

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE

EN

MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE APPLIQUÉES

PAR

AMAZIT ABDELGHANI

IMPACT DES INTERFÉRENCES DE LA COUCHE PHYSIQUE SUR
LA COUCHE MAC DANS LA TECHNOLOGIE LTE.

JUIN 2011

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

À mes enseignants

Veuillez trouver ici l'expression de mes profonds sentiments de respect pour le soutien que vous n'avez cessé de m'apporter.

Pour l'occasion, je désire remercier mes professeurs, M. Boucif Amar Bensaber et M. Adel Dahmane de m'avoir proposé de faire la maîtrise et pour le soutien qu'ils ont su m'apporter tout au long de mes travaux.

À ma famille

Nulle dédicace et remerciements ne sont susceptibles de vous exprimer ma profonde reconnaissance et mon immense gratitude pour tous les sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et mes études.

À tous (es) mes amis (es)

Trouvez ici le témoignage d'une fidélité et amitié infinies.

RÉSUMÉ

Les réseaux mobiles et sans fil ont connu un essor sans précédent ces dernières années. Il s'agit d'une part du déploiement de plusieurs générations successives de réseaux de télécommunications essentiellement dédiés à la téléphonie (2^{ème} Génération, GSM), puis plus orientés vers le multimédia (3^{ème} Génération, UMTS), la future génération de réseaux sans fil dite de quatrièmes générations (4G) apporte un véritable tournant dans le foisonnement et la disparité des solutions existantes.

L'objectif cette fois-ci sera certes d'augmenter les débits et les applications prises en charge par ces réseaux, mais encore de construire un cadre permettant leur interopérabilité.

Tandis que les premières solutions sont déjà disponibles auprès de la plupart des opérateurs de télécommunications, la plupart d'entre elles sont des solutions spécifiques à un type d'interconnexion et à un certain opérateur.

Dans ce contexte, un des défis majeurs rencontrés dans ce type de réseaux est la qualité de service (QoS) qui prend en charge la qualité des paquets transmis. Dans ce cas, les protocoles « Hybride Automatic Repeat Request » (HARQ) sont utilisés pour améliorer la fiabilité du réseau de communication et leur utilisation contribue à une exploitation efficace des ressources disponibles afin d'offrir un service fiable.

Notre travail consiste à réaliser une étude de l'impact des interférences de la couche physique sur le fonctionnement de la couche MAC, en particulier, sur le mécanisme d'acquittement HARQ. Aussi, nous procéderons à la réalisation d'une campagne de mesures et de tests afin de vérifier l'impact de l'HARQ sur le débit, le temps de transmission et le nombre de paquets versus le taux d'erreur. Ce travail ouvrirait le chemin à d'autres recherches dans cette technologie et précisément entre les couches les plus importantes qui sont MAC et physique dans le but d'améliorer l'interaction entre elles.

ABSTRACT

The mobile and wireless networks have experienced an unprecedented expansion in recent years. This is a part of the deployment of successive generations of telecommunications networks mainly dedicated to telephony (2nd Generation GSM), and more oriented towards multimedia (3rd Generation UMTS), the next generation of wireless networks called fourth generation (4G) brings a real turning point in the profusion and disparity of solutions.

The aim this time will certainly be to increase the flow and the applications that are supported by these networks but also to build a framework for interoperability.

While the former solutions are readily available from most telecom operators, most of them are solutions to a specific type of interconnection and operator.

In this context, one of the major challenges encountered in such networks is the quality of service (QoS), which supports the quality of transmitted packets. In this case, Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) protocols are used to improve the reliability of communication and its use contributes to an efficient use of available resources to provide reliable service.

Our work is to conduct a study of the impact of interference of the physical layer in the MAC layer operation, in particular, the HARQ acknowledgment mechanism. Also, we will proceed to carry out a campaign of measurements and tests to verify the impact on the HARQ throughput, the transmission time and the number of packets versus the error rate. This work would pave the way for further research in this technology and specifically between the most important layers that are the physical and MAC layer in order to improve the interaction between them.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

UE	User Equipment.
GSM	Global System for Mobile communications.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System.
EPC	Evolved Packet Core.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
MAC	Medium Access Control.
ARQ	Automatic Repeat reQuest.
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest.
LTE	Long Term Evolution.
SAE	System Architecture Evolution.
3GPP	Third Generation Partnership Project.
EPS	Evolved Packet System.
E-UTRAN	Evolved Umts Terrestrial Radio Access Network.
CDMA	Code Division Multiple Access.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
SC-FDMA	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access.
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access.

IP	Internet Protocol.
RNC	Radio Network Controller.
PDP	Packet Data Protocol.
RAB	Radio Access Bearer.
MME	Mobility Management Entity.
PDN GW	Packet Data Network Gate Way.
HSS	Home Subscriber Server
PCRF	Policy and Charging Rules Function.
QOS	Quality Of Service.
QCI	Qos Class Identifier.
EMM	Eps Mobility Management.
ESM	Eps Session Management.
HLR	Home Location Registrar.
IMS	Ip Multimedia Subsystems.
SIP	Session Initiation Protocol.
WAP	Wimax Access Point.
RLC	Radio Link Control.
PDCP	Packet Data Convergence Protocol.
NAS	Non Access Stratum.

RRC	Radio Resource Control.
RAN	Radio Access Network.
PSTN	Public Switched Telephone Network.
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service.
P-CSCF	Proxy- Call Session Control Function.
SCH	Synchronisation CHannel.
BCH	Broadcast CHannel.
FEC	Forward Error Correction.
MIMO	Multiple Input Multiple Output.
RF	Radio Frequency.
FDD	Frequency Division Duplex.
TDD	Time Division Duplex.
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation.
CRC	Cyclic Redundancy Code.
ECC	Error Correction Codes.
ACK	ACKnowledge.
RN	Request Number.
SN	Sequence Number.

PM	Phase Modulation.
FM	Frequency Modulation.
FSK	Frequency Shift Keying.
ASK	Amplitude Shift Keying.
OPNET	OPtimum NETwork performance.
NS	Network Simulator.
TCL	Tool Command Language.
OTCL	Object Tools Command Language.
LDPC	Low Density Parity Check.
MPDU	Mac Protocol Data Unit.
GBR	Guaranteed Bit Rate.
PUCCH	Physical Uplink Control CHannel.
PDCCH	Physical Downlink Control CHannel.
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator CHannel.
GGSN	Gateway Gprs Support Node.
GPRS	General Packet Radio Service.
PDU	Protocol Data Unit.
EMM	Eps Mobility Management.
ESM	Eps Session Management.

ARP Allocation and Retention Priority.

RPC Remote Procedure Call.

RRC Radio Resource Control

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	v
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES TABLES	xviii
CHAPITRE 1 : Les caractéristiques et les différents composants de la technologie LTE.	1
1.1 Introduction.....	1
1.1.1 Généralités de la technologie LTE (4G)	4
1.2 Caractéristique de la technologie LTE (4G)	4
1.2.1 Connexion permanente	4
1.2.2 Délai pour la transmission de données	5
1.2.3 Mobilité.....	5
1.2.4 Co-existence et Interfonctionnement avec la 3G	6
1.2.5 La flexibilité dans l'usage de la bande.....	6
1.2.6 Support du multicast	7
1.2.7 Couverture de cellule importante dans les zones urbaines et rurales	7
1.2.8 Débit sur l'interface radio	7
1.3 Caractéristiques du réseau central SAE	8
1.3.1 L'EPC est un réseau cœur paquet tout IP	8
1.3.2 L' EPC supporte les « Default bearers » et « Dedicated bearers ».....	8
1.3.3 EPC supporte le filtrage de paquet	9
1.4 Caractéristiques et entités du réseau EPS	9
1.4.1 Équipement Utilisateur (UE)	12
1.4.2 Entité eNodeB.....	13
1.4.3 Entité MME (Mobility Management Entity)	14

1.4.4 L'entité « Serving GW » (Serving Gateway)	16
1.4.5 Entité PDN-GW (Packet Data Network Gateway).....	17
1.4.6 Entité HSS (Home Subscriber Server).....	17
1.4.7 L'entité PCRF (Policy & Charging Rules Function).....	18
1.5 Conclusion	18
CHAPITRE 2 : Les couches du modèle LTE	19
2.1 Introduction	19
2.2 Les couches supérieures du protocole LTE	19
2.2.1 Couche NAS (non Access Stratum).....	20
2.2.2 Couche RRC (Radio Resource Control).....	20
2.2.3 Couche PDCP (Packet Data Convergence Protocol).....	21
2.2.4 Couche RLC (Radio Link Control)	22
2.3 La couche MAC (Medium Access Control) de LTE	22
2.3.1 Ordonnancement	23
2.3.2 La technique de retransmission HARQ	23
2.3.3 La recherche des cellules	24
2.3.4 Contrôle de l'énergie	24
2.3.5 Le protocole ARP (Allocation and Retention Priority)	24
2.3.6 Les voies logiques et leurs canaux de transport et d'utilisation	24
2.4 La couche physique de LTE	25
2.4.1 La trame physique LTE	26
2.4.2 Le codage du canal	27
2.5 Conclusion	27
CHAPITRE 3 : Le fonctionnement des protocoles d'acquittement ARQ et la technique HARQ	28
3.1 Introduction	28
3.2 Définition des protocoles d'acquittement ARQ.....	29
3.2.1 La raison d'utilisation de protocole d'acquittement	29
3.3 Les protocoles ARQ.....	31
3.3.1 Les protocoles d'acquittement	31

3.3.1.1 Le Protocole « Stop and Wait »	31
3.3.1.2 Le protocole « Go-Back-N (sliding window) »	34
3.3.1.2.1 Les caractéristiques du protocole Go Back N	35
3.3.1.2.2 Le fonctionnement du protocole Go Back N.....	35
3.3.1.2.3 Efficacité du protocole « Go Back N »	37
3.3.1.2.4 Conclusion	38
3.3.1.3 Le protocole répétition sélectif (Selective Repeat)	38
3.3.1.3.1 Les Caractéristiques du protocole SRP	39
3.3.1.3.2 Les méthodes de retransmission des paquets perdues	39
3.3.1.3.3 L'efficacité de protocole SRP	40
3.4 Le protocole d'acquittement HARQ	40
3.4.1 Les caractéristiques de protocole HARQ	41
3.4.2 Type de fonctionnement de protocole HARQ	42
3.4.3 Utilisation d'HARQ dans la technologie LTE	43
3.4.4 Modulation d'amplitude en quadrature (QAM)	44
CHAPITRE 4 : Résultats expérimentaux	47
4.1 Introduction.....	47
4.2 Méthodologie de simulation	47
4.2.1 Les simulateurs réseau	48
4.2.2 Buts	48
4.2.3 Déroulement.....	48
4.2.4 Les avantages des simulations réseau	49
4.2.5 Les inconvénients des simulations réseau.....	50
4.3 Le Simulateur utilisé	51
4.3.1 La structure d'OPNET	52
4.4 Implémentation	53
4.4.1 Comparaisons du temps de réponse	54
4.4.1.1 Description du modèle	55
4.4.1.2 Analyse et résultats.....	60
4.4.2 Impact de la mobilité sur le fonctionnement d'HARQ.....	63

4.4.2.1 Analyse	65
4.4.2.2 Résultats.....	66
4.4.3 Impact des interférences de la couche physique sur le fonctionnement d'HARQ	66
4.4.3.1 Interférence (Bande passante 10MHZ).....	66
4.4.3.1.1 Description du modèle.....	67
4.4.3.1.2 Impact de la mobilité sur l'interférence.....	68
4.4.3.1.3 Analyse de la perte de paquets	69
4.4.3.1.4 Analyse du taux de retransmission	70
4.4.3.1.5 Conclusion	71
5 CONCLUSION.....	72
6 PERSPECTIVES	74
7 BIBLIOGRAPHIE	75
ANNEXE 1: simulation avec une bande passante de 20Mhz.....	80
1 Interférence avec une bande passante (20Mhz).....	80
1.1 Analyse	82
1.2 Résultats et conclusion.....	85
ANNEXE 2 : Configuration et paramétrage des composants LTE.	86
1 Contrôle d'admission	86
1.1 L'entité Efficiency attributes (Efficacité des attributs).....	87
1.2 Mode (modalité).....	88
1.3 L'attribut HARQ specific parameters (paramètres de HARQ).....	89
1.4 L'entité LTE physical profiles (profils physiques)	90
2 L'entité eNodeB.....	90
2.1 L'entité de paramétrage de contrôle d'admission.....	91
2.1.1 L'entité Symboles PDCCH par sous-trame	91
2.1.2 Le taux de charge UL.....	91
2.1.3 Porteur inactif en pause.....	92
2.2 L'entité physique	92
2.2.1 Le gain d'antenne dBi (Antenna gain)	92

2.2.2 La puissance d'émission maximale	92
2.2.3 La sensibilité du récepteur en dBm	92
2.3 Les paramètres de contrôle L1/L2	93
2.3.1 La configuration de PUCCH.....	93
2.3.2 La configuration de PDCCH.....	94
2.3.3 La configuration de PHICH	94
2.3.4 La configuration de PDCP	95
2.4 Les paramètres d'accès aléatoire	95
3 EPC	96
3.1 Les paramètres de GTP	97
4 Équipement utilisateur (UE)	97
4.1 La partie physique d'équipement utilisateur	98
4.2 La configuration des porteurs (Bearers) EPS.....	99
4.2.1 Le filtrage des paquets TFT	99
4.2.2 La configuration de Radio porteur RLC	100
4.3 Les paramètres de HARQ	101
4.4 L'identification de l'entité EPC et eNodeB	101
4.5 Minuteries (Timers)	102

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Le « hard handover »	5
Figure 2: Le « soft handover »	6
Figure 3: Le fonctionnement du multicast	7
Figure 4: L'architecture d'EPS.....	10
Figure 5: L'évolution des réseaux mobiles	11
Figure 6: Le graphe d'états fini d'UE.....	13
Figure 7: L'architecture E-UTRAN.....	13
Figure 8: Architecture LTE : Plan de contrôle.....	19
Figure 9: Architecture LTE au plan de données utilisateur.....	20
Figure 10: Fonctionnement de la couche RRC.....	21
Figure 11: La trame physique LTE.....	26
Figure 12: L'évolution de système cellulaire	28
Figure 13: Le principe de fonctionnement de protocole d'acquittement.....	29
Figure 14: La technique d'envoyer les paquets et leurs acquittements.....	30
Figure 15: Méthode d'acquittement (acquittement positif ou négatif).....	31
Figure 16: Le calcul de l'efficacité du protocole Stop and Wait	33
Figure 17: Le fonctionnement du protocole Go-Back-N.....	34
Figure 18: la décomposition d'un paquet.....	35
Figure 19: Le calcul de l'efficacité du protocole Go Back	37
Figure 20: La méthode (Chase Combining)	42
Figure 21: La méthode (Incremental redundancy)	43
Figure 22: Le diagramme d'interaction pour HARQ-ARQ.....	44
Figure 23: La méthode d'utilisation de QAM au niveau de l'émetteur.....	45
Figure 24: La méthode inverse au niveau de récepteur.	46
Figure 25: LTE License.....	47
Figure 26: Étapes pour la réalisation d'une simulation	49
Figure 27: Les étapes pour la réalisation d'une simulation avec Opnet	51
Figure 28: Le node domain sous OPNET.....	52

Figure 29: Le modèle utilisé pour étudier le temps de réponse.....	54
Figure 30: Les composants utilisés lors de simulations.....	55
Figure 31: Lancement des simulations.....	60
Figure 32: Temps de réponse (avec et sans HARQ).....	61
Figure 33: La retransmission des paquets perdue (HARQ).....	62
Figure 34: Le temps de réponse (en changeant la taille des paquets).....	62
Figure 35: Modèle pour étudier l'impact de la mobilité sur HARQ.....	64
Figure 36: La réaction d'HARQ avec des nœuds fixes.....	64
Figure 37: HARQ avec un noeud mobile.....	65
Figure 38: Les différentes bandes passantes utilisées dans LTE.....	66
Figure 39: Les composants utilisés.....	67
Figure 40: Le modèle pour étudier l'interférence.....	67
Figure 41: Les paquets perdus selon le taux d'interférence.....	68
Figure 42: Les paquets retransmis à cause d'interférence.....	69
Figure 43: Le trafic reçu versus le taux d'interférence.....	70
Figure 44: Les trois scénarios utilisés (20MHZ).....	80
Figure 45: Configuration FDD2 (20MHZ).....	80
Figure 46: Configuration FDD (20MHZ).....	80
Figure 47: Configuration FDD3 (20MHZ).....	81
Figure 48: Les paquets perdus (bande passante 20MHZ).....	81
Figure 49: Les paquets perdus (bande passante 10MHZ).....	82
Figure 50: Les paquets retransmis (bande passante 20Mhz).....	83
Figure 51: Les paquets retransmis (bande passante 10Mhz).....	83
Figure 52: Le trafic reçu (bande passante 20Mhz).....	84
Figure 53: Le trafic reçu (bande passante 10Mhz).....	85
Figure 54: Exemple d'un projet avec quelques composants LTE.....	86
Figure 55: L'entité Efficiency attributes.....	87
Figure 56: Le mode physique.....	88
Figure 57: le paramétrage de l'attribut HARQ.....	89
Figure 58: Les différents choix de bande passante.....	90

Figure 59: Les attributs d'eNodeB.....	90
Figure 60: L'entité de paramétrage de contrôle d'admission.....	91
Figure 61: Les paramètres physiques.....	92
Figure 62: Les paramètres de contrôle L1/L2.....	93
Figure 63: La configuration de PUCCH.....	93
Figure 64: La configuration de PDCCH.....	94
Figure 65: La configuration de PHICH.....	94
Figure 66: La configuration de PDCP.....	95
Figure 67: Les paramètres d'accès aléatoire.....	95
Figure 68: L'entité EPC.....	96
Figure 69: Les paramètres de GTP.....	97
Figure 70: L'entité équipement utilisateur.....	98
Figure 71: La partie physique d'équipement utilisateur.....	98
Figure 72: La configuration des porteurs (Bearers).....	99
Figure 73: Le filtrage des paquets TFT.....	99
Figure 74: La configuration de radio porteur RLC.....	100
Figure 75: Les paramètres HARQ.....	101
Figure 76: L'identification de l'entité EPC et eNodeB.....	101
Figure 77: Les minuteries.....	102

LISTE DES TABLES

Tableau 1: Les principales normes du standard IEEE 802.16	2
Tableau 2: La Cartographie des voies logiques aux canaux de transport.	25
Tableau 3: La Comparaison entre les deux principaux simulateurs réseau.	48
Tableau 4: Les configurations spécifiques.....	56

CHAPITRE 1 : Les caractéristiques et les différents composants de la technologie LTE.

1.1 Introduction

L'évolution et la progression technologiques ont connu un sommet avec la création d'Internet et sa propagation à travers les quatre coins du monde. Ce dernier joue un rôle efficace dans la distribution et le partage rapide et gratuit de l'information, toutefois, on remarque une lacune dans le mode des communications à grande échelle [1].

Les téléphones cellulaires sont en progression constante. Ils sont utilisés non seulement pour les communications vocales, mais également, grâce aux avancées technologiques, pour la partie vision comme dans (3G, 4G), dans le partage d'applications et même comme modems sans fil ou navigateurs web [2].

Dans le début des années 2000, plusieurs opérateurs mobiles et équipementiers télécoms et organisations se sont réunies dans le but de développer un réseau de mobile dit nouvelle génération basée sur la 3G et appelée LTE (Long Term Evolution). Le principal avantage de ce nouveau standard est de permettre des débits pouvant aller jusqu'à 1 Gigabit/s en vitesses fixes (stable), et 100 Mbit/s pour les utilisateurs mobiles.

Le tableau ci-dessous illustre l'évolution des normes du standard IEEE 802.16.

Tableau 1: Les principales normes du standard IEEE 802.16 [3,4].

Norme	Date de ratification	Plage des fréquences	Débit (maximum)	Portée (maximum)
802.16a	29 janvier 2003	2-11 GHz	70 Mbit/s	~50 km
802.16d	24 juin 2004	2-11 GHz	75 Mbit/s	~7 km
802.16e	7 décembre 2005	2-6 GHz	30 Mbit/s	~3,5 km
802.16m	En cours de normalisation	-	1 Gb/s (fixe ou nomade) 100 Mb/s (mobile)	-

Le système 4G permet la mise à niveau des réseaux de communication. Il devrait fournir une solution IP complète et sécuriser pour les installations multimédias, telles que la voix et les données multimédias qui seront fournies aux utilisateurs; dans un esprit de « Anytime, Anywhere », avec une qualité de service beaucoup plus élevée par rapport aux générations précédentes [5].

L'initiative, nommée LTE/SAE (System Architecture Evolution), résulte de la version 8 des spécifications 3GPP (Third Generation Partnership Project). En plus d'un débit de 100 Mb/s, le nouveau standard devrait permettre aux opérateurs de réduire leurs coûts. Ce dernier critère est crucial pour le développement d'une technologie, et ainsi il permettrait aux utilisateurs de bénéficier de meilleures performances et d'un temps de latence

diminué. L'IEEE, au travers d'un groupe de travail spécifique 802.21, a proposé un cadre général pour un développement harmonieux de cette interopérabilité [5].

Le présent mémoire est constitué de cinq parties : la première partie comprend une introduction qui décrit d'une façon générale la technologie de quatrième génération des réseaux de communication cellulaires sans fil. Nous faisons un état de l'art qui illustre les caractéristiques de la technologie de la quatrième génération et leurs différents composants, en focalisant sur un des défis majeurs rencontrés dans ce type de réseaux, qui est la qualité de service (QoS), qui prend en charge la qualité des paquets transmis.

La deuxième partie est une brève description du fonctionnement de la couche physique et de la couche liaison ainsi que les différentes interactions entre elles. Nous focalisons toujours sur l'aspect de la qualité de service.

Dans la troisième partie, on détaillera le fonctionnement des protocoles d'acquittement ARQ et spécialement la technique HARQ.

La quatrième partie présente le processus des tests à travers de nombreuses simulations. Ceci consiste à réaliser une étude afin de vérifier l'impact des interférences de la couche physique sur le fonctionnement de la couche MAC, en particulier, sur le mécanisme d'acquittement ARQ et HARQ.

Finalement, le mémoire se termine par une conclusion qui résume notre travail et nos résultats de recherche.

Dans ce qui suit, nous présentons les différentes parties de la technologie 4^{ème} génération; ainsi que l'architecture et les composants de cette dernière.

1.1.1 Généralités de la technologie LTE (4G)

L'idée et le projet pour développer la technologie LTE sont menés par l'organisme de standardisation 3GPP visant à rédiger les normes techniques de la future quatrième génération en téléphonie mobile.

Cette technologie a comme but de permettre le transfert de données à très haut débit, avec une portée plus importante, un nombre d'appels par cellule supérieur (zone dans laquelle un émetteur mobile peut entrer en relation avec des terminaux) et un temps de latence plus faible.

En théorie, elle permet d'atteindre des débits de l'ordre de **50 Mb/s** en lien ascendant et **de 100 Mb/s** en lien descendant, de partager entre les utilisateurs mobiles à l'intérieur d'une même cellule. Pour les opérateurs (qui ont la partie la plus importante pour supporter cette technologie), LTE implique de modifier le cœur du réseau et les émetteurs radio. Il faut également développer des terminaux mobiles adaptés.

En termes de vocabulaire informatique, le futur réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System). Il est combiné du nouveau réseau appelé LTE (Long Term Evolution) et du nouveau réseau central appelé SAE (System Architecture Evolution) [6].

1.2 Caractéristique de la technologie LTE (4G)

1.2.1 Connexion permanente

Parmi les objectifs les plus importants de l'accès à haut débit, on retrouve la connexion permanente à l'Internet. Même si la connexion est permanente au niveau du réseau, il est toujours nécessaire pour le terminal de passer de l'état IDLE à l'état ACTIF lorsqu'il veut échanger du trafic avec d'autres terminaux. Ce changement d'état se réalise en moins de 100 ms.

Le principe de ce réseau, est qu'il peut recevoir le trafic de tout terminal rattaché, puisque ce dernier dispose d'une adresse IP. La procédure sert à mettre en mémoire les données,

ensuite de réaliser l'opération de « paging » afin de localiser le terminal et lui demander de réserver et de préparer des ressources pour lui acheminer le trafic [6].

1.2.2 Délai pour la transmission de données

Le délai pour la transmission de données est de moins de 5 ms entre l'équipement utilisateur (UE) et « l'Access Gateway » (passerelle d'accès) dans une situation de non-charge où un seul terminal est actif sur l'interface radio. La valeur moyenne du délai devrait avoisiner les 25 ms en situation de charge moyenne. Ainsi, il permet de supporter les services en temps réel IP nativement, comme la voix et le « streaming » sur IP [7].

1.2.3 Mobilité

Avec le facteur de la mobilité, la technologie assure le bon fonctionnement à des vitesses comprises entre 120 et 350 km/h où le « handover » comme est illustré dans la figure 1 pourra s'effectuer, LTE ne permet que le « hard handover » et non pas le « soft handover » dans des conditions où l'usager se déplace à grande vitesse comme démontrer dans la figure 2 [8].



Figure 1: Le « hard handover » [9].



Figure 2: Le « soft handover » [9].

1.2.4 Co-existence et Interfonctionnement avec la 3G

La technique du handover entre E-UTRAN (evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) et celle d'UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) doivent être réalisées en moins de 300 ms pour les services temps réels et 500 ms pour les services non-temps réels. Il est clair qu'au début du déploiement et d'exploitation de LTE peu de zones seront couvertes.

Il s'agira de garantir et d'assurer que le « handover » entre LTE et la 2G/3G soit toujours possible. De plus, le « handover » pourra également s'effectuer entre LTE et les réseaux CDMA-2000. Les opérateurs qui utilisent le CDMA (Code Division Multiple Access) évolueront aussi vers la LTE qui deviendrait prochainement le standard de communication mobile de 4^{ème} génération [6].

1.2.5 La flexibilité dans l'usage de la bande

La technologie LTE offre la possibilité et la flexibilité d'opérer dans des allocations de bande de fréquences avec différentes tailles incluant 1.25, 2.5, 5, 10, 15 et 20 MHz [10].

