexe) :

$$\text{SNR} = \frac{E_S}{N_0} = \frac{T_D}{T_C + T_D} \frac{N_p}{\text{NFFT}} n \frac{E_b}{N_0} \quad (18)$$

Avec  $E_S$  : énergie du Symbole OFDM,

$T_D$  : durée du Symbole OFDM sans Cyclique préfix,

$T_C$  : durée du Cyclique préfix,

$N_p$  : le nombre de symboles M-QAM dans un symbole OFDM,

**NFFT** : nombre de point dans un Symbole OFDM,

$n$  : le nombre de bit dans un Symbole M-QAM,

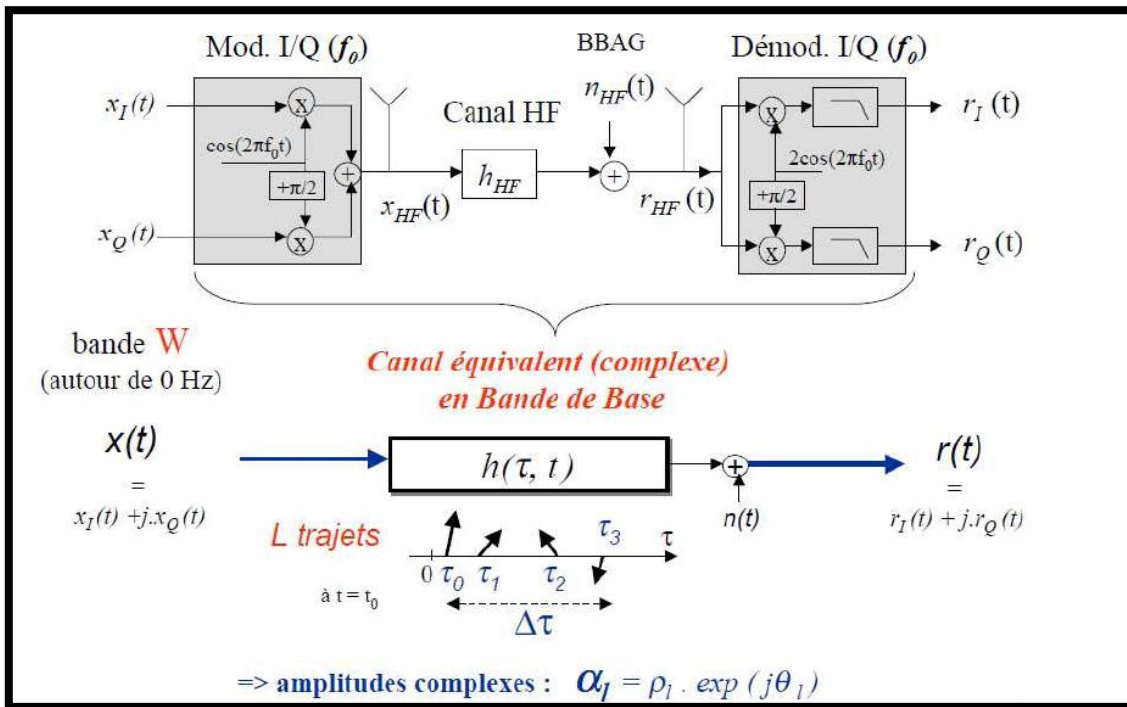
$E_b$  : énergie du bit.

**b)** Ajout du bruit des interférences SIR :

Après ajout du bruit blanc, le script additionne le signal, des interférences intercellulaires, issue des autres cellules en fonction de la valeur du facteur «  $\alpha$  »

avec  $\alpha = 10 \log_{10}(\gamma)$ ,  $\text{SIR} = \frac{1}{\gamma} = \frac{P_{\text{utilisateur } k}}{P_{\text{interference}}}$  et  $\gamma = \frac{\sum_{i \neq s} P^i(m, f) |H_k^i(m, f)|^2}{P^s(m, f) |H_k^s(m, f)|^2} = \frac{P_{\text{interference}}}{P_{\text{utilisateur } k}}$

Tenant compte des opérations a et b, le canal de transmission radio mobile peut être schématisé sur la figure 2.17 :

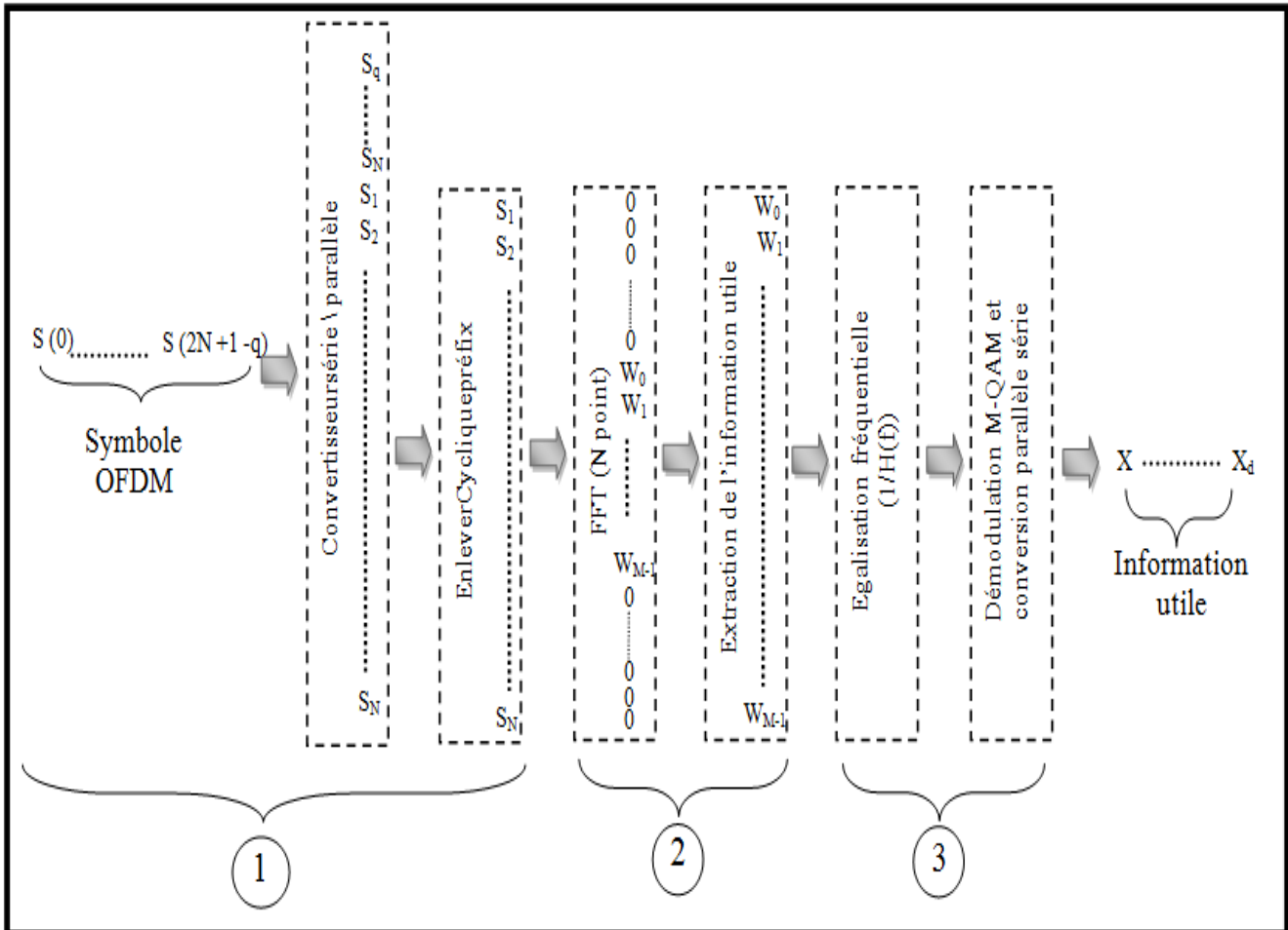


**Figure 2.17** : Modélisation du système de transmission radio simulé.

Le signal radio en sorti du script canal radio mobile est envoyé au script récepteur.

### II.3.2.3- Modèle du Récepteur OFDM simulé.

La simulation du récepteur OFDM de l'interface radio E-UTRAN, a nécessité le développement de modules sous forme de scripts, schématisés sur la figure 2.18, ils décrivent les différentes étapes de reconstitution des bits de données envoyés par l'émetteur.



**Figure 2.18 :** Modèle du récepteur OFDM simulé.

Les modules (scripts) qui interviennent dans le modèle du récepteur E-UTRAN sont comme suit :

1. Le script de synchronisation niveau Symbole, et conversion série /parallèle puis extraction du préfixe cyclique.
2. Le script d'extraction de l'information contenue dans chaque sous porteuse par utilisation de la FFT.
3. Le dernier module, fait une égalisation (Zéro forcing) en utilisant les coefficients du canal sans estimation. L'opération d'égalisation est réalisée par multiplication des composantes fréquentielle du signal reçu sans préfixe cyclique, avec l'inverse de la réponse fréquentielle du filtre modélisant le canal multi-trajets. Ceci a pour effet l'annulation approximative des effets des multi-trajets. Le signal en sortie de l'égalisateur est représenté par la formule :

$$S_e(f) = \frac{S(f)}{H(f)} \text{ avec } H(f) = \text{TF}[h(t)] \quad (19)$$

$h(t)$  étant la réponse impulsionnel du canal radio modélisant l'effet multi – trajets.

A la sortie de l'égalisateur, le script procède à la démodulation des symboles M-QAM, suivi de la conversion parallèle /série pour obtenir les bits des données envoyées par l'émetteur.

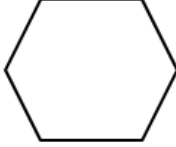
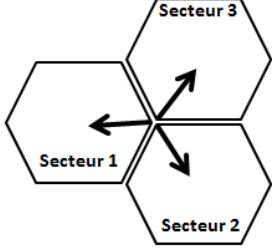
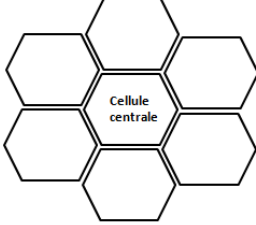
Pour donner les résultats des simulations, on procède à la comparaison des bits de données émises et celles reçus par le récepteur.

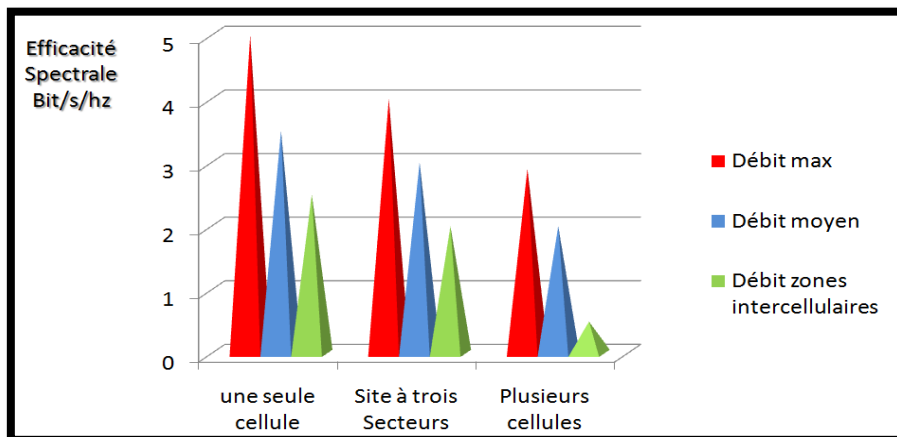
La partie II.3.3, donne les résultats issus de notre simulateur des trois types de répartitions cellulaires étudiés.

### **II.3.3- Simulation de l'impact des interférences.**

Pour mettre en exergue l'impact des interférences sur la capacité totale de la cellule LTE, la figure 2.19 consigne les résultats de simulation de l'efficacité spectrale de la cellule LTE conformément au modèle de notre simulateur déjà présenté dans la partie II.3.2. Une telle simulation a été effectuée avec trois types de répartitions cellulaires comme présenté dans le tableau 2.3 et a conduit aux résultats rapportés par la Figure 2.19.

**Tableau 2.3:** Les paramètres de simulation simplifié du LTE.

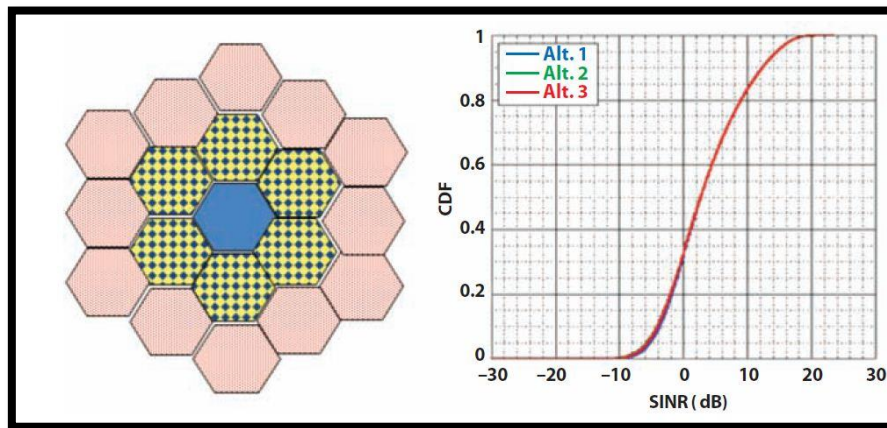
	Une seule cellule	Un site avec trois secteurs	Plusieurs cellules
<b>Schéma de simulation</b>			
<b>Utilisateurs (Position fixe)</b>	Un utilisateur <b>SNR = 5dB</b> (Proche de la cellule), <b>SNR = 0dB</b> (bordure de la cellule) (Sans interférence)	Un utilisateur à chaque secteur <b>SNR = 5dB et <math>\alpha=0dB</math></b> (Centre cellule), ( <b>SNR = 0dB et <math>\alpha=4dB</math></b> ) (Bordure de la cellule)	Un utilisateur au centre de chaque cellule <b>SNR = 5dB et <math>\alpha=2dB</math></b> (Centre cellule), ( <b>SNR = 0dB et <math>\alpha=10dB</math></b> ) (Bordure de la cellule)
<b>Bande passante</b>	20 Mhz	20 Mhz par secteur	20 Mhz par cellule
<b>Ordonnancement</b>	L'utilisateur utilise simultanément toute la bande passante (100 Mb/s)	Chaque utilisateur utilise simultanément toute la bande passante (100 Mb/s)	Chaque utilisateur utilise simultanément toute la bande passante (100 Mb/s)
<b>Facteur d'interférences intercellulaires <math>\alpha = 10\log_{10}(\gamma)</math> (Voire la partie II.1)</b>	Sans interférence	$\alpha=4dB$	$\alpha=10dB$
<b>Fréquence centrale</b>	Fc= 2.14Ghz		
<b>Puissance de l'antenne émettrice</b>	46 dBm (émission en continue)		



**Figure 2.19 :** Efficacité spectrale de la cellule dans de différentes répartitions cellulaires simulées.

Avec une simulation en temps réel simplifiée, il est clair que la réutilisation fréquentielle entraîne l'augmentation des interférences ce qui implique que l'efficacité spectrale de la cellule LTE se dégrade atteignant un taux de perte de 50 %, ce qui rend les interférences un des problèmes les plus néfastes sur le système LTE.

Pour le système LTE, les performances sont estimées par les résultats des tests de simulation conformément au modèle de la 3GPP. La figure 2.20 montre le modèle 3GPP utilisé pour simuler la performance du système LTE [2].



**Figure 2.20 :** Modèle 3GPP pour simuler les performances du système LTE.

Selon le modèle 3GPP, les valeurs du SINR sont rarement en dessous de - 8 dB. Le modèle du réseau d'essai urbain de la 3GPP ne contient que 19 stations de base hexagonale avec des antennes simples OMNI avec densité de population uniforme et la mobilité à moins de 30 kilomètres par heure. Les quelques cellules voisines ne contribuent pas suffisamment à l'interférence de la cellule même si elles sont totalement chargées.

Avec le modèle et les résultats de la 3GPP, il semble que les interférences intercellulaires en LTE ne sont pas importantes si elles viennent des cellules qui sont physiquement loin de la cellule centrale. Ce n'est pas toujours vrai dans le cas des zones urbaines où les cellules sont proches et la vitesse de la mobilité peut réellement aller jusqu'à 60 kilomètres par heure.

Considérant ces conditions, et dans l'objectif de montrer l'impact réel de ce phénomène sur l'expérience des utilisateurs, ainsi que sur la capacité du système, nous avons développé des modèles ; plus réalistes ; de simulation des interférences intercellulaires pour LTE. Ils font l'objet de la prochaine partie de ce travail.

## **II.4- Simulations des interférences intercellulaires en lien radio descendant LTE dans un environnement multicellulaire Urbain.**

L'ensemble des simulations de la partie II.4, utilisent le noyau du code source Matlab « **Vienna LTE Simulators LTE-A Link Level Simulator** » [45]. Ce code source modélise les différents éléments d'un réseau LTE, ainsi que les différents phénomènes et protocoles intervenant lors d'une communication sur le lien radio descendant. Cette modélisation se présente sous forme de fichiers et dossiers imbriqués entre eux, dont la plupart sont basés sur la notion de la programmation orientée objet de telle façon que chaque élément du réseau est modélisé sous forme d'objet.

En vue de réaliser un simulateur fiable pour le LTE, une collaboration a été mise en place entre la faculté des sciences et techniques et l'institut des télécommunications à l'université des technologies de Vienna en Autriche. Elle nous autorise à utiliser sous licence, les scripts Matlab des objets « LTE-A Link Level Simulator », développés par l'université des technologies de Vienna.

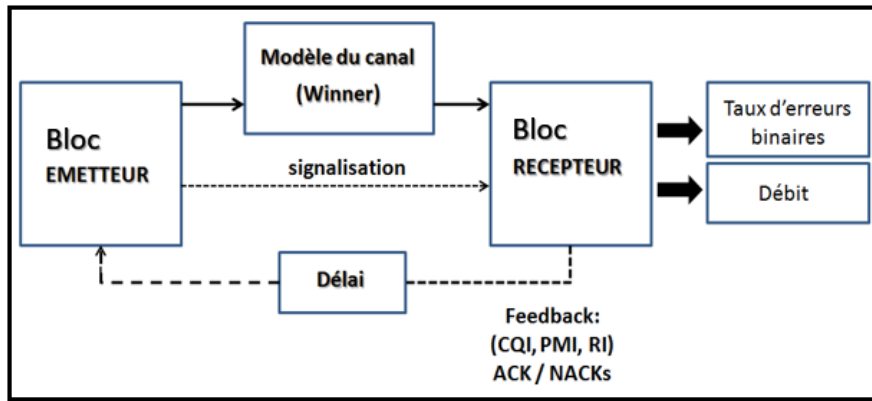
Alors nous avons utilisés les objets développés par le simulateur LTE, pour construire nos propres modèles de simulations qui satisfaits les exigences de la 3GPP pour les milieux urbains, dans le but de voir l'impact réel sur la qualité de transmission en sens descendant sur le système LTE.

### **II.4.1- Structure du simulateur « THE VIENNA LTE-A LINK LEVEL SIMULATOR » modélisé.**

Le simulateur de niveau Liaison de données, est divisé en trois blocs : bloc émetteur, bloc modèle canal radio mobile et bloc récepteur [50].

Selon le type de la simulation, une ou plusieurs instances de ces composantes de base sont utilisées.