1.2.6 Support du multicast

Le LTE supportera la technologie multicast (voir figure 3) nécessaire pour les applications multimédias telle que la télévision (Broadcast).

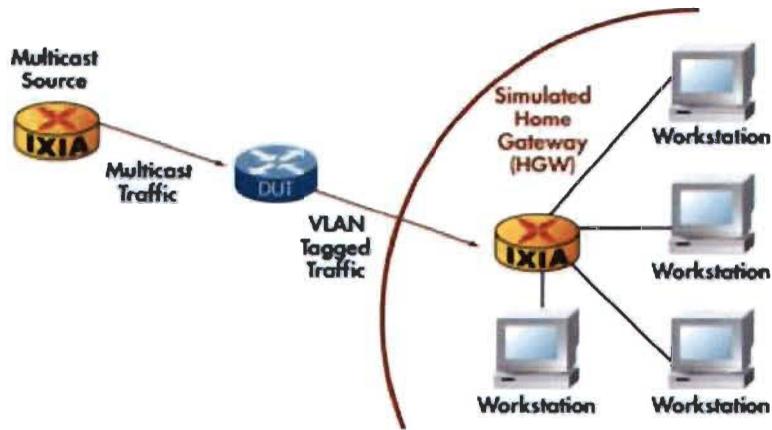


Figure 3: Le fonctionnement du multicast [11].

1.2.7 Couverture de cellule importante dans les zones urbaines et rurales

Non seulement la technologie LTE pourra opérer sur des bandes de fréquences diverses et particulièrement basses comme celle des 700 MHz (choisies par les opérateurs AT&T et Verizon Wireless), il sera aussi possible de prendre en considération des cellules qui couvriraient un large diamètre [6].

1.2.8 Débit sur l'interface radio

La technologie LTE offre un débit de 100 Mbit/s pour le flux descendant et de 50 Mbit/s pour le flux ascendant. Pour ce qui est de l'interface radio E-UTRAN, elle doit avoir la possibilité de supporter un débit maximum. L'allocation d'une bande passante 20 MHz supporte un débit de 100 Mbit/s pour le sens descendant et de 50 Mbit/s pour le sens ascendant. Les technologies utilisées pour atteindre ces objectifs sont OFDMA

(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le sens descendant et SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) pour le sens ascendant [12].

Par exemple, l'efficacité du spectre de 5 bit/s/Hz pour le sens descendant et 2,5 bit/s/Hz pour le sens ascendant avec une bande passante de 20 MHz permet d'atteindre des débits de 100 Mbit/s et 50 Mbit/s.

On considère la technologie HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) lorsque l'efficacité spectrale est de 2,9 bit/s/Hz dans le sens descendant pour atteindre une vitesse de 14,4 Mbit/s. On est obligé d'allouer une bande passante de 5 MHz. Par contre, la technologie LTE, nous donne la possibilité d'opérer avec une bande de fréquence comprise entre : 1.25, 2.5, 5, 10, 15 et 20 MHz. L'intention de cette flexibilité est de permettre un déploiement en fonction des besoins des opérateurs et des services qu'ils souhaitent proposer.

1.3 Caractéristiques du réseau central SAE

Nous citerons dans ce qui suit, quelques caractéristiques de SAE (System Architecture Evolution).

1.3.1 L'EPC est un réseau cœur paquet tout IP

Comparativement aux différents réseaux 2G et 3G qui utilisent les deux domaines de commutation de circuits CS (Circuit Switched) et de commutation de paquet, PS (Packet Switched), le réseau central (core network), opère avec un seul domaine de paquet appelé EPC (Evolved Packet Core), qui offre tous ces services en IP.

1.3.2 L' EPC supporte les « Default bearers » et « Dedicated bearers »

Dès le moment, où l'usager se joint au réseau EPC, il réserve un « default bearer » qui représente une connectivité permanente (établis tant que l'usager est toujours attaché au réseau), mais sans débit garanti [13].

Ensuite, lorsque l'usager souhaitera établir un appel qui requiert une certaine qualité de service telle que l'appel vocal, instantanément, le réseau pourra établir pour la durée de l'appel un « dedicated bearer » qui supporte la qualité de service exigée par le flux de service qui dispose d'un débit garanti.

1.3.3 EPC supporte le filtrage de paquet

Pour ce qui est du système de filtrage et de protection, on a comme exemple le détecteur de virus (deep packet inspection) qui est une taxation basée sur les flux de service.

En effet, la technologie LTE est parmi les technologies qui fournissent des mécanismes de taxation très sophistiqués permettant de taxer le service accédé par le client sur la base du volume, de la session, de la durée, etc....

1.4 Caractéristiques et entités du réseau EPS

Le réseau EPS est formé par les entités suivantes: (voir figure 4 ci-dessous)

1. UE (User Equipment);
2. eNodeB (l'antenne de liaison);
3. MME (Mobility Management Entity);
4. Serving Gateway;
5. PDN GW (Packet Data Network Gateway);
6. HSS (Home Subscriber Server);
7. PCRF (Policy and Charging Rules Function).

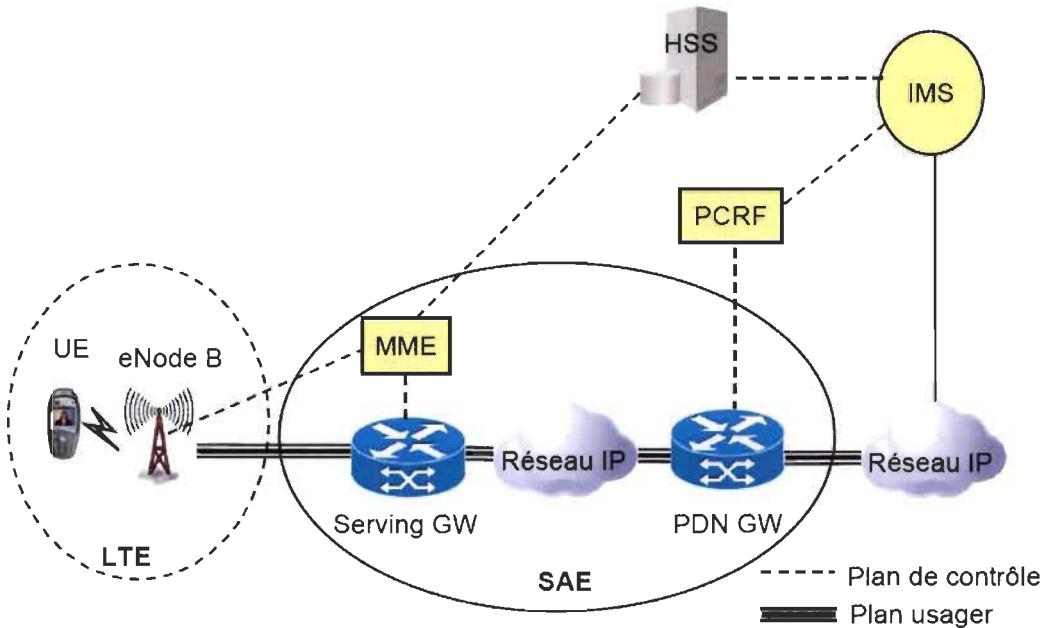


Figure 4: L'architecture d'EPS.

- L'EPS (Evolved packet System) représente l'ensemble du réseau LTE et SAE, il se caractérise par [14] :
 - La possession d'une architecture simple comparativement à celle de 2G et 3G, puisque la fonction de contrôleur d'antenne a disparu comme est illustré dans la figure 5;
 - La seule entité qui est présentée dans l'accès est l'eNodeB qui peut être assimilé à un eNodeB+RNC;
 - Il s'agit d'une architecture uniquement paquet, comparativement aux architectures 2G/3G qui utilisent les deux techniques soit : circuit et le paquet;
 - Il permet une connectivité permanente (IP) comparée à des contextes PDP temporaires ou permanents en 2G/3G;
 - L'interface radio est totalement partagée entre tous les usagers en mode ACTIFS;

- Il permet des « handover » (hard et soft) vers les réseaux 2G/3G et CDMA/CDMA2000, afin d'assurer des communications sans interruption dans un environnement hétérogène.

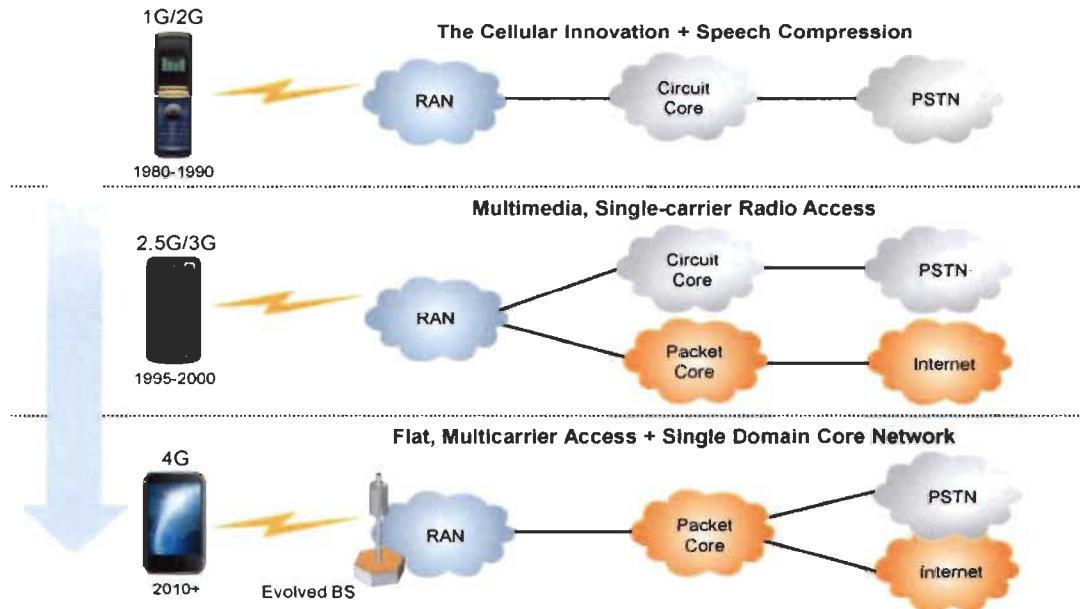


Figure 5: L'évolution des réseaux mobiles [14].

b) Les grandes fonctions assurées par l'EPS sont :

- La fonction de contrôle d'accès réseau :** Elle permet d'identifier l'utilisateur lorsque ce dernier se joint au réseau, elle met à jour la zone de localisation (tracking area), et elle demande ensuite des ressources pour assurer les communications. Elle permet aussi de sécuriser les flux de signalisation des usagers en les cryptant entre l'UE et l'eNodeB;
- La fonction de gestion de la mobilité :** C'est une fonctionnalité qui permet à l'UE de s'attacher, de quitter et de mettre à jour la zone de localisation (tracking area);

- **La fonction de gestion de session :** Elle permet d'établir soit des « defaults bearers » et des « dedicated bearers » afin que l'UE dispose de connectivité IP pour ses communications;
- **La fonction de routage de paquet et de transfert :** Elle permet d'acheminer les paquets de l'UE au PDN-GW (Packet Data Network Gateway) ainsi que du PDN - GW vers l'UE;
- **La fonction de gestion de ressource radio :** Elle permet l'établissement et la libération de RAB (Radio Access Bearer) entre l'UE et le « Serving Gateway » à chaque fois que le terminal souhaite devenir actif pour communiquer.

1.4.1 Équipement Utilisateur (UE)

Il est présenté sous deux plans [15] :

- Le plan utilisateur : il contient les couches PHY (physique), MAC (Medium Access Control), RLC (Radio Link Control) et PDCP (Packet Data Convergence Protocol);
- Le plan de contrôle : il contient le NAS (Non Access Stratum) et le RRC (Radio Resource Control), avec le plan utilisateur.

La figure 6 représente les états d'équipement utilisateur qui passe de l'état LTE-IDLE à l'état LTE-ACTIVE lorsque il y a du trafic acheminé et vice versa s'il est en mode inactive et il passe à l'état LTE-DETACHED lorsqu'il est détaché ou bien hors usage :

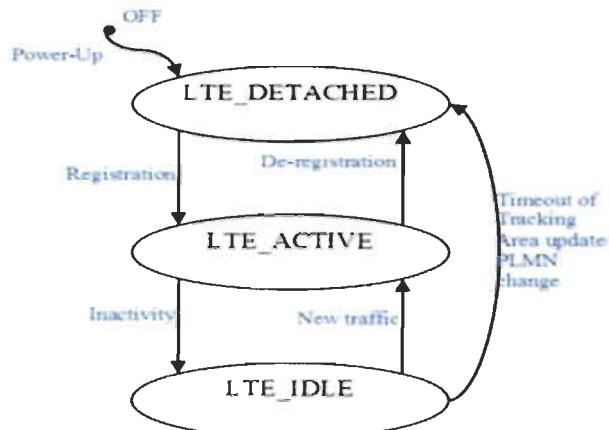


Figure 6: Le graphe d'états fini d'UE.

1.4.2 Entité eNodeB

La figure 7 illustre l'architecture E-UTRAN qui contient : eNodeB, les interfaces X2 (entre les eNodeB) et S1 (entre eNodeB et les entités du réseau central (core network) MME/Serving Gatway) :

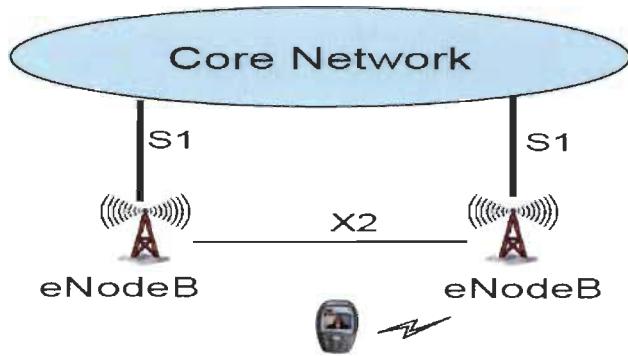


Figure 7: L'architecture E-UTRAN.

L'eNodeB est responsable de la transmission et de la réception radio avec l'équipement utilisateur [16]. À la différence de 3G, où l'on trouve en même temps les entités eNodeB et RNC réunies. Les fonctions qui sont prises en charge par le RNC ont été réparties entre l'eNodeB et les entités du réseau central MME (Mobility Management Entity)/Serving GW).

On distingue deux interfaces dont dispose l'eNodeB soit S1 et X2 :

- a) L'interface S1, contient S1-C (S1-Contrôle) utilisé entre l'eNodeB et le MME, ainsi que le S1-U (S1-Usager) qui est situé entre l'eNodeB et le Serving GW;
- b) Une nouvelle interface X2 est définie entre les eNodeB adjacents. Son rôle est de minimiser la perte de paquets lors de la mobilité de l'usager en mode ACTIF (handover).

Cette nouvelle interface permet à l'usager de se déplacer en mode ACTIF d'un eNodeB à un autre en allouant des nouvelles ressources. Celle-ci donne au réseau la possibilité de continuer à transférer les paquets entrants vers l'ancien eNodeB, grâce à cette interface l'ancien eNodeB arrive à acheminé les paquets entrants sur l'interface X2 vers la nouvelle eNodeB.

1.4.3 Entité MME (Mobility Management Entity)

Les fonctions de l'entité MME sont :

- **La signalisation EMM et ESM avec l'UE** : Les terminaux LTE disposent des protocoles comme EMM (EPS Mobility Management) et ESM (EPS Session Management) qui leur permet de gérer leurs mobilités (attachement, détachement, mise à jour de localisation) et de gérer leurs sessions (établissement/libération de session de données). Ces protocoles sont utilisés pour l'échange entre l'UE et le MME [17];
- **L'authentification** : L'entité MME est responsable de l'identification des équipements utilisateurs grâce aux informations recueillies par l'entité HSS;

- **La joignabilité de l’UE dans l’état ECM-IDLE (incluent le « paging ») :**
L’entité MME prend la responsabilité du « paging », lorsque l’UE est dans l’état IDLE, les paquets à destination de l’équipement utilisateur sont reçus et sauvegardé en mémoire par le Serving Gateway;
- **La gestion de la liste de zone de localisation (Tracking Area) :** Ce mécanisme consiste à informer l’équipement utilisateur d’être sur les zones de localisation prise en charge par le MME, appelée « Tracking Area ». L’équipement utilisateur met à jour sa localisation lorsqu’il se retrouve dans une « Tracking Area » qui n’est pas encore prise en charge par son MME;
- **La sélection du « Serving Gateway » et du « PDN-GW » :** C’est le travail de MME de sélectionner le « Serving GW » et le « PDN GW » qui serviront à mettre en œuvre le « Default Bearer » au moment où l’équipement utilisateur se joindra au réseau.
- **La sélection de MME lors d’un « handover » avec changement de MME :**
Lorsque l’usager est dans l’état ACTIF et qu’il se déplace d’une zone prise en charge et sous le contrôle d’un autre MME, il est nécessaire que l’ancien et le nouveau MME s’engagent pour le « handover »;
- **La sélection du SGSN (Serving GPRS Support Node) lors d’un « handover » avec les réseaux d’accès 2G et 3G :** Au moment où l’usager se déplace d’une zone LTE à une zone 2G/3G, c’est l’entité MME qui sélectionnera le SGSN qui sera impliqué dans la mise en place du « default bearer »;
- **Le « roaming » avec interaction avec le HSS (Home Subscriber Server) nominal :** Lorsque l’usager se rattache au réseau, l’entité MME s’interface au HSS nominal. Le but est de mettre à jour la localisation du mobile et d’obtenir le profil de l’usager;
- **Le Fonctionnement de gestion du « bearer » incluant l’établissement de « dedicated bearer » :** Parmi les fonctions de MME l’une d’elles est d’établir

pour le compte de l'usager les « defaults » et « dedicated bearers » nécessaires pour la prise en charge des communications;

- **L'interception légale du trafic de signalisation :** L'entité MME reçoit toute la signalisation qui a été envoyé par l'équipement utilisateur et peut la sauvegarder à des fins de traçabilité.

1.4.4 L'entité « Serving GW » (Serving Gateway)

Les fonctions de l'entité « Serving Gateway » sont [18] :

- **Le point d'ancrage pour le « handover » inter-eNodeB :** Dans le cas d'une manœuvre de « handover » inter-eNodeB, le trafic qui s'échangeait entre l'ancien eNodeB et le Serving GW doit désormais être acheminé au nouveau eNodeB et au « Serving GW »;
- **Le point d'ancrage pour le « handover » LTE et les réseaux 2G/3G :** Il achemine les paquets entre les systèmes 2G/3G et le PDN-GW. Lors d'une mobilité entre LTE et les réseaux 2G/3G, le SGSN du réseau 2G/3G s'interface avec le Serving GW pour la continuité du service de données sans coupure;
- **L'interception légale :** Le « Serving GW » est situé dans le chemin des données et celui de signalisation pour l'établissement/libération de « bearer » (paquets de données échangés par l'UE). Il est donc un point stratégique pour l'interception légale des flux de média et de contrôle;
- **Le routage des paquets et l'acheminement des paquets :** Le « Serving GW » achemine les paquets vers PDN-GW, à son tour, il renvoie les paquets entrants à l'eNodeB subordonnée de l'UE;
- **La comptabilité par usager pour la taxation inter-opérateurs :** Le « Serving GW » comptabilise le nombre d'octets échangés qui permet la permutation de tickets de taxation inter-opérateurs;

- **Le marquage des paquets dans les sens descendant et descendant :** La technique de marquage permet d'associer des priorités aux flux de données, en positionnant le DiffServ.

1.4.5 Entité PDN-GW (Packet Data Network Gateway)

Les fonctions de l'entité PDN-GW incluent les points suivants [6] :

- **L'interface vers les réseaux externes :** Parmi les fonctionnalités les plus importantes, on retrouve, Internet et intranet. Le PDN-GW est l'entité qui se situe entre le réseau mobile et les réseaux externes (IPv4 ou IPv6);
- **L'allocation de l'adresse IP de l'UE :** Le PDN-GW fournit à l'UE l'adresse IP, par la suite lorsque le réseau est établi, il l'offre un « default bearer » permanent. En plus, PDN-GW peut allouer une adresse IPv4 ou IPv6;
- **La taxation des flux de service descendants et descendants :** Les règles de taxation sont fournies soit par le PCRF (Policy and Charging Rules Function) ou sur la base de l'inspection de paquets définie par des politiques locales.

1.4.6 Entité HSS (Home Subscriber Server)

Dans la technologie LTE, le service HLR est réutilisé et renommé « Home Subscriber Server » (HSS). Le HSS est un HLR évolué qui contient toutes les informations pour les réseaux GSM/GPRS/3G/LTE et IMS. À la différence de la 2G et 3G, l'interface vers le HLR est supportée par le protocole MAP (protocole du monde SS7), HSS utilise l'interface dite S6 qui utilise le protocole « Diameter » (protocole du monde IP).

Le HSS est une base de données qui peut être utilisée simultanément par les réseaux 2G et 3G, LTE/SAE et IMS [6].

1.4.7 L'entité PCRF (Policy & Charging Rules Function)

L'entité PCRF prend en charge les deux fonctionnalités suivantes [6] :

- Fournir au PDN-GW les règles de taxation lorsqu'un « default » ou un « dedicated bearer » est activé ou modifié pour l'usager. Ces règles de taxation permettent au PDN-GW de différencier les flux de données de service et les taxer par la suite de façon appropriée. Par exemple, si l'usager fait circuler sur son « default bearer » des flux WAP et des flux de « streaming », il sera possible au PDN-GW de distinguer ces deux flux et de taxer le flux WAP (WiMax Access Point) sur la base du volume alors que le flux de « streaming » sera taxé sur la base de la durée;
- Elle permet également de demander au PDN-GW d'établir, de modifier et de libérer des « dedicated bearer » sur la base de qualité de service (QoS) souhaitée par l'usager. Par exemple, si l'usager demande l'établissement d'une session IMS (IP Multimedia Subsystems), un message SIP (Session Initiation Protocol) sera envoyé au P-CSCF (Proxy- Call Session Control Function) qui dialoguera avec le PCRF pour lui indiquer la QoS requise par l'usager pour cette session. Le PCRF communique alors avec le PDN-GW pour créer le « dedicated bearer » correspondant.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un aperçu des différents caractéristiques et des composants de la technologie LTE (quatrième génération) afin de les faciliter, par la suite la terminologie des termes utilisés dans cette technologie. Dans le chapitre suivant, nous décrivons le fonctionnement de la couche physique et liaison et les autres couches de la technologie LTE. Ainsi, nous présenterons les différentes interactions entre elles.

CHAPITRE 2 : Les couches du modèle LTE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une brève description du fonctionnement de la couche physique et de la couche MAC et nous expliquons les différentes interactions qui existent entre elles. L'aspect qualité de service est toujours priorisé.

2.2 Les couches supérieures du protocole LTE [19, 20, 21, 22]

Le modèle LTE est formé de deux plans (diagrammes). En effet, LTE possède deux piles protocolaires : la première est pour la signalisation ou le contrôle, et la seconde pour les données utilisateur.

- L'architecture et les couches du réseau LTE peuvent être résumées par les figures 8 et 9 suivantes :

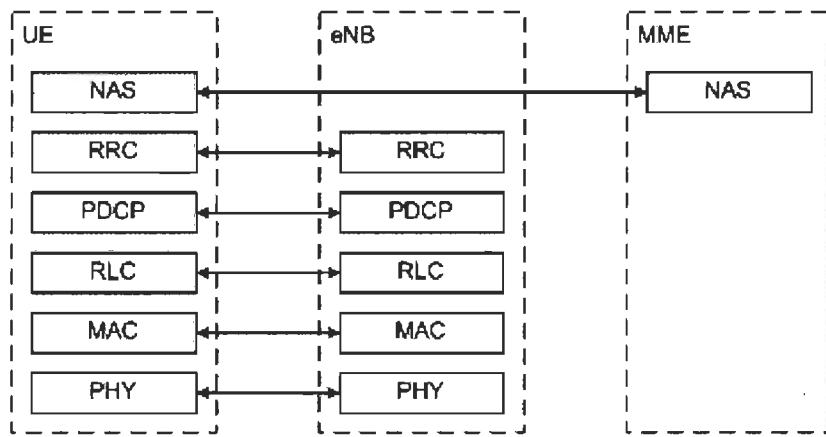


Figure 8: Architecture LTE : Plan de contrôle.

NAS (Non Access Stratum), RRC (Radio Resource Control), PDCP (Packet Data Convergence Protocol), RLC (Radio Link Control), MAC (Medium Access Control), PHY (Physique).

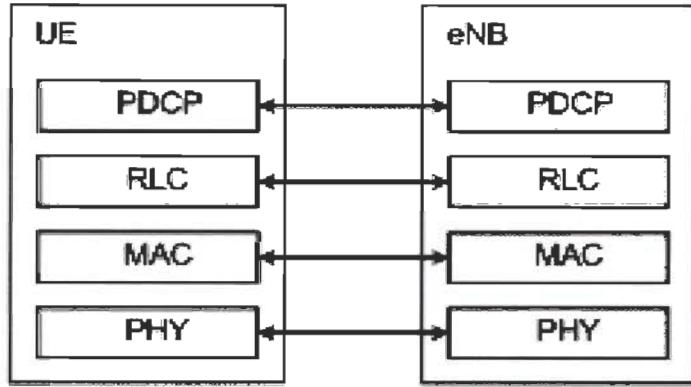


Figure 9: Architecture LTE au plan de données utilisateur.

Dans ce qui suit, nous présenterons un aperçu des couches les plus importantes de cette technologie.

2.2.1 Couche NAS (non Access Stratum)

Cette couche est responsable de plusieurs tâches de contrôle comme :

- La gestion des entrées au réseau;
- L’authentification;
- La gestion de la mobilité;
- Elle est responsable de la mise en place du porteur de données (*Data bearer*).

La sécurité de la transmission des données de signalisation est assurée par le système de chiffrement et la protection de l’intégrité. Le transfert des messages de NAS depuis et vers les UE est réalisé par la couche RRC (Radio Resource Control) [23].