La figure 2.21, montre le schéma du simulateur pour nos modèles des simulations en sens descendant pour le LTE :



**Figure 2.21** : Schéma du simulateur pour nos modèles des simulations en sens descendant.

Les blocs émetteur et récepteur sont reliés par le modèle de canal, qui est utilisé pour transmettre les données de la liaison descendante, tandis que la signalisation et le retour du canal montant est supposé être sans erreur. L'hypothèse du non erreur sur la signalisation et le retour peut être acceptable vu que les canaux de signalisation sont plus robustes que les canaux de données avec leurs codages réduits et leurs faibles taux de modulations.

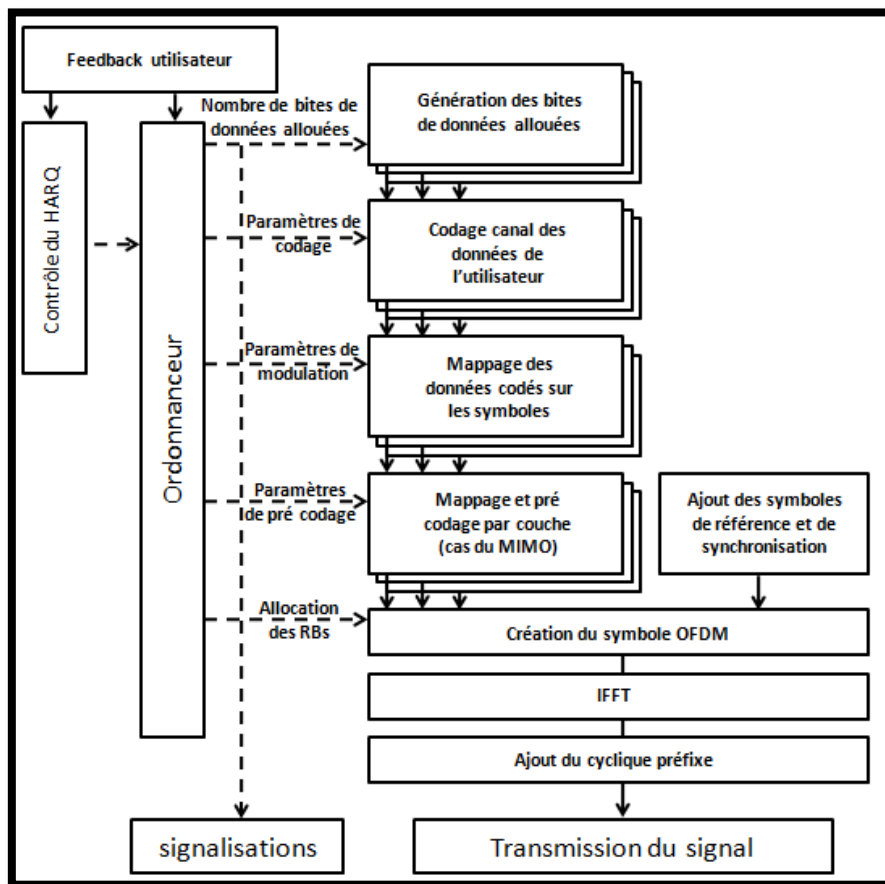
Sur la liaison descendante, l'information de signalisation transmise par l'émetteur au récepteur contient le HARQ codé, l'ordonnancement et les paramètres de pré codage. Sur la liaison montante, elle contient le Canal Indicateur de la qualité (CQI : Channel Quality Indicator), la Matrice d'indicateurs Pré codage (PMI : Precoding Matrix Indicator), et l'indicateur de rang (RI : Rank Indicator). Ces trois paramètres sont nommés la Chaîne d'Information d'Etat (CSI : Channel State Information).

#### - Structure de l'émetteur simulé :

Comme illustrée à la figure 2.22, cette structure est essentiellement une représentation graphique de la description de l'émetteur défini dans la série du standard TS36 [47-49]. Elle est équivalente au modèle de l'émetteur OFDM présenté dans la partie II.2 pour le cas mono utilisateur. Le nouveau simulateur est par contre basé sur un modèle multi utilisateurs ainsi que sur le retour d'information de la signalisation de l'équipement utilisateur (UE). Un algorithme d'ordonnancement attribue des blocs de ressources (RBS) aux UES et établit un MCS approprié (codage des taux compris entre 0,076 et 0,926 avec 4, 16, ou 64 modulation QAM).

L'émetteur permet le mode de transmission MIMO (Transmit Diversity (TxD), le multiplexage spatial en boucle ouverte (OLSM), ou le multiplexage spatial en boucle fermée (CLSM).

La figure 2.22 présente la structure de l'émetteur implémenté dans le simulateur LTE-A Vienna



**Figure 2.22 :** La Structure de l'émetteur implémenté dans le simulateur LTE-A Vienna.

- **Modèle du canal radio mobile simulé :**

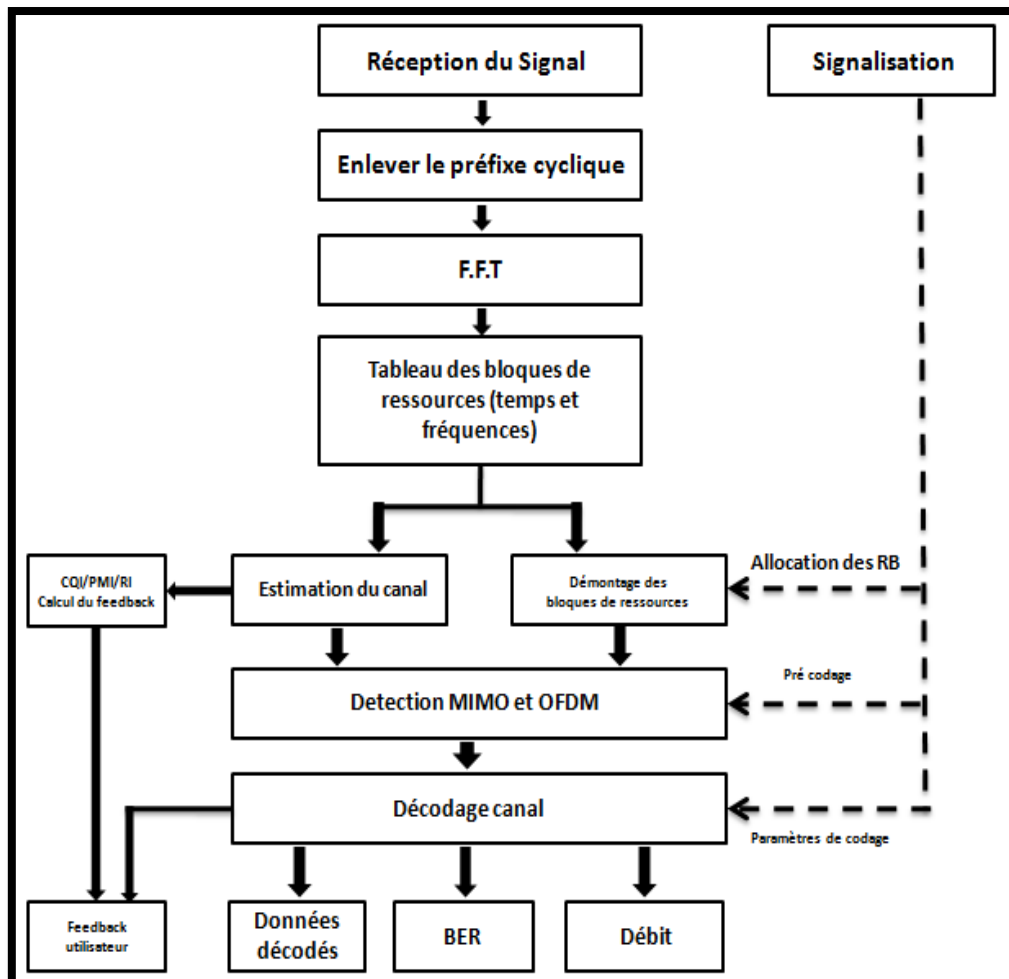
Le simulateur LTE-A Vienna supporte les évanouissements en bloc et les évanouissements rapides. Dans le cas des évanouissements en bloc, le canal est considéré constant durant la période de transmission d'un semi-bloc de 1ms. Dans le cas des évanouissements rapides, les réponses impulsionnelles des canaux corrélés en temps sont générées pour chaque échantillon du signal transmis.

Le simulateur LTE-A Vienna supporte plusieurs modèles des évanouissements rapides. Mais dans le cas de nos simulations on opte pour l'intégration du script du modèle « Winner II model » [51]. C'est une évolution du modèle de canal spatial 3GPP qui introduit des fonctionnalités supplémentaires telles que le soutien des motifs des antennes 3D.

- **Structure du récepteur simulé :**

Après démontage des blocs de ressources (RB) selon l'allocation des ressources affectées à l'utilisateur, la détection du MIMO OFDM (MIMO Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est effectuée et suivie par la procédure de détection des symboles OFDM. Le simulateur prend en charge plusieurs algorithmes de détection : le (Zero-Forcing) (ZF), (Linear Minimum Mean Squared Error) (LMMSE) et soft sphere decoding [52]. A la fin de la procédure les bits détectés sont décodés pour obtenir les bits de données et plusieurs facteurs de mérite, tels que BER codée / non codée, BLER, et le débit que nous allons utiliser pour l'analyse des résultats de nos simulations.

La figure 2.23 présente la structure du récepteur implémenté dans le simulateur LTE-A Vienna :



**La Figure 2.23 :** La Structure du récepteur implémenté dans le simulateur LTE-A Vienna.

La partie II.4.2, donne une description générale des paramètres et hypothèses utilisés dans nos simulations du LTE en milieu urbain.

#### II.4.2- Les principaux paramètres des modèles simulés.

Les modèles et les hypothèses des simulations que nous avons réalisées sont alignés avec les recommandations de la 3GPP pour les milieux urbains [2]. Le tableau 2.4 renferme les principaux paramètres de nos simulations pour le LTE en milieu urbain. La méthode d'évaluation est basée sur les simulations en temps réel des systèmes multicellulaires.

La simulation en temps réel des systèmes multicellulaires, est une technique qui permet de simuler les composantes physiques des systèmes multicellulaires, afin de les tester avant le déploiement réel.

**Tableau 2.4:** Les paramètres principaux des simulations LTE (A, B et C) en milieu urbain.

<b>Modèles des simulations</b>	<b>Modèle A</b>	<b>Modèle B</b>	<b>Modèle C</b>
Géométrie et nombre de cellules	<b>Système multi cellulaires OMNI (19 cellules)</b>	<b>Système 3 secteurs hexagones (19 cellules)</b>	<b>Système 3 secteurs hexagones (19 cellules) plus utilisation des cellules femto</b>
Paramètres	Valeurs		
Modèle de trafic	Full buffer	Full buffer	Full buffer
Distance de cellule à cellule	500 m	500 m	500 m
Fréquence centrale	2.14Ghz	2.14Ghz	2.14Ghz
Bande utilisé	20Mhz	20Mhz	20Mhz
Modèle des pertes de parcours Pathloss (Milieu Urbain)	TS36942 [53]	TS36942 [53]	TS36942 [53]
Retour (Feedback) sur le canal de transmission en Downlink	Chaque 3 T.T.I (Time Transmission Interval)	Chaque 3 T.T.I (Time Transmission Interval)	Chaque 3 T.T.I (Time Transmission Interval)

Les évanouissements rapides (Microscale fading) (entre E-nodeB et utilisateurs attachés)	Winner II + channel model [51]	Winner II + channel model [51]	Winner II + channel model [51]
Nombre des utilisateurs	10 utilisateurs par cellule	10 utilisateurs par secteur	10 utilisateurs par secteur et par cellule femto indoor
Distribution des utilisateurs	Loi uniforme normale	Loi uniforme normale	Loi uniforme normale
Vitesse de déplacement des utilisateurs	5km/h -30km/h - 60km/h	5km/h -30km/h - 60km/h	(5km/h -30km/h - 60km/h) et (5km/h in indoor Femto-Cell)
Puissance de l'antenne émettrice	46dBm	46dBm	46dBm
Station de base	(Les BS n'émettent pas quand il y'a pas de cellules attachés)	(Les BS n'émettent pas quand il y'a pas de cellules attachés)	(Les BS n'émettent pas quand il y'a pas de cellules attachés) (Puissance de la Femto-cell = 0.1 Watt)
Configuration de l'antenne de transmission (BS) (ENODEB)	Antenne Omnidirectionnel Sans Inclinaison Gain d'antenne = 0dB	Kathrein 742212 Inclinaison Electrique de 8 degré [54]	Kathrein 742212 Inclinaison Electrique de 8 degré [54]
Mode de transmission	C.L.S.M (Closed Loop Spatial Multiplexing) n.TX =1 and n.RX =1	C.L.S.M (Closed Loop Spatial Multiplexing) n.TX =2 and n.RX =1	C.L.S.M (Closed Loop Spatial Multiplexing) n.TX =2 and n.RX =1
Ordonnanceur	Round Robin	Round Robin	Round Robin
Type de récepteur	Zéro Forcing	Zéro Forcing	Zéro Forcing

Dans le paragraphe qui suit (II.4.3) nous donnons une description détaillée des paramètres résumés sur le tableau 2.4.

## II.4.3- Description des principaux paramètres des simulations détaillées.

### II.4.3.1- La répartition et nombre des cellules.

Dans l'impossibilité de conduire des simulations très réalistes, nous avons optés pour l'étude de trois structures (nombres de cellules et types de répartitions) réparties selon les modèles A, B et C :

#### ❖ Le Modèle A :

La figure 2.24 présente les utilisateurs (points bleus) ainsi que les cellules (points rouges) sujet des simulations à un instant donné de la simulation qui dure 60000 TTI soit 5 minutes (période de 100 TTI). L'ensemble des simulations des interférences sont faites par rapport à la cellule centrale (couleur grises).

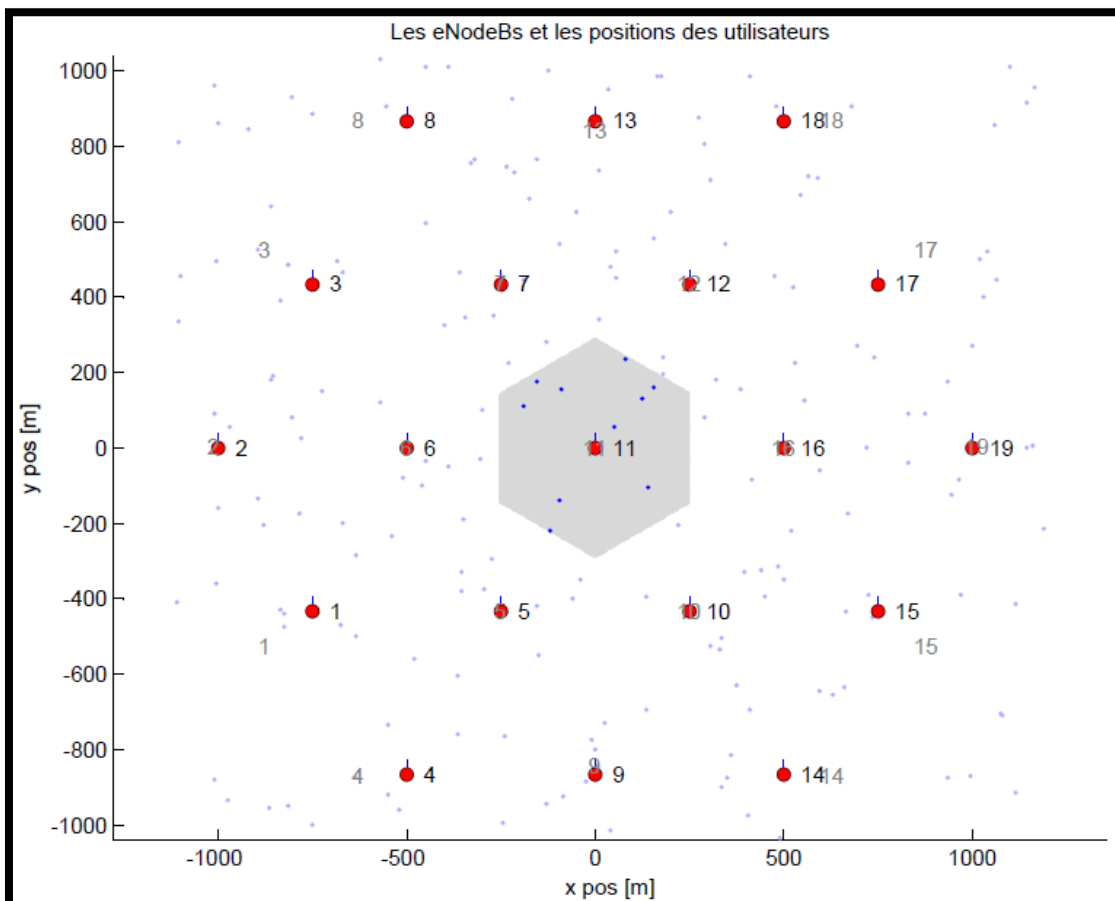
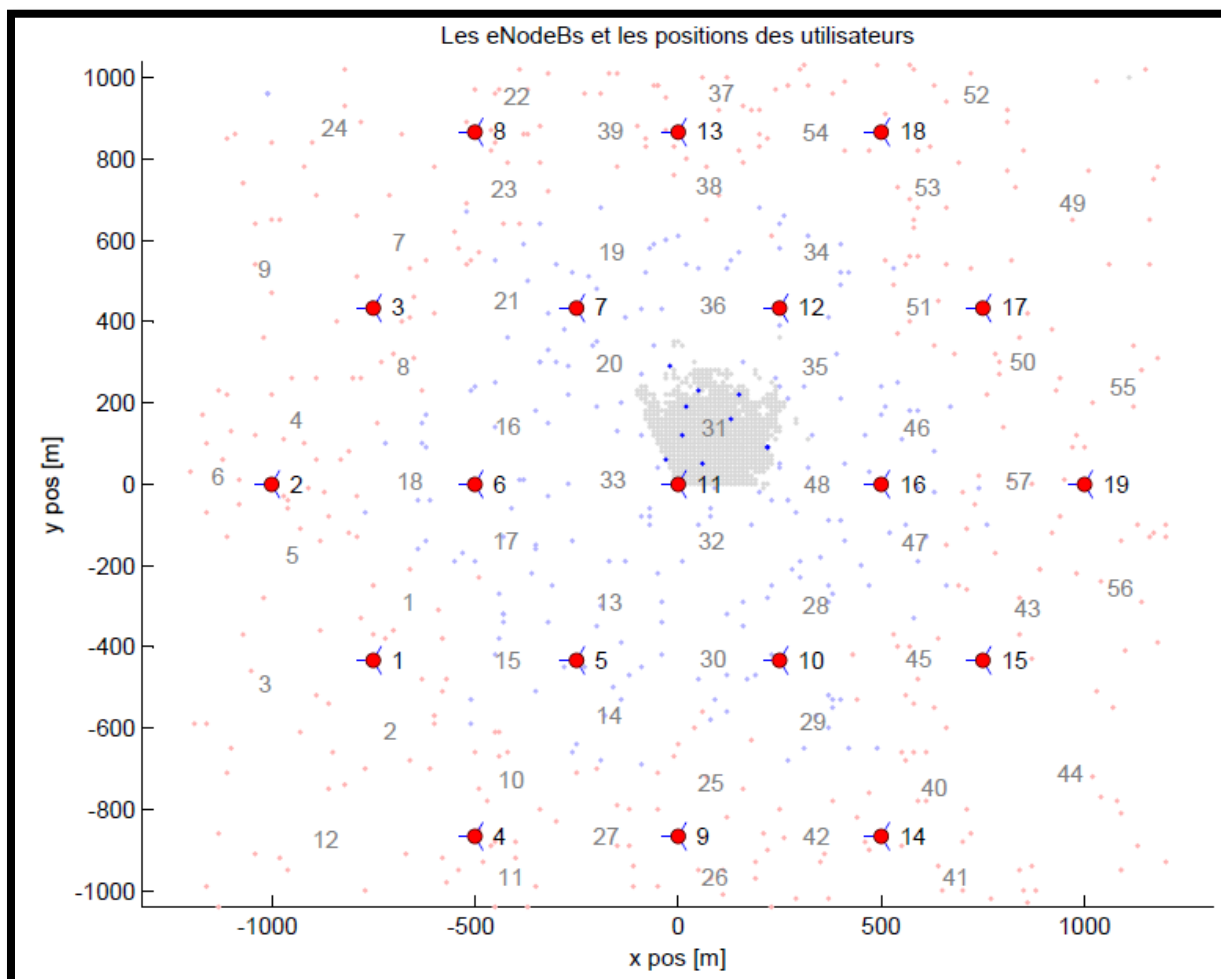


Figure 2.24 : Présentation des cellules et des utilisateurs à un instant donné des simulations du modèle A.