2.2.2 Couche RRC (Radio Resource Control)

La couche RRC au niveau d’eNodeB est responsable des opérations suivantes [24] :

- La diffusion des informations du système;
- La procédure de la pagination;

- Elle prend les décisions de « handover » en se basant sur les informations d'UE sur les cellules voisines;
- L'allocation des identificateurs temporaires aux UE;
- Elle assure le transfert de la situation de « handover » entre deux eNodeB à l'UE;
- La configuration de la signalisation des porteurs radio pour la connexion RRC;
- Elle facilite les services MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service).

En comparant cette couche aux technologies prédecesseurs de LTE, les états de RRC sont réduits à deux états seulement (RRC_IDLE et RRC_CONNECTED). Les états et les cas de RRC sont décrits par la figure 10 et présente les étapes rencontrées par un utilisateur au moment de la connexion et de la demande de la table des voisins jusqu'au test de qualité de canal utilisé :

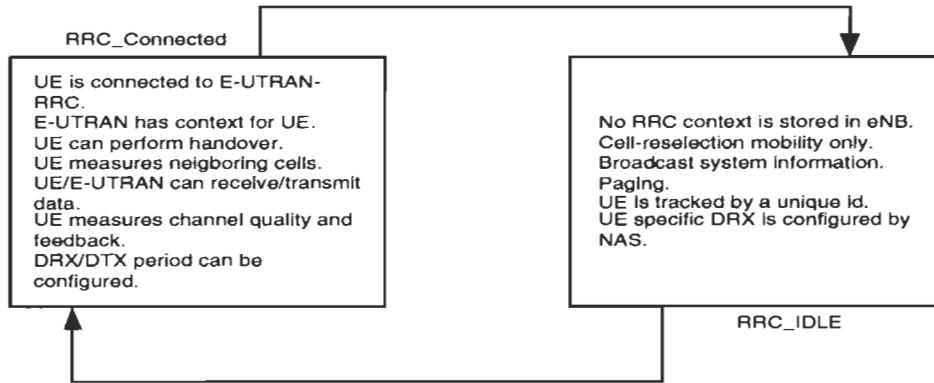


Figure 10: Fonctionnement de la couche RRC.

2.2.3 Couche PDCP (Packet Data Convergence Protocol)

La couche PDCP au plan utilisateur prend la charge d'assurée : la compression et la décompression des entêtes IP liées aux données utilisateurs. Elle utilise ROHC (Robust Header Compression) pour augmenter l'efficacité de la bande passante.

Elle est aussi responsable du chiffrement des données sur les deux plans (données et signalisation). Les messages de la couche NAS sont chiffrés deux fois, au niveau de MME et d'eNodeB, puisqu'ils passent par la couche RRC. Elle assure le transfert du SDU reçu du NAS vers la couche RLC et vice versa.

2.2.4 Couche RLC (Radio Link Control)

Cette couche est située au dessous de la couche PDCP, son travail est de formater et de transporter les données entre l'eNodeB et l'UE.

Elle offre trois modes de fiabilité [25] :

- AM (Acknowledge Mode), qui nécessite un acquittement. Ce mode est intéressant pour les applications tolérantes aux délais tels que le téléchargement de fichiers;
- UM (Unacknowledged Mode) ne nécessite pas d'acquittement. Il convient aux applications à temps réel, comme le streaming vidéo;
- TM (Transparent Mode) est utile lorsque la taille de message PDU = SDU + entête PDPC.

2.3 La couche MAC (Medium Access Control) de LTE [26, 27, 28]

Elle est parmi les couches les plus importantes du modèle. Elle assure le mappage des données entre les canaux logiques et les canaux de transport en utilisant une fonction de multiplexage de RLC.

Au niveau de cette couche, les mesures de l'état du trafic et de la correction des erreurs sont assurées par la méthode de retransmission HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest). De plus, la couche MAC offre le service d'ordonnancement.

Dans ce qui suit, nous résumerons les différentes fonctions de la couche MAC.

2.3.1 Ordonnancement

L'eNodeB possède un ordonnanceur pour contrôler les ressources comme le temps et la fréquence pour un temps donné. Dépendamment de l'état des canaux, l'ordonnanceur choisit le meilleur multiplexage pour l'UE en prenant toujours en considération :

- Les paramètres de qualité de service (QoS);
- Les données utiles dans la mémoire tampon;
- La capacité de l'UE;
- Les cycles de mise en veille de l'UE;
- Les informations du système telles que la bande passante et le niveau d'interférence.

Pour le lien descendant, la couche MAC utilise trois ordonnanceurs : FSS (Frequency Selective Scheduling), FDS (Frequency Devise Scheduling) et PFS (Proportional Fair Scheduling).

2.3.2 La technique de retransmission HARQ

Le protocole HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) est le noyau de notre étude. C'est un mécanisme de retransmission de la couche MAC, il peut être synchrone ou asynchrone. Le protocole HARQ synchrone nécessite une retransmission à des instants connus et par conséquent il n'a pas besoin de signalisation explicite. Par contre, pour le HARQ asynchrone une signalisation explicite est obligatoire.

Le mécanisme HARQ peut être aussi adaptatif et peut donc changer la modulation, l'allocation des blocs de ressource et la durée de la transmission. Le mode synchrone nécessite moins de signalisation et il est avantageux lorsqu'il est non adaptatif. Ce mode est choisi pour le lien ascendant, tandis que pour le lien descendant le mode asynchrone non adaptatif est retenu.

2.3.3 La recherche des cellules

L'équipement utilisateur (UE) recherche la cellule, afin d'avoir les informations nécessaires pour sa connexion et sa synchronisation, à savoir : l'identificateur de la cellule, le temps et la fréquence. Durant la recherche de cellule, deux canaux sont détectés soit :

- Synchronisation CHannel (SCH), c'est pour avoir de l'information sur l'horloge ou la fréquence du lien descendant;
- Broadcast CHannel (BCH), le canal de diffusion indique certaines informations sur la cellule comme : la bande passante, l'Id de la cellule, la configuration de l'antenne, etc....

2.3.4 Contrôle de l'énergie

Le contrôle de l'énergie a comme but de mitiger les problèmes d'affaiblissement de propagation, ce qu'on appelle « path-loss » et l'effet d'ombre (shadowing).

2.3.5 Le protocole ARP (Allocation and Retention Priority)

Ce mécanisme d'allocation et de priorité de rétention gère les porteurs (bearer) pour les autoriser ou non dépendamment des disponibilités des ressources.

2.3.6 Les voies logiques et leurs canaux de transport et d'utilisation

Le tableau 2 montre les voies logiques qui sont modélisées avec leurs canaux de transport et d'utilisation :

- La cartographie des porteurs EPS/radio vers les circuits logiques est réalisée.
- La cartographie des canaux logiques dans les circuits de transport est effectuée.

Tableau 2: La Cartographie des voies logiques aux canaux de transport.

Direction	Logical Channel	Transport Channel	Usage
Downlink	Common Control Channel (CCCH)	Downlink Shared Channel (DL-SCH)	Control messages sent before UE's RRC connection
	Dedicated Traffic Channel (DTCH)		Downlink user data
	Dedicated Control Channel (DCCH)		Downlink control information
Uplink	Common Control Channel (CCCH)	Uplink Shared Channel (UL-SCH)	Control message sent before RRC connection
	Dedicated Traffic Channel (DTCH)		Uplink user data
	Dedicated Control Channel (DCCH)		Uplink control information

2.4 La couche physique de LTE

Dans cette partie, nous allons illustrer les différentes fonctionnalités de base de la couche physique de LTE ainsi que ses différents aspects : format de la trame, le codage, lien descendant et ascendant, etc... Cette couche a comme tâche de [29, 30, 31, 32, 33]:

- Assurer la détection des erreurs de transmission et la notification vers la couche supérieure;
- Utiliser FEC (Forward Error Correction) du canal de transmission pour les fonctions de codage et de décodage;
- Offrir le mappage des symboles codés avec les canaux physiques;
- Assurer la modulation/démodulation;
- Fournir la synchronisation des fréquences et de l'horloge;
- Mesurer les caractéristiques radios et envoie les indications aux couches supérieures;
- Être le support de MIMO (Multiple Input Multiple Output).

La couche physique utilise la technique OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le flux descendant (d'eNodeB vers UE) et la technique SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) pour le flux ascendant. Elle offre aussi la possibilité d'utiliser trois modes de transmission : Full Duplex FDD (Frequency Division Duplex), Half Duplex FDD et TDD (Time Division Duplex).

2.4.1 La trame physique LTE

Pour chaque mode, une trame physique est définie. La trame LTE de type-1 est utilisée pour les deux modes de FDD, elle possède la structure suivante (voir figure 11) :

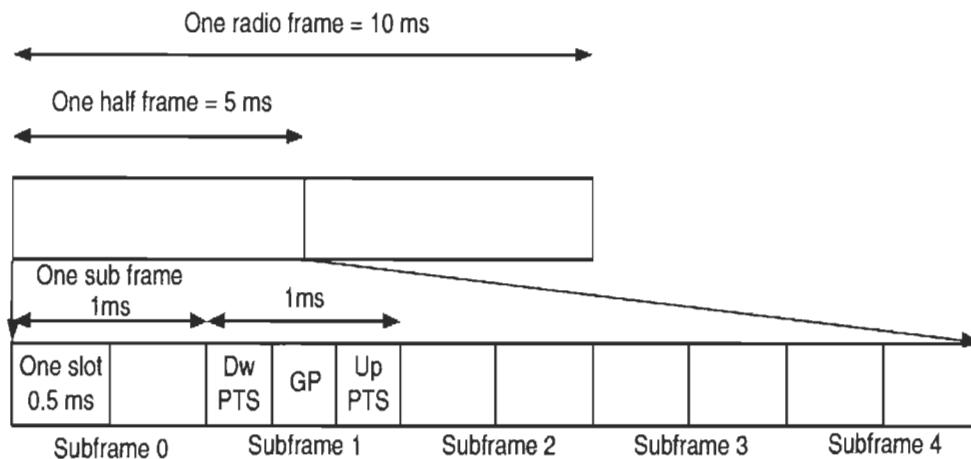


Figure 11: La trame physique LTE.

Parmi ses caractéristiques :

- La trame LTE de type-1 possède 20 intervalles de temps (Slot) chacun de 0.5 ms;
- Chaque deux intervalles de temps adjacents constituent une sous-trame (subframe);
- Les modulations possibles sont : QPSK, 16QAM et 64QAM;
- Le canal de diffusion utilise QPSK seulement;
- Le CRC-24 est utilisé pour la détection des erreurs;
- La taille maximale d'un bloc d'information est de 6144 bits;

- Les techniques de brouillage et d'entrelacement sont possibles;
- Le mappage des couches et le pré-codage sont utilisés dans MIMO.

2.4.2 Le codage du canal

Le codage du canal est utilisé après la vérification du CRC en tenant compte de la taille du bloc à transmettre, la modulation et l'allocation des ressources. La technique de retransmission HARQ est utilisée pour contrôler le codage.

L'ordonnanceur de la couche MAC intervient aussi dans le codage, il est responsable du mappage des blocs de ressources alloués avec les ports des antennes.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le fonctionnement de la couche physique et réseau, qui sont les couches sur lesquelles nous allons nous concentrer le plus au cours de cette étude, avec la coopération d'autres couches de la technologie LTE. Dans le chapitre suivant, nous décrirons principalement les protocoles ARQ et HARQ qui sont le cœur de cette étude.

CHAPITRE 3 : Le fonctionnement des protocoles d'acquittement ARQ et la technique HARQ.

3.1 Introduction

Au cours de la dernière décennie, nous avons assisté à une progression très rapide de l'accès aux interfaces radio (voir figure 12). De nos jours, les systèmes cellulaires offrent aux clients non seulement des services de voix, mais aussi l'accès à des données et au contenu multimédia.

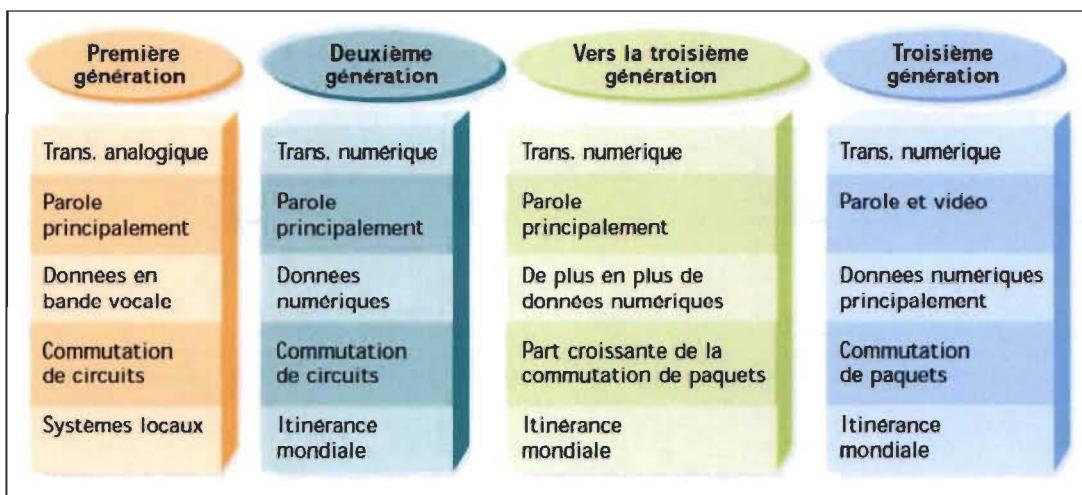


Figure 12: L'évolution de système cellulaire [34].

Il existe différentes techniques qui sont utilisées pour assurer la bonne transmission et réception de l'information, entre autres les accusées de réceptions ARQ et HARQ [35].

Cette partie est consacrée à l'étude des protocoles et du fonctionnement d'ARQ et HARQ. Nous présenterons une vue globale des deux protocoles qui faciliteront le suivi de l'implémentation.

3.2 Définition des protocoles d'acquittement ARQ

Les protocoles ARQ (Automatic repeat request) sont indispensable dans les systèmes de communication entre l'émetteur et le récepteur comme est illustré dans la figure 13, il assure et garantit une transmission fiable via des liens physiques imparfaits [36]. Le principe de leur utilisation consiste à faire :

- La vérification des paquets reçus ou transmis pour s'assurer qu'ils ne contiennent pas d'erreurs;
- Il est nécessaire de faire la retransmission des paquets contenant des erreurs.

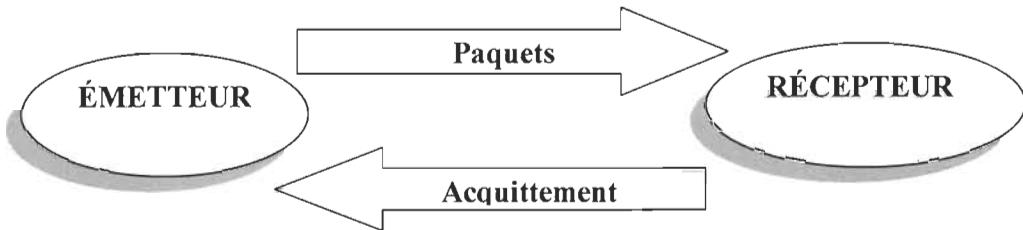


Figure 13: Le principe de fonctionnement de protocole d'acquittement.

La transmission fiable et sécuritaire des données dans les systèmes de communication est une priorité absolue dans la majorité des applications. Une telle transmission a pour but de garantir qu'aucune information ne soit perdue, dupliquée ou bien reçue dans le désordre.

3.2.1 La raison d'utilisation de protocole d'acquittement [37]

Elles sont nombreuses les raisons pour lesquelles on utilise un mécanisme d'acquittement. Dans la réalité, le lien idéal (pratiquement inatteignable) est celui qui garantit un taux d'erreur pratiquement nulle, et une transmission à grande vitesse (débit) sans changer l'ordre des paquets reçus.

Dans tous les systèmes de communication, on ne peut atteindre une connexion avec une probabilité d'erreur nulle, à cause du bruit et la limite de temporisateur, et aussi la limite de la bande passante.

Pour surmonter et trouver des solutions à ces limitations physiques, plusieurs mesures ont été prises. Pour contrer le problème du désordre des paquets reçus, on a introduit l'insertion d'un numéro de séquence. Cette information permet au récepteur de rétablir l'ordre initial du flux des bits. On a également déployé des codes de correction d'erreur ECC (erreur code correction) pour diminuer le taux d'erreur binaire. Le rôle de ces codes est de détecter un certain nombre d'erreurs de bits par bloc de données et de les corriger.

La technique de correction peut diminuer le pourcentage des erreurs causées par l'état de la liaison. Dans ce cas, le récepteur est capable d'envoyer un paquet de contrôle spécial à l'expéditeur, qui a l'obligation de retransmettre les paquets erronés. Cela nécessite que l'émetteur soit en mesure de conserver une copie locale d'un certain nombre de paquets pour les futures retransmissions potentielles. Dans le cas où le récepteur serait capable de corriger les erreurs d'un paquet de contrôle, un signal ACK (d'acquittement) est renvoyé à l'expéditeur. Cela signifie que la transmission est bien faite et que l'émetteur peut se libérer de la copie locale, ce qui lui permet d'initier la transmission de nouveaux paquets.

Un temporisateur est utilisé, au niveau de l'émetteur, qui après un certain temps, si aucune réponse n'est reçue, il considère alors que le paquet est perdu et qu'il doit être retransmis et la technique est illustrée dans la figure 14.

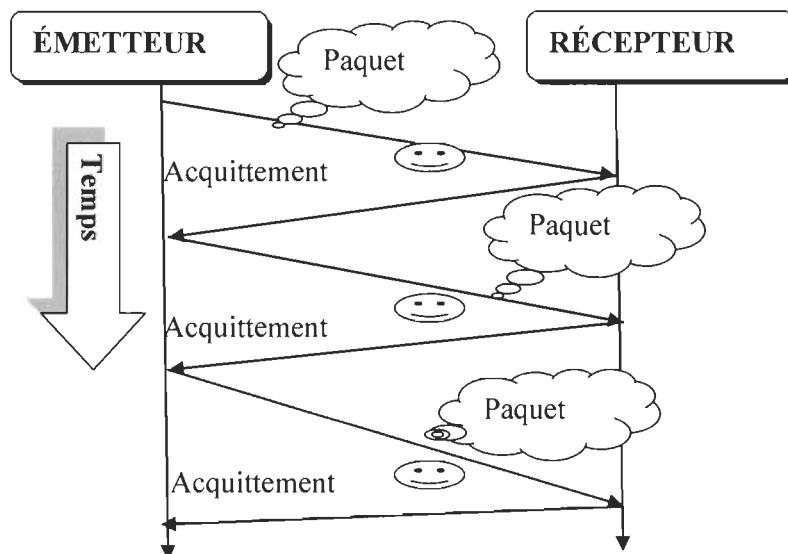


Figure 14: La technique d'envoyer les paquets et leurs acquittements.

3.3 Les protocoles ARQ

Nous allons décrire le fonctionnement et les caractéristiques des protocoles d'acquittement.

3.3.1 Les protocoles d'acquittement

3.3.1.1 Le Protocole « Stop and Wait » [38] [39] [40]

Ces protocoles sont les plus simples à utiliser lors d'une transmission. Il utilise au moment de la transmission une fenêtre d'anticipation, d'une taille égale à 1, donc un seul paquet est transmis à la fois.

Son rôle primordial est d'empêcher l'émetteur d'envoyer des données plus rapidement que le récepteur peut les traiter.

3.3.1.1.1 Les caractéristiques de protocole « Stop and Wait » [41] :

Le protocole SWP est caractérisé par :

- Une obligation du récepteur a informé l'émetteur de son état par un signal d'acquittement;
- Une technique très simple utilisée par l'émetteur : il envoie et il reste en attente d'une réponse.

La figure 15 illustre son mécanisme de fonctionnement

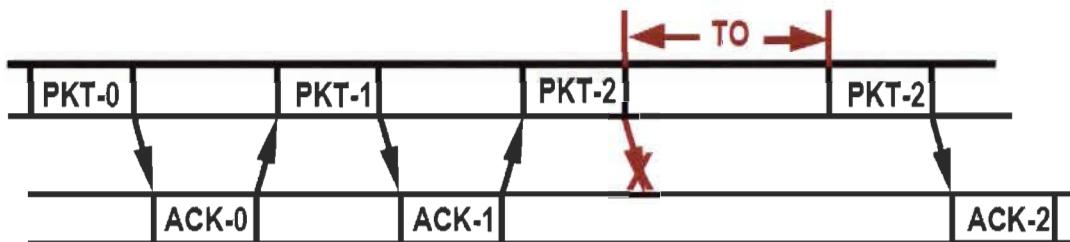


Figure 15: Méthode d'acquittement (acquittement positif ou négatif).

3.3.1.1.2 La numérotation des paquets

La méthode utilisée par le protocole SWP pour numérotter les paquets est la suivante :

- L'émetteur envoie les paquets avec des numéros de séquence SN (Sequence Number).
- Le récepteur renvoie les paquets d'acquittements avec des numéros de la requête RN (Request Number).

3.3.1.1.3 L'algorithme utilisé par l'émetteur

Cet algorithme est utilisé comme suit : (SN initialisé à 0)

- L'émetteur accepte les paquets arrivant de la couche supérieure, et leurs assigner un numéro de séquence SN;
- Comme deuxième étape, il transmet les paquets avec leurs numéros SN :
 1. Si le paquet d'acquittements contient $RN > SN$, alors il affecte SN à RN et envoie le prochain paquet.
 2. S'il n'est pas reçu dans l'intervalle de temps donné TO (time out), alors il retransmet le paquet.

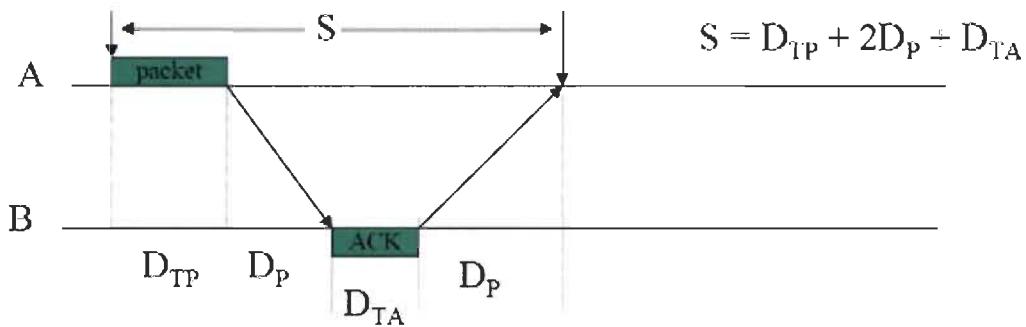
Dans le paragraphe suivant, on décrira le rapport entre l'efficacité de protocole SWP et la probabilité de présence d'erreurs et les formules utilisées pour les calculer.

3.3.1.1.4 L'efficacité du protocole « Stop and Wait »

Pour calculer l'efficacité (E) de protocole SWP (voir figure 16), on utilise les variables suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \text{efficacité.} \\ S = \text{temps total entre la transmission d'un paquet et la réception de son acquittement.} \\ D_p = \text{probabilité de retard.} \\ D_{TA} = \text{temps de la réception d'acquittement.} \\ D_{TP} = \text{temps de transmission du paquet.} \end{array} \right.$$

Efficacité (avec aucune erreur) = DTP/S .



$$E = D_{TP}/(D_{TP} + 2D_P + D_{TA})$$

Figure 16: Le calcul de l'efficacité du protocole Stop and Wait.

3.3.1.1.5 Présence d'erreurs dans le protocole Stop and Wait

Soit P = la probabilité d'une erreur dans la transmission d'un paquet ou de son accusé d'accusé de réception.

$$\left\{ \begin{array}{l} S = D_{TP} + 2D_P + D_{TA} \\ \text{TO} = \text{l'intervalle de délai (timeout).} \\ X = \text{le nombre de paquets transmis avec succès.} \\ E [X] = \text{efficacité de protocole en prendre en compte le temps nécessaire pour la transmission d'un paquet et de recevoir son accusé de réception.} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$E[X] = S + TO * P / (1 - P) \quad (2)$$

$$\text{Efficacité} = D_{TP} / E [X] \quad (3)$$

Où :

$TO = D_{TP}$ dans un système full-duplex.

$TO = S$ dans un système half-duplex.

Dans ce qui suit, nous présenterons le protocole Go-Back-N. Il est parmi ceux qui utilisent la technique d'acquittement négatif. Cette technique est parmi les plus utilisées dans les transmissions de multidiffusion, car elle ne nécessite pas de générer d'accusés de réception. Il existe, malgré cela, un problème appelé « implosions NAK », une telle

situation arrive lorsque tout à coup une énorme quantité de demandes de répétitions surcharge l'expéditeur (overload).

3.3.1.2 Le protocole « Go-Back-N (sliding window) » [42] [43]

C'est un protocole qui est simple à implémenter et qui permet de réaliser une transmission des paquets sans erreur dans des réseaux imparfaits. Tant qu'une demande de retransmission de la part de récepteur n'a pas été demandée, l'idée est de supposer que la transmission des données est acceptée et bien reçue (voir figure 17).

Ce protocole n'utilise pas les accusés de réception pour confirmer à l'émetteur l'arrivée des données. Un acquittement négatif est généré lorsque le paquet reçu par le récepteur est incomplet ou bien il ne suit pas l'ordre des paquets.

On dit que le protocole « Go-Back-N » est inefficace lorsque le délai de propagation (diffusion) est plus grand que le temps de transmission par paquet puisque :

- Il ne peut pas envoyer plus qu'un paquet dans le temps d'aller-retour;
- Il autorise la transmission de nouveaux paquets même avant que les précédentes ne soient reconnues (accepter).