### ❖ Le Modèle B :

La figure 2.25 présente une capture des utilisateurs (couleur bleue) ainsi que des sites (couleur rouge) sujet des simulations. Chaque site est constitué de trois secteurs ou cellules. La simulation présente l'étude des interférences de 19 sites urbains soit 56 cellules sur la cellule centrale (couleur grise).



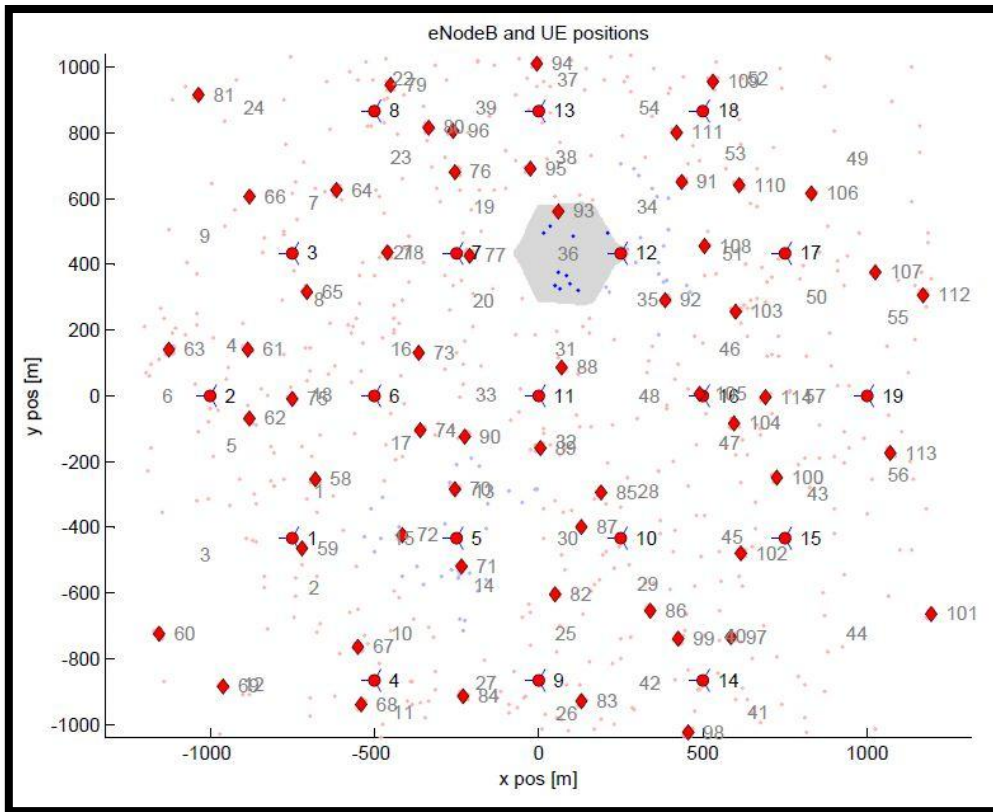
**Figure 2.25 :** Présentation des cellules et des utilisateurs à un instant donné des simulations du modèle B.

### ❖ Le modèle C :

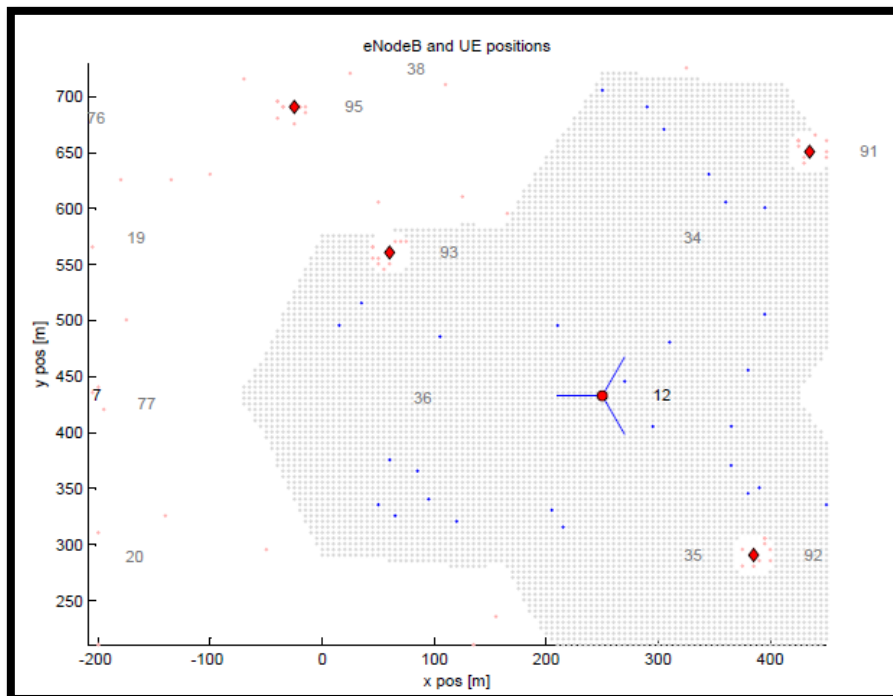
La figure 2.26 présente les positions des sites (points avec couleur rouge) et la position des cellules Femto (losanges rouges). La figure contient au total 19 sites avec 114 cellules, 57 cellule LTE et 57 cellule Femto.

Chaque cellule a une cellule Femto indoor de rayon 20 m. Les utilisateurs (points rouges) à l'intérieur de la cellule Femto ne quittent pas la cellule Femto.

Les utilisateurs des cellules normales (points bleus) peuvent quitter leurs cellules.



**Figure 2.26** : Présentation des cellules et des utilisateurs à un instant donné des simulations du modèle C.



**Figure 2.27** : Présentation des cellules Femto et des utilisateurs à un instant donné des simulations du modèle C.

### **II.4.3.2- Les utilisateurs.**

#### **➤ Distribution initiale :**

Pour les trois modèles de simulation A, B et C :

A l'instant initial ; 10 utilisateurs sont générés et distribués aléatoirement (loi uniforme) par cellule pour le modèle A et par secteur pour les modèles B et C [55].

#### **➤ Déplacement des utilisateurs :**

Les utilisateurs peuvent se déplacer sur la cellule et quitter la cellule. La vitesse de déplacement des utilisateurs peut varier entre 5 km/h (utilisateurs en marche), et 30 km/h à 60 km/h (utilisateurs motorisés).

Les utilisateurs à l'intérieur de la cellule Femto indoor se déplacent à une vitesse constante de 5 km/h et ne peuvent pas quitter la cellule Femto.

#### **➤ Les paramètres du récepteur de l'utilisateur :**

Nous avons pris comme référence les paramètres cible de la 3GPP pour un milieu urbain, pour les paramètres du récepteur de l'utilisateur [2] :

**Le facteur de bruit (Noise figure) :** 9 dB.

**Densité du bruit :** -174 dBm/Hz (valeur typique pour le milieu urbain).

**Puissance maximale reçue par l'utilisateur :** 21dBm.

**Puissance minimale reçue par l'utilisateur :** -50dBm.

Un paramètre important à définir est la perte de couplage minimal (MCL). MCL est le paramètre décrivant la perte minimum en signal entre ENodeB et l'utilisateur. Il se définit comme la perte de distance minimum y compris les gains d'antennes mesurées entre les connecteurs d'antenne. La valeur du MCL est égale à 70dB pour le milieu urbain.

La hauteur des utilisateurs Mobiles est de 1.5m

#### **➤ Modèle du trafic des données :**

Pour les besoins de nos simulations le modèle du trafic des données suppose que les utilisateurs reçoivent en continu et durant la période de la simulation des données à partir de leurs ENodeB attaché.

Ce modèle nous convient pour simuler l'utilisation des applications mobiles récentes et qui demandent une connexion permanente au réseau.

### II.4.3.3- Modèle du Pathloss Macroscopique (Milieu Urbain).

Le modèle de propagation empirique permet d'estimer la valeur de l'atténuation de trajet. Pour le besoin de nos simulations, nous avons intégré notre script de calcul des pertes de parcours conformément à la spécification TS36942 de la 3GPP [53] :

La puissance reçue en sens descendant par le mobile est exprimée par notre script comme suite :

$$RX\_PWR = TX\_PWR - \text{Max}(\text{pathloss} - G\_TX - G\_RX, MCL) \quad (20)$$

Avec :

RX\_PWR : la puissance reçue par le récepteur.

TX\_PWR : la puissance de l'émetteur.

G\_TX : le gain de l'antenne émetteur.

G\_RX : le gain de l'antenne récepteur.

MCL : la perte de couplage minimal.

Pathloss : pertes de parcours.

La valeur du **Pathloss**  $L$  avec le modèle de propagation des cellules macro pour une **zone urbaine** avec des bâtiments de **taille à peu près uniforme** a pour formule :

$$L(dB) = 40 \times (1 - 4 \times 10^{-3} \times D_{hb}) \times \log_{10}(R) - 18 \times \log_{10}(D_{hb}) + 21 \times \log_{10}(f) + 80dB \quad (21)$$

Avec :

R : la distance entre l'utilisateur et la station de base en Km.

f : la fréquence porteuse en Mhz.

D<sub>hb</sub> : la hauteur de la station de base par rapport à la hauteur moyenne de toit (en mètre).

Pour une fréquence porteuse de 2140 MHz et d'une hauteur d'antenne de station de base de 15 mètres au-dessus du toit moyen, le modèle de propagation est donné par la formule suivante :

$$L(dB) = 128.769 + 37.6 \times \log_{10}(R) \quad (22)$$

Après le calcul des pertes de parcours, il y a d'abord l'ajout de l'effet de masque sous forme d'une distribution log-normale logF avec un écart type de 10 dB, et ensuite l'ajout d'un facteur de corrélation pour effet de masque avec la valeur de 0.5 pour les sites adjacents et 1 entre les secteurs du même site.

La valeur de L :

$$\text{Pathloss\_urbain\_Macro (dB)} = L \text{ (dB)} + \text{LogF} \text{ (23)}$$

Il y a lieu cependant d'apporter les précisions suivantes :

- **Note 1 :** L ne doit en aucun cas être inférieur à la perte de l'espace libre. Ce modèle est valable pour le cas NLOS (sans visibilité directe) seulement. Il décrit le pire cas de propagation.

- **Note 2 :** Le modèle d'affaiblissement de trajet est valable pour une hauteur de station de base  $D_{hb}$  de 0 à 50 mètres. (Pour notre cas d'étude  $D_{hb} = 15\text{m}$ ).

- **Note 3 :** Ce modèle est conçu principalement pour la distance de quelques centaines de mètres à un kilomètre. (Pour notre cas d'étude  $R = 500\text{m}$ ).

- **Note 4 :** La hauteur de construction moyenne est égale à la somme de la hauteur de l'antenne portable (1,5m) et  $\Delta h_m = 10.5 \text{ m}$ .

#### **Calcul des évanouissements rapides (Microscale fading) :**

Les effets des évanouissements rapides sont calculés en temps réel par l'utilisation du modèle du canal Winner phase 2. L'implémentation de ce canal sous Matlab est disponible pour tous les chercheurs en ligne sur la référence [51].

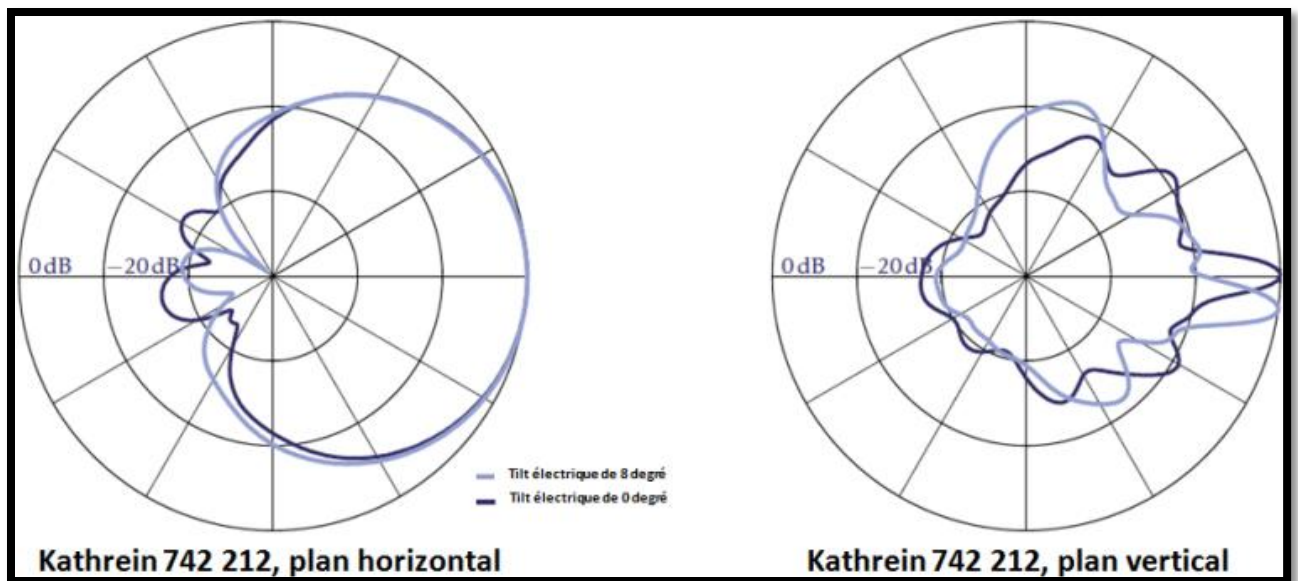
Le modèle de WINNER utilise une bande passante de canal allant jusqu'à 100 MHz pour une fréquence radio entre 2 et 6 GHz. Le modèle peut être appliqué non seulement au système WINNER II, mais aussi à tout autre système sans fil fonctionnant dans la gamme de fréquences comprises entre 2 et 6 GHz. Le système WINNER II supporte le mode multiutilisateur, la technologie MIMO, la polarisation et le multicellulaires.

#### **II.4.3.4- Configuration de l'antenne d'émission de la BS (ENODEB).**

Dans les simulations ; l'antenne de l'émission de la BS (ENODEB) a deux configurations possibles :

Une antenne omnidirectionnelle sans inclinaison avec Gain d'antenne = 0dB.

Une antenne Kathrein 742 212 avec inclinaison électrique de 8 degrés, le script de simulation de cette antenne, que nous avons intégré au simulateur, est disponible sur le site web de constructeur [54].



**Figure 2.28** : Plan horizontal et vertical pour l'antenne kathrein 742 212 simulé.

#### II.4.3.5- Ordonnanceur.

L'ordonnanceur, a pour rôle l'allocation des ressources aux différents utilisateurs. A cet effet, il doit déterminer, à chaque instant les RBs qui sont assignées à chaque utilisateur.

Pour affecter la transmission des ressources, différentes stratégies sont utilisées telles que :

##### ✓ **Round Robin :**

L'algorithme **Round Robin** ne tient pas compte des conditions radio de l'équipement utilisateur et attribue équitablement de manière cyclique les ressources pour chaque utilisateur. Cette technique est utilisée généralement pour les cellules de petite taille où les utilisateurs ont des conditions radio approximativement équivalentes, et aussi pour les cellules à forte densité de population afin de minimiser le temps de décision pour l'attribution des ressources radio [56].

##### ✓ **Best CQI :**

L'algorithme Best CQI essaie de maximiser le débit total et ignore complètement la répartition équitable des ressources pour les utilisateurs. Ceci implique que les utilisateurs avec les bonnes conditions radio auront un accès avantageux aux ressources radio. Cette technique améliore le débit total mais en contrepartie dégrade l'expérience des utilisateurs en cas de mauvaises conditions radio [56].

### ✓ **Proportional fair :**

L'algorithme Proportional fair affecte les ressources radio en prenant comme référence l'utilisateur qui a la meilleure réalisation canal actuel par rapport à son propre débit moyen. La stratégie de planification des ressources équitable garantit un montant égal des ressources pour tous les utilisateurs, tout en essayant de maximiser le débit total [57].

Pour nos simulations, nous avons intégré au simulateur le script de l'algorithme Round Robin, qui convient aux conditions de nos simulations dans le milieu urbain.

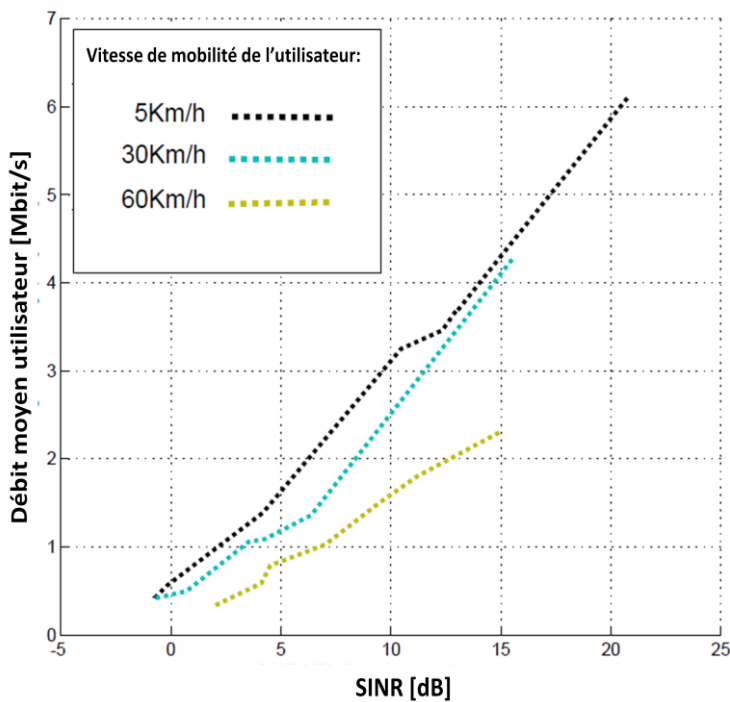
## **II.5- Analyse des résultats des simulations détaillées.**

Après la présentation des paramètres des modèles des simulations dans la partie II.4, cette partie donne les résultats des simulations pour les trois modèles. Elle est suivie par une analyse des résultats afin de mettre en évidence l'impact réel des interférences intercellulaires sur le système LTE dans un milieu urbain.

### **II.5.1- Résultats des simulations détaillées.**

Les résultats détaillés de nos simulations, sont présentés ; sous forme de tableau pour chaque modèle. Dans ces résultats, on présente l'expérience des différents utilisateurs ainsi que le SINR expérimenté par modèle de simulation pour la cellule sujets d'étude (voir II.4.3.1). Puis on donne le graphe de la Capacité Moyenne descendante de la cellule centrale LTE, ainsi que les débits Maximal, moyen et en bordure des utilisateurs pour chaque modèle.

## Modèle A



**Figure 2.29 :** Modèle A : débit moyen descendant de l'utilisateur dans la cellule centrale en fonction de la variation du SINR à des vitesses de mobilité utilisateurs (5km/h, 30km/h et 60km/h).