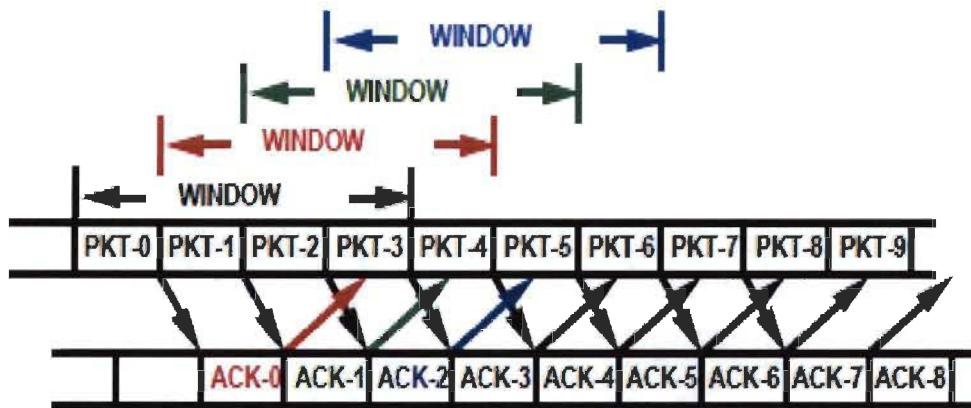


Figure 17: Le fonctionnement du protocole Go-Back-N.

3.3.1.2.1 Les caractéristiques du protocole Go Back N

Le récepteur dispose de quelques caractéristiques semblables à celui du protocole « Stop and Wait » comme :

- { - Le récepteur ne peut pas accepter de paquets hors séquence (il accepte juste les paquets dans l'ordre).
- Il envoie un RN (Request Number) (voir figure 18), $i + 1$ (taille de la fenêtre plus 1) qui signifie que l'acquittement pour tous les paquets y compris le i est garantie.

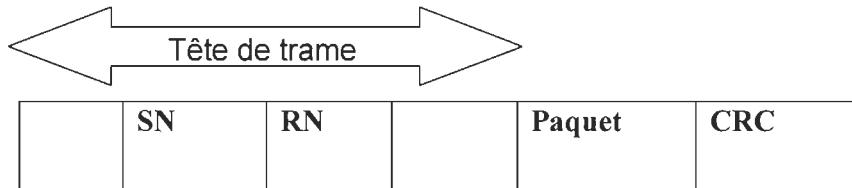


Figure 18: la décomposition d'un paquet.

3.3.1.2.2 Le fonctionnement du protocole Go Back N

Il se caractérise par :

- L'émetteur a une fenêtre de N paquets à transmettre;
- Lorsque l'émetteur a atteint la fin de sa fenêtre (maximum) ou lorsqu'il arrive à l'expiration, il revient en arrière et retransmet le premier paquet qui contient SN_{min} .

Les règles de l'expéditeur (algorithme) :

- { SN (Sequence Number).
- SN_{max} : la taille maximale de fenêtre (fin de la fenêtre).
- SN_{min} : la taille minimale de fenêtre (le début de la fenêtre).
- RN (Request Number).
- N : la taille de la fenêtre.

Initialisation : $SN_{min} = 0$; $SN_{max} = 0$

- Répétez :
 - Si $SN_{max} < (SN_{min} + N)$ (la fenêtre n'a pas été envoyée au complet), alors envoyer paquet SN_{max} ;
Incrémantation : $SN_{max} = SN_{max} + 1$;
 - Si le paquet d'acquittements contient $RN > SN_{min}$, Alors $SN_{min} = RN$.
 - Si $SN_{min} < SN_{max}$ (signifié l'existence de quelques paquets à l'intérieur de la fenêtre qui ne sont pas encore envoyés).
Alors, envoyer les paquets qui sont entre SN_{min} et SN_{max}

- La dernière règle est de ne pas être en mesure d'envoyer un nouveau paquet parce que :

$$\begin{cases} \text{Aucun nouveau paquet n'arrive de la couche supérieure pour le transmettre.} \\ \text{La fenêtre expirée } (SN_{max} = SN_{min} + N). \end{cases}$$

Vous devez renvoyer un ancien paquet non accusé encore (la règle du moins récemment envoyée).

Les règles de récepteur

De son côté, le récepteur utilise deux variables RN et SN qui définissent si un paquet arrive correctement ($SN = RN$), dans ce cas :

- Le récepteur accepte le paquet.
- Il incrémente $RN = RN + 1$.

Dans ce qui suit, on décriera la façon de calculer l'efficacité de protocole Go Back N avec une conclusion sur les différentes règles du récepteur et d'émetteur.

3.3.1.2.3 Efficacité du protocole « Go Back N »

Pour calculer l'efficacité (E) de protocole « Go Back N » (voir figure 19), on utilise les variables suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \text{efficacité.} \\ S = \text{temps total entre la transmission d'un paquet et la réception d'accusé de réception.} \\ D_p = \text{probabilité de retard.} \\ \\ D_{TA} = \text{temps de la réception d'acquittement.} \\ D_{TP} = \text{temps de transmission du paquet.} \\ N = \text{la taille de la fenêtre.} \\ X = \text{le nombre de paquets transmis avec succès.} \\ \\ E[X] = \text{efficacité de protocole en prendre en compte le temps nécessaire pour la transmission d'un paquet et de recevoir son accusé de réception.} \end{array} \right.$$

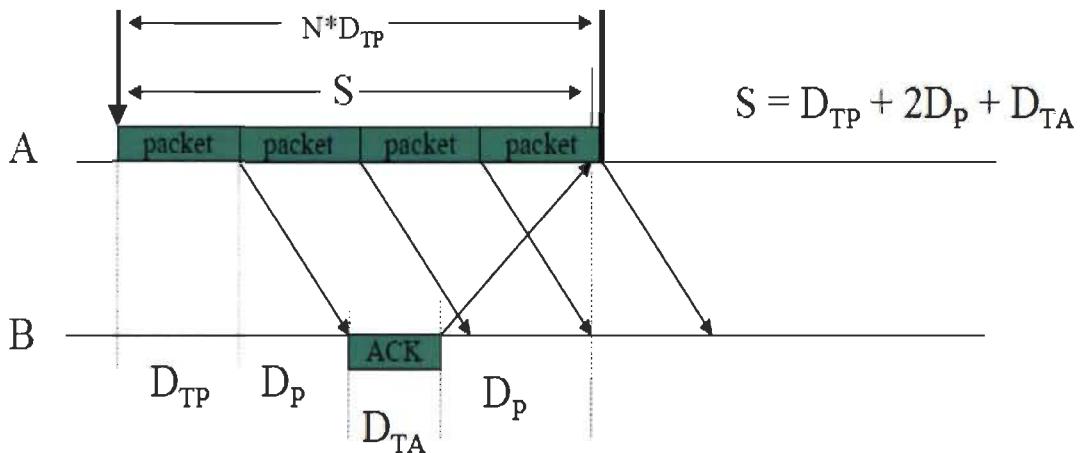


Figure 19: Le calcul de l'efficacité du protocole Go Back.

- Nous devons choisir la taille de la fenêtre (N) le plus grande possible pour permettre la transmission continue.
 - Une transmission sans erreur, donne une efficacité du protocole Go Back N :

$$E = \min \{1, N*D_{TP}/S\}.$$
 - Lorsqu'une erreur se produit, la fenêtre entière doit être retransmise :
 Soit X = le nombre de paquets transmis avec succès :

$$E[X] = 1*(1-P) + (X+N)*P = 1 + N*P/(1-P).....(4)$$

 Efficacité = $1/E[X].....(5)$

3.3.1.2.4 Conclusion

Dans ce protocole l'émetteur et le récepteur sont caractérisés par :

- L'émetteur ne nécessite aucune mise en mémoire temporaire (buffer) des paquets au niveau du récepteur. De son côté, l'émetteur doit être capable de garder en mémoire jusqu'à N paquets en attendant leur acquittement. En plus, l'émetteur doit renvoyer la fenêtre entière dans le cas d'une erreur.
 - Le récepteur accepte seulement les paquets en ordre et de son côté :
 - Le récepteur doit envoyer les paquets par ordre à la couche supérieure.
 - Il n'accepte pas le paquet $i+1$ ayant le paquet i .

3.3.1.3 Le protocole répétition sélectif (Selective Repeat) [44]

Le protocole « Selective repeat » est parmi les protocoles d'acquittements les plus puissants. Il exige à la fois que l'expéditeur et le récepteur disposent d'un mémoire temporaire (buffer) d'au moins égale à la taille de la fenêtre actuelle.

De plus, le récepteur peut conserver les paquets hors séquence, plutôt que de les détruire comme dans le protocole « Go-Back-N » et le protocole « Stop and Wait ».

Toutefois, ce protocole est très exigeant en termes de coût de mise en œuvre. Il oblige que le récepteur et l'émetteur aient, non seulement avoir des « buffers », aussi

grands que la taille de la fenêtre de transmission, mais aussi beaucoup de puissance de calcul pour les gérer.

Le fonctionnement de protocole « Selective Repeat » consiste à retransmettre uniquement les paquets qui ont été effectivement perdus. Le récepteur doit respecter les conditions suivantes :

- Il doit être en mesure d'accepter les paquets dans le bon ordre (séquence);
- Il doit envoyer les paquets à la couche supérieure dans l'ordre;
- Il doit être capable de mémoriser temporairement quelques paquets (selon la taille de buffer).

Dans ce qui suit, nous décrirons les caractéristiques et les méthodes utilisées par le protocole de répétition sélective afin de retransmettre les paquets perdus.

3.3.1.3.1 Les Caractéristiques du protocole SRP

Le protocole de répétition sélective est caractérisé par :

- C'est un Protocole de fenêtre, comme celui de « GO Back N » (retransmission continue);
- Le récepteur garde les paquets corrects jusqu'à ce qu'ils puissent être acheminés vers la couche supérieure.

3.3.1.3.2 Les méthodes de retransmission des paquets perdues

Il existe deux méthodes qui sont utilisées pour assurer la retransmission des paquets perdu :

- **La méthode implicite :** Le récepteur reconnaît chaque bon paquet reçu dans l'ordre, et les paquets qui ne sont pas acquittés dans un délai sont supposés perdus ou erronés. L'utilisation de cette approche assure que chaque paquet soit finalement reçu.

- **La méthode explicite :** Un Acquittement négatif (NAK) explicite peut demander la retransmission d'un paquet, comparant à la méthode implicite, elle accélère la retransmission.

Dans cette partie, on décrira la façon de calculer l'efficacité de protocole de répétition sélective en comparant avec d'autres protocoles.

3.3.1.3.3 L'efficacité de protocole SRP

Pour un SRP dit idéal, seuls les paquets erronés vont être retransmis puisque :

- Parfois les paquets doivent être retransmis, non parce qu'ils sont erronés, mais parce que le temporisateur est expiré;
- Dans le cas de protocole de répétition sélective l'efficacité = $1 - P$, le P signifie la probabilité d'une erreur dans les paquets;
- La nécessité d'avoir des fenêtres plus grandes est due à l'augmentation du taux (nombre) de transmissions.

3.4 Le protocole d'acquittement HARQ

Le protocole HARQ (Hybrid automatic repeat request) est une évolution de la méthode ARQ. Ce mécanisme est obtenu en fusionnant le mécanisme ARQ avec le correcteur d'erreurs FEC (forward error correction), afin d'éviter le gaspillage des ressources lors des retransmissions. En fait, la protection des données des utilisateurs par un code FEC permet de minimiser le nombre des retransmissions, tandis qu'une stratégie ARQ permet de limiter la redondance.

Dans la norme standard ARQ, les bits ED (Error-Detection) sont ajoutés aux données à transmettre (par exemple, le code de contrôle de redondance cyclique CRC). Dans « L'Hybrid ARQ », des bits de « forward error correction » (FEC) sont également ajoutés aux bits de la détection d'erreur existants (ED) (comme les « Reed-Solomon », code ou « Turbo code ») [45].

3.4.1 Les caractéristiques de protocole HARQ

En conséquence, HARQ fonctionne mieux que ARQ dans des conditions d'un signal faible puisque :

- La version la plus simple est le modèle HARQ(I). Il ajoute à la fois les deux informations ED et FEC pour chaque message avant sa transmission. Lorsque le bloc de données est reçu, le récepteur décode d'abord le code d'erreur de correction. Si la qualité du canal est bonne, toutes les erreurs de transmission doivent être corrigées. Par contre, si la qualité du canal est mauvaise et qu'il est impossible de corriger toutes les erreurs de transmission. Si le récepteur arrive à détecter cette situation en utilisant le code ED (error-detection), alors le bloc de données reçu est écarté et une retransmission est demandée par le récepteur, semblable à celle d'ARQ [46].
- Le modèle le plus adapté de HARQ, est HARQ(II) ou version deux, qui ne transmet que des bits ED ou bien uniquement des informations FEC, et pour comprendre la différence entre le type I et type II d'HARQ, on considère seulement les bits ajoutés pour détecter les erreurs en utilisant ED et FEC. L'ajout de quelques bits à un paquet est une augmentation considérable de la taille. En termes de débit, les protocoles ARQ standards dépensent généralement quelques pour cent de la capacité du canal pour une protection fiable contre les erreurs, tandis que l'utilisation de code FEC consacre normalement la moitié ou plus de la capacité de canal de transmission pour son amélioration. D'autre part, dans la première transmission, le type II HARQ contient seulement les données et le détecteur d'erreurs ED (semblable au standard ARQ). Si le paquet est reçu sans erreur, on passe à l'envoi d'un nouveau paquet. La seconde transmission contient les deux codes (FEC avec parité) en plus du détecteur d'erreurs (ED), lorsque le bloc est retransmis pour une deuxième fois les deux blocs sont combinés [47].

L'avantage de cette technique de combinaison de bloc est qu'elle donne suffisamment d'informations pour le décoder correctement et le corriger.

3.4.2 Type de fonctionnement de protocole HARQ

Dans le protocole HARQ, il existe deux méthodes :

1) La méthode « chase combining » (code de convolution, voir figure 20) : est l'une des deux formes fondamentales de « l'Hybrid ARQ » [48]. Chaque retransmission contient les mêmes informations (données et les bits de parité). Cette méthode permet au décodeur (coté récepteur) de combiner plusieurs exemplaires des paquets ensemble. Elle est très simple à implémenter en utilisant la séquence obtenue à partir des paquets erronés transmis antérieurement et stockés dans une mémoire temporaire au niveau du récepteur [49].

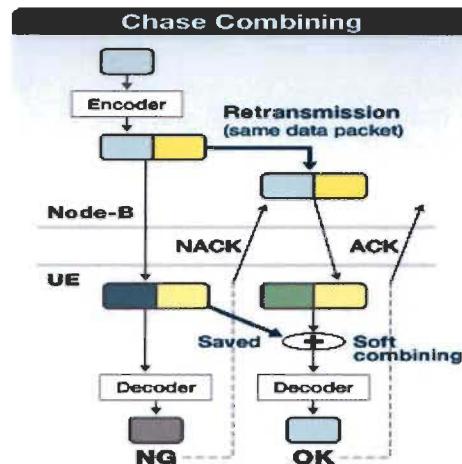


Figure 20: La méthode (Chase Combining) [50].

2) La méthode de redondance incrémentale (Incremental redundancy, voir figure 21) se base sur le fait que chaque retransmission contient des informations différentes de la précédente. À chaque retransmission, le récepteur bénéficie des données et des informations supplémentaires sur les paquets.

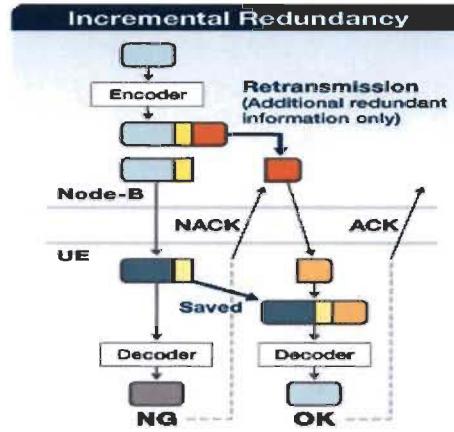


Figure 21: La méthode (Incremental redundancy) [50].

3.4.3 Utilisation d'HARQ dans la technologie LTE

Pour arriver à mieux comprendre l'efficacité et l'utilité d'employer une telle technique pour assurer la bonne transmission des données, nous illustrons dans le paragraphe suivant la façon de contrôler la transmission de données entre deux entités qui sont e-NodeB et UE. [51] Les deux entités sont conçues pour réduire le délai de transmission dans le réseau de LTE. La station de base et le contrôleur de réseau radio sont fusionnés dans un seul nœud nommé eNodeB, afin d'éliminer le délai de transmission entre la base et le contrôleur de réseau radio. D'autre part dans E-UTRAN, le protocole « Stop-and-wait » (SAW-HARQ) au niveau de la couche (MAC) traite les erreurs de transmission sans faire appel au protocole ARQ. Les protocoles HARQ et ARQ interagissent uniquement pour traiter les erreurs HARQ résiduelles.

La figure 22 explique la façon d'envoyer les données entre ces deux entités en utilisant les techniques ARQ et HARQ selon les besoins : au niveau d'entité eNodeB, elle commence d'utiliser la couche RLC pour envoyé la trame vers sa couche MAC, en passant par un temporisateur qui sert à garder temporairement les trames avant de les envoyer, et au niveau de la couche MAC elle utilise un ordonnanceur afin de bien recevoir en ordre les paquets, après elle renvoie les trames vers l'UE qui passe par les mêmes étapes afin de les recevoir, en utilisant à la nécessité les protocoles ARQ et HARQ.

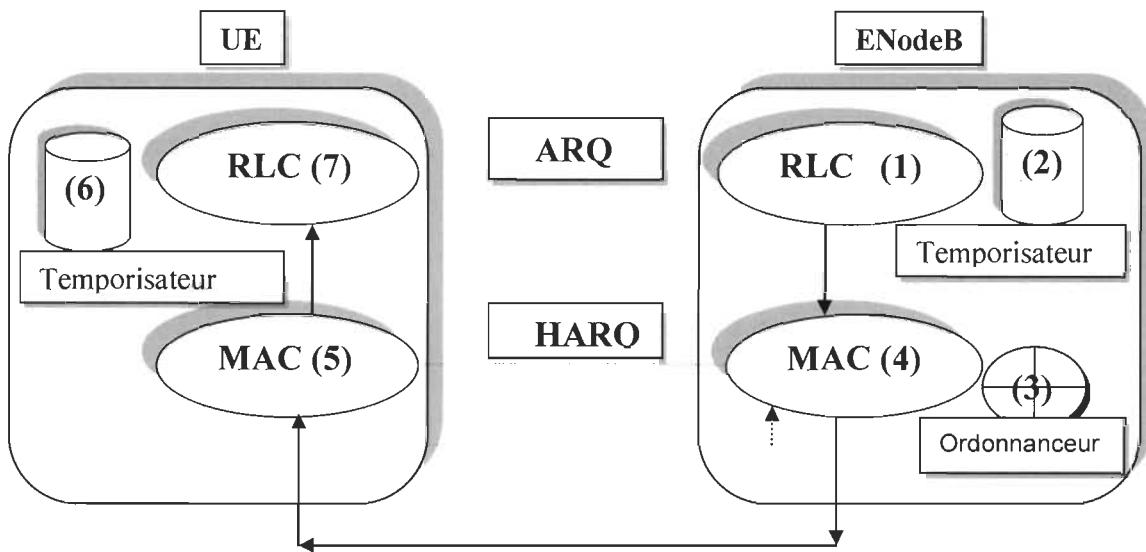


Figure 22: Le diagramme d'interaction pour HARQ-ARQ.

3.4.4 Modulation d'amplitude en quadrature (QAM) [52]

Elle a comme but de transporter un message de deux signaux à la fois analogiques et d'un régime de modulation numérique. En changeant les amplitudes de deux ondes porteuses, et utilisant l'« amplitude-shift keying » (ASK) qui représente la modulation numérique ou bien la modulation d'amplitude (AM), ceci représente la modulation analogique. Les ondes modulées sont additionnées, et la forme d'onde résultante est une combinaison des deux « phase-shift keying » (PSK) et d'« amplitude-shift keying » (ASK).

3.4.4.1 QAM numérique

Comme dans tous les systèmes qui utilisent la modulation, QAM transmet les données en modifiant certains aspects d'un signal porteur, ou bien l'onde porteuse, (généralement est représenté de forme d'une sinusoïde) Dans le cas de QAM, l'amplitude des deux ondes, 90 degrés hors de phase les uns avec les autres (en quadrature) sont modifiés (ou modulées à clé) pour représenter le signal de données. La modulation de phase analogique (PM) et la «phase-shift keying» numérique (PSK) peuvent être considérée comme un cas particulier de QAM, dans le cas que l'amplitude du signal de modulation

est une constante avec seulement la phase qui est variable. Cela peut également être étendu à la modulation de fréquence (FM) et une manipulation à décalage de fréquence (FSK) peut être considérée comme un cas particulier de la modulation de phase.

3.4.4.2 QAM analogique

Voilà la formule lors de la transmission de deux signaux par modulation QAM :

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t) \dots \quad (6)$$

Où $I(t)$ et $Q(t)$ sont les signaux de modulation et f_0 est la fréquence porteuse.

Au niveau du récepteur, ces deux signaux peuvent être démodulés en utilisant la technique de démodulation cohérente. Le récepteur multiplie le signal reçu à la fois un cosinus et le signal sinusoïdal pour produire les estimations reçues de $I(t)$ et $Q(t)$ respectivement.

3.4.4.2.1 Transmetteur

La figure 23 montre la structure idéale d'un émetteur QAM, avec une fréquence porteuse de f_0 , et la réponse en fréquence de H_f :

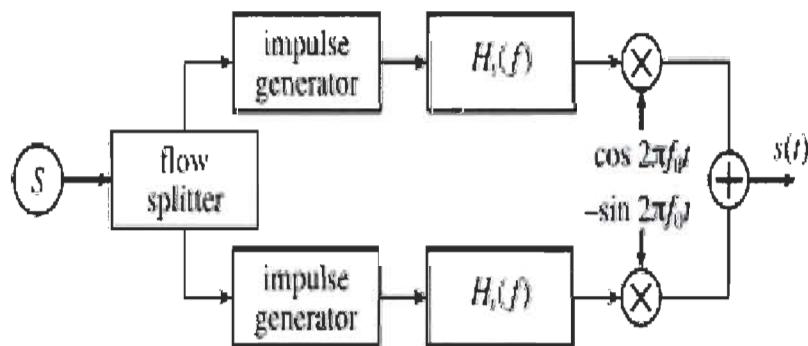


Figure 23: La méthode d'utilisation de QAM au niveau de l'émetteur.

Premièrement, le flux de bits à transmettre est séparé en deux parties égales, il génère deux signaux indépendants à transmettre. Ils sont codés séparément, comme s'ils étaient

dans une «amplitude-shift keying» (ASK) modulatrice. Ensuite, un canal (en phase) est multiplié par un cosinus, tandis que l'autre canal (en quadrature) est multiplié par un sinus. Avec cette méthode, on obtient une phase de 90° entre eux. Ils sont simplement ajoutés les uns aux autres et envoyés via le canal réel.

3.4.4.2.2 Récepteur

Le récepteur exécute le processus inverse de celui de l'émetteur. La méthode est indiquée dans la figure 24 avec H_r , il reçoit la réponse en filtrant la fréquence :

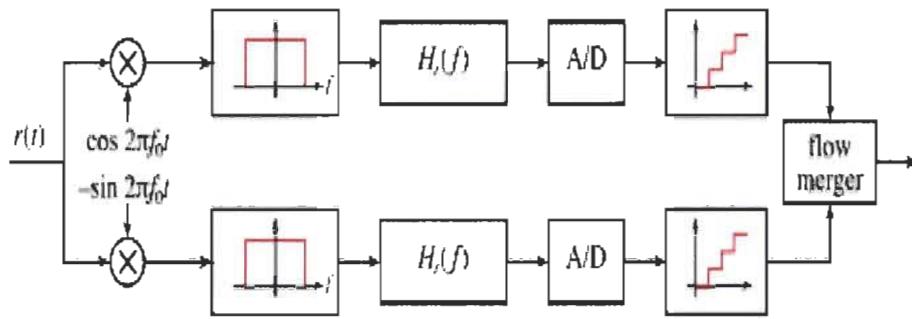


Figure 24: La méthode inverse au niveau de récepteur.

La procédure sert à multiplier par un cosinus (ou un sinus) et par un filtre passe-bas, il est possible d'extraire le composant dans la phase (ou en quadrature). Par suite, un démodulateur ASK et les deux flux de données sont fusionnés [52]. Un retard de phase entre l'émetteur et le récepteur doit être compensé par la synchronisation des appareils récepteurs de l'oscillateur local.

Dans le chapitre suivant, nous procéderons à la phase la plus importante de la recherche soit l'expérimentation. Nous parlerons du choix du simulateur des résultats obtenus, ensuite, nous exposerons les performances des protocoles d'acquittements ARQ et HARQ selon des différents scénarios.

CHAPITRE 4 : Résultats expérimentaux

4.1 Introduction

L'étude des performances des systèmes de communications au niveau réseau représente une tâche complexe où des outils de simulation spécialisés doivent être utilisés. Dans notre cas, sachant que nous nous intéressons aux systèmes cellulaires actuels et futurs, une prise en charge du modèle LTE est d'une importance primordiale.

Dans ce chapitre, nous traiterons du choix du simulateur réseau retenu pour produire les résultats et nous exposerons les performances au niveau réseau des méthodes ARQ et HARQ selon différents scénarios.

4.2 Méthodologie de simulation

La figure 25 représente les licences qu'on a utilisées dans cette étude.

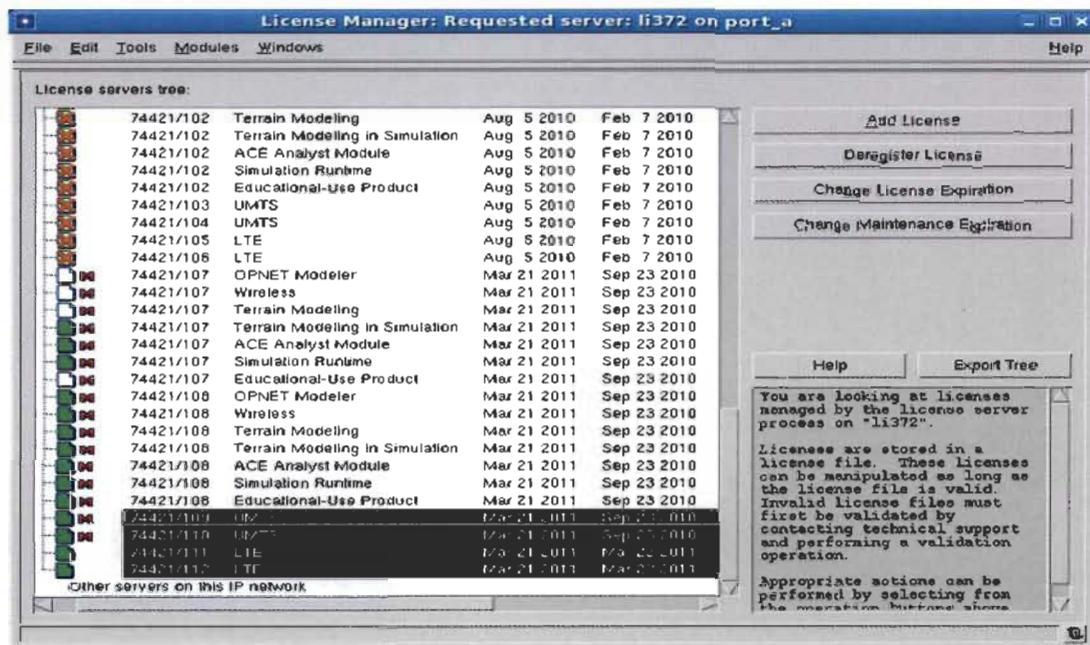


Figure 25: LTE License.

4.2.1 Les simulateurs réseau [53]

Parmi les simulateurs réseau, les plus utilisés dans la recherche en réseautique sont : Network Simulator (NS), et OPNET. Le tableau 3 exprime les différences entre ces deux simulateurs.

Tableau 3: La Comparaison entre les deux principaux simulateurs réseau.

	Network Simulator	OPNET
Langage	TCL, OTCL	ProtoC ~ C/C++
Entrée	Fichier texte passé en paramètre	Environnement graphique ou importation d'un fichier
Édition de noeud	Oui	Oui
Édition de réseau	Oui	Oui
Édition de comportement	Oui	Oui
Plates-formes	Unix, Linux, Windows	Linux, Windows 2000 et NT
Coût	Gratuit	Licence univ. gratuite

4.2.2 Buts

Les simulations réseau nous permettent [54] :

- D'observer un comportement dans des différents scénarios;
- D'explorer des scénarios qui ne peuvent être observés de façon traditionnelle;
- De minimiser le coût des tests et de développement en cas d'erreur.

4.2.3 Déroulement

Voici les démarches de déroulement d'une simulation, telles qu'illustrées à la figure 26. Premièrement, il faut définir le problème : comprendre et avoir une vue d'ensemble du problème (conception).

[53] Ensuite les simulations sont effectuées, il suivie d'une analyser des résultats en vue de savoir si la solution répond aux attentes de la partie conception. Si les résultats ne sont pas corrects, il faut revoir soit les paramètres de simulation, soit la conception. Après s'être assuré que la simulation est correcte, il s'agit de prendre les décisions par rapport aux requêtes de départ.

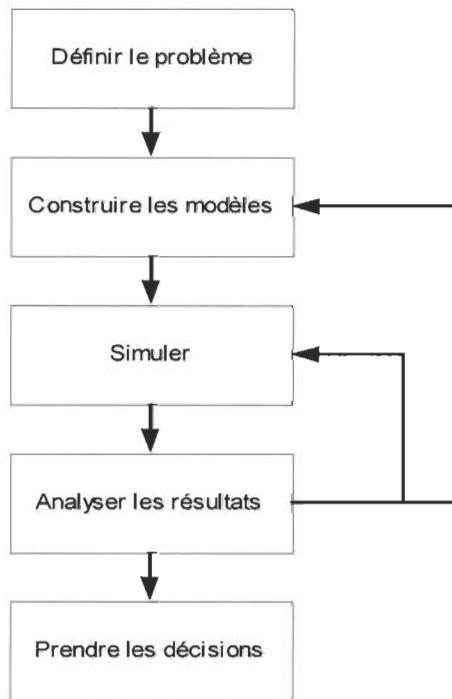


Figure 26: Étapes pour la réalisation d'une simulation [53].

4.2.4 Les avantages des simulations réseau [53] [55] [56]

Au moment du développement d'une application, les développeurs se retrouvent devant un certain nombre d'inconnues et d'obstacles. Ces inconnues peuvent être rencontrées durant la période de conception, de développement et/ou d'intégration ou bien dans les trois phases. Parmi les avantages de l'utilisation d'un simulateur sont :

- Qu'il est possible de comparer facilement les conceptions alternatives, afin de choisir le système optimal;

- Au cours de développement de la simulation, elle peut nous fournir des indications précieuses sur le fonctionnement interne du réseau, qui peut à son tour être utilisé à un stade ultérieur;
- Les simulateurs peuvent réduire les inconnues et les obstacles. En permettant de voir tout ce qui peut arriver et tous les scénarios possibles, les concepteurs ayant la possibilité de prendre des décisions face à certains problèmes;
- La phase de simulation donne aux développeurs une bonne idée de l'ampleur de l'implémentation réelle de l'application;
- Le fait de faire la conception et les scénarios à main se révèle trop fastidieux et trop complexe. Dans ces cas, les simulateurs réseau interviennent et permettent de mieux comprendre des protocoles ou des applications.

4.2.5 Les inconvénients des simulations réseau [53] [55] [56]

Parmi les obstacles et les inconvénients des simulateurs réseau, le plus connu est qu'il soit limité à des architectures existantes. Si une architecture n'existe pas ou si le simulateur réseau ne supporte pas encore l'architecture (protocole ou technologie, etc.), les utilisateurs ne peuvent pas l'utiliser; à l'exception des simulateurs libres (Open source). Dans ce qui suit d'autres inconvénients auxquels il faut faire face :

- D'importantes ressources sont nécessaires pour le développement et la simulation;
- Les résultats de simulation dépendent du degré de précision du modèle choisi. De plus, les résultats obtenus demeurent des estimations (par rapport à la réalité);
- Pour certaines simulations, le nombre limité des variables et des ressources accessibles représentent une limitation sérieuse à l'étendue des résultats souhaitable;
- Il est facile parfois de passer par des simplifications des différents problèmes et obstacles. Et par suite le fait de trouver un écart entre les simulations et les situations réelles, rends parfois difficiles à surmonter la situation et ça prend beaucoup de temps à résoudre ce problème.

4.3 Le Simulateur utilisé

Le produit **OPNET Modeler** (voir figure 27) est très réputé dans l'industrie pour la modélisation et aussi la simulation des réseaux. Parmi ses avantages, il permet de concevoir et d'étudier des réseaux de communications, des nouvelles technologies, des protocoles et des applications avec facilité et évolutivité. Le produit **Modeler** est utilisé spécialement par les entreprises des technologies les plus performantes pour accélérer et améliorer leurs procédés de recherches et de développements.

En plus de la qualité de ce simulateur, l'introduction d'une bibliothèque **LTE** avec une prise en charge du protocole **HARQ** a grandement **motivé notre choix**. OPNET a lancé (LTE Model Développement) en collaboration avec les fabricants d'équipements réseaux, fournisseurs de services et autres intervenants pour élaborer le modèle spécifique de LTE.

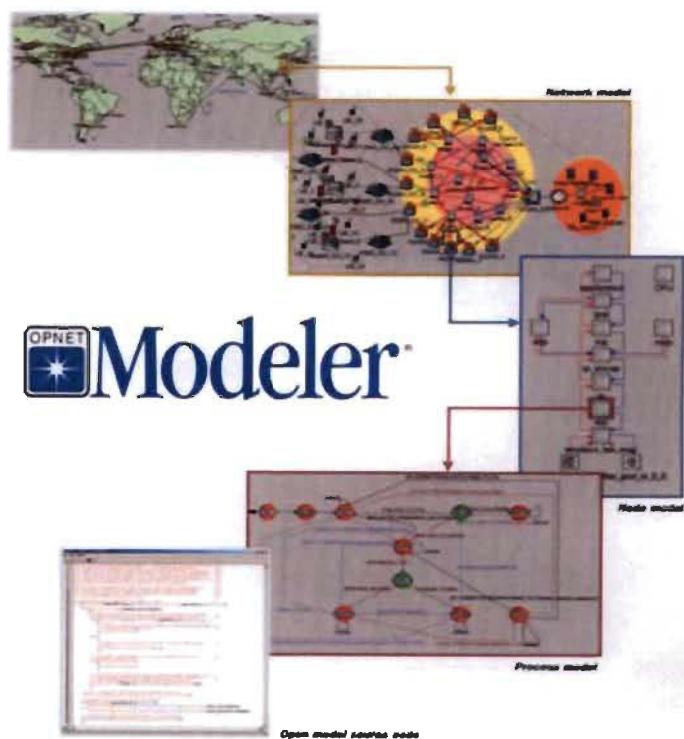


Figure 27: Les étapes pour la réalisation d'une simulation avec Opnet [57].

4.3.1 La structure d'OPNET [58]

OPNET se compose de trois niveaux hiérarchiques imbriqués :

1) Network domain

C'est le niveau le plus élevé de la hiérarchie d'**OPNET** (*interface de réaction entre simulateurs et utilisateur*). Il permet de définir la topologie du réseau (modèle) en y installant des équipements, des commutateurs, des routeurs, et d'autres équipements qui sont reliés entre eux par des liens. Chaque entité de communication (appelée nœud) est entièrement configurable et est définie par son modèle.

2) Node domain (voir figure 28)

Il permet de définir la composition des nœuds (commutateurs, eNodB, UEs, stations de travail...).

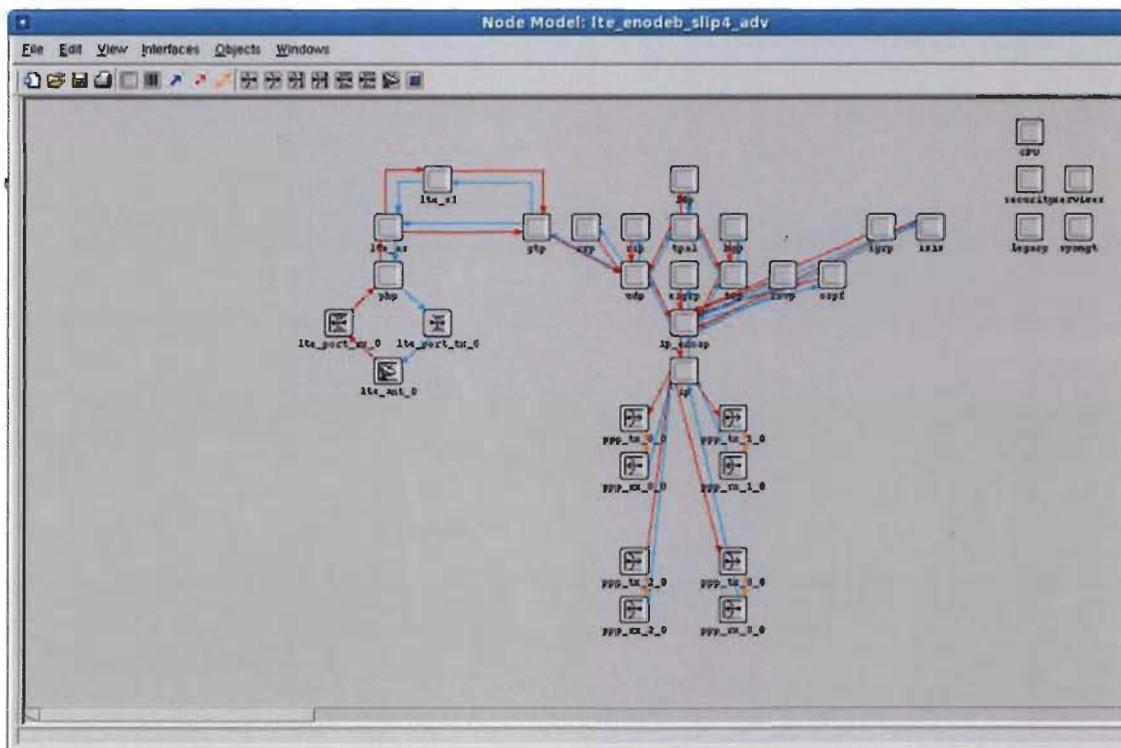


Figure 28: Le node domain sous OPNET.

Au niveau de node domain certains modules sont non programmables, il s'agit des transmetteurs (**transmitters**) et des receveurs (**receivers**), dont la seule fonction est de joindre le nœud et les liens auxquels ils sont connectés.

Par contre, la majorité des autres modules est programmable, il s'agit des **processors** et des **queues**. Les processors représentent les différentes parties du système d'exploitation d'une machine, et particulièrement les différentes couches réseaux implémentées dans le nœud (station de travail).

La communication entre les processors peut s'établir via des packets streams (flux de paquets), qui permettent la transition des paquets d'une couche à l'autre à l'intérieur d'une même machine. Ce module donne une vision claire de la pile de protocoles implémentée et utilisée dans un nœud, et de connaître rapidement leurs différentes interactions.

3) Process domain

La définition de chaque module programmable se fait à ce niveau. **OPNET** fournit des mécanismes permettant à tous les processus de communiquer entre eux via un bloc de mémoire partagée (buffer), ou l'ordonnancement des interruptions est géré. Le process model est décrit sous forme d'une machine à états finis. Chaque bloc représente un état différent, dans lequel la machine exécute un code bien spécifié.

4.4 Implémentation

L'objectif principal est d'analyser l'impact des interférences issues de la couche physique sur le fonctionnement de la couche MAC, en particulier, sur le mécanisme d'acquittement HARQ. Pour ce faire, j'ai procédé par les étapes suivantes :

- Premièrement, j'ai commencé par analyser le comportement du système par l'entremise du temps de réponse et le nombre de paquets en fonction du taux d'erreurs avec et sans l'utilisation du HARQ;
- Comme deuxième étape, j'ai étudié l'effet de la mobilité sur les performances du protocole HARQ;

- Et finalement, comme dernière étape, j'ai étudié l'impact d'interférences de la couche physique sur le fonctionnement de la couche MAC (la réaction du protocole HARQ).

4.4.1 Comparaisons du temps de réponse

La figure 29 représente le modèle qu'on a utilisé pour étudier le temps de réponse :

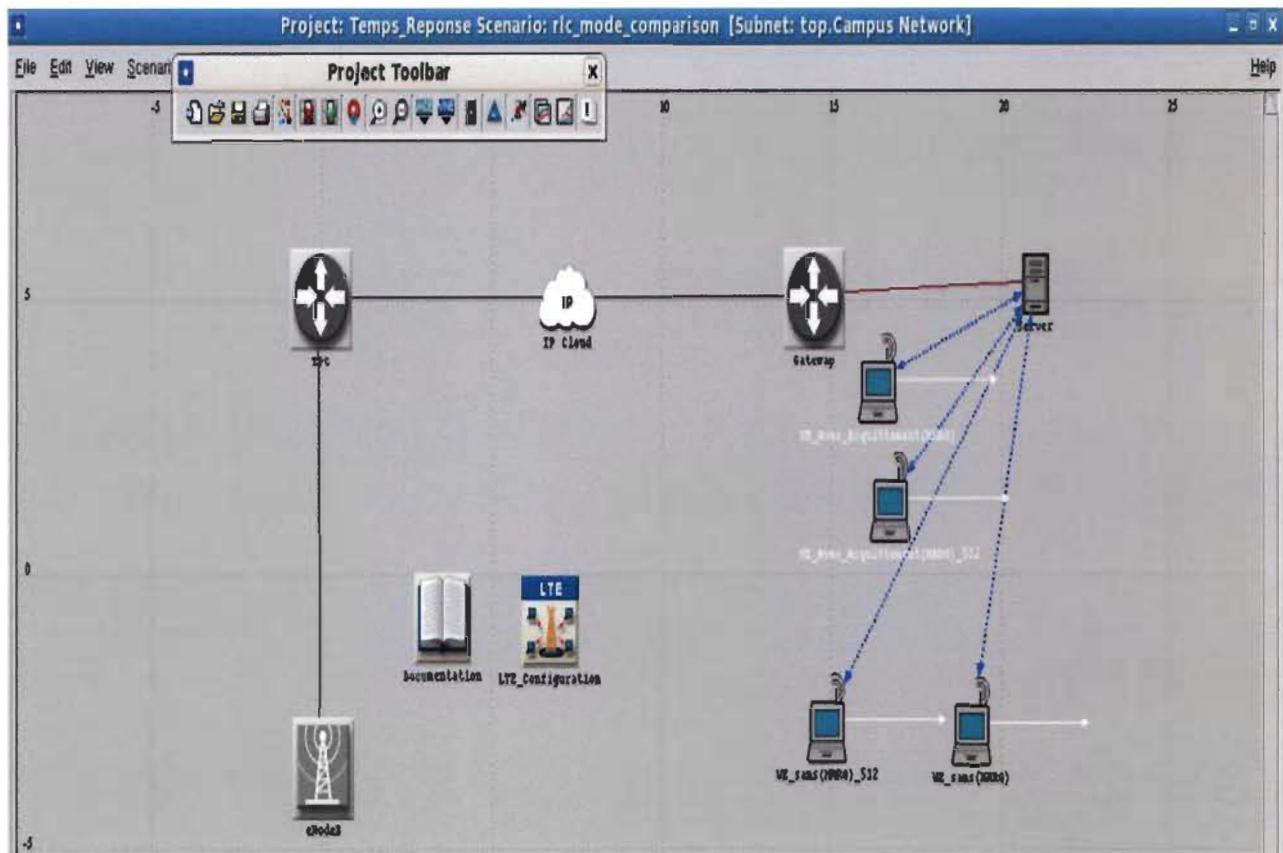


Figure 29: Le modèle utilisé pour étudier le temps de réponse.

4.4.1.1 Description du modèle (voir figure 30)

Network Inventory Summary		
Element	Type	Count
1 Devices	Total	6
2	Routers	3
3	Workstations	4
4	Servers	1
5		
6 Physical Links	Total	4
7	Serial	3
8	Ethernet	1
9		
10 Traffic Flows	Total	4
11		
12	Other	4
13 Other	Network Clouds	1
14	Configuration Utilities	1

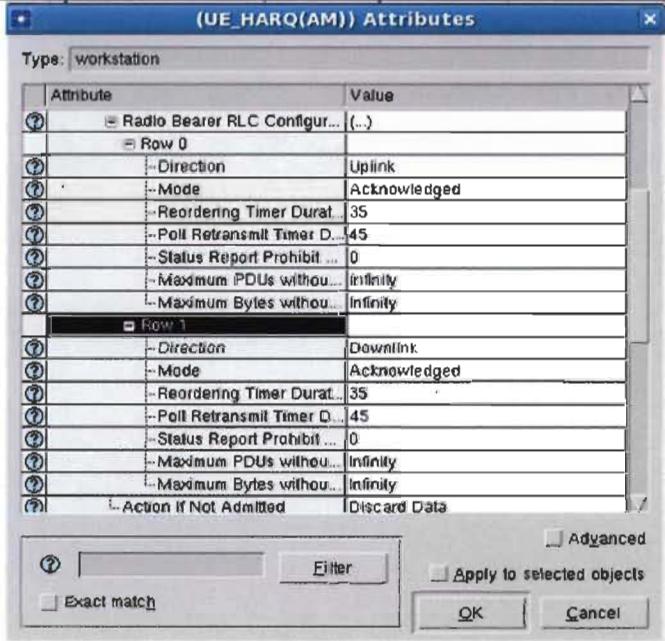
Figure 30: Les composants utilisés lors de simulations.

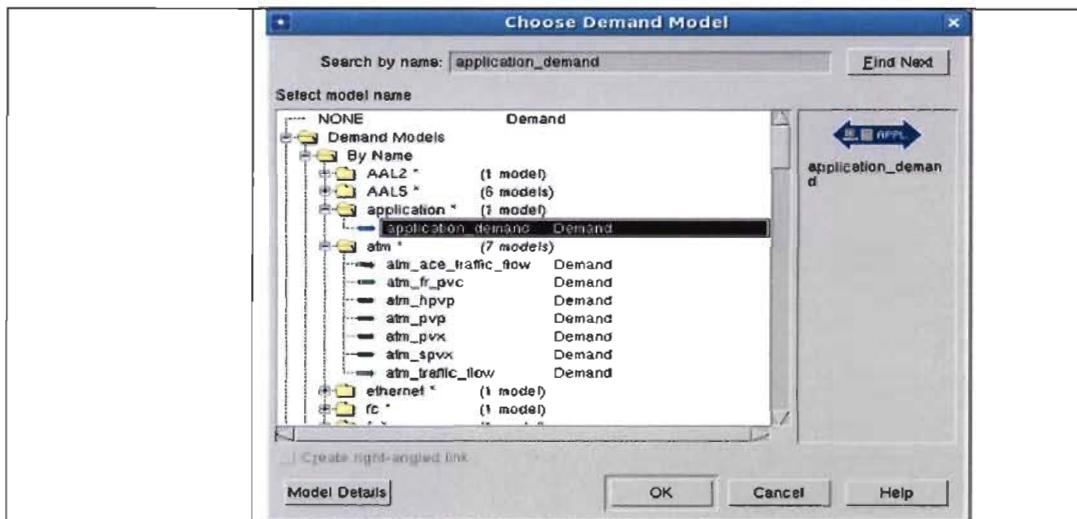
Les caractéristiques des composants utilisés dans cette simulation sont :

- eNodeB avec la possibilité de configurer le (PHY profile) soit : (1.4MHZ, 3MHZ, 5MHZ, 10MHZ, 15MHZ 20MHZ... etc.).
- Les conditions de simulation comprennent l'utilisation de quatre nœuds UEs avec les mêmes paramètres sauf pour le mode de porteur radio RLC ; le nœud UE_Avec_Accès (HARQ) est configuré avec le mode (Acknowleged) ; le nœud UE_sans (HARQ) est configuré avec le mode (Unacknowledged) et les deux autres nœuds possèdent les mêmes configurations avec un changement au niveau de la taille des paquets d'émissions et de réceptions.

Dans le tableau 4, un aperçu des configurations spécifiques d'intérêt pour notre étude de chaque composant de ce modèle est présenté.

Tableau 4: Les configurations spécifiques.

Composant	Exemple sur la configuration																																		
UE_Avec_Acquittement(HARQ)	 <p>The dialog box shows the configuration for 'Radio Bearer RLC Configur...' with two rows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Attribute</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-Direction</td> <td>Uplink</td> </tr> <tr> <td>-Mode</td> <td>Acknowledged</td> </tr> <tr> <td>-Reordering Timer Durat...</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>-Poll Retransmit Timer D...</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>-Status Report Prohibit...</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>-Maximum PDUs without...</td> <td>infinity</td> </tr> <tr> <td>-Maximum Bytes without...</td> <td>infinity</td> </tr> <tr> <td>Row 1</td> <td></td> </tr> <tr> <td>-Direction</td> <td>Downlink</td> </tr> <tr> <td>-Mode</td> <td>Acknowledged</td> </tr> <tr> <td>-Reordering Timer Durat...</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>-Poll Retransmit Timer D...</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>-Status Report Prohibit...</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>-Maximum PDUs without...</td> <td>infinity</td> </tr> <tr> <td>-Maximum Bytes without...</td> <td>infinity</td> </tr> <tr> <td>Action if Not Admitted</td> <td>Discard Data</td> </tr> </tbody> </table> <p>Buttons at the bottom include 'Advanced', 'OK', and 'Cancel'.</p> <p>Dans cette configuration, nous avons choisi le mode sur lequel, ce nœud agirait s'il y a une perte de paquets. Le mode (Acknowledged) utilise le protocole HARQ pour retransmettre les paquets mal envoyés (perdus).</p>	Attribute	Value	-Direction	Uplink	-Mode	Acknowledged	-Reordering Timer Durat...	35	-Poll Retransmit Timer D...	45	-Status Report Prohibit...	0	-Maximum PDUs without...	infinity	-Maximum Bytes without...	infinity	Row 1		-Direction	Downlink	-Mode	Acknowledged	-Reordering Timer Durat...	35	-Poll Retransmit Timer D...	45	-Status Report Prohibit...	0	-Maximum PDUs without...	infinity	-Maximum Bytes without...	infinity	Action if Not Admitted	Discard Data
Attribute	Value																																		
-Direction	Uplink																																		
-Mode	Acknowledged																																		
-Reordering Timer Durat...	35																																		
-Poll Retransmit Timer D...	45																																		
-Status Report Prohibit...	0																																		
-Maximum PDUs without...	infinity																																		
-Maximum Bytes without...	infinity																																		
Row 1																																			
-Direction	Downlink																																		
-Mode	Acknowledged																																		
-Reordering Timer Durat...	35																																		
-Poll Retransmit Timer D...	45																																		
-Status Report Prohibit...	0																																		
-Maximum PDUs without...	infinity																																		
-Maximum Bytes without...	infinity																																		
Action if Not Admitted	Discard Data																																		



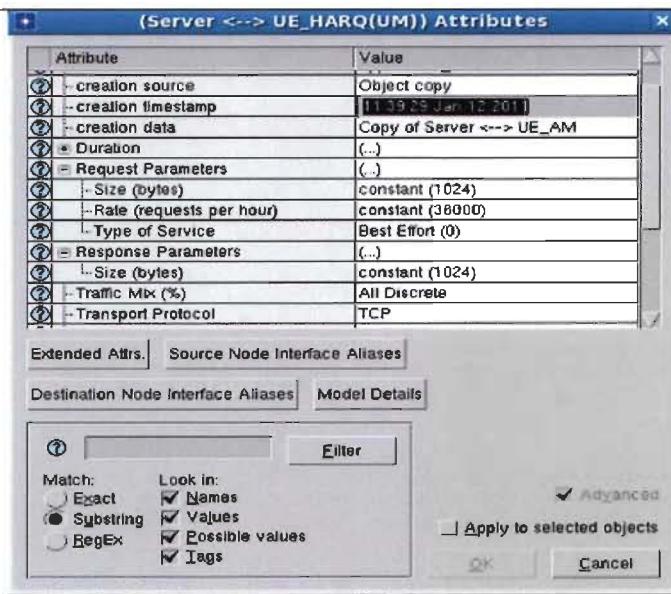
(Choose demand model) sert à définir le lien entre les UEs et les autres composants de la technologie LTE.