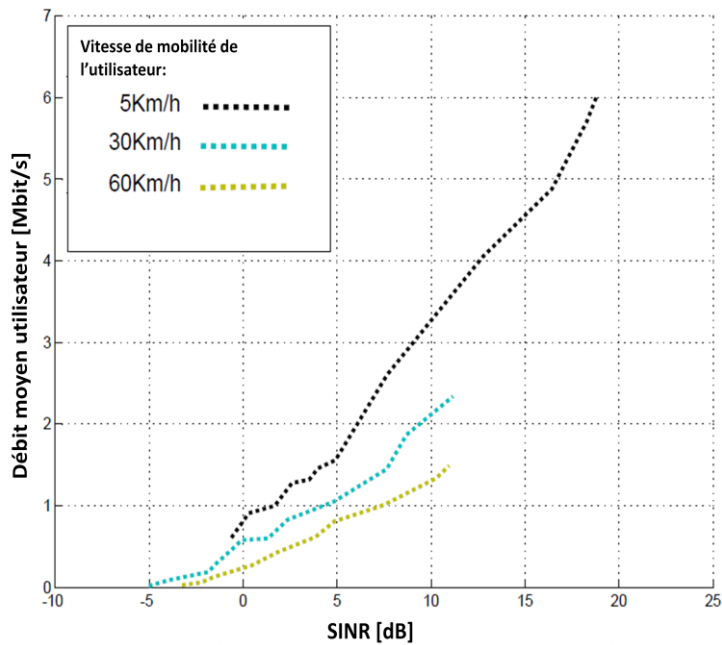
**Tableau 2.5:** L'expérience de l'utilisateur dans le système LTE en sens descendant par rapport au modèle A

Vitesse de mobilité (Km/h)	Efficacité spectrale moyenne [Bit/cu]
5 Km/h	1.58 Bit/cu
30 Km/h	1.24 Bit/cu
60 Km/h	0.96 Bit/cu

Vitesse de mobilité (Km/h)	Débit utilisateur (maximale/moyen/en bordure de la cellule) [Mbit/s]
5 Km/h	8.42/2.61/0.64
30 Km/h	8.2/2.02/0.36
60 Km/h	5.19/1.59/0.35

SINR Minimale	SINR maximale
-0.69 dB	21.94 dB

## Modèle B



**Figure 2.30 :** Modèle B : débit moyen descendant de l'utilisateur dans la cellule centrale en fonction de la variation du SINR à des vitesses de mobilité utilisateurs (5km/h, 30km/h et 60km/h).

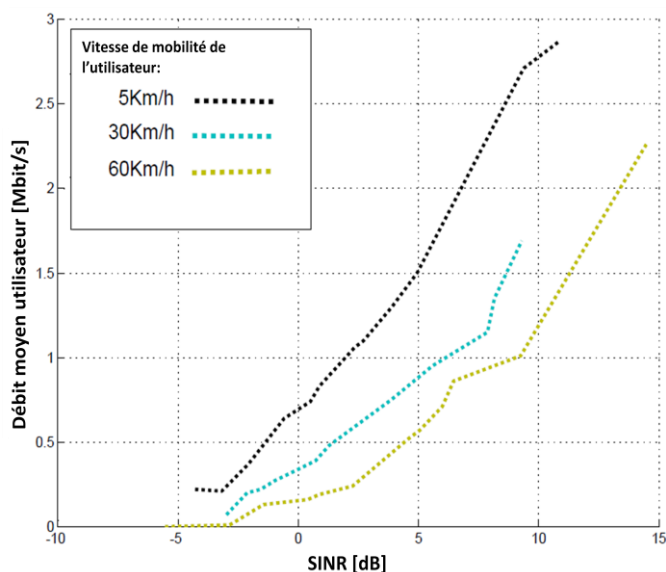
**Tableau 2.6 :** L'expérience de l'utilisateur dans le système LTE en sens descendant par rapport au modèle B.

Vitesse de mobilité (Km/h)	Efficacité spectrale moyenne [Bit/cu]
5 Km/h	1.45 Bit/cu
30 Km/h	0.6 Bit/cu
60 Km/h	0.38 Bit/cu

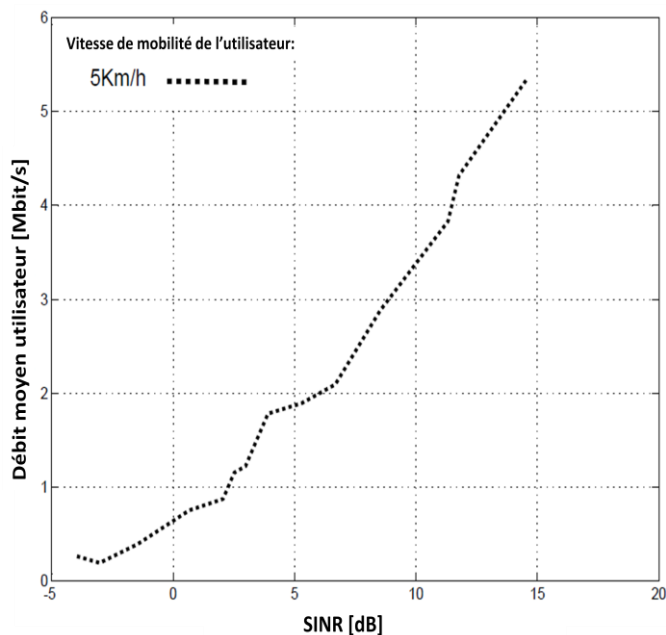
Vitesse de mobilité (Km/h)	Débit utilisateur (maximale/moyen/en bordure de la cellule) [Mbit/s]
5 Km/h	6.78/2.42/0.39
30 Km/h	2.28/0.96/0.09
60 Km/h	1.5/0.57/0.05

SINR Minimale	SINR maximale
-5.02 dB	18.78 dB

### Modèle C



**Figure 2.31 :** Modèle C : débit moyen descendant de l'utilisateur dans la cellule Femto avec l'id : 93 en fonction de la variation du SINR à une vitesse de mobilité utilisateur de 5km/h.



**Figure 2.32 :** Modèle C : débit moyen descendant de l'utilisateur dans la cellule Femto avec l'id : 93 en fonction de la variation du SINR à une vitesse de mobilité utilisateur de 5km/h.

**Tableau 2.7.** L'expérience de l'utilisateur dans le système LTE en sens descendant par rapport au modèle C.

Vitesse de mobilité (Km/h)	Efficacité spectrale moyenne [Bit/cu]
5 Km/h	0.77 Bit/cu
30 Km/h	0.45 Bit/cu
60 Km/h	0.37 Bit/cu

Vitesse de mobilité (Km/h)	Débit utilisateur (maximale/moyen/en bordure de la cellule) [Mbit/s]
5 Km/h	2.87/1.25/0.21
30 Km/h	2.45/0.7/0.1
60 Km/h	1.74/0.56/0.01

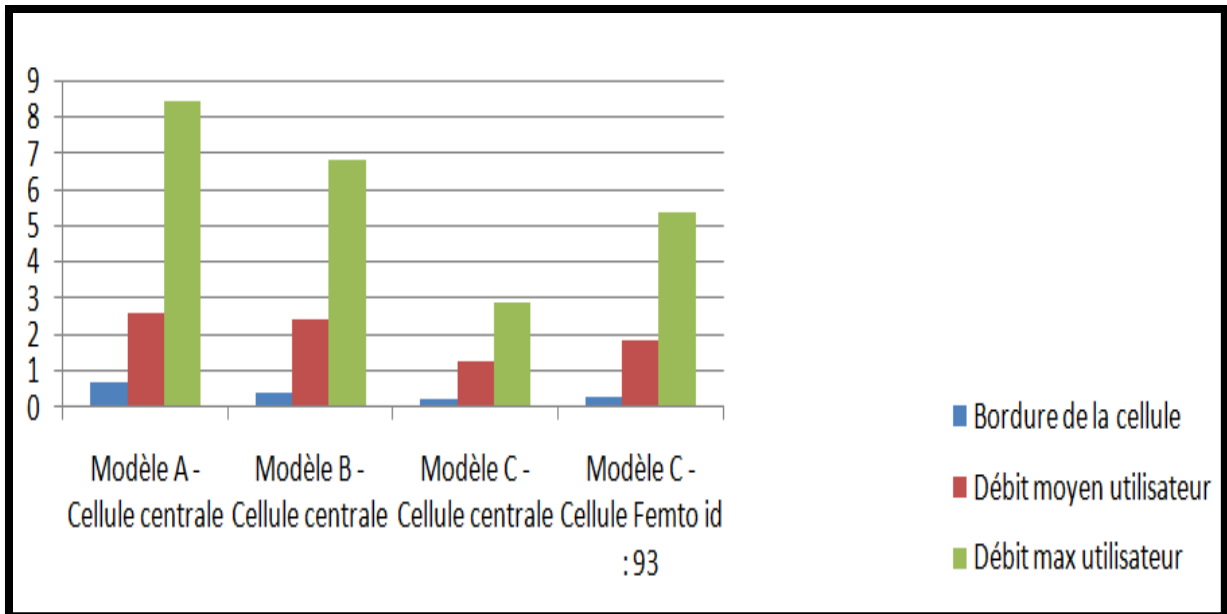
SINR Minimale	SINR maximale
-5.54dB	14.89dB

**Tableau 2.8 :** L'expérience de l'utilisateur dans le système LTE en sens descendant par rapport à la cellule Femto de l'id : 93 du modèle C.

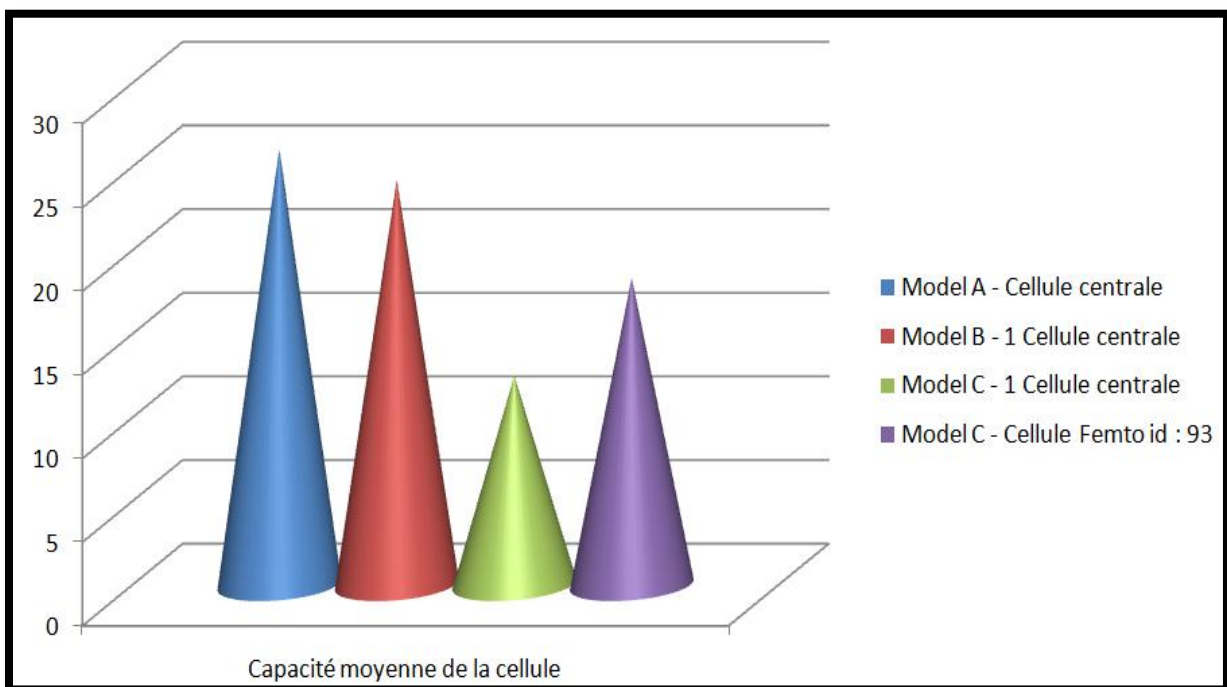
Vitesse de mobilité (Km/h)	Efficacité spectrale moyenne [Bit/cu]
5 Km/h	1.11 Bit/cu

Vitesse de mobilité (Km/h)	Débit utilisateur (maximale/moyen/en bordure de la cellule) [Mbit/s]
5 Km/h	5.35/1.84/0.26

SINR Minimale	SINR maximale
-3.96dB	14.56dB



**Figure 2.33 :** Débit descendant (Mb/s) Maximale, moyen et en bordure de la cellule de l'utilisateur dans les modèles A, B et C.



**Figure 2.34 :** Capacité Moyenne descendante de la cellule centrale LTE dans les modèles A, B et C.

## II.5.2- Analyse des résultats des simulations.

### II.5.2.1- Impact de la vitesse de mobilité et du SINR sur le débit descendant de l'utilisateur du système LTE.

A partir des tableaux 2.5, 2.7 et 2.8 il apparait clairement que la vitesse de mobilité des utilisateurs impacte leurs débits de transmissions en sens descendant.

Pour le modèle A le pourcentage du débit descendant moyen perdu en prenant comme référence la vitesse de mobilité 5 km/h est de 22.6% pour une vitesse de déplacement de 30 km/h et peut atteindre jusqu'à 39.08% pour une vitesse de mobilité de 60 km/h et cela dans une variation du SINR entre -0.69 dB et 21.94 dB.

Pour le modèle B le pourcentage du débit descendant moyen perdu en prenant comme référence la vitesse de mobilité 5 km/h est de 60.33% pour une vitesse de déplacement de 30 km/h et peut atteindre jusqu'à 76.44% pour une vitesse de mobilité de 60 km/h et cela dans une variation du SINR entre -5.02 dB et 18.78 dB.

Pour le modèle C le pourcentage du débit descendant moyen perdu en prenant comme référence la vitesse de mobilité 5 km/h est de 44% pour une vitesse de déplacement de 30 km/h et peut atteindre jusqu'à 55.2% pour une vitesse de mobilité de 60 km/h et cela dans une variation du SINR entre -5.54 dB et 14.89 dB.

Il est aussi important de comparer la variation des valeurs extrêmes du SINR par rapport au changement du modèle de simulation en prenant comme référence le modèle A. L'augmentation des nombres de cellules dans le modèle B même avec le choix des cellules à trois secteurs inclinés, augmente les interférences intercellulaires et cause la dégradation du SINR minimale à -5.02 dB. Aussi la valeur du SINR maximale expérimentée diminue de 14.4% par rapport au modèle A. Dans le modèle C, l'ajout d'une cellule Femto par secteur par rapport au modèle B augmente la qualité de réception des utilisateurs à l'intérieur de la cellule Femto mais en même temps cause la dégradation de SINR dans le secteur en question. La valeur du SINR minimale atteint la valeur de -5.54 dB. Aussi la valeur maximale du SINR se dégrade de 32.13% par rapport à celle du modèle A.

D'après les figures 2.29, 2.30 et 2.31 on peut également conclure que les faibles valeurs du SINR ( $\text{SINR} \leq 0$  dB) détériorent considérablement le débit d'utilisateurs en liaison descendante avec la vitesse de mobilité supérieure ou égale à 30 km/h. De même la figure 2.33 permet de montrer l'impact critique des interférences sur les utilisateurs en bordure de la cellule. L'interférence peut être très élevée de telle sorte que le débit maximal que l'utilisateur peut atteindre ; dans le meilleur des cas ; ne dépasse pas 0,64 Mb/s, ce qui dégrade considérablement l'expérience utilisateur en bordure de la cellule.

#### **II.5.2.2- Impact du SINR sur la capacité de la cellule LTE.**

Les figures 2.33 et 2.34 illustrent l'impact des interférences sur le système multicellulaire LTE dans un environnement urbain. Le modèle A enregistré une perte de

73,92% de la capacité totale de la cellule en raison des interférences, dans le modèle B qui peut supporter 30 utilisateurs par site (10 par cellule), l'impact des interférences augmente les pertes dans la capacité de la cellule de 75,78%. Dans le modèle C, l'ajout de la cellule Femto intérieure améliore l'expérience des utilisateurs à l'intérieur des cellules Femto mais ajoute des interférences supplémentaires au système ce qui réduit la capacité de la cellule et cause une perte de 81.63% par rapport à la capacité totale. Les interférences affectent également les cellules FEMTO et réduisent leurs capacités. La perte de la capacité totale de la cellule Femto est de 87,51%.

En s'appuyant sur ces analyses, il devient nécessaire de prendre en considération l'impact des interférences entre les cellules.

Le modèle 3GPP sous-estime l'impact de ces interférences en particulier à la frontière des cellules. Les solutions de segmentation et des motifs de réutilisation peuvent permettre une augmentation du nombre des utilisateurs desservis. Toutefois il ne résoudra pas le problème des interférences qui peuvent dégrader considérablement l'expérience utilisateur dans le cas de la liaison descendante, ce qui est inacceptable pour un système avancé tel que LTE, qui doit assurer une faible latence et des débits élevés.

## **II.6- Conclusion**

Les résultats des simulations effectuées montrent que l'impact des interférences entre les cellules ne doit pas être sous-estimé, en particulier pour les zones de forte densité de population. Les solutions récentes en matière de réduction des interférences dans le LTE sont basées sur les techniques de distribution de la bande passante et la gestion de la transmission de la puissance telle que le SFR et PFR.

Ces techniques peuvent réduire l'impact des interférences, mais ne fournissent pas une solution radicale. Ainsi ces techniques réduisent la capacité utilisable de la cellule et ne donnent que peu d'amélioration de l'expérience utilisateur en bordure de la cellule. L'optimisation du SINR dans le LTE doit prendre essentiellement en compte la distribution et la capacité des cellules. En effet, cela ne peut être possible qu'avec l'existence des interfaces de communication entre les cellules voisines (interface X2) et la collaboration dans la gestion de l'allocation des ressources, avec cette vision.

Pour parer à cela, nous donnons dans le chapitre III une proposition pour une nouvelle technique d'optimisation basée sur une architecture distribuée, qui peut améliorer l'expérience utilisateur de la liaison descendante en milieu et également en bordure de la cellule.

# **Chapitre.III**

## **Proposition d'une nouvelle technique de gestion des interférences intercellulaires en lien descendant L.T.E**

### **III.1- Introduction**

De l'étude de l'impact des interférences intercellulaires sur les milieux urbains, il apparaît que le système LTE ne peut fournir les performances attendues surtout en bordure des cellules sans prendre en compte l'optimisation de l'interface radio. Il est de ce fait nécessaire d'impliquer et de mobiliser des organismes scientifiques de recherche pour proposer des solutions efficaces de gestion des interférences intercellulaires.

La gestion des interférences intercellulaires doit prendre en considération la possibilité des cellules de s'adapter à la nature du milieu ainsi qu'aux changements de la distribution des utilisateurs. Les techniques actuelles se basent sur la répartition fréquentielle pour le LTE ainsi que sur les techniques d'agrégation du spectre et envisagent une communication basique entre les cellules. Toutefois ces techniques ne permettent pas de donner une solution optimisée à la gestion de la capacité des cellules et laissent des défis techniques et de coût de production pour le LTE.

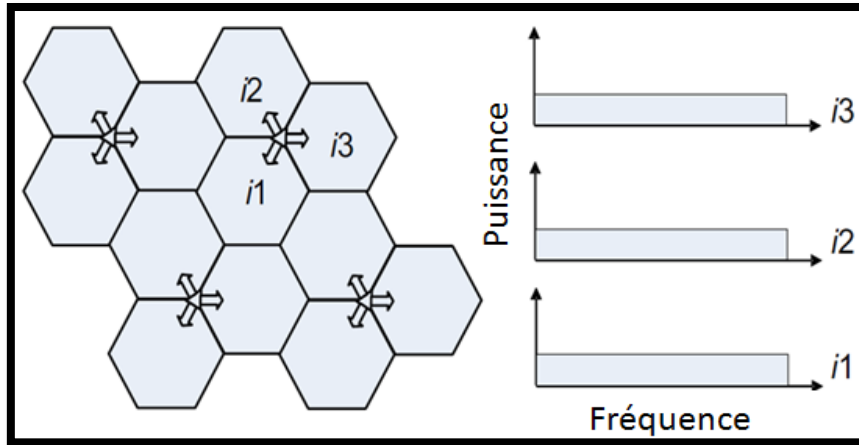
Dans ce chapitre il sera présenté, les grands axes des solutions proposées par la littérature et les publications récentes dans le domaine d'optimisation radio en précisant leurs faiblesses. Nous proposerons à la fin, une nouvelle vision d'optimisation de l'interface Radio en sens descendant pour LTE en présentant quelques résultats de simulations qui montrent les points fort de notre nouvelle technique.

### **III.2- Les techniques de gestion des interférences intercellulaires.**

Plusieurs solutions ont été proposées dans le cadre de réduction des effets dus aux interférences intercellulaires. Parmi elles ; nous citons principalement les solutions standards qui se basent sur la technique de répartitions cellulaires et les solutions avancées qui mises sur la technique de l'agrégation du spectre et la communication basique entre les cellules.

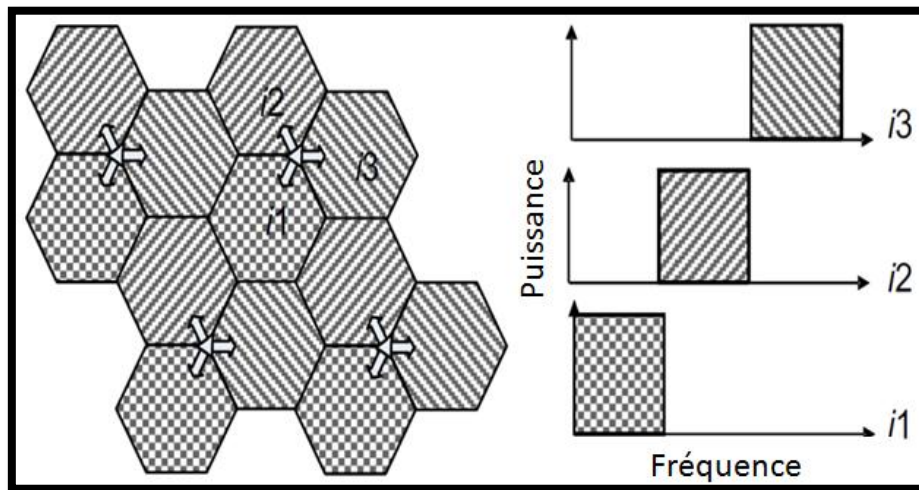
#### **III.2.1- Les solutions aux problèmes des interférences intercellulaires.**

Le système LTE est un système qui fonctionne principalement avec un facteur de réutilisation égal à 1, comme illustré sur la Figure 3.1 [58].



**Figure 3.1 :** Facteur de réutilisation égale à 1.

✓ La première solution consiste de passer d'un facteur de réutilisation de 1 à un facteur de réutilisation égale à 3, en divisant la bande en trois parties, chacune sera utilisée sur un des trois secteurs d'un même site [59]. La figure 3.2 en donne une illustration.

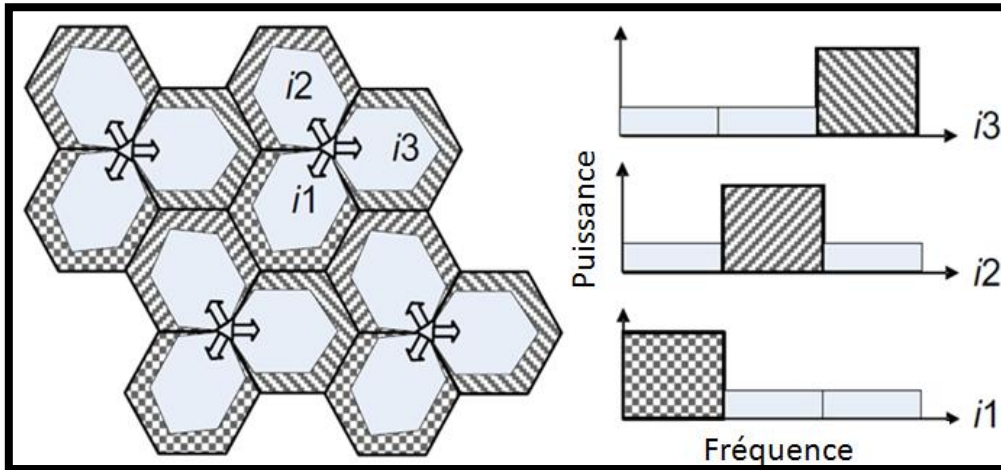


**Figure 3.2 :** Facteur de réutilisation égale à 3.

Avec une telle solution les interférences sont réduites. Mais la capacité totale du système sera divisée par trois, ce qui est plus pénalisant qu'un facteur de réutilisation égale à 1.

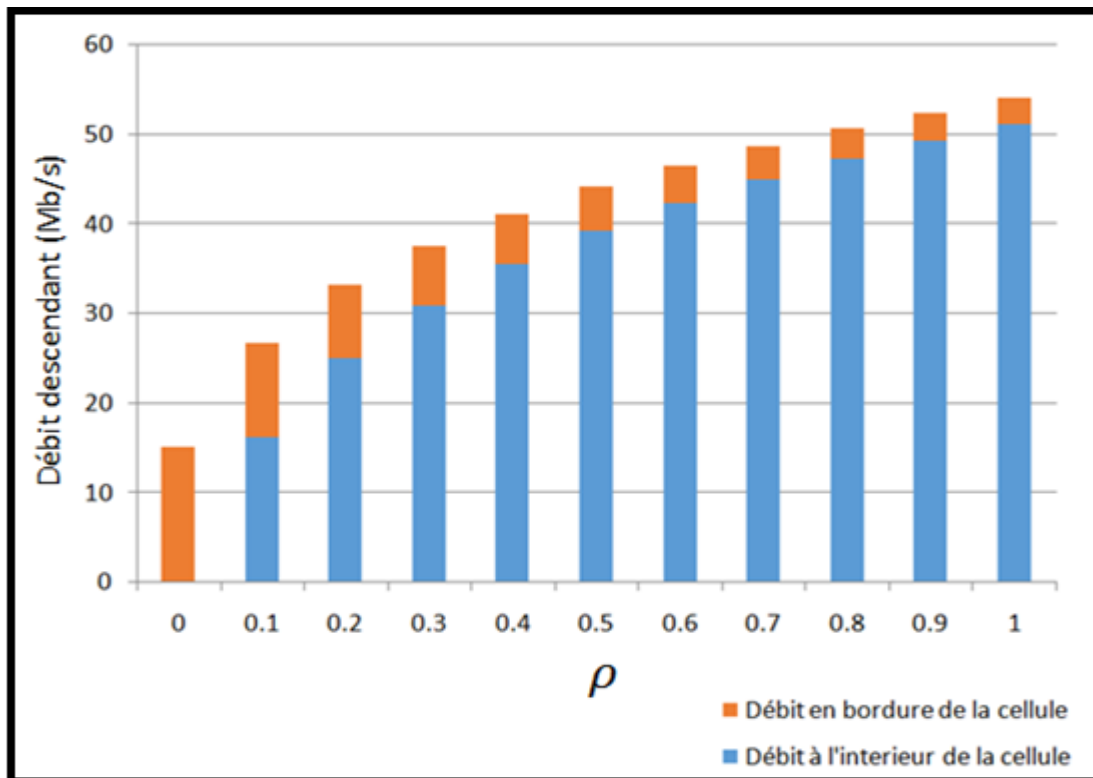
✓ Une solution intermédiaire entre les deux facteurs de réutilisation 1 et 3 et le « Soft Frequency Reuse » [60], [61] qui exploite la bande non utilisée par le facteur de réutilisation égale à 3 avec une émission à faible densité spectrale de puissance pour les utilisateurs proches de la station de base. Le reste de la bande est affecté comme un facteur égal à 3 pour les utilisateurs en bordure de la cellule.

La figure 3.3 présente le Soft Frequency Reuse à facteur de réutilisation égal à 3.



**Figure 3.3 :** Soft Frequency Reuse à facteur de réutilisation égale à 3.

En fonction du rapport  $\rho = \frac{P_{inner-cell}}{P_{edge-cell}}$  (24) (densité spectrale de puissance de la zone interne à la cellule par rapport à celle de la zone en bordure de la cellule), on peut avoir plusieurs réalisations possibles concernant la capacité totale de la cellule, ainsi que le débit des utilisateurs à proximité de la station de base et ceux dans les bordures de la cellule. La figure 3.4 représente l'impact de la variation du rapport  $\rho$  sur la capacité de la cellule [61].

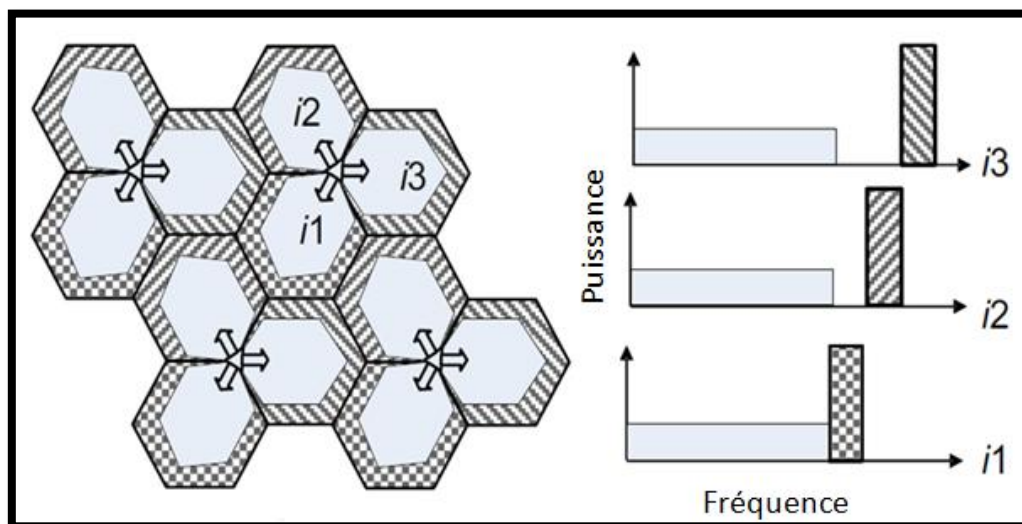


**Figure 3.4 :** Débits en fonction du rapport  $\rho$ .

La soft Frequency Reuse permet une bonne flexibilité en terme de nombre de configurations qu'on peut atteindre en fonction du rapport  $\rho$ . Cela permet d'adapter la cellule en fonction de la répartition des utilisateurs (à l'intérieur ou à la bordure de la cellule).

La grande contrainte d'un tel système réside dans l'augmentation des interférences avec le rapport  $\alpha$  qui dégrade considérablement la capacité des utilisateurs en bordure de la cellule de 15.2 Mb/s à 3 Mb/s.

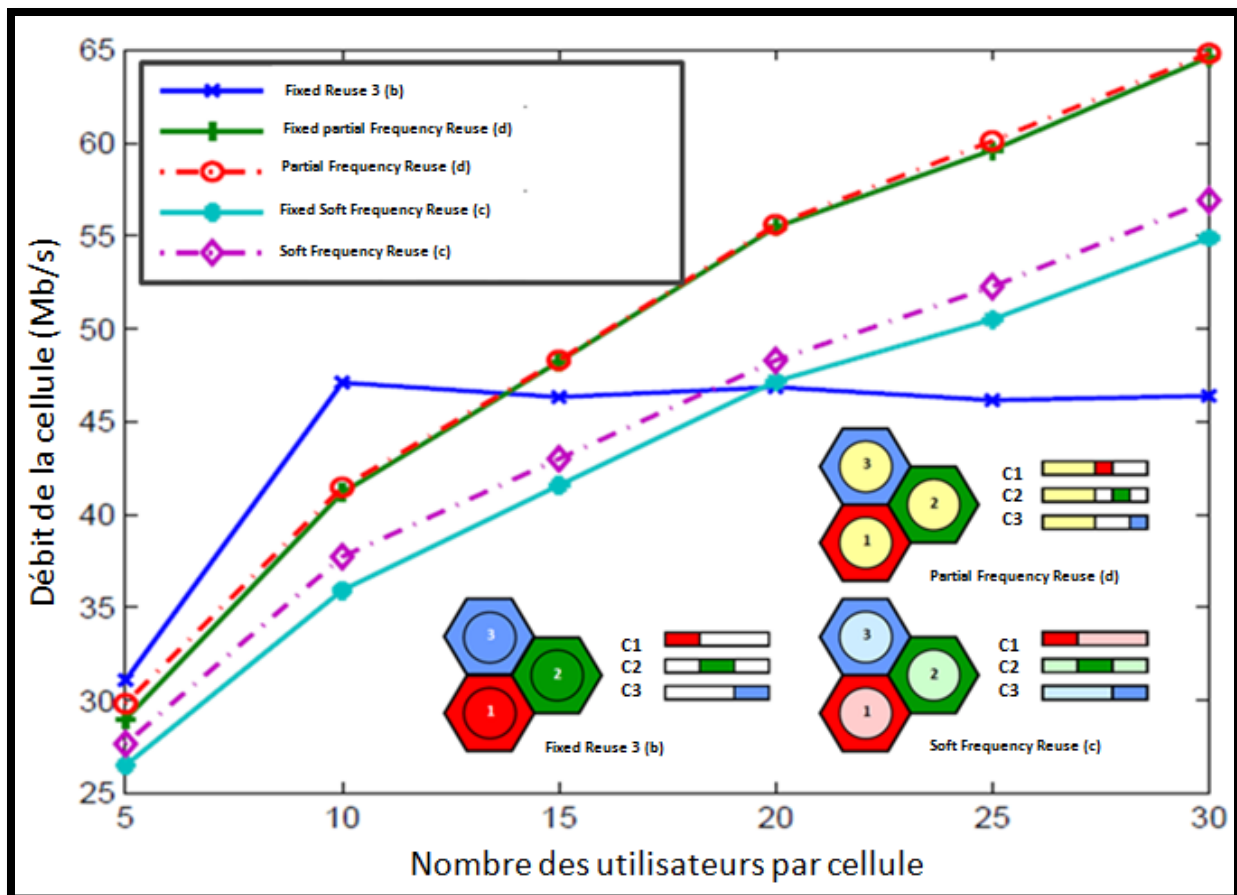
✓ La technique de répartition fréquentielle partielle (Partial Frequency Reuse) [62] permet de remédier au problème de dégradation de la capacité des utilisateurs en bordure de la cellule, tout en gardant le même principe que la répartition fréquentielle soft (soft frequency reuse). La figure 3.5 représente la répartition fréquentielle partielle pour un site à trois secteurs.



**Figure 3.5 :** La répartition fréquentielle partielle (Partial Frequency Reuse).

La répartition fréquentielle partielle divise la bande passante en deux parties. Les deux premiers tiers de la bande totale sont utilisés à l'intérieur de toutes les cellules à densité spectrale de puissance  $P_{\text{interne à la cellule}}$ , tandis que pour les utilisateurs à la bordure des cellules on divise le 3<sup>ème</sup> tiers selon un facteur de réutilisations 3 avec une densité spectrale de puissance  $P_{\text{bordure de la cellule}}$ .

La figure 3.6 illustre la capacité de la cellule en fonction du nombre des utilisateurs pour les différentes techniques de répartition cellulaire en distribution symétrique, c'est-à-dire, un même nombre des utilisateurs par cellule [63].



**Figure 3.6 :** Capacité de la cellule pour différents techniques de répartition cellulaire à trafic symétrique.

A partir de cette courbe, il apparaît clairement que la technique de répartition fréquentielle offre de meilleures performances, lorsque le nombre d'utilisateur est supérieur à 13, ce qui est le cas le plus réaliste.

Malgré son efficacité et ses bonnes performances, la technique de répartition fréquentielle partielle **PFR** n'exploite qu'approximativement 60 % de la capacité totale de la cellule et ne permet guère de meilleurs débits aux utilisateurs aux bordures de celle-ci.

### III.2.2- Introduction de la coordination entre les cellules « COMP » comme solution avancée à la gestion des interférences intercellulaires.

L'une des solutions les plus récentes pour gérer les problèmes des interférences intercellulaires porte sur l'introduction de la possibilité de coordination entre les cellules adjacentes.

La 3GPP a réalisé une étude sur les techniques de coordination entre les cellules « COMP » pour faciliter les communications coopératives à travers des points de transmission et de réception multiples pour le système LTE-Advanced.

La transmission COMP se réfère effectivement à un large éventail de techniques qui permettent la coordination dynamique à la transmission et la réception avec plusieurs eNBs géographiquement séparés. Son objectif est d'accroître la performance globale du système, utiliser les ressources radio plus efficacement et améliorer la qualité de service de l'utilisateur final.

Un des paramètres clés pour LTE dans son ensemble, et en particulier 4G LTE Advanced est le taux élevé de données qui sont réalisables. Ces débits sont relativement faciles à maintenir à proximité de la station de base et dans un concept mono cellulaire. Toutefois, ils deviennent plus difficiles à maintenir dans le cas multicellulaire et aussi lorsque les distances augmentent.

Les bordures des cellules sont les plus affectées. Non seulement le signal devient faible en raison de la distance de la station de base (eNodeB), mais aussi le niveau des interférences des eNodeB voisins est plus élevé.

4G LTE COMP, nécessite une coordination étroite entre un certain nombre d'eNodeBs géographiquement séparés. Elles coordonnent dynamiquement pour fournir la gestion des ressources et la transmission radio ainsi que le traitement commun des signaux reçus. De cette manière, un équipement utilisateur en bordure d'une cellule est susceptible d'être desservi par deux ou plusieurs eNodeBs pour améliorer la réception et augmenter le débit en particulier dans des conditions radio difficiles tel par exemple en bordure des cellules.

La 3GPP a introduit 3 grandes catégories du COMP [64] :

- **Traitement commun (Joint processing)** : traitement conjoint se produisant lorsqu'il y a une coordination entre plusieurs entités (stations de base) qui émettent ou reçoivent simultanément de l'utilisateur.
- **Ordonnancement coordonné ou formation de faisceaux coordonnée (beamforming) (Coordinated scheduling or Coordinated beamforming)**: est une forme de coordination entre un utilisateur et un seul point de la transmission ou de réception

(station de base). Cependant, la communication est faite par un échange de contrôle entre plusieurs entités coordonnées (les stations de base).

- **Sélection du point de transmission (TRANSMISSION POINT SELECTION) (TPS) :** Avec cette technique l'utilisateur reçoit le signal à partir d'un seul point de transmission (station de base) sans COMP. Initialement l'utilisateur envoie au système le TP le plus robuste (qui a le SINR le plus grand) et le CSI qui lui correspond. Alors le canal le plus robuste sera choisi comme TP pour servir l'utilisateur. Le TP change dynamiquement chaque 1ms en fonction des conditions radio. Les autres TPS non choisies doivent garder le silence et ne pas transmettre à l'utilisateur.