UE_sans(HARQ)

Attribute	Value
RadioBearer RLC Config... (..)	
-- Row 0	
-- Direction	Uplink
-- Mode	Unacknowledged
-- Reordering Timer Durat...	35
-- Poll Retransmit Timer D...	45
-- Status Report Prohibit ...	0
-- Maximum PDUs without...	Infinity
-- Maximum Bytes without...	Infinity
RadioBearer RLC Config... (..)	
-- Row 1	
-- Direction	Downlink
-- Mode	Unacknowledged
-- Reordering Timer Durat...	35
-- Poll Retransmit Timer D...	45
-- Status Report Prohibit ...	0
-- Maximum PDUs without...	Infinity
-- Maximum Bytes without...	Infinity
Action If Not Admitted	Discard Data

Dans cette configuration, le mode sur lequel est configuré ce nœud est le mode (Unacknowledged). Il utilise le protocole TCP (Go-Back-N Protocol) pour retransmettre les paquets mal envoyés.

Choix de la taille
des paquets



Cette configuration nous permet de choisir la taille moyenne des paquets (Mean outcome), qui sont envoyés ou bien reçue comme dans ce cas-ci c'est 1024 octets pour les deux.

UE_Avec_Acquit
 tement
 (HARQ)_512
 Et
 UE_sans
 (HARQ) 512

(Server <-> UE_HARQ(AM)_512) Attributes

Attribute	Value
- creation timestamp	10:43:39 Jan 22 2011
- creation date	Copy of Server <-> UE_HARQ(A...)
- Duration	(..)
- Start Time (seconds)	uniform (100, 110)
- End Time (seconds)	constant (3600)
- Request Parameters	(..)
- Size (bytes)	constant (512)
- Rate (requests per hour)	constant (36000)
- Type of Service	Best Effort (0)
- Response Parameters	(..)
- Size (bytes)	constant (512)
- Traffic Mix (%)	All Discrete

Extended Attrs. Source Node Interface Aliases

Destination Node Interface Aliases Model Details

Filter

Match: Look In:

- Exact Names
- Substring Values
- RegEx Possible values
- Tags

Advanced Apply to selected objects

OK Cancel

"Size (bytes)" Specification

Distribution name: constant

Mean outcome: 512

OK Cancel Help

Choisir la taille moyenne des paquets (Mean outcome), envoyés ou bien reçus comme dans ce cas-ci, c'est 512 octets afin de l'utiliser dans d'autres simulations.

Après cette brève introduction qui contient une partie de la configuration, je procède à la simulation et la collecte des résultats :

La figure 31 représente la procédure pour lancer les simulations.

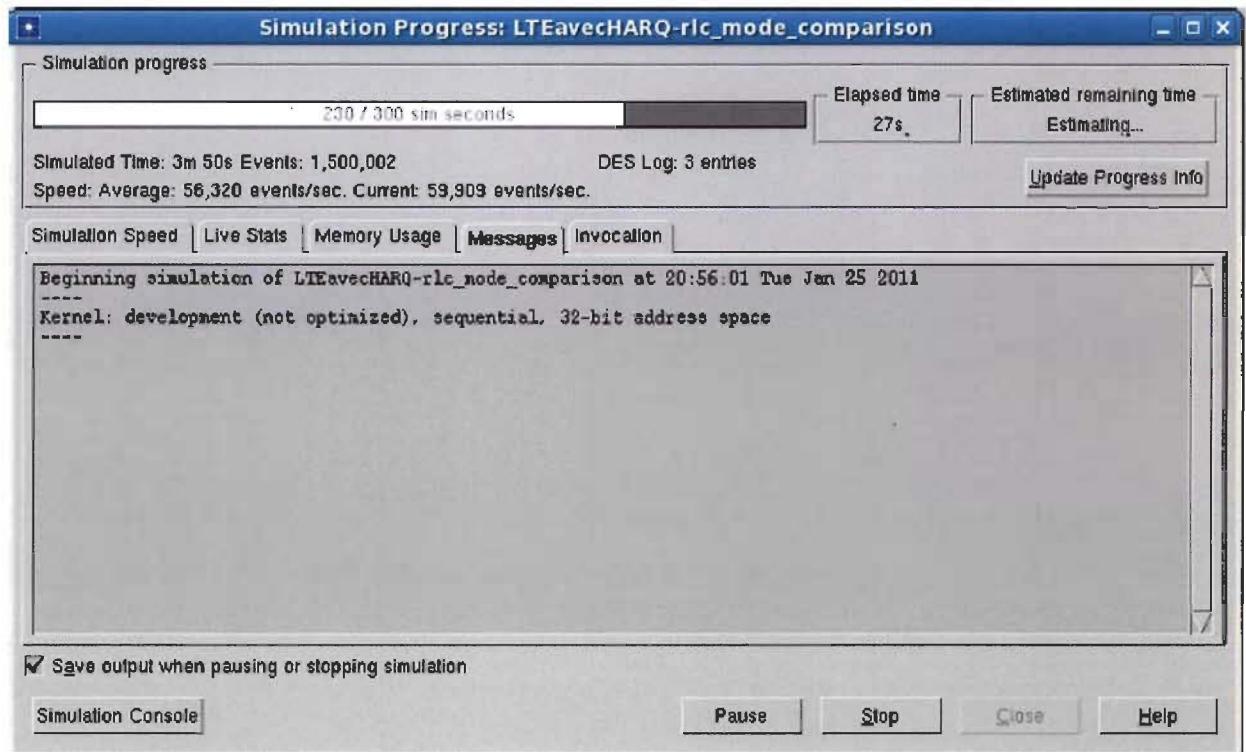


Figure 31: Lancement des simulations.

4.4.1.2 Analyse et résultats

La figure 32 représente les résultats collectés afin d'étudier le temps de réponse avec et sans l'utilisation de protocole HARQ.

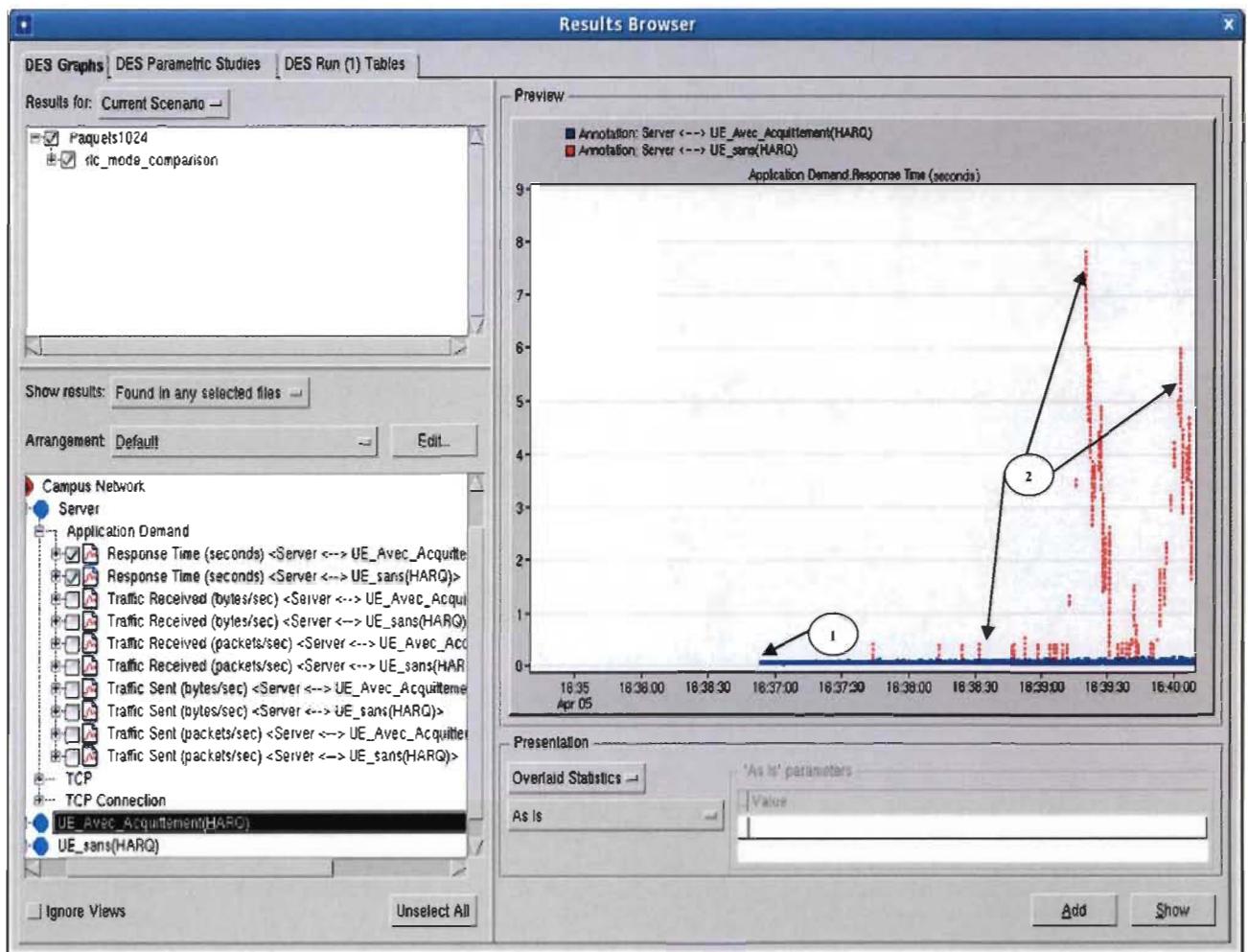


Figure 32: Temps de réponse (avec et sans HARQ).

Analyse :

Dans le panneau temps de réponse des applications (Application response time), nous remarquons que les deux UEs ont des réponses similaires jusqu'à environ 110 secs (1) (T comprise entre 34.5Mn et 37Mn), ce qui explique qu'il n'y a pas de retransmissions de paquets. Après la 37^{ème} minute, nous remarquons une augmentation de temps de réponse au niveau de nœud qui n'utilise pas le protocole HARQ (2), par contre le nœud qui utilise HARQ reste stable parce que le mécanisme HARQ est capable de récupérer les paquets perdus.

La figure 33 représente la retransmission des paquets perdus.

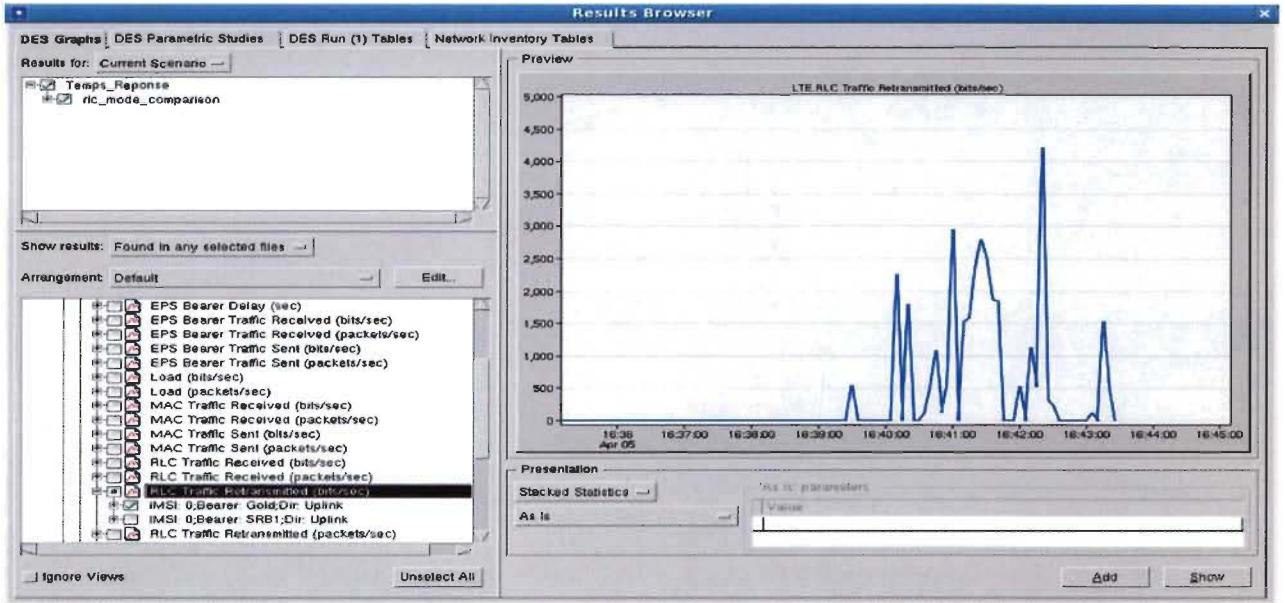


Figure 33: La retransmission des paquets perdus (HARQ).

La figure 34 représente le temps de réponse en changeant la taille des paquets.

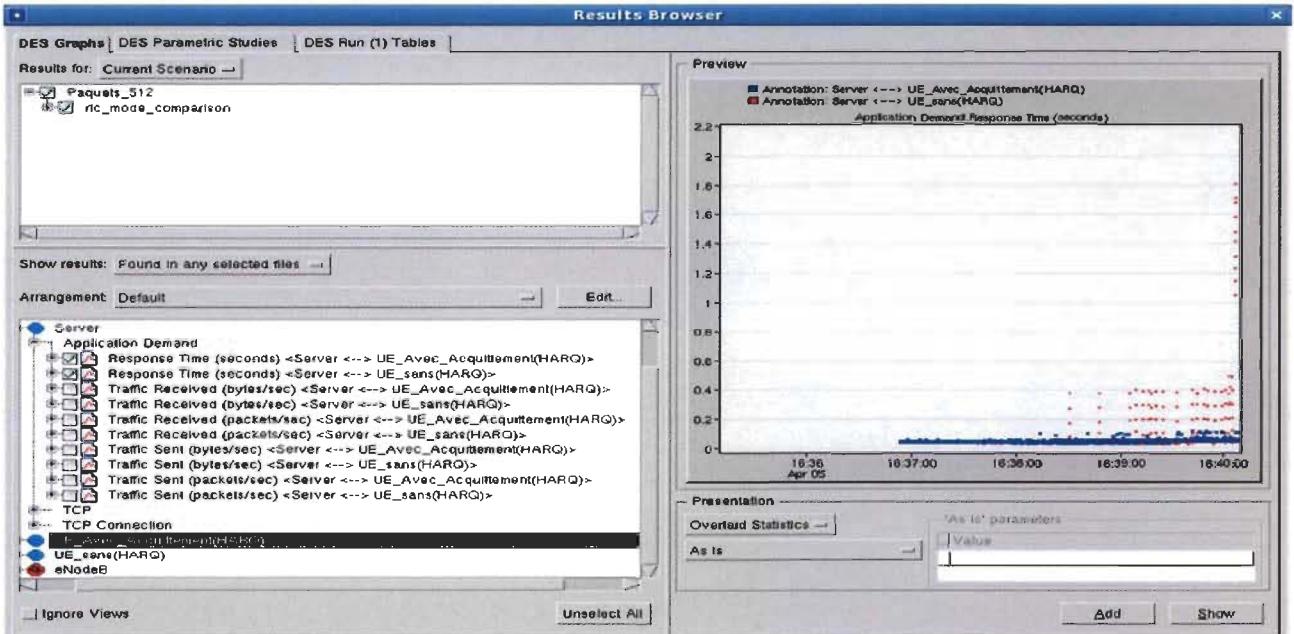


Figure 34: Le temps de réponse (en changeant la taille des paquets).

Analyse :

Dans la figure 34 qui présente le temps de réponse (Application response time), même avec le changement la taille des paquets à 512Kb, on remarque une grande ressemblance avec les simulations qui utilisent des paquets de taille de 1024Kb.

Ainsi, l'utilisation du HARQ permet un temps de réponse stable comparant aux autres nœuds même si la taille des paquets change.

Résultats et conclusion :

- Le nœud qui utilise le protocole TCP pour la récupération des paquets perdus au lieu du protocole HARQ, enregistre une augmentation du temps de réponse;
- Cependant, les nœuds qui utilisent le protocole HARQ maintiennent un temps de réponse plus raisonnable. Cette caractéristique représente un critère important pour statuer sur le choix d'une technologie.

4.4.2 Impact de la mobilité sur le fonctionnement d'HARQ

Dans cette section, nous étudierons l'impact et la réaction des protocoles d'acquittements (HARQ) en fonction du facteur Mobilité. Le modèle de la simulation est présenté dans la figure 35 et les résultats obtenus sont présentés dans la figure 36 en présence de nœuds fixes et dans la figure 37 lorsqu'un des nœuds est mobile.

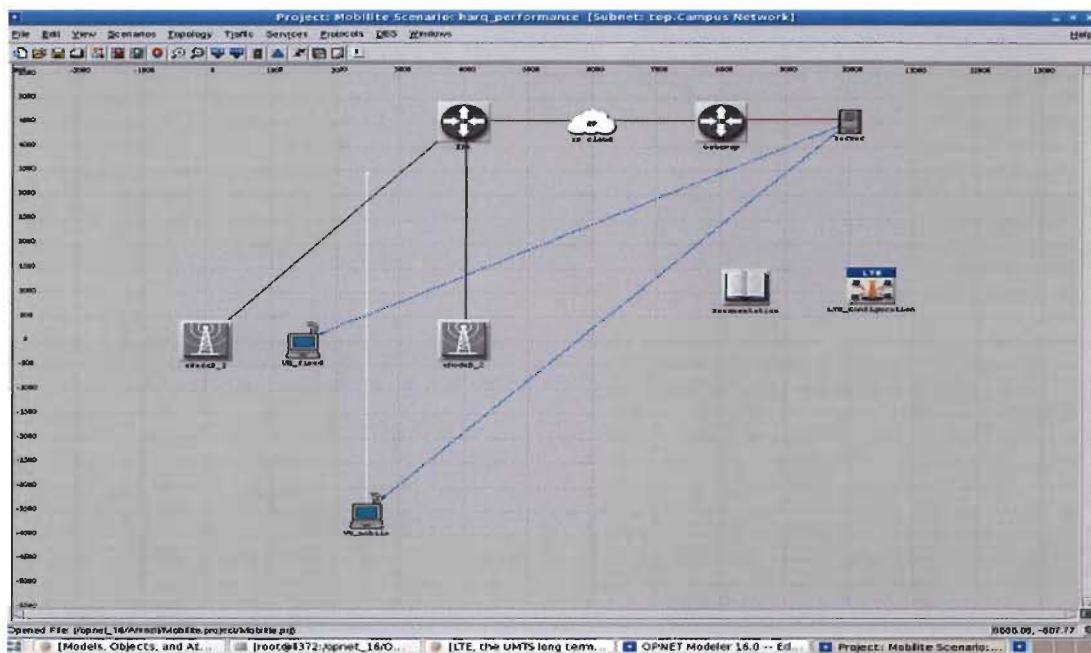


Figure 35: Modèle pour étudier l'impact de la mobilité sur HARQ.

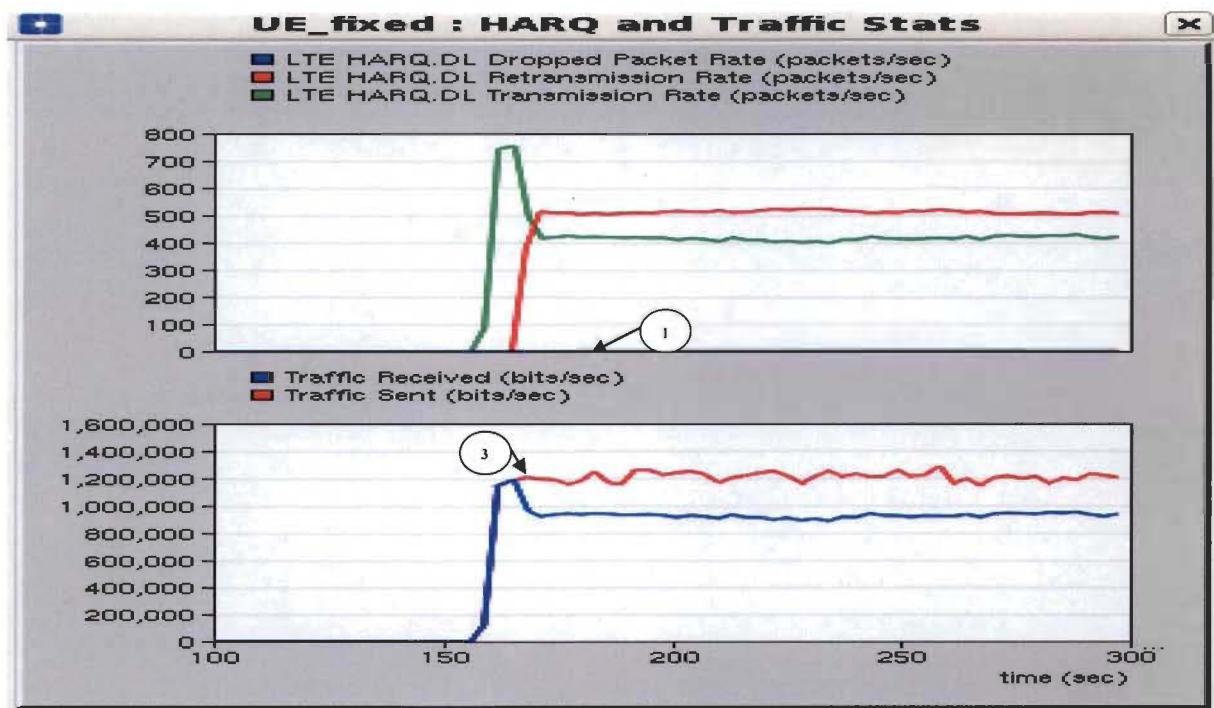


Figure 36: La réaction d'HARQ avec des nœuds fixes.

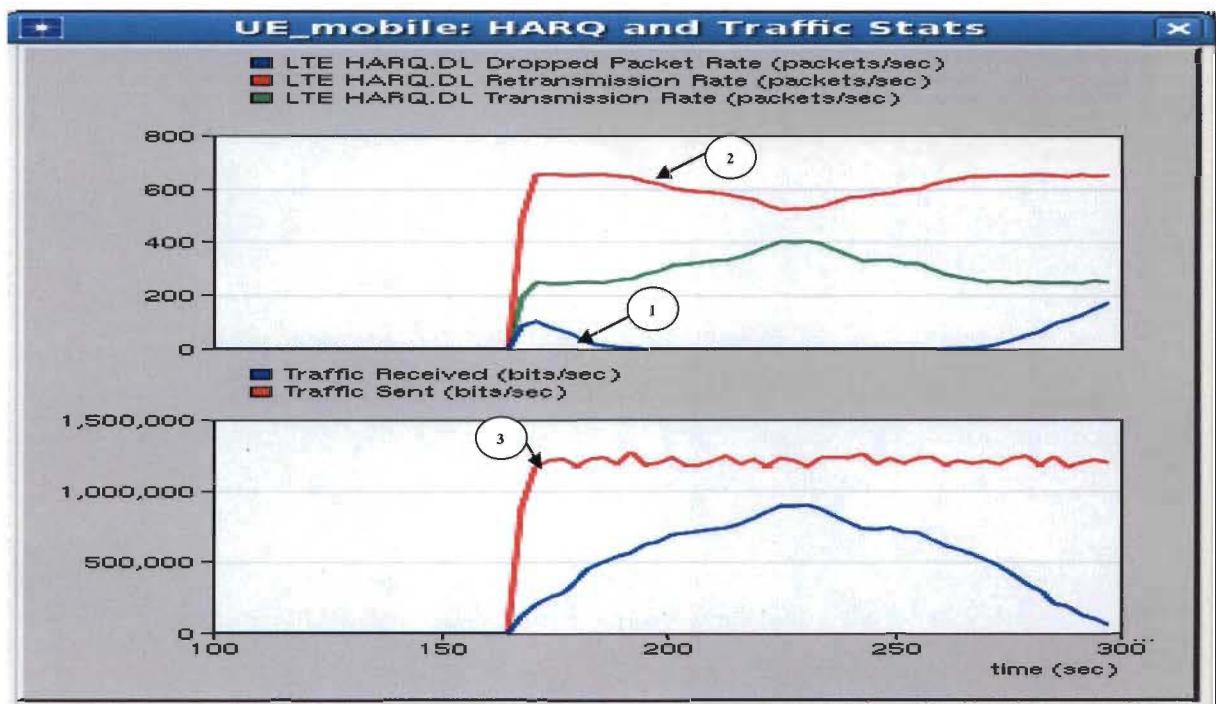


Figure 37: HARQ avec un noeud mobile.

4.4.2.1 Analyse

On remarque premièrement au niveau des figures 36 et 37, au niveau des paquets rejetés (Dropped packet Rate) marqué par (1), que le taux de perte des paquets au niveau du nœud mobile est trop élevé en le comparant avec celui du nœud fixe avec un taux nul. Ces pertes sont expliquées par la présence de collisions, d'obstacle et d'autres facteurs causés par la mobilité.

Dans la courbe identifiée par (2), le nœud mobile tente de rattraper cette perte en retransmettant les paquets perdus en utilisant le protocole HARQ.

En analysant les résultats des courbes de (Traffic sent) (3), un résultat qui peut sembler surprenant est noté quant à la faible différence entre les niveaux de trafic échangé entre les nœuds qu'ils soient mobiles ou fixes. Malgré la perte des paquets au niveau du nœud mobile et qui aurait dû se répercuter sur le trafic en général, l'utilisation du HARQ au niveau du nœud mobile a permis de minimiser l'impact de la mobilité sur le trafic.

4.4.2.2 Résultats

Le facteur mobilité joue un rôle très important au niveau de trafic échangé entre les nœuds et qui cause des pertes de paquets dues aux collisions, obstacles et autres facteurs causés par la mobilité des nœuds. Par contre, le protocole HARQ intervient pour combler ce problème par la retransmission de paquets perdus d'une façon efficace qui ne perturbe ni le temps de réponse, ni le trafic entre les nœuds.