Pour exploiter l'une de ces catégories, une communication très détaillée est nécessaire sur les propriétés du canal d'une manière rapide, de sorte que les changements peuvent être apportés dans les délais nécessaires pour la transmission. L'autre exigence est que les délais de coordination doivent être très étroits entre les eNodeBs pour faciliter la combinaison des données ou la commutation rapide des cellules.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons exploiter les expériences des recherches sur la répartition cellulaire en LTE ainsi que les notions COMP introduit par la 3GPP afin de réaliser une nouvelle technique de gestion des interférences intercellulaires pouvant être exploitée pour la 4G

### **III.3- Proposition d'une nouvelle technique de gestion des interférences intercellulaires en sens descendant.**

#### **III.3.1- Principe de base.**

La nouvelle technique se base sur les deux principes évoqués dans la partie 1 du chapitre 3 (la technique de répartition fréquentielle et la technique de coordination entre les cellules adjacentes).

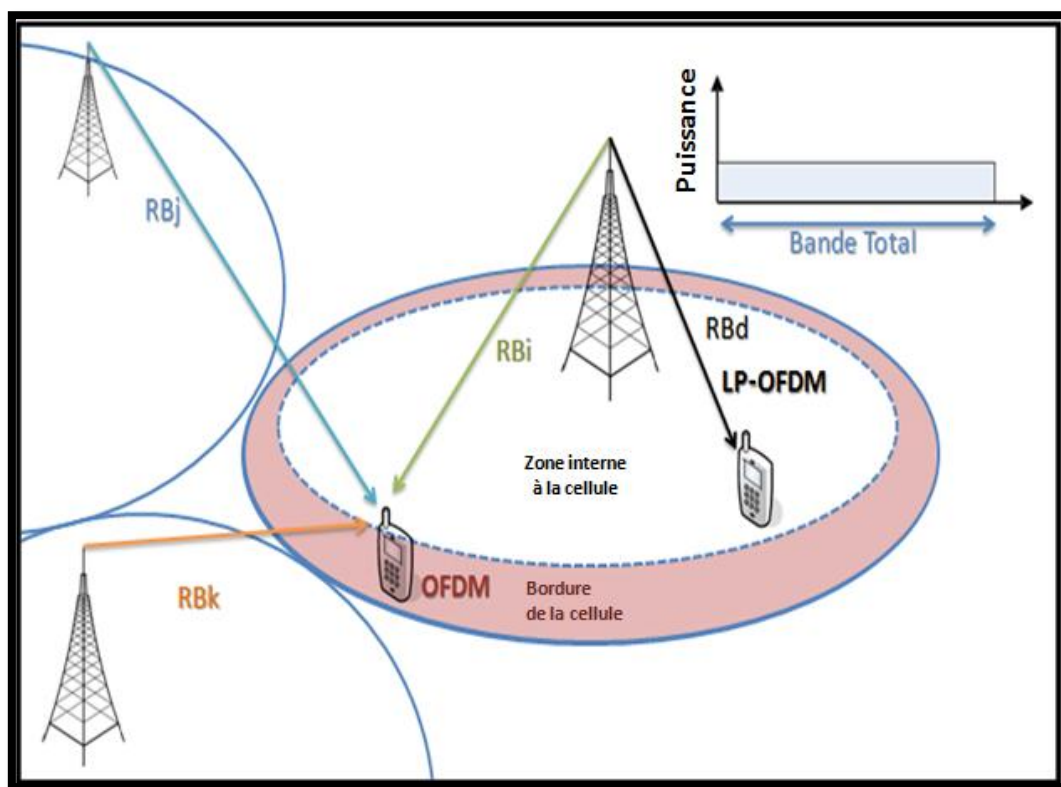
Cette technique propose trois possibilités de répartition fréquentielle ;

- **A** : nommé facteur de réutilisation à 1,
- **B** : nommé facteur de réutilisation à 3 et
- **C** : nommée répartition fréquentielle avec séparation des bandes entre la zone interne à la cellule et les bordures des cellules.

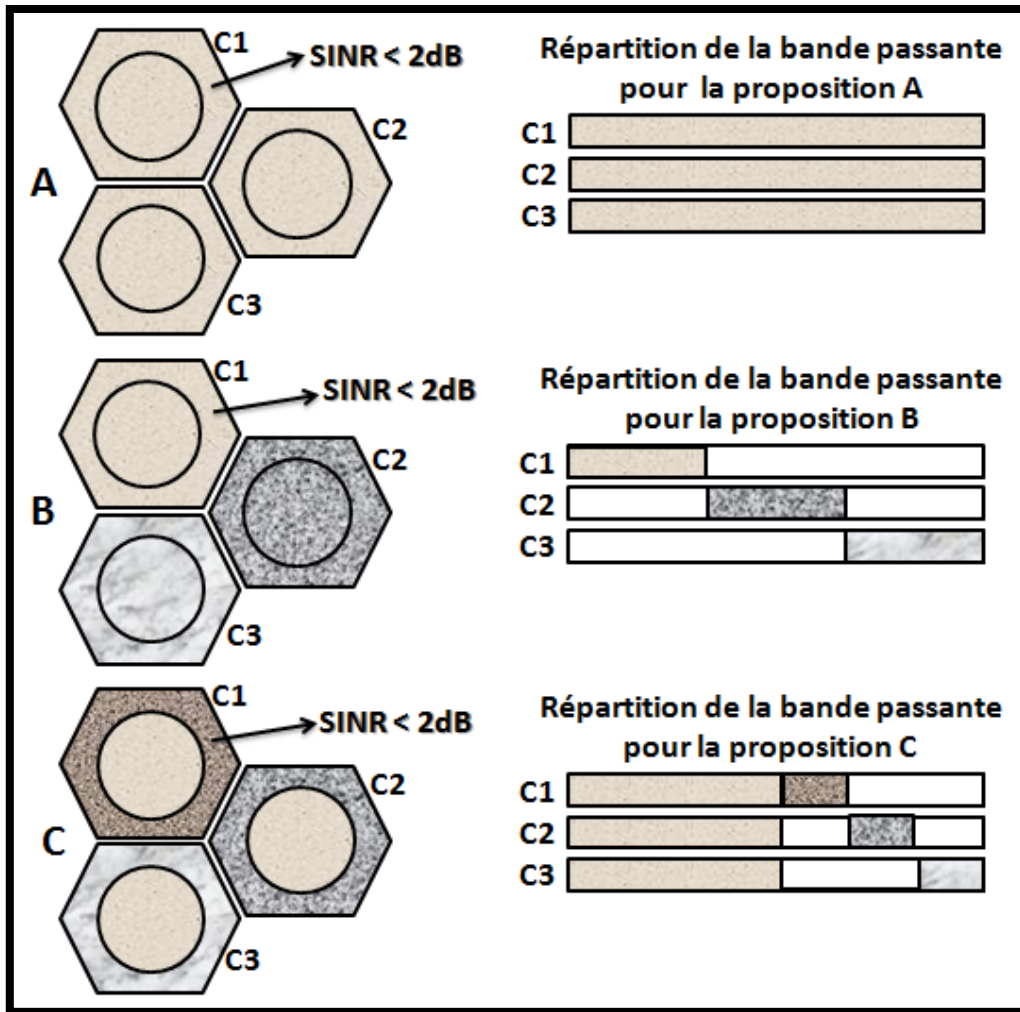
Les trois variantes sont couplées avec deux techniques de transmission Radio à savoir : le LP-OFDM (**Linear Precoding OFDM**) et la transmission simultanée de plusieurs ressources physiques issues de différentes stations de base adjacentes.

Le but de ces deux nouvelles techniques de transmission radio est de diminuer l'effet des interférences intercellulaires, tout en permettant l'exploitation de la majorité de la bande passante pour la transmission. Ceci permettra d'atteindre une grande capacité en sens descendant dans les cellules LTE.

La figure 3.7 schématise le principe de base de cette technique de gestion des interférences intercellulaires. La figure 3.8 présente les trois propositions de répartition fréquentielle.



**Figure 3.7 :** Le principe de base de la nouvelle technique de gestion des interférences intercellulaires



**Figure 3.8 :** Les trois propositions de répartition fréquentielle (A, B et C)

Dans la technique proposée, le traitement des interférences intercellulaires pour une cellule est reparti en deux cas suivant la zone d'existence.

- Dans la zone interne à la cellule ( $SINR \geq 2dB$ ), le LP-OFDM (précodage linéaire de la technique d'accès en sens descendant OFDM) est utilisé.
- Dans la zone de bordure  $SINR < 2dB$  plusieurs ressources physiques issues de différentes cellules adjacentes seront allouées à l'utilisateur. La figure 3.9 présente l'algorithme utilisé.

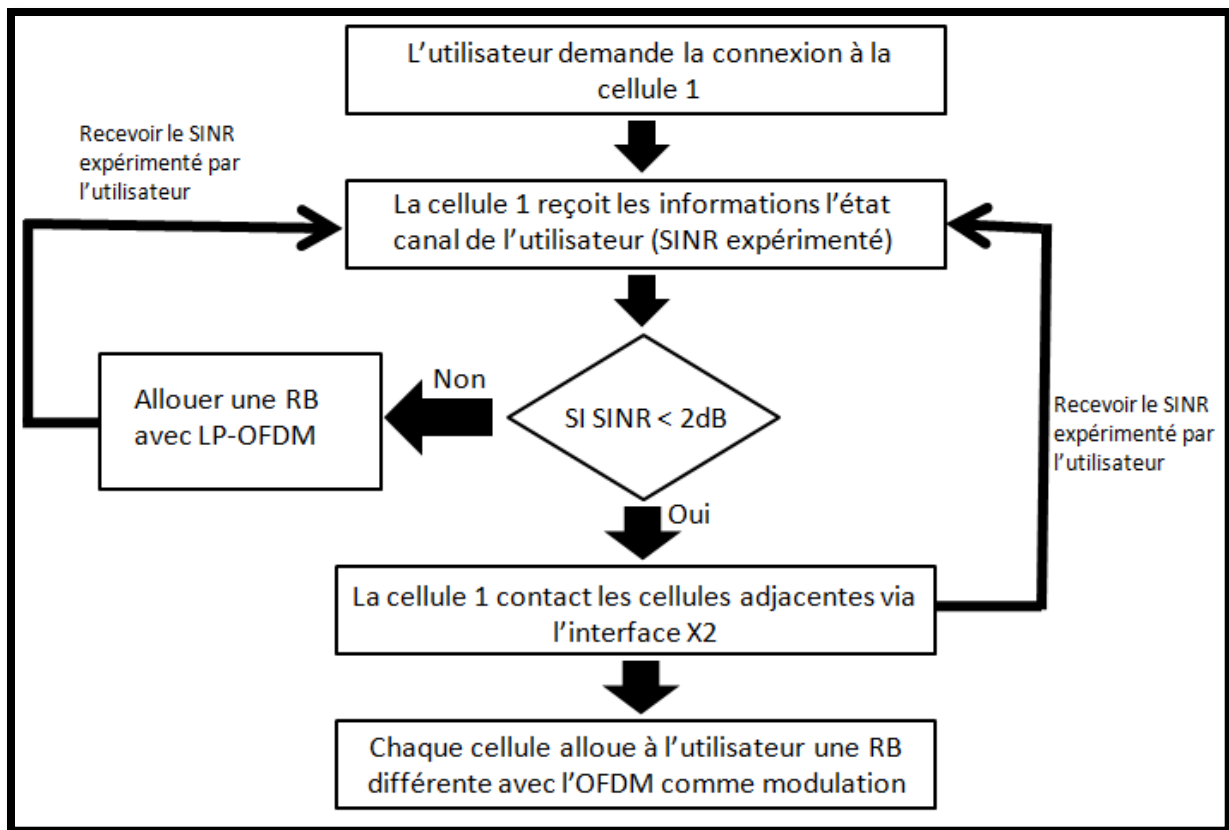


Figure 3.9 : Algorithme de gestion des ressources radio.

### III.3.2- Zone interne de la cellule : technique LP-OFDM.

Le LP-OFDM est un précodage linéaire de l'OFDM qui se base sur des matrices de dimension  $(L, M)$  en réalisant le précodage de l'information de l'utilisateur avant de la mapper sur la ressource physique allouée pour la modulation OFDM.

La figure 3.10 présente le schéma bloc de LP-OFDM avec un simple récepteur ZF (zéro forcing) ; le récepteur recommandé en LTE.

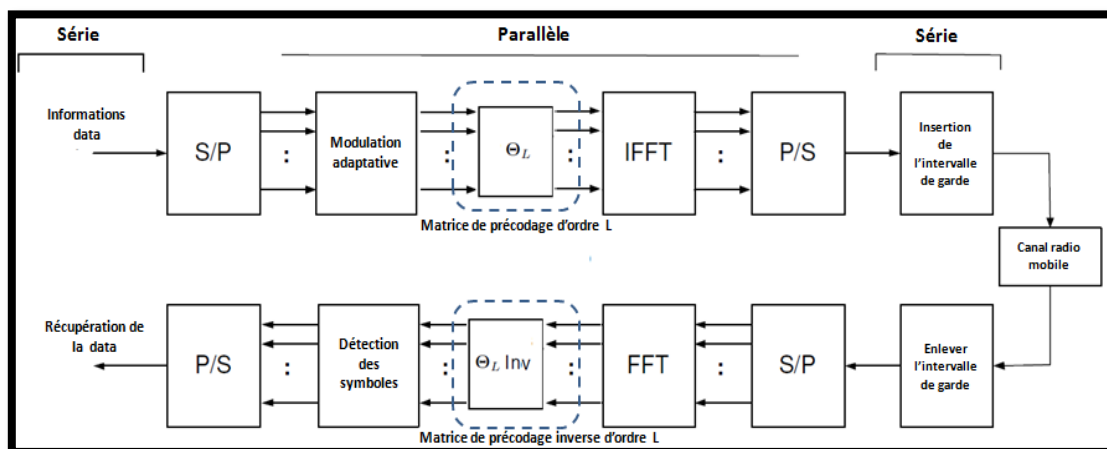


Figure 3.10 : Schéma bloc de la technique de pré codage linéaire LP-OFDM.

La chaîne de transmission est similaire à l'OFDM. On ajoute seulement un bloc de pré codage, représenté par une matrice  $\theta_L$ . Puis, en réception  $\theta_L^{inv}$  qui est la matrice inverse de précodage  $\theta_L$  « matrice de décodage » pour extraire l'information utile au niveau du récepteur.

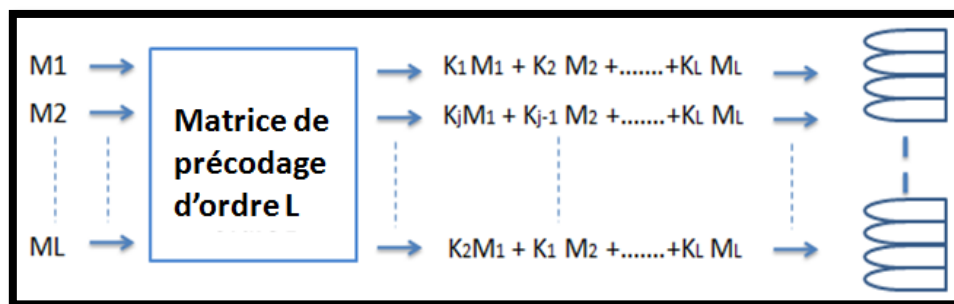
Dans notre étude on utilise les matrices carrées d'Hadamard d'ordre L (2, 4, 16, 64, 128), le choix de ses matrices réside dans le fait de la propriété de l'orthogonalité telle que :

$$\theta_L * \theta_L^t = L * I_L \quad (25)$$

Avec  $I_L$  la matrice d'identité d'ordre L et  $\theta_L^t$  est la matrice transposée de  $\theta_L$

$$\theta_L = \sqrt{\frac{2}{L}} \begin{bmatrix} \theta_{L/2} & \theta_{L/2} \\ \theta_{L/2} & -\theta_{L/2} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \theta_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1-j & -1+j \\ 1+j & -1-j \end{bmatrix} \quad (26)$$

Cette nouvelle technique de traitement ajoute une nouvelle dimension de diversités d'ordre L :



**Figure 3.11** : Pré codage d'ordre L.

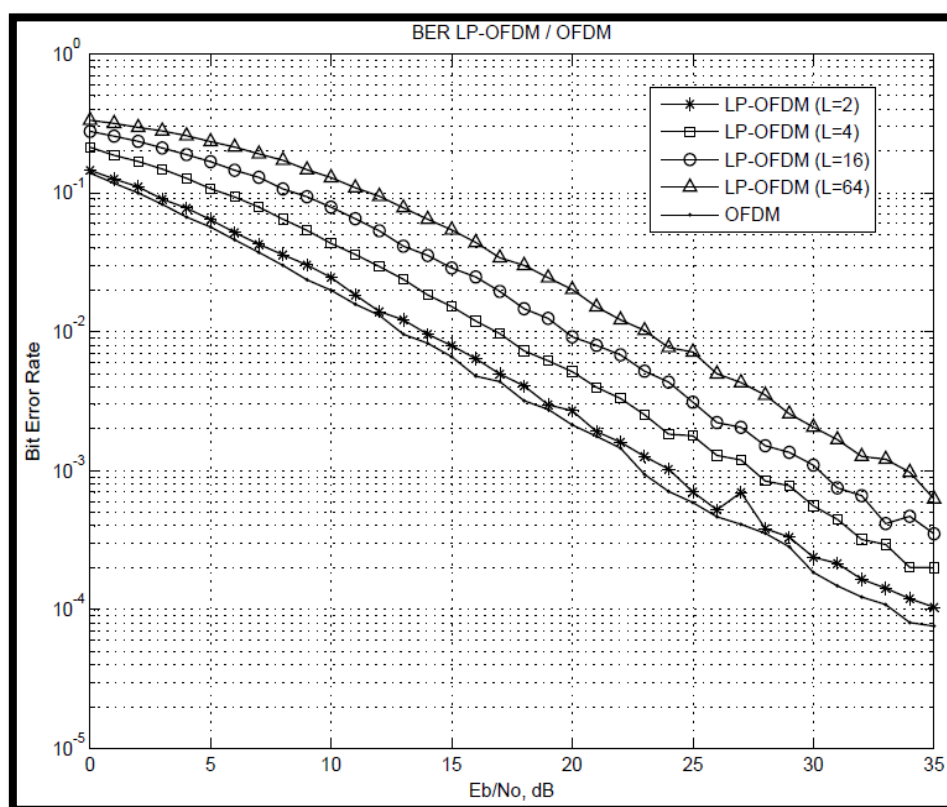
Avec un pré codage d'ordre L, chaque groupe de L symboles sera Mixé sur les L sorties du pré codeur. Ainsi après un mappage, chaque Sub-carrier portera l'information sur les L symboles constituant le groupe pré codé. Cette nouvelle dimension de diversité permettra de restituer l'information utile même si quelques porteuses (Sub-carrier) sont inexploitable après passage dans le canal de transmission radio mobile. Ceci est impossible avec l'OFDM.

Malheureusement, cette nouvelle technique ne peut pas être exploitable avec un simple récepteur Zéro Forcing (ZF) ou Minimum Mean Square Estimation (MMSE). En effet, les interférences inter symboles empêchent la dé corrélacion de l'information par pré codage inverse : décodage.

**Tableau 3.1:** Paramètres de simulation.

Bande de transmission BW	20 MHz	Nombre des sous-porteuses occupées	1201
Durée de la sub-frame	0.5ms	Nombre des PRBs	100
Espacement des sous-porteuses	15 kHz	Nombre des symboles OFDM par sub-frame (Court/Long CP)	7/6
Fréquence d'échantillonnage	30.72 MHz (8 × 3.84 MHz)	Taille CP (µs/échantillon)	144 (short)
Taille de la FFT	2048		

La figure 3.12 présente les résultats de simulation du LP-OFDM réalisée avec un simple récepteur ZF. Elle met le point sur le problème des interférences inter symboles dans cette nouvelle technique par la croissance du taux d'erreurs binaires (BER).



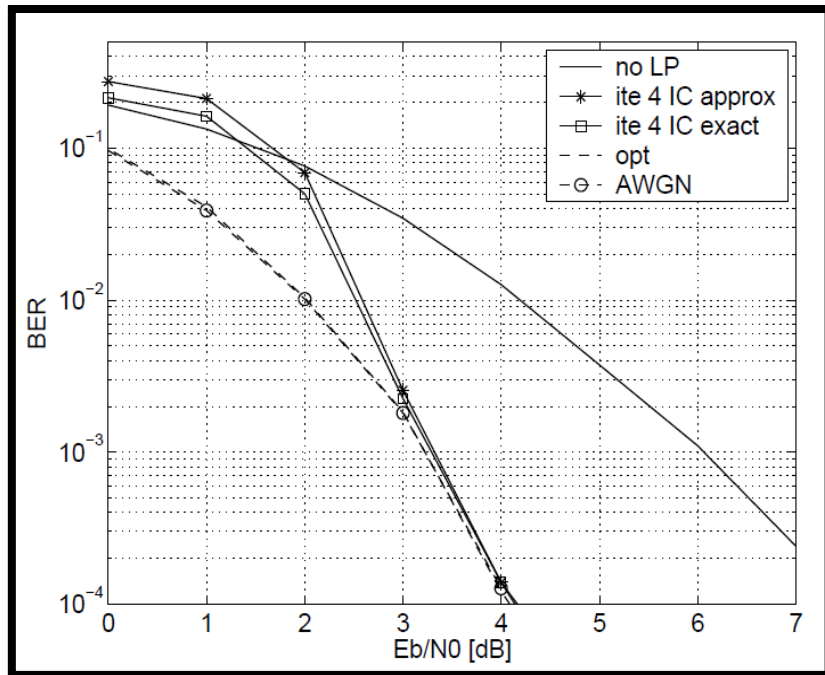
**Figure 3.12 :** LP-OFDM avec un récepteur ZF.

Avec l'augmentation de l'ordre du pré codage, les interférences inter symboles s'accroissent aussi, causant à leur tour l'augmentation du taux d'erreurs binaires BER. Ceci dégrade la qualité de la transmission par rapport à l'OFDM.

Pour remédier aux problèmes causés par les interférences inter symboles et garder un récepteur aussi simple que possible, une recherche faite par IEEE propose un récepteur itératif pour le système LP-OFDM avec le codage canal [65]. Ceci offre de très bons résultats en termes de taux d'erreurs binaires BER à un coût très faible de complexité (décodage par processus itératif (4 itérations seulement et faible consommation d'énergie). En fait, le projet de récepteur itératif ne nécessite aucune inversion de matrice et sa complexité n'augmente pas avec le pré codage linéaire, ni avec l'ordre de modulation. Les interférences inter symboles, créées par pré codage linéaire, sont efficacement éliminées dans le processus itératif : « **effet turbo** ». La figure 3.13 présente les résultats de LP-OFDM avec le récepteur itératif avec codage canal de taux  $\frac{1}{2}$ .

**Tableau 3.2** Les paramètres de simulation

<b>Fréquence</b>	5 GHz
<b>Fréquence d'échantillonnage</b>	57.6 MHz
<b>FFT Size</b>	1024
<b>Nombre de subcarriers</b>	768
<b>Bande de transmission</b>	42.75 MHz
<b>OFDM temps de garde</b>	3.73s
<b>Durée de la symbole OFDM</b>	21.52s
<b>Taille de la matrice de pré codage</b>	64
<b>Codage symbole</b>	QPSK
<b>Codage canal</b>	$\frac{1}{2}$



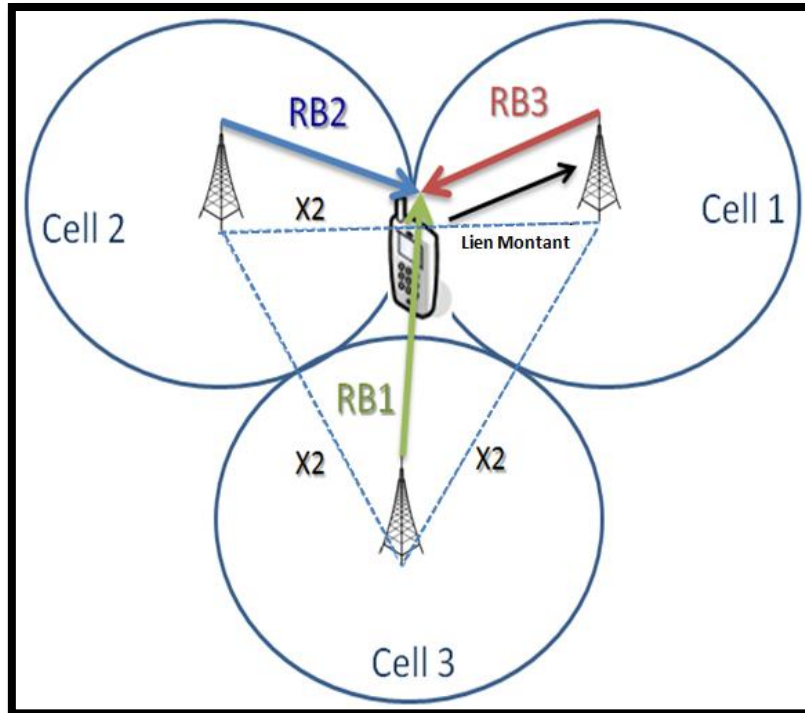
**Figure 3.13 :** Les performances en BER pour LP-OFDM pour un récepteur itératif avec un codage de taux  $\frac{1}{2}$ .

Le LP-OFDM avec un récepteur itératif présente des résultats meilleurs que l'OFDM pour les SNR supérieurs à 2 dB. Le gain en réduction des erreurs peut atteindre 2.5 à 3 dB en fonction de l'amélioration des conditions radio (SNR), ce qui justifie l'utilisation de cette technique pour la zone interne de la cellule où le SNR respecte cette condition.

### III.3.3- Zone au bord de la cellule : transmission multiple avec coordination (COMP).

La technique utilisée à l'extrémité de la cellule (Bordure des cellules) se base sur une collaboration entre les e-Node B adjacentes. En effet, pour son accès en sens descendant, un utilisateur en bordure de la cellule se voit allouer 2 à 3 ressources physiques différentes issues de différentes cellules adjacentes. Ces ressources allouées sont de différentes portions de la bande passante et chacune d'elles expérimente un canal radio mobile différent. Elles transportent la même information pour un utilisateur donné, Alors la diversité spatio-fréquentielle permet une diminution du taux d'erreur à la réception.

La figure 3.14 : présente un exemple simplifié du scénario de collaboration entre 3 stations de base mettant en œuvre la technique que nous avons proposée en bordure de la cellule :

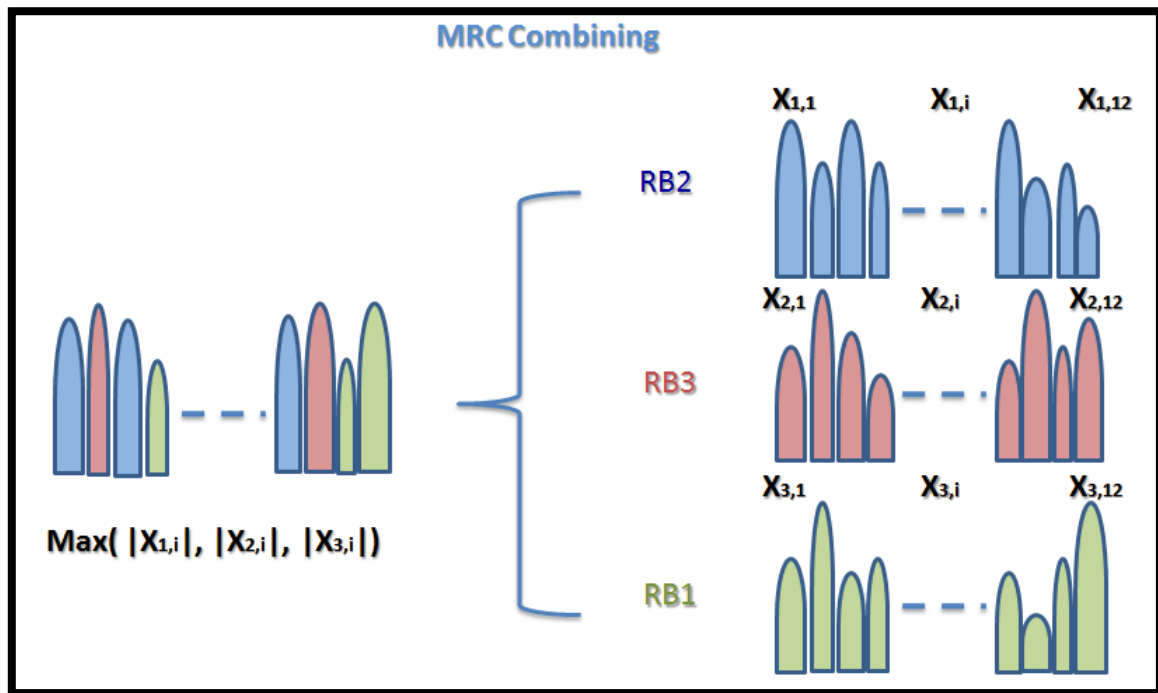


**Figure 3.14** : Scénario d’allocation des ressources physiques pour un utilisateur en bordure de la cellule.

L’utilisateur demande la connexion à la cellule qui a les conditions radio les plus favorables (le meilleur signal de référence reçu par l’utilisateur), ainsi que les informations des autres cellules les plus proches. La cellule cible contacte l’utilisateur et les cellules voisines via l’interface de communication X2 pour que les autres cellules affectent les ressources nécessaires à l’utilisateur. La cellule choisie comme cellule centrale, qui a les meilleures conditions radio, se chargera par la suite de communiquer les conditions canal aux cellules voisines via l’interface X2. Cette interface peut être utilisée comme envisagé par la 3GPP une interface de transmission de la data entre les e-NodeBs [66]. On note que pour servir un utilisateur, il faut que les deux ou trois e-NodeBs reçoivent les mêmes informations à émettre à l’utilisateur en bordure de la cellule. La faisabilité d’un tel mode de fonctionnement sera traitée dans la quatrième partie de ce chapitre.

L’utilisateur reçoit trois ressources physiques de trois stations de base différentes. Ces ressources ayant la même modulation symbole (4-QAM), le même codage canal et portant la même information. Le récepteur combine ces trois ressources en utilisant le **MRC** (Maximum Ratio Combining) : extraire la porteuse à puissance maximale, donc le meilleur profil canal. Ceci permettra à l’utilisateur d’extraire le meilleur signal des trois ressources allouées.

La figure 3.15 schématise la technique du MRC au niveau récepteur :

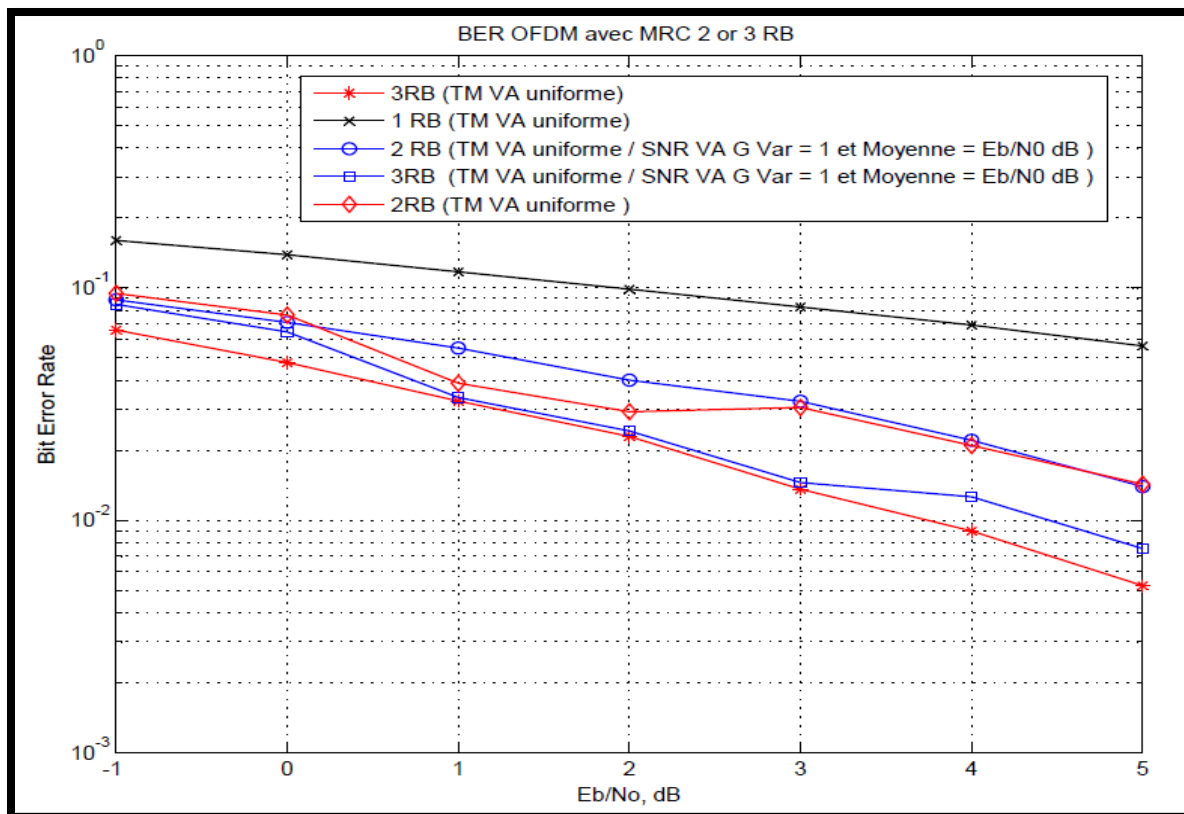


**Figure 3.15** : Implémentation du MRC au niveau récepteur.

La figure 3.16 présente les résultats de la simulation sous Matlab du scénario de transmission sur la figure 3.15.

**Tableau 3.3** : Les valeurs des paramètres de simulation.

<b>Trois cellules</b>	
<b>Schéma de simulation (Modèle A, B et C)</b>	
<b>Utilisateurs (Position fixe)</b>	Un utilisateur en bordure de trois cellules
<b>Bande passante</b>	5 Mhz
<b>Ordonnancement</b>	L'utilisateur utilise simultanément toute la bande passante de la cellule (100 Mb/s)
<b>Diamètre de la cellule</b>	500 m
<b>Fréquence centrale</b>	$F_c = 2.14\text{GHz}$
<b>Puissance de l'antenne émettrice</b>	46 dBm (émission en continue)
<b>Type d'antenne</b>	Antenne omni directionnelle de gain 0dB
<b>SNR</b>	Variable aléatoire gaussienne de moyenne ( $E_b/N_0$ dB) [-1dB jusqu'à 5 dB] et variance de 1 dB
<b>Ordonnanceur</b>	File d'attente plane
<b>Modulation</b>	QPSK
<b>Subframe</b>	1000



**Figure 3.16 :** Simulation du BER en fonction du SNR pour 2 et 3 ressources allouées avec utilisation du MRC au niveau du récepteur.

Il est clair qu'avec cette solution combinant plusieurs ressources physiques pour les trois modèles proposés A, B et C (les mêmes résultats pour un modèle à 3 cellules), nous pouvons améliorer considérablement les conditions de transmission pour les utilisateurs en bordure de la cellule. La combinaison de deux ressources radio (2RB) donne un gain supérieur à 5 dB en comparaison avec une seule ressource physique (1RB) et cela pour un SNR faible entre -1 dB à 5dB. Par ailleurs, l'utilisation de 3 RB donne un gain supérieur 6dB dans les mêmes conditions radio, ce qui montre l'efficacité de cette technique dans les cas de mauvaises conditions radio (Bordure des cellules).

### III.3.4- Faisabilité des modèles proposés A, B et C.

Dans LTE la gestion des interférences intercellulaires entre les cellules peut être statique ou semi-statique, avec différents niveaux de communications requis entre les eNodeBs.

Pour la coordination de l'interférence statique, chaque cellule prend la décision de façon indépendante. Cela évite en grande partie la signalisation sur l'interface X2, et permet une prise de décision rapide et par conséquent des temps de latence faibles (répond au besoin

des hauts débits). Mais il peut donner une certaine limitation de la performance car il ne peut pas prendre en compte les variations de la distribution des utilisateurs.

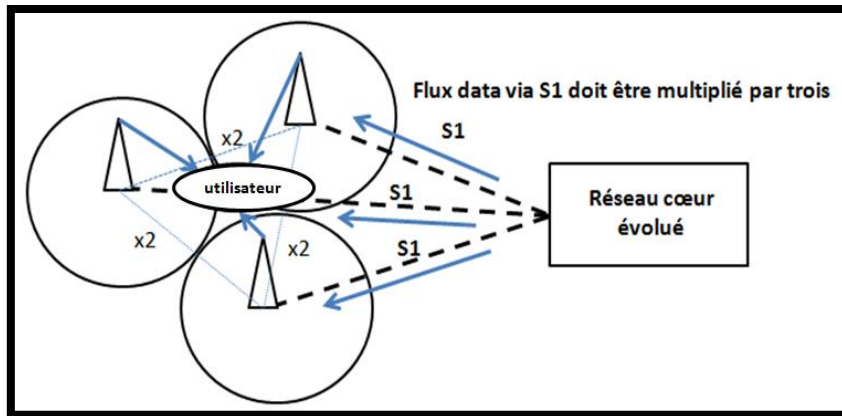
Pour notre **modèle B** (voir figure 3.8 modèle B) ; la coordination peut être statique vu que les ressources en bande passante sont divisées par 3 (facteur de réutilisation à 3). Ceci va permettre de réduire les interférences et aussi favoriser les utilisateurs en bordure des cellules (2 à 3RB). Mais malheureusement, la division de la bande passante en 3 dans le modèle B, causera une division de la capacité par 3.

Cependant, bien que la capacité soit divisée par 3, cela sera meilleur dans les environnements denses urbains par rapport à une implémentation traditionnelle comme il a été déjà montré dans le chapitre 2.

Pour le **modèle C** (voir figure 3.8 modèle C); il présente une amélioration du modèle **B**, car il bénéficie des avantages du modèle de coordination statique par réservation d'une partie de la bande passante uniquement aux utilisateurs en bordure des cellules. Il augmente en même temps la bande utilisée par rapport au modèle **B** en utilisant la même bande dans la zone interne à la cellule.

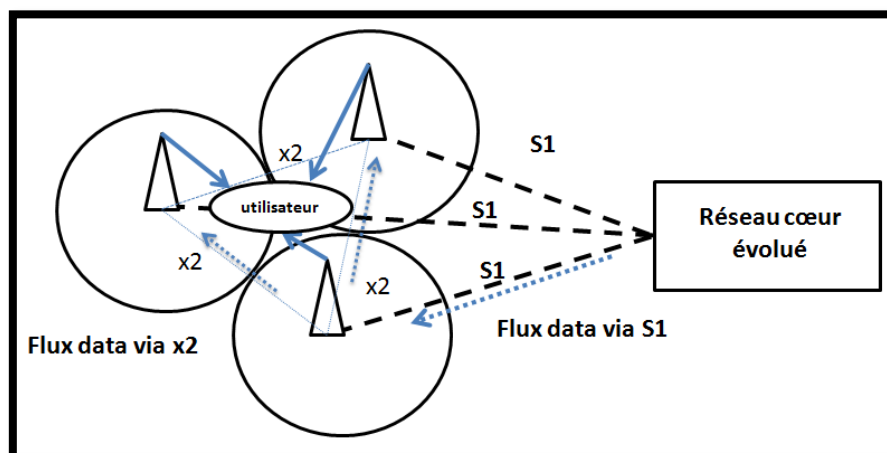
La coordination d'interférence semi-statique se réfère généralement à des reconfigurations effectuées sur une échelle de temps de l'ordre des secondes ou plus. Les moyens de communication inter-eNodeB sur l'interface X2 peuvent être utilisés. La coordination d'interférence semi-statique peut être plus bénéfique dans les cas de distributions de charge non uniformes dans les eNodeBs de différentes tailles de cellules à travers le réseau.