4.4.3 Impact des interférences de la couche physique sur le fonctionnement d'HARQ

4.4.3.1 Interférence (Bande passante 10MHz) (voir figure 38)

Après les simulations faites sur le temps de réponse et la réaction des protocoles d'acquittements en introduisant le facteur de la mobilité, nous nous intéressons dans cette section à l'étude des interférences et son impact sur l'HARQ.

Name	UL SC-FDMA Channel Configuration	DL OFDMA Channel Configuration
0 LTE 20 MHz FDD	Default UL 20 Mhz	Default DL 20 MHz
1 LTE 15 MHz FDD	Default UL 15 Mhz	Default DL 15 MHz
2 LTE 10 MHz FDD	Default UL 10 Mhz	Default DL 10 MHz
3 LTE 5 MHz FDD	Default UL 5 Mhz	Default DL 5 MHz
4 LTE 3 MHz FDD	Default UL 3 Mhz	Default DL 3 MHz
5 LTE 1.4 MHz FDD	Default UL 1.4 Mhz	Default DL 1.4 MHz

6 Rows [Delete](#) [Insert](#) [Duplicate](#) [Move Up](#) [Move Down](#)

[Details](#) [Promote](#) Show row labels [OK](#) [Cancel](#)

Figure 38: Les différentes bandes passantes utilisées dans LTE.

4.4.3.1.1 Description du modèle (voir figure 39)

Network Inventory Summary		
Element	Type	Count
1 Devices	Total	7
2	Routers	4
3	Workstations	2
4	Servers	1
5		
6 Physical Links	Total	5
7	Serial	4
8	Ethernet	1
9		
10 Traffic Flows	Total	2
11	IP	2
12		
13 Other	Network Clouds	1
14	Configuration Utilities	1

Figure 39: Les composants utilisés.

La figure 40 représente le modèle qu'on a utilisé pour étudier l'impact d'interférence de la couche physique sur le fonctionnement d'HARQ, chaque composant utilisé dans ce modèle est décrit en détails dans le chapitre 1 et annexe 2.

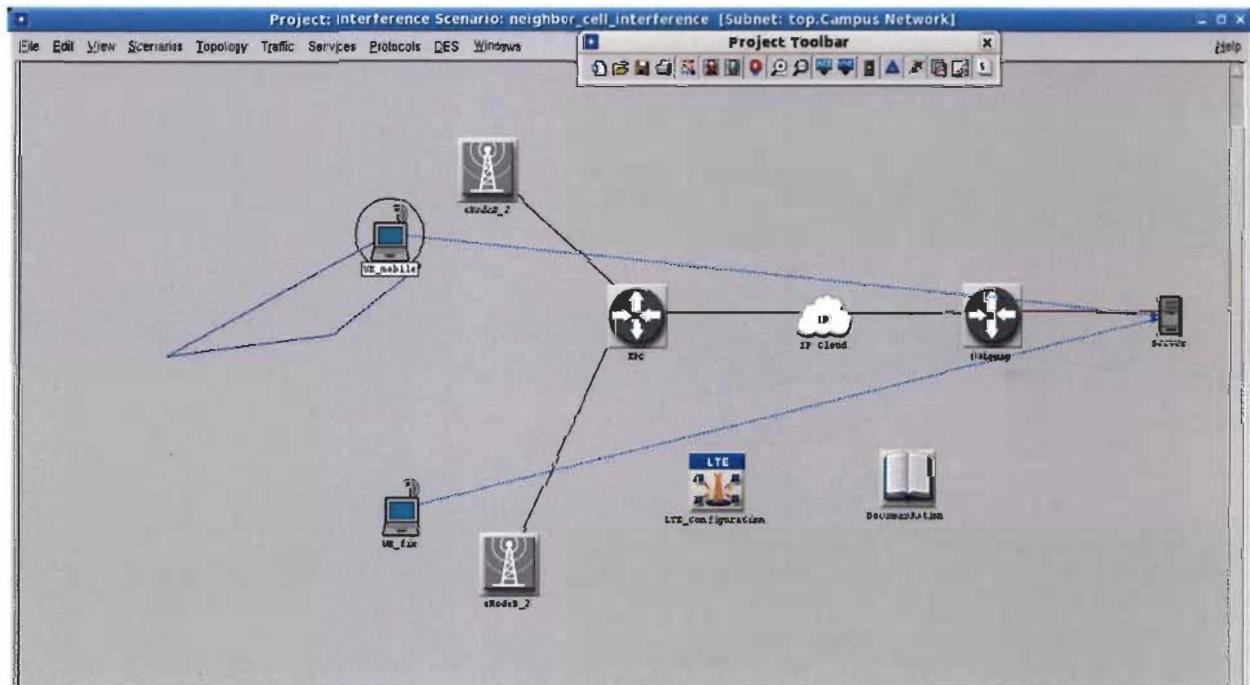


Figure 40: Le modèle pour étudier l'interférence.

4.4.3.1.2 Impact de la mobilité sur l'interférence

Dans notre cas, nous avons configuré deux nœuds avec une bande passante de 10MHz en choisissant trois scénarios différents pour les canaux UL SC-FDMA et DL OFDMA. Le modèle contient deux nœuds l'un mobile et l'autre fixe. La configuration flexible de l'outil logiciel permet de paramétriser le pourcentage d'interférence souhaité. Pour notre étude, nous avons trois scénarios avec 100 % et 50 % ainsi que 0 % d'interférence afin d'étudier l'impact sur les paquets transmis, les paquets perdus et la performance du protocole HARQ dont le rôle est d'assurer la bonne émission de tous les paquets et éventuellement la retransmission des paquets perdus.

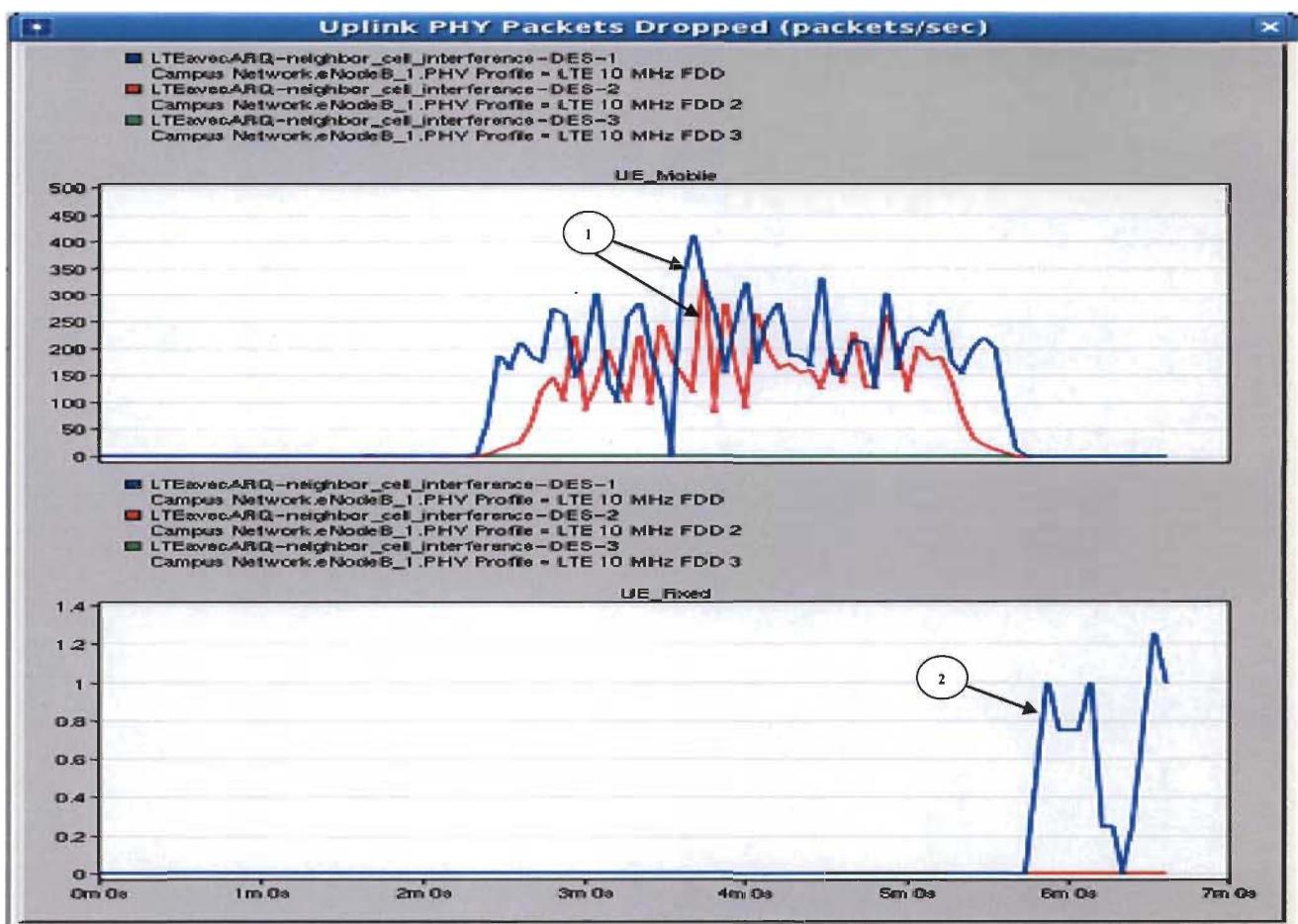


Figure 41: Les paquets perdus selon le taux d'interférence.

4.4.3.1.3 Analyse de la perte de paquets

Dans la figure 41 et au niveau du nœud mobile, une perte considérable des paquets pour les deux premières configurations (FDD et FDD2) (1), qui représentent respectivement 100 % et 50 % d'interférence sont observées. De son coté, le nœud fixe présente une faible perte lorsque le pourcentage d'interférence est très élevé (2) et nulle dans le deuxième cas.

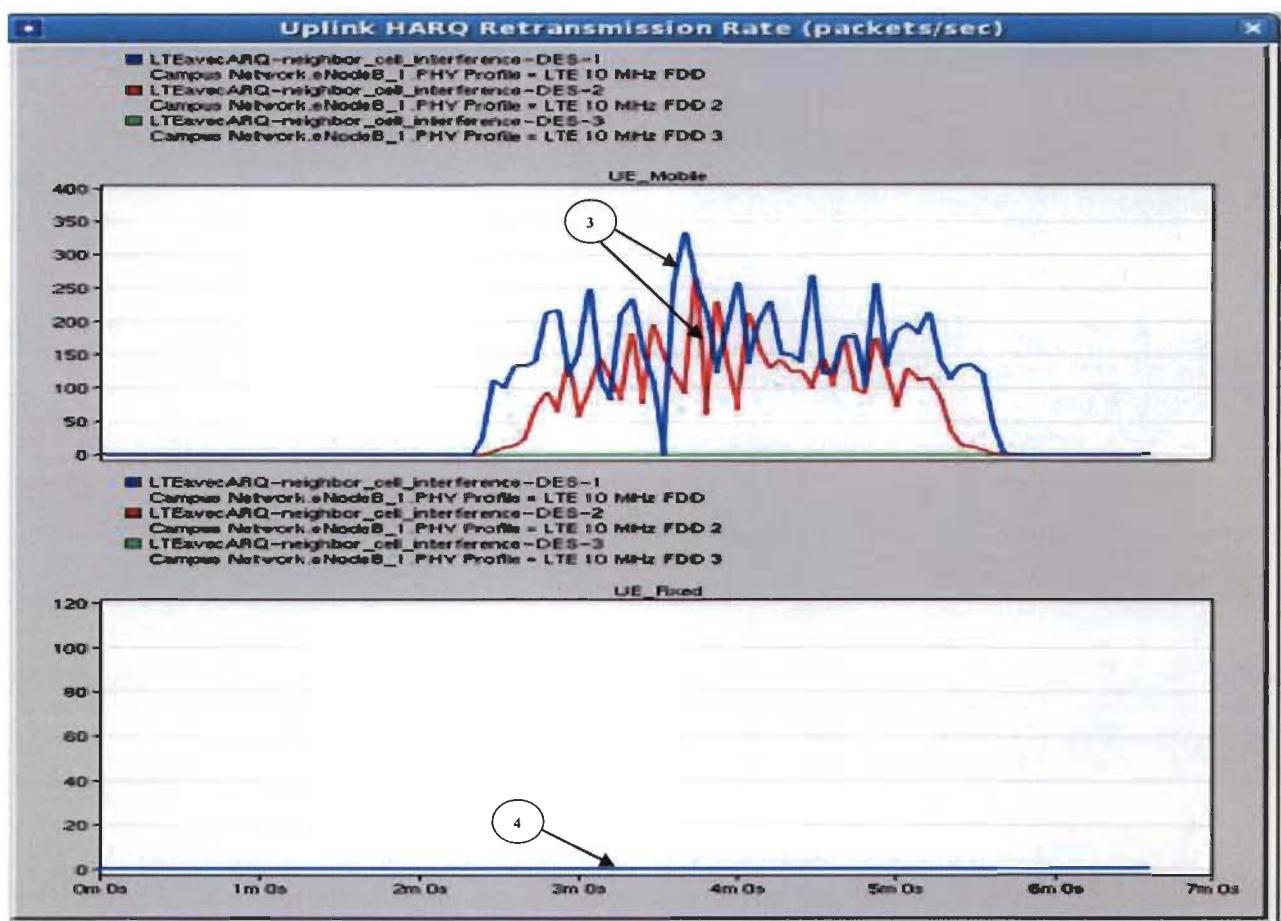


Figure 42: Les paquets retransmis à cause d'interférence.

4.4.3.1.4 Analyse du taux de retransmission

Au niveau de la figure 42 Nous remarquons au niveau du nœud mobile une retransmission faite pour combler et corriger la perte des paquets (3). Quant au nœud fixe, une absence totale de retransmission au niveau de nœud fixe (4) malgré la perte de paquets enregistrée dans la figure 41 qui représente les paquets perdus.

Ceci est dû à la mise en œuvre progressive de l'un des meilleurs types de prototype HARQ (IR-HARQ incremental redundancy HARQ) dont les bits de redondance peuvent également être inclus dans la première transmission. En effet, l'IR-HARQ améliore le débit en ne retransmettant qu'une partie des bits de parité plutôt que l'ensemble des bits d'information.

Ainsi, grâce à cette technique, aucune retransmission n'a été nécessaire au niveau du nœud fixe; contrairement au nœud mobile. En effet, dans ce dernier cas, la présence du protocole IR-HARQ n'a pas été suffisante pour éviter des retransmissions à cause du taux considérable de pertes et aussi de l'influence du facteur mobilité.

La figure 43 confirme le renvoi des paquets au récepteur au fur et à mesure par HARQ.

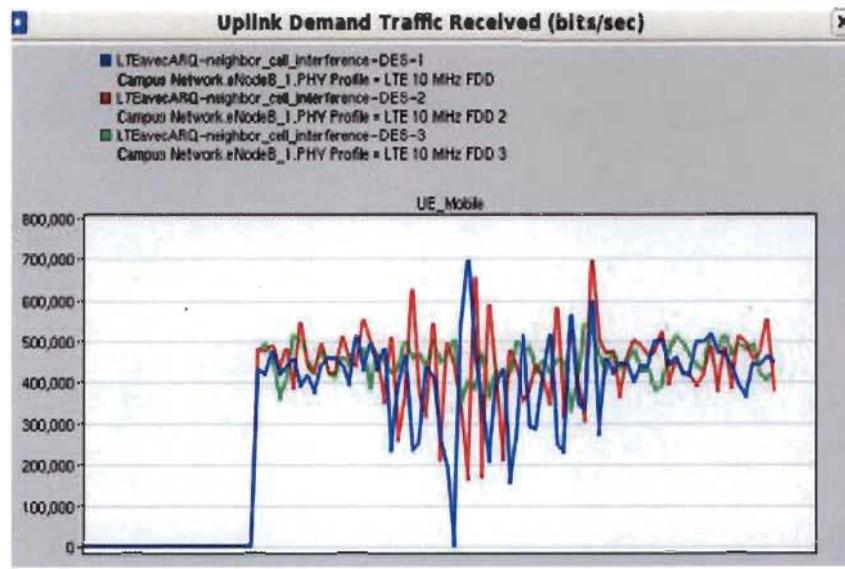


Figure 43: Le trafic reçu versus le taux d'interférence.

4.4.3.1.5 Conclusion

La configuration des nœuds au niveau d'un site selon des liaisons (bande passante) uplink et downlink proches cause des interférences qui peuvent ralentir le trafic des paquets. La mobilité est un autre facteur qui joue un rôle très important au niveau de la transmission du trafic.

Le protocole HARQ montre son importance à assurer la bonne réception des données en retransmettant les paquets perdus en temps réel avec des techniques qui assurent de garder toujours la fiabilité de lien avec le meilleur temps de réponse même avec la présence de la mobilité et d'interférence.

L'IR-HARQ représente un des meilleurs types de protocoles HARQ parce qu'il s'adapte au système de communication et à l'état de la qualité de canal en le code appelé LDPC (Low Density Parity Check) parallèle concaténé [59]. Ces codes LDPC ont été inventés par Gallager en 1962 [60]. Ils sont basés sur des matrices de contrôle de parité pseudo aléatoires de faible densité[61].

Selon les résultats de l'annexe1 qui traite des nœuds dont la bande passante est de 20 MHz, le choix de la bande passante et notamment les fréquences des canaux montants et descendants (UL SC-FDMA et DL OFDMA) influencent le taux d'interférence.

5 CONCLUSION

Ce projet m'a permis d'approfondir mes connaissances et d'ouvrir un chemin vers cette nouvelle technologie récemment déployée, et aussi d'être imprégné des différentes harmonies menant à un choix technologique. Ce choix repose sur l'équation coût-performance.

Avec les années, on va apercevoir l'utilisation à grande échelle de la technologie 4G qui demande en parallèle l'amélioration de la qualité de service. À cette effet, l'étude qu'on a réalisé ouvre une voie et donne un aperçue sur les meilleurs protocoles et mécanismes qui s'adaptent et qui donnent de meilleurs résultats au niveau de la qualité de service.

La prise en compte de plusieurs critères simultanés est un point majeur d'une technologie, ceci se répercute d'une façon directe sur le fonctionnement d'une telle technologie. Dans ce cas, les protocoles ARQ et Hybride ARQ sont utilisés pour améliorer la fiabilité du réseau de communication et leur utilisation contribue à une exploitation efficace des ressources disponibles.

Tout au long de cette étude, nous avons fait face à plusieurs difficultés et obstacles. Tout d'abord, lorsqu'on a pris connaissance du logiciel de simulations réseau (OPNET Modeler Wireless), nous avons eu de la difficulté à faire la recension des écrits puisque les articles et les références sont limités et difficilement accessibles à cause de la nouveauté de cette technologie. Dans la partie pratique, on a intégré une « library » qui assure qu'Opnet supporte le protocole HARQ, le simulateur nous a grandement permis d'avancer, grâce aux modèles prêts à être utilisés et la possibilité de les paramétrier et de les configurer. Toutefois, avec notre planification de départ, nous avons dû recalculer le temps d'apprentissage et revoir l'échéancier.

Notre travail a consisté à réaliser une étude de l'impact des interférences de la couche physique sur le fonctionnement de la couche MAC, en particulier, sur le mécanisme d'acquittement HARQ. Dans la partie théorique, on a commencé par trouver une harmonie des chapitres qui précèdent la partie expérimentale, afin de faciliter et de donner une idée globale de cette nouvelle technologie et les différents composants et

aspects qui sont liés au protocole utilisé dans cette étude. Tout d'abord, on a commencé par une description générale de la technologie LTE et par la suite, nous avons illustré les caractéristiques de cette technologie et ses différentes composantes en focalisant toujours sur le défi majeur rencontré dans ce type de réseaux qui est la qualité de service (QoS).

Dans la deuxième partie, on a présenté une brève description du fonctionnement de la couche physique et de la couche réseau afin de faciliter et d'éclaircir leurs rôles envers les protocoles en question.

Dans le troisième chapitre, on a approfondi d'une façon plus détaillée les protocoles d'acquittement ARQ et spécialement le protocole HARQ et leurs fonctionnements.

Finalement, la partie la plus importante de ce mémoire est celle qui présente les simulations. On a réalisé une campagne de mesures et de tests afin de vérifier l'impact de l'HARQ sur le débit, le temps de transmission et le nombre de paquets versus le taux d'erreur et l'impact des interférences. Pour conclure, je présente quelques résultats obtenus lors du processus de simulations :

- Les nœuds qu'utilisent le protocole HARQ étaient toujours capables de maintenir le temps de réponse plus raisonnable, ce qui est un important critère pour le choix d'une technologie;
- Le facteur mobilité influence directement le trafic échangé entre les nœuds, causant des pertes de paquets. D'un autre côté, le protocole HARQ intervient pour combler ce problème par la retransmission des paquets perdus d'une façon efficace qui ne perturbe ni le temps de réponse, ni le trafic entre les nœuds;
- Le choix de la bande passante et notamment les fréquences des canaux ascendants et descendants (UL SC-FDMA et DL OFDMA) influencent le taux d'interférence et ce dernier joue un rôle direct sur le taux des paquets perdus et par conséquent l'obligation de faire appel à une retransmission qui est assurée par le protocole HARQ, afin de combler cette perte.

6 PERSPECTIVES

Ce travail ouvrirait le chemin à d'autres recherches dans cette technologie et précisément entre les couches les plus importantes qui sont MAC et physique dans le but d'améliorer l'interaction entre elles, et ce mémoire peut être aussi utilisé comme support et référence pour d'autres chercheurs qui sont intéressés à approfondir la recherche sur cette technologie.

Un des objectifs de cette étude comparative est d'ouvrir ou ajouter un nouveau axe de recherche dans la technologie LTE. D'après les données recueillies et présentées à travers les simulations, on est arrivé à démontrer l'importance de chaque protocole d'acquittement avec ses points forts et ses points faibles qui sont à améliorer.

A cet effet, le présent mémoire donne une bonne vue sur les protocoles et les mécanismes d'acquittement et de retransmission qui assurent la qualité et la bonne transmission des données.

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. zebdi, “DZ-MAODV : nouveau protocole de routage multicast pour les réseaux adhoc mobiles basé sur les zones denses ”, Université du Québec à Trois Rivières, pages 14-16, Canada, avril 2006.
- [2] A. Cavoukian, Ph.D, “Bureau du commissaire à l’information et à la protection de la vie privée”, ISSN 1188-3006, No. 14, août 2007.
- [3] D.J. Johnston, “IEEE 802.16* WirelessMAN* Specification Accelerates Wireless Broadband Access”, Technology Intel Magazine, page 4-5, août 2003.
- [4] A. Ghosh, R. Ratasuk and all, “LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology”, IEEE Wireless Communications, page 4-22, Juin 2010.
- [5] M. Salhani, “Modélisation et Simulation des Réseaux mobiles de 4ème Génération”, Institut National Polytechnique de Toulouse, page 1-23, France, octobre 2008.
- [6] www.efort.com, 2009, site d’études et formations en Télécommunications Service et Réseaux de Télécommunication).
- [7] Roke Manor Research Limited, “LTE eNodeB MAC Scheduler Introduction”, Roke Manor, Romsey, Hampshire, SO51 0ZN, page 1-4, Angleterre, 2009.
- [8] Qualcomm Incorporated, “LTE Mobility Enhancements”, RFC 12/20079, février 2010.
- [9] http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/eric_meurisse/umts.php.
- [10] V. Plicanic, “Flexible bandwidth in LTE”, Department of Electrical and Information Technology, Chp 20, Suède, Mai 2009.
- [11] www.ixiacom.com, site de fabricants d’équipements réseau.
- [12] A. Furuskär, T. Jönsson, and M. Lundevall, “The LTE Radio Interface Key Characteristics and Performance”, IEEE, Ericsson Research, Suède, 2008.
- [13] W. Brouwer, “QoS in LTE PSCR Demo Days”, Alcatel-Lucent, Public Safety in LTE, September 2010.
- [14] Tektronix communication, “LTE Networks”, FRC CMW-26012-0, September 2010.
- [15] J. Wiqard and T. Kolding., "On the User Performance of LTE UE Power Savings

Schemes with Discontinuous Reception in LTE", Communications Workshops, ICC Workshops, 2009.

[16] Z. Yan, L. Lei, M. Chen, "WIISE – a completely flat and distributed architecture for future wireless communication systems", Wireless World Research Forum, October 2008.

[17] Motorola, "Long Term Evolution", Technical white paper, 2007.

[18] A. Kunz, T. Taleb, S. Schmid, "On Minimizing Serving GW/MME Relocations in LTE", NEC Europe, Heidelberg, Allemagne.

Les références de (19 à 33) sont des rapports sur la technologie LTE dans le site sécurisé d'Opnet (www.opnet.com):

[19] 3GPP TS 23.303, UE functions and interlayer procedures in connected mode (Release 8).

[20] 3GPP TS 23.401, General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (Release 8).

[21] 3GPP TS 29.274, Evolved General Packet Radio Service (GPRS) Tunnelling Protocol for Control plane (GTPv2-C); stage 3 (Release 8).

[22] 3GPP TS 36.101, Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) Radio transmission and reception (Release 8).

[23] 3GPP TS 24.301, Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS) (Release 8).

[24] 3GPP TS 36.331, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 8).

[25] 3GPP TS 36.322, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification (Release 8).

[26] 3GPP TS 36.321, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 8).

[27] 3GPP TS 36.212, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 8).

[28] 3GPP TS 36.300, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 8).