Le **modèle A** (voir figure 3.8) avec le facteur de réutilisation égal à 1 prévoit l'utilisation de toute la bande passante ce qui concorde avec la vision de la 3GPP pour le LTE. Cela ne peut pas se faire sans coordination semi-statique parfaite entre les cellules via X2 afin d'atteindre des résultats plus optimaux dans les zones urbaines. Une étude de simulation plus poussée en environnement multicellulaire doit être faite pour déduire les avantages de cette nouvelle technique sur un environnement urbain. Le défi majeur dans la proposition A, est que l'architecture de communication entre les eNodeBs doit satisfaire les contraintes de communication rapide de signalisation via l'interface x2 ainsi que l'échange de trafic data via l'interface S1 comme le montre la figure 3.17.



**Figure 3.17 :** Flux de données pour servir un utilisateur en bordure des cellules.

Pour servir un utilisateur en bordure des cellules le flux de données entre le réseau cœur et le réseau d'accès est multiplié par 3. Ceci peut causer une saturation dans le cas où plusieurs utilisateurs profitent du COMP en bordure des cellules. L'une des solutions proposées serait de revoir l'architecture de communication de réseau LTE pour intégrer l'utilisation de l'interface X2 afin de diffuser les données data entre les cellules en coordination. Cela est en respect avec les exigences de la 3GPP pour LTE qui ouvre l'utilisation de l'interface X2 ; pas uniquement à la signalisation mais aussi au transfert data et ouvre également la voie à l'utilisation du Handover entre cellules via X2 [66]. La figure 3.18 donne une illustration de la circulation du flux de données dans ce cas d'utilisation.



**Figure 3.18 :** Propagation du flux de données via l'interface X2.

Le transfert des données via l'interface S1 est effectué une seule fois. C'est la cellule qui se charge de diffuser la donnée via l'interface X2 entre les cellules en collaboration permettant ainsi de diffuser la data rapidement entre les cellules en collaboration.

### **III.4- Conclusion**

Les idées de base d'une nouvelle technique de gestion des interférences intercellulaires en sens descendant ont été présentées. Il a été montré que cela augmente la qualité de transmission et exploite toute la bande passante disponible.

Les résultats des simulations ont prouvé l'intérêt que peut offrir le LP-OFDM et la coordination cellulaire avec le MRC comme solution optimale et simple à implémenter en LTE.

Il a été proposé trois modèles d'implémentation (A, B et C) utilisable dans LTE, et nous avons énuméré les avantages pour chaque modèle par rapport à l'environnement d'utilisation.

Pour les milieux denses urbains avec des petites cellules nécessitant une signalisation très rapide, les modèles B et C pourront être utilisés pour garantir un temps d'allocation des ressources rapide. Toutefois cela sera obtenu dans la contrainte de perte de la bande passante.

Pour le modèle A à exploitation maximale de la bande passante avec une coordination semi-statique entre les cellules, il est nécessaire de faire une étude de simulation plus poussée en environnement multicellulaire pour déduire les avantages de cette nouvelle technique. Le défi majeur dans la proposition A, est que l'architecture de communication entre les eNodeBs doit satisfaire les contraintes de communication rapide de signalisation via l'interface x2 ainsi que l'échange de trafic data via x2 et l'interface S1 et cela en respectant la contrainte du temps d'allocation des ressources radio pour les utilisateurs mobiles.

## Conclusion générale

Le LTE constitue une évolution des systèmes sans fils de la 3GPP. Ceci a été conduit soit par une architecture plate des réseaux d'accès ou de transport répondant à la tendance tout-IP, soit par des objectifs très optimistes largement atteints par les tests tels que : latence réduite, débits et efficacité spectrale élevés, etc.

L'étude détaillée effectuée de l'impact des interférences intercellulaires en milieu urbain dans LTE a lancé une alerte sur un des grands problèmes de la 4G. Le taux des pertes peut aller jusqu'à 80% de la capacité de la cellule comme rapporté par un ensemble de grands constructeurs tels que ZTE, Coolpad et Qualcomm. Il y avait par conséquent la nécessité de trouver une solution pour le déploiement multicellulaire du LTE, dans les milieux urbain et urbain denses connaissant un effet d'interférences intercellulaires handicapant sur la capacité des cellules 4G. Des appels à projets ont été lancés pour des solutions de réduction des interférences dans les environnements urbain et urbain dense. Nous avons souscrit en proposant une des solutions envisageables pour ce problème.

La notre consiste à intégrer dans les cellules 4G un algorithme intelligent de gestion des ressources radio en fonction de l'état canal (SINR) de chaque utilisateur. L'algorithme proposé sépare le traitement des utilisateurs entre deux zones, la zone interne et la zone en bordure de la cellule.

La simulation d'un modèle simplifié avec interférences, a prouvé que pour la zone interne à la cellule ; l'utilisation du LP-OFDM permet aux utilisateurs d'avoir un gain de 3dB par rapport au débit normal, tandis qu'en bordure des cellules, la technique de coordination intercellulaire avec le MRC le gain peut aller jusqu'à à 6 dB. De tels résultats permettront aux utilisateurs dans cette zone de profiter de la modulation 64QAM en respectant les exigences de la qualité de transmission dans la 4G.

Le travail a été poursuivi par la simulation d'un modèle complet avec interférences pour le milieu urbain dense, pour les trois modèles (A, B et C) proposés pour la coordination statique et semi-statique. Il a prouvé que cette nouvelle technique permet d'obtenir une capacité meilleure par rapport aux autres techniques usuelles.

Toutefois il reste à conduire d'autres investigations pour éclaircir certains aspects et trancher sur la pertinence et la faisabilité pratique de telles solutions.

Ainsi il est nécessaire d'étudier l'impact de la nouvelle architecture de coordination sur les liens X2 d'interconnexion entre les cellules voisines en ce qui concerne le trafic de la signalisation ainsi que les données qui pourront circuler directement entre les cellules dans le cas de la coordination semi-statique.

Par ailleurs pour la coordination semi-statique, il est nécessaire de faire une étude sur la rapidité de la décision pour l'allocation des ressources radio.

De ; plus dans le cas de la coordination statique ; la prise de décision de l'allocation des ressources radio est rapide, une étude doit être conduite sur l'échange de trafic de données via l'interface S1 pour mieux optimiser et répondre aux quantités de trafic multiple de données dans ce type de coordination.

## Les références bibliographiques

- [1] 3GPP TR 25.913 Version 7.3.0/9.0.0 Release 7/9: Requirements for Evolved UTRA (E-UTRAN) and Evolved UTRAN (E-UTRAN), 2006-03/2009-12.
- [2] 3GPP TR-25.814- V7.1.0, “Physical Layer Aspects for E-UTRAN,” ANNEX A: Simulation Scenarios, 2010.
- [3] International Telecommunication Union. The World in 2015: ICT FACTS AND FIGURES 2015, ICT Data and Statistics Division, Telecommunication Development Bureau, International Telecommunication Union, Place des Nations, 1211 Geneva 20 – Switzerland, 2015.
- [4] 3GPP, Overview of 3GPP release 8. v.0.3.3, *European Telecommunications Standards Institute*, Mobile Competence Centre, 2014.
- [5] 3GPP, TR 36.913 Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN) (LTE-Advanced), December 2009 [Online]. Adresse Web: <http://ftp.3gpp.org/specs/html-info/36913.htm>. (Date de consultation: 2014).
- [6] The Evolution to 4G Cellular Systems: Architecture and Key Features of LTE-Advanced Networks, Ghassan A. Abed, Mahamod Ismail, Kasmiran Jumari, IRACST – International Journal of Computer Networks and Wireless Communications, 2012, Vol. 2, No. 1.
- [7] Tableau de bord Marché Internet au Maroc- Agence Nationale de Réglementation des Télécommunications (ANRT) -September 2015.
- [8] WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE, Harri HOLMA, Antti TOSKALA, par John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, UK, 4ème édition 2007.
- [9] 3G Evolution – HSPA & LTE for Mobile Broadband, Erik DAHLMAN, Stefan PARKVALL, Johan SKÖLD et Per BEMING, par Academic Press: imprimerie de Elsevier, UK, 1ère édition 2007.
- [10] Mobile broadband with HSPA and LTE – capacity and cost aspects, Nokia White paper, Nokia, June 2014.
- [11] Global Mobile Broadband: Market potential for 3G LTE (Long Term Evolution), Final Report for UMTS Forum, UMTS Forum, 2008.
- [12] LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, Stefania SESIA ST-NXP Wireless/ETSI, France, Issam TOUFIK ST-NXP Wireless, France et Matthew BAKER Philips Research, UK, par John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, UK, 1ère édition 2009.
- [13] 3GPP 36.912, 2010 (Release 9): 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility study for Further Advancements for E-UTRAN (LTE-Advanced), 2010.
- [14] 3GPP TS 36.133 version 9.3.0 Release 9 (2010-04): LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN); Requirements for support of radio resource management, 2010.
- [15] 3GPP TS 23.002 V8.5.0, Network architecture (Release 8), Juin 2009.
- [16] 3GPP TR 24.801 V8.1.0, 3GPP System Architecture Evolution (SAE); CT WG1 aspects (Release 8), December 2008.
- [17] 3GPP TR 23.882. V8.0.0, 3GPP System Architecture Evolution: Report on Technical Options and Conclusions (Release 8), December 2008.
- [18] Evolved Packet System (EPS) – The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS, Pierre LESCUYER et Thierry LUCIDARME : Alcatel-Lucent, France, par John Wiley &

- Sons Ltd, Chichester, West Sussex, UK, Edition 2008.
- [19] 3GPP TS 36.302, Release 8: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN); Services provided by the physical layer, 2009.
  - [20] 3GPP TS 36.201 Release 8, LTE Physical Layer: General Description, 2009.
  - [21] 3GPP TS 36.211, Release 8, Physical Channels and Modulation, 2009.
  - [22] 3GPP TS 36.212, Release 8, Multiplexing and Channel Coding, 2009.
  - [23] 3GPP TS 36.213, 2009, Physical Layer Procedures, Release 8.
  - [24] 3GPP TS 25.214, Release 8, Group Radio Access Network; Physical Layer Procedures (FDD)', 3GPP, 2009.
  - [25] 3GPP, release 9, Overview of 3GPP Release 9 V0.3.4, 2014.
  - [26] 3GPP Multimedia Broadcast and Multicast Service (MBMS) V0.0.2, 3GPP, 2013.
  - [27] 3GPP activities on Location Services V0.0.1, 2012.
  - [28] 3GPP, release 10, Overview of 3GPP Release 10 V0.2.1, 2014.
  - [29] Carrier Aggregation for LTE v0.1.1, 3GPP, 2014.
  - [30] 3GPP, release 11, Overview of 3GPP Release 11 V0.2.0, 2014.
  - [31] 3GPP, release 12, Overview of 3GPP Release 12 V0.1.4, 2014.
  - [32] 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband Second Edition, Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skoö Id, Elsevier, 2014.
  - [33] 3GPP work items on Small Cells v0.0.4, 3GPP, 2014.
  - [34] 3GPP, release 13, Overview of 3GPP Release 13 V0.0.6, 2014.
  - [35] 3GPP, release 14, Overview of 3GPP Release 14 V0.0.1, 2014.
  - [36] RAN 5G Workshop - The Start of Something, Phoenix, AZ, USA, September 19, 2015.
  - [37] LTE multi-cellular system in urban environment: inter-cell interference Impact on the Downlink radio transmission, Younes BALBOUL, Najiba EL AMRANI EL IDRISSE, International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJET), Vol. 4, Jun 2014.
  - [38] Initial Views on 5G Technologies - from Terminal Perspectives, 3GPP RAN Workshop on 5G Phoenix, AZ, USA, Sept. 17-18, 2015.
  - [39] 5G Views on Technology & Standardization Qualcomm, 3GPP RAN Workshop on 5G Phoenix, AZ, USA, Sept. 17-18, 2015.
  - [40] Considerations on 5G Key technologies & Standardization, 3GPP RAN Workshop on 5G Phoenix, AZ, USA, Sept. 17-18, 2015.
  - [41] LTE - Improving Quality Reception in Downlink Radio Resources Links, Younes BALBOUL, Fatiha MRABTI, Najiba EL AMRANI EL IDRISSE, Signals, Systems and Components Lab. Faculty of Science and Technology Fez, Morocco, 20th International Conference on Telecommunications - 20th International Conference on Telecommunications, IEEE, 2013.
  - [42] LTE – INTER-CELL INTERFERENCE MANAGEMENT TO IMPROVE THE QUALITY RECEPTION IN DOWNLINK RADIO RESOURCES LINKS, Younes BALBOUL, Fatiha MRABTI, Najiba EL AMRANI EL IDRISSE, Signals, Systems and Components Lab. Faculty of Science and Technology, Fez, Morocco, INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS AND COMMUNICATION ENGINEERING & TECHNOLOGY (IJECET), 3, March (2014).
  - [43] Enhancing LTE Cell-Edge Performance via PDCCH ICIC, Fujitsu Network Communications, 2801 Telecom Parkway, Richardson, Texas 75082-3515.
  - [44] 3GPP TR-36814-V9.0.0, "Physical Layer Aspects for E-UTRAN", 2010.
  - [45] Vienna university Austria, web site: <http://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vienna-lte-a-simulators/>. (Date de consultation: 2015, version du simulateur 2014).

- [46] LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, Second Edition. Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker. Published by John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [47] LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, par John Wiley & Sons Ltd. Chichester, West Sussex, UK, 1ere edition 2009.
- [48] 3GPP TS 36.211 V1.0.0, Physical Channels and Modulation for E-UTRAN, 2007.
- [49] Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer. Dr. Wes McCoy, Technical Editor, 3GPPEVOLUTIONWP,2014.
- [50] The Vienna LTE Simulators - Enabling Reproducibility in Wireless Communications Research Christian Mehlführer, Josep Colom Ikuno, Michal Šimko, Stefan Schwarz, Martin Wrulich, and Markus Rupp,2014.
- [51] IST-WINNER D1.1.2 P. Kyösti, et al., "WINNER II Channel Models", Available: <https://www.ist-winner.org/WINNER2-Deliverables/D1.1.2v1.1.pdf>, ver 1.1, Sept. 2007.
- [52] Performance Comparison of LTE Transmission Modes in High Speed Channels using Soft Sphere Decoder, The International Journals of Engineering & Sciences (IJENS), Jun 2012.
- [53] TS 36,942 3GPP LTE path loss model, recommended by TS 36.942, subclause 4.5, 2014.
- [54] Spécification technique pour l'antenne Kathrein 742212, site web du constructeur: <https://www.kathrein.com/de/>, 2014.
- [55] Loi uniforme discrète: site web: [http://nobelis.eu/photis/Lois/uniforme\\_discrete.html](http://nobelis.eu/photis/Lois/uniforme_discrete.html), date de consultation: 2014.
- [56] Downlink Scheduling in 3GPP LongTerm Evolution (LTE), Thesis\_Tshiteya\_Dikamba, mars 2011.
- [57] Proportional Fair Multiuser Scheduling in LTE Signal Processing Letters, IEEE (Volume:16, Issue: 6) ISSN : 1070-9908 Page(s):461 – 464.
- [58] 3GPP Long Term Evolution (LTE): «4g-lte-world.blogspot.com », (Date de la consultation: 11/06/2012).
- [59] Dynamic Radio Resource Management in 3GPP LTE, Thesis, Sajid Hussain, Blekinge Institute of Technology, Suède, janvier 2009.
- [60] Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting 41, Athens, Greece, 9 – 13 Mai, 2005.
- [61] COMPARATIVE EVALUATION OF FRACTIONAL FREQUENCY REUSE (FFR) AND TRADITIONAL FREQUENCY REUSE IN 3GPP -LTE DOWNLINK, International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT) Vol.2, No.4, Août 2012.
- [62] Partial Frequency Reuse for Long Term Evolution, Wireless Communication Group, Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Decembre 2011.
- [63] MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES - A Graph Approach to Dynamic Fractional Frequency Reuse (FFR) in Multi-Cell OFDMA Networks. TR2009-037, Juillet 2009.
- [64] Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced: Deployment Scenarios and Operational Challenges, IEEE Communications Magazine, February 2012.
- [65] Low complexity iterative receiver for Linear Precoded OFDM, Cesson- Sévigné, France. Wireless And Mobile Computing, P.-J. Bouvet, M. Hélar , et V. Le Nir, Networking And Communications, IEEE International Conference 2005.

- [66] LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, Stefania SESIA ST-NXP Wireless/ETSI, France, Issam TOUFIK ST-NXP Wireless, France et Matthew BAKER Philips Research, UK , 31.2.3 X2 Interface Enhancements for Time-Domain ICIC, par John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, West Sussex, 2ème édition 2011.

## Annexe

### Démonstration de l'énergie du symbole OFDM en fonction de l'énergie du bit :

Soit par définition du symbole OFDM sans cyclique préfixe à énergie normalisé par rapport à l'énergie symbole M-QAM :

$$S_{\text{sans cp}}(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N M(k) e^{j2\pi \frac{(k-1)(n-1)}{N}} \quad \text{avec } 1 \leq n \leq N$$

Avec :

$N$  : Nombre de points FFT.

$N_p$  : Nombre de sous porteuses portant l'information utile.

$M(k)$  : le symbole numéro  $k$  de M-QAM.

Aussi l'énergie du symbole M-QAM en fonction de l'énergie du bit :  $E_{S \text{ M-QAM}} = nE_b$

$E_{S \text{ M-QAM}}$  : Energie du symbole M-QAM.

$E_b$  : Energie du bit.

$n$  : Le nombre de bit par symbole M-QAM.

Alors l'énergie du symbole OFDM  $S_{\text{sans cp}}(n)$  s'écrit de la manière analytique suivante :

$$E_{\text{sans cp}} = \sum_{i=1}^N |S_{\text{sans cp}}(i)|^2$$

$$E_{\text{sans cp}} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^{N_p} M(k) e^{j2\pi \frac{(k-1)(n-1)}{N}} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^{N_p} M^*(k) e^{-j2\pi \frac{(k-1)(n-1)}{N}} \right)$$

Vue l'orthogonalité entre les sous porteuse alors :

$$M(i)M^*(j) = 1 \text{ si } i=j \text{ et } M(i)M^*(j) = 0 \text{ si } i \neq j$$

$$\text{Ce qui donne : } E_{\text{sans cp}} = \sum_{k=1}^{N_p} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N M(k) M^*(k)$$

Alors :

$$E_{\text{sans cp}} = \frac{N_p}{N} M(k)^2 = \frac{N_p}{N} E_{S \text{ M-QAM}} = \frac{N_p}{N} nE_b$$

Par conservation de l'énergie : l'énergie du symbole OFDM avec cyclique préfixe s'écrit en fonction du symbole OFDM sans cyclique préfixe comme suite :

$$E_{\text{avec cp}} = \frac{T_D}{T_C + T_D} E_{\text{sans cp}}$$

Avec :

$T_D$  : la durée du symbole initial sans cyclique préfixe

$T_C$  : la durée du cyclique préfixe.

Finalement en obtiens la formule analytique de l'énergie symbole avec cyclique préfixe en fonction de l'énergie du bit :

$$E_{\text{avec cp}} = \frac{T_D}{T_C + T_D} \frac{N_p}{N} nE_b$$