- [29] 3GPP TS 36.211, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA);Physical channels and modulation (Release 8).
- [30] 3GPP TS 36.213, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 8).
- [31] 3GPP TS 36.410, Evolved Universal Terrestrial Access Network (E-UTRAN); S1 General aspects and principles (Release 8).
- [32] 3GPP TS 36.413, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP) (Release 8).
- [33] 3GPP TS 23.203, Policy and charging control architecture (Release 8).
- [34] V. Kumar, “Les radiocommunication mobiles au-delà de la 3G”, Revue de Télécommunication d’Alcatel, page 28, 2001.
- [35] L. Favalli, M. Lanati, and P. Savazzi, “Hybrid ARQ Based on Rateless Coding for UTRAN LTE Wireless Systems”, Wireless Communications 2007 CNIT Thyrrenian Symposium Signals and Communication Technology, page. 29-37, 2007.
- [36] J. Moskal and J. Grad “Implementation and Performance Analysis of Various ARQ Protocols in Opnet”, Contributed papers avec Opnet, RFC 597.
- [37] J. Mohamed, “Evaluation de l’efficacité de transmission du récepteur en râteau et de l’égaliseur linéaire pour la norme HSDPA”, École Supérieur des Communications de Tunis, pages. 63-64, Tunisie, 2005.
- [38] S. De Vuyst, S. Wittevrongel and H. Bruneel, “Delay Analysis of the Stop-and-Wait ARQ Protocol over a Correlated Error Channel ”, Stochastic Modeling and Analysis of Communication Systems, Université de Ghent, Belgique.
- [39] S. Manitpornsut and P. Sagetong, “Stop-and-Wait Flow and Error Control Protocol Simulation and Analysis”, Université de Southern California, 1999.
- [40] T. Hu, D. Afshartous, G. Young, “Parallel Stop and Wait ARQ in UMTS-Performance and Modeling”, Université de Miami Hutchingson 3G, Angleterre.
- [41] E. Modiano, “ARQ Protocols”, Communication Systems Engineering Lectures, L15, automne 2003.
- [42] V. Vitsas, A. Boucouvalas, “Packet level acknowledgement and Go-Back- N protocol performance in infrared wireless LANs”, International journal of communication systems, RFC 10.1002/dac.575, 2003.

- [43] I. Chlamtac, C. Petrioli, J. Redi, “Energy-conserving Go-Back-N ARQ Protocols for Wireless Data Networks”, IEEE, International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC 98), 1998.
- [44] A. Sabaa, F. Elguibaly, D. Shpak, “Performance analysis of an improved selective repeat protocol for high-speed networks”, université de Victoria, Vol 22, No 2, Pages. 29-36, 1997.
- [45] http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_automatic_repeat_request.
- [46] D. Chase, “Code combining. A maximum likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets”, IEEE Trans. Commun, vol 33, pp. 385-393, mai 1985.
- [47] S. Kallel, “Analysis of Type II Hybrid ARQ Schemes with code combining”, IEEE Trans Communication, vol38, No8, 1990.
- [48] <http://www.javvin.com/wireless/ChaseCombining.html>.
- [49] J. Roman, F. Berens, M. Kirsch, S. Tanrikulu, “Hybrid ARQ schemes for future wireless systems based on MC-CDMA”, Switzerland ,14^{ème} IST Mobile and Wireless Communication Summit, juin 2005.
- [50] www.nec.com, NEC Corporation est l'un des principaux fournisseurs d'Internet au monde et de solutions pour les entreprises.
- [51] C. Hsiang, P. Lin, “Performance study for HARQ-ARQ interaction of LTE”, wireless communications and mobile computing, Wireless Communications and Mobile Computing, Vol 10, Issue 11, pages. 1459–1469, 2010.
- [52] <http://en.wikipedia.org/wiki/Quadr>.
- [53] M. St-Amand, “Nouvelle méthode de distribution des clés de cryptage dans les communications multicast”, Université du Québec à Trois-Rivières, pages.103-105, novembre 2003.
- [54] S. Floyd, V. Paxson, “Difficulties in simulating the Internet”, IEEE/ACM Transactions on networking, vol 9, no 4, pages. 392-403, août 2001.
- [55] Pearson Education, “commutation des télécommunications, du trafic et des réseaux”, ISBN 8131705021, Circulation des télécommunications, New York, 1998.
- [56] A. Penttinens, “Introduction à la théorie du télétrafic”, Université de technologie d'Helsinki, référence S-38.145, automne 1999.

- [57] www.didierfavre.net/Opnet-Modeler.htm, site spécialisé en simulation réseautique(Opnet).
- [58] http://malm.tuxfamily.org/doc/qr_chap4_opnet.htm, site spécialisé en simulation réseautique (Opnet).
- [59] H. Wen, C. Fu, Z. Shi, “Performance analysis of Incremental Redundancy Hybrid ARQ Schemes with Parallel Concatenated LDPC codes”, International Conference Communications, Circuits and Systems Proceedings, page. 731–734, 2006.
- [60] R. G. Gallager, “Low-density parity-check codes”, université de Cambridge, mémoire de doctorat présenté en 1963.
- [61] J. Baptiste Doré, “Optimisation conjointe de codes LDPC et de leurs architectures de décodage et mise en œuvre sur FPGA”, INSA de Rennes, page. 26–28, France, 26 octobre 2007.

ANNEXE 1: simulation avec une bande passante de 20Mhz.

1 Interférence avec une bande passante (20Mhz)

Dans cette étude, on change la bande passante à 20Mhz avec trois scénarios pour les canaux (UL SC-FDMA et DL OFDMA).

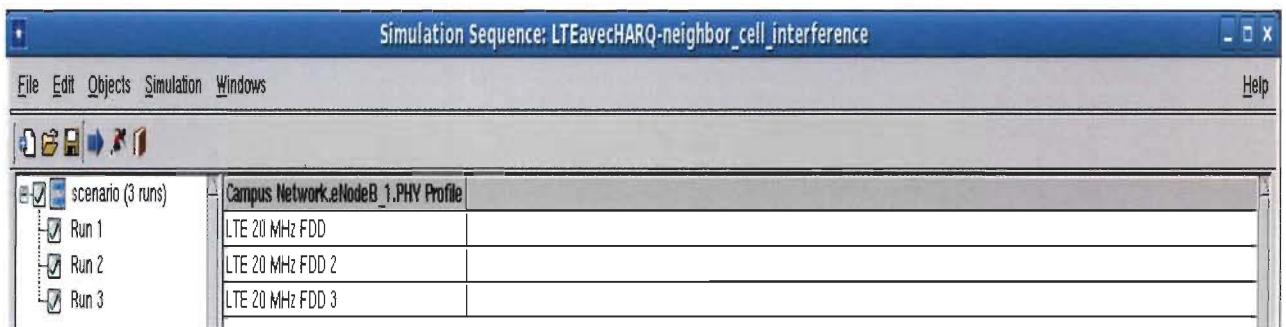


Figure 44: Les trois scénarios utilisés (20MHZ).

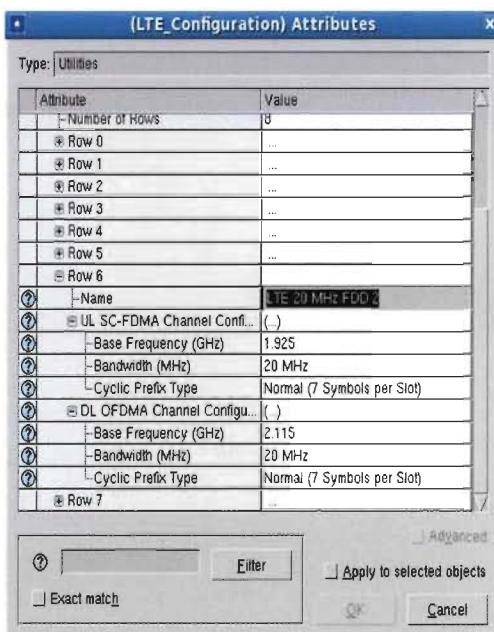


Figure 45: Configuration FDD2 (20MHZ).

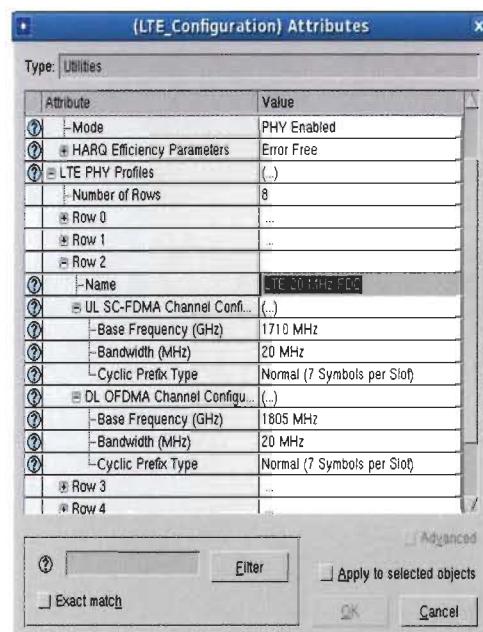


Figure 46: Configuration FDD (20MHZ).

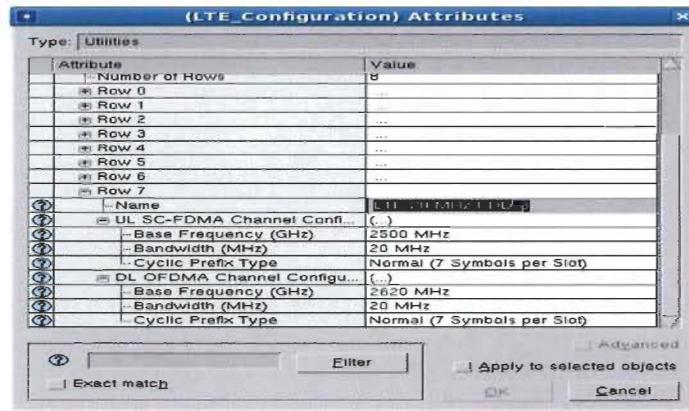


Figure 47: Configuration FDD3 (20MHz).

Les trois précédentes figures représentent les différentes configurations de la bande passante pour les canaux montant et descendant (UL SC-FDMA et DL OFDMA) utilisés dans cette étude.

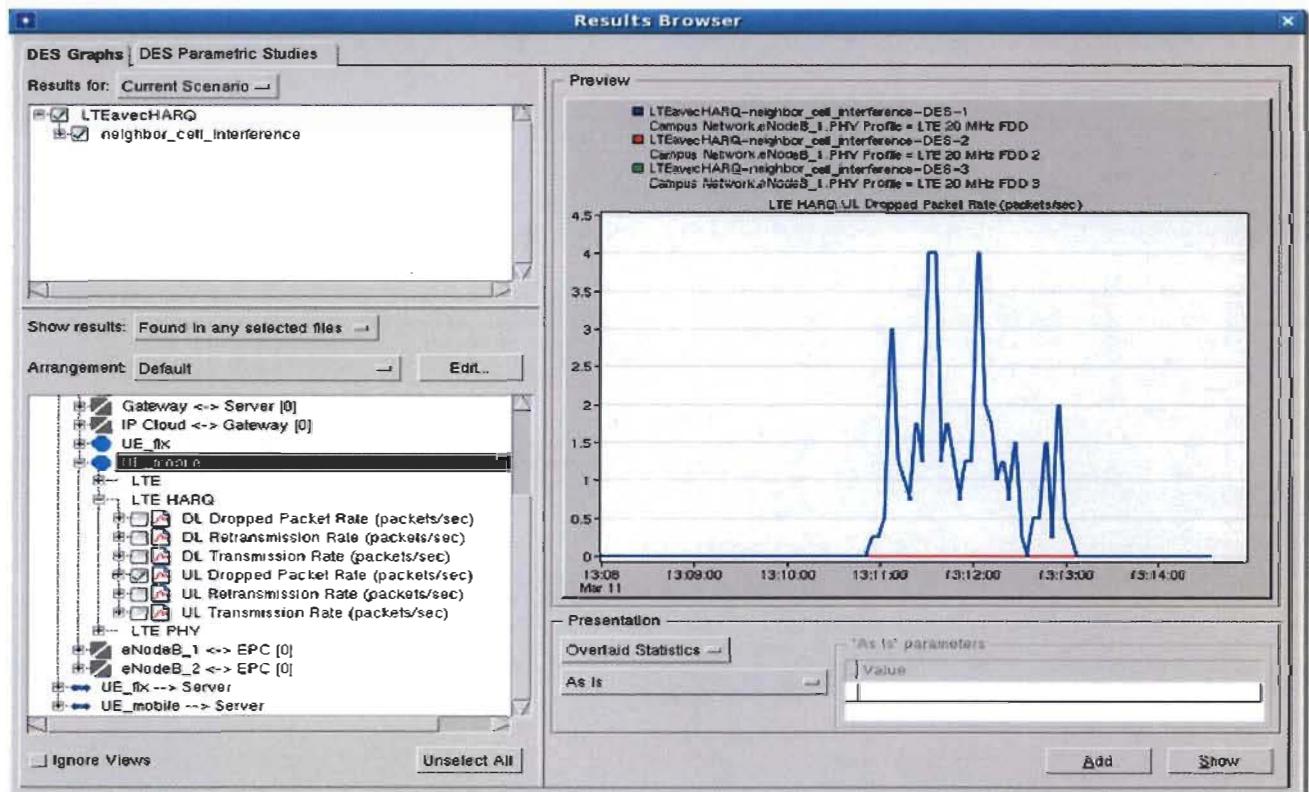


Figure 48: Les paquets perdus (bande passante 20MHz).

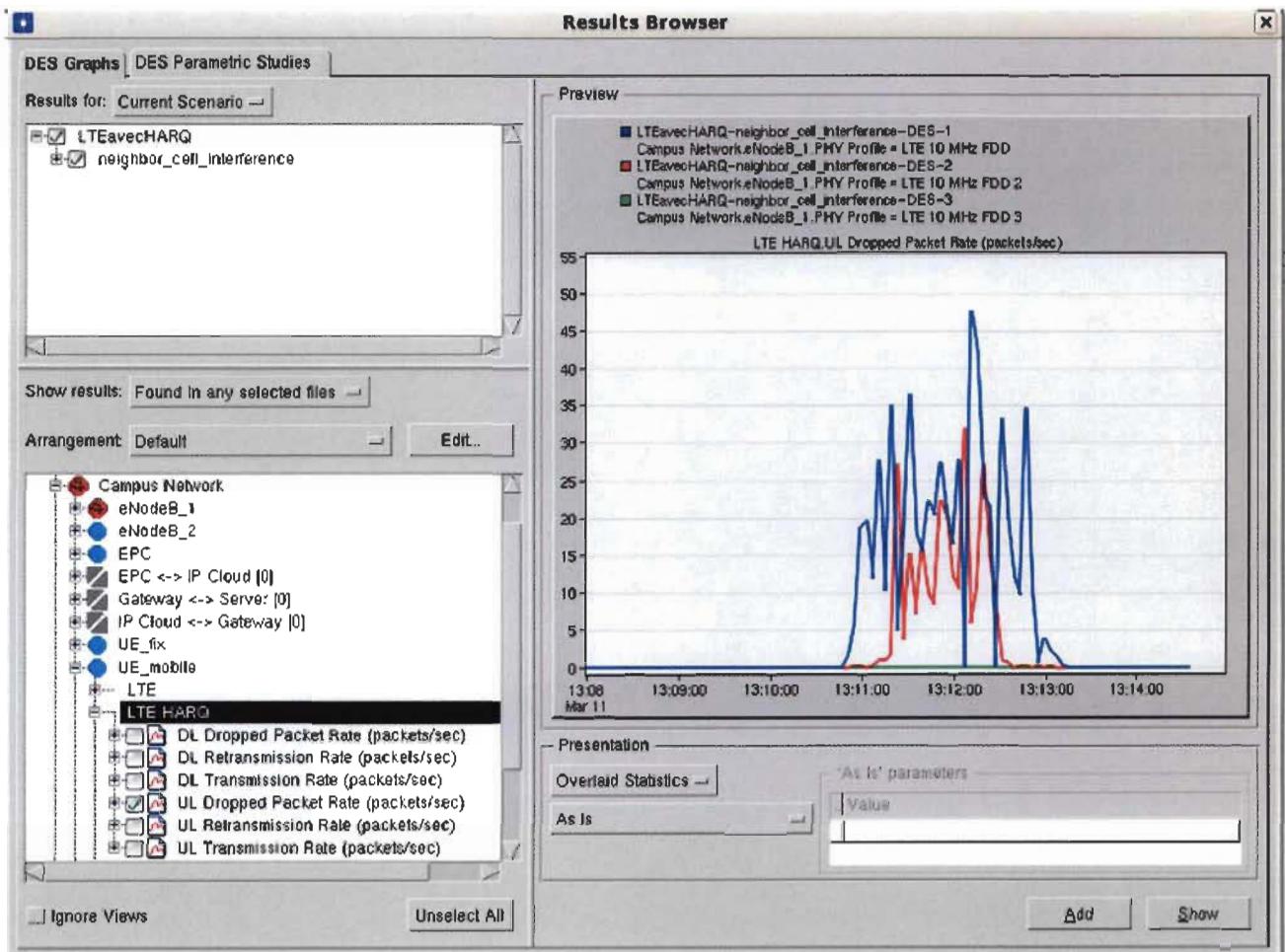


Figure 49: Les paquets perdus (bande passante 10MHz).

1.1 Analyse

À l'utilisation de la bande passante de 20Mhz, on remarque que le nombre de paquets perdus est nul pour (LTE 20Mhz FDD2 et LTE 20Mhz FDD3) pour un taux d'interférence de 50 %. Cependant, dans le cas de la transmission LTE 20 Mhz FDD où le taux d'interférence est de 100 %, une perte de paquets est enregistrée. En utilisant une bande passante de 10Mhz, des pertes de paquets surgissent dans les deux cas (LTE 10Mhz FDD et LTE 10Mhz FDD2) qui subissent respectivement 100 % et 50 % d'interférence.

La figure 50 suivante représente la retransmission des paquets perdus avec une bande passante de 20Mhz.

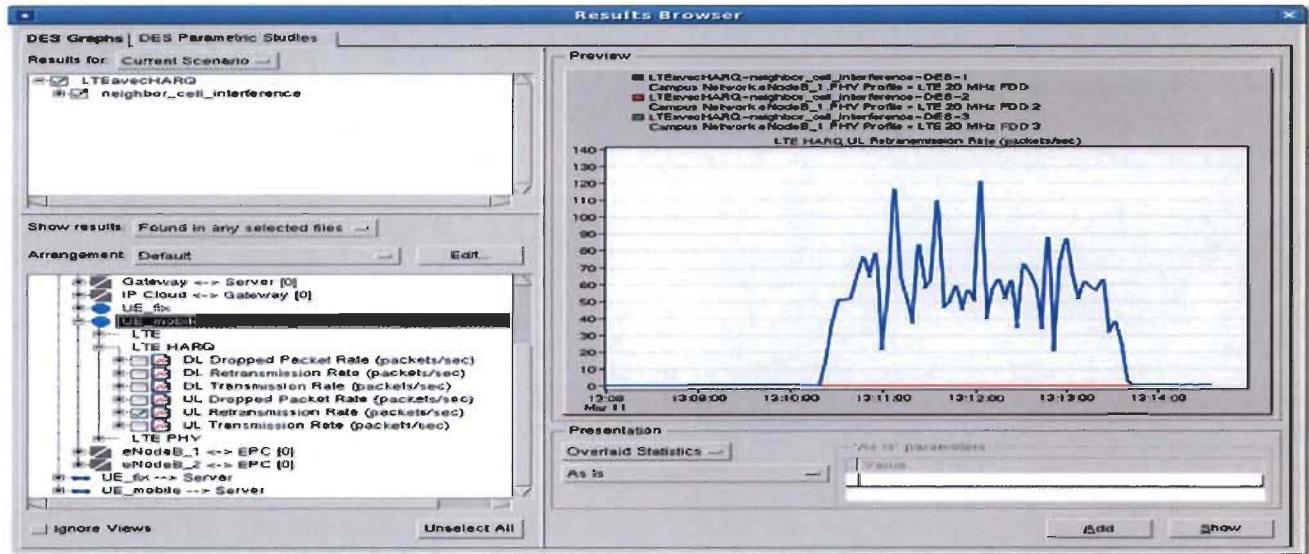


Figure 50: Les paquets retransmis (bande passante 20Mhz).

La figure 51 suivante représente la retransmission des paquets perdus avec une bande passante de 10Mhz.

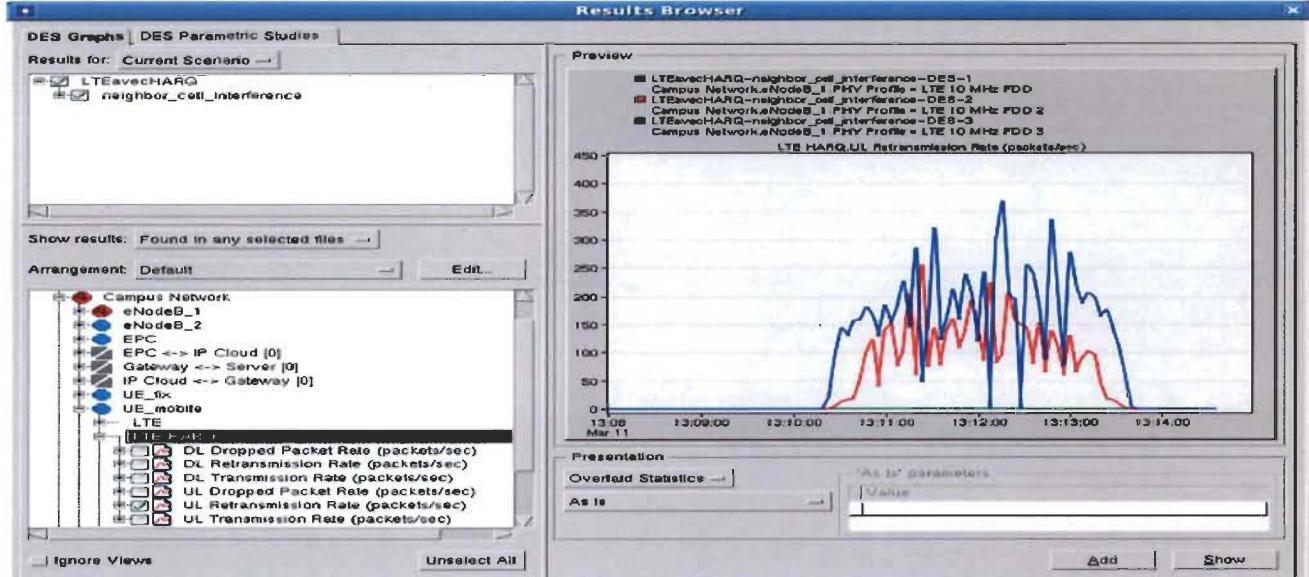


Figure 51: Les paquets retransmis (bande passante 10Mhz).

Analyse

Dans les deux figures précédentes, on remarque une retransmission qui est faite pour combler et corriger les paquets perdus.

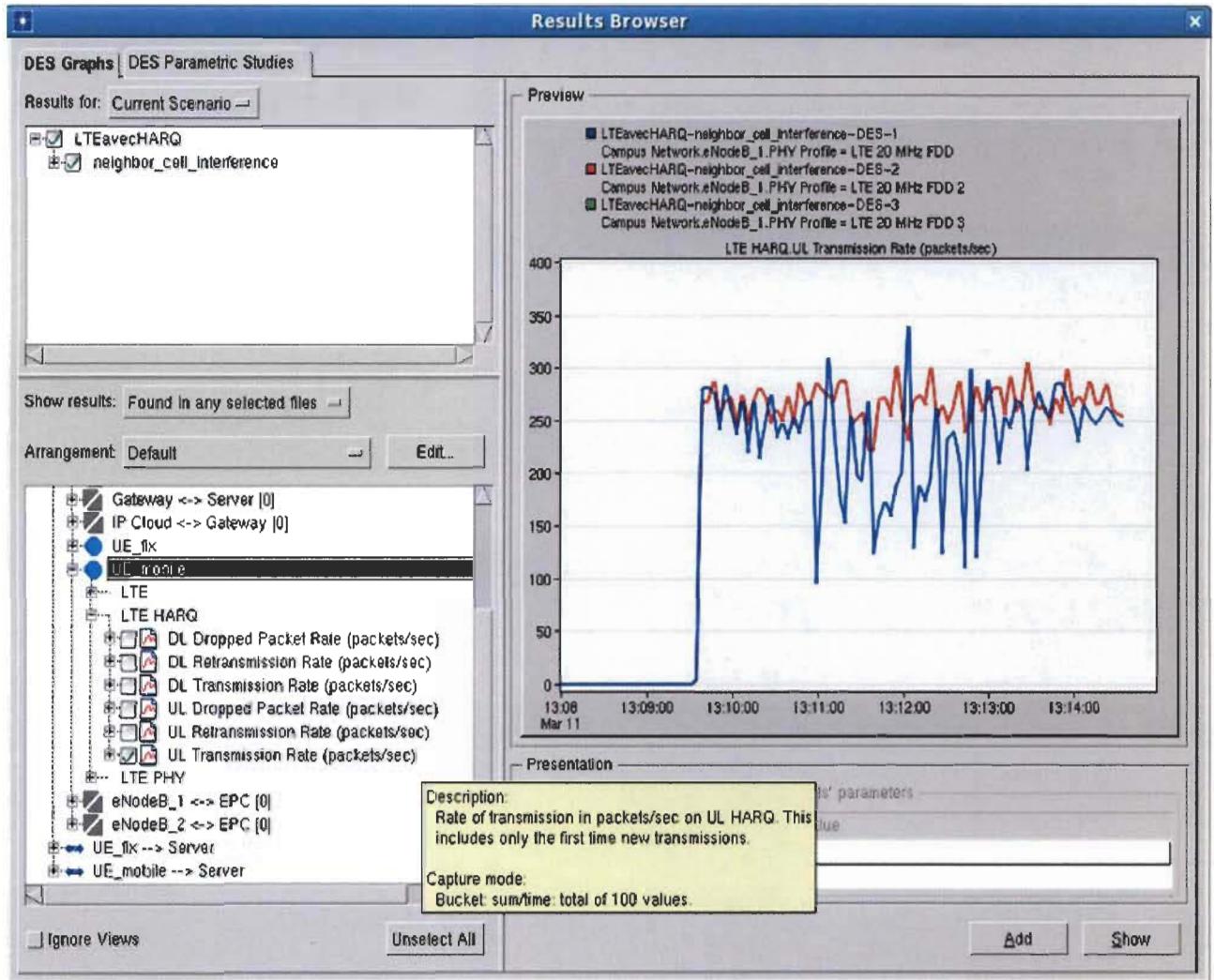


Figure 52: Le trafic reçu (bande passante 20Mhz).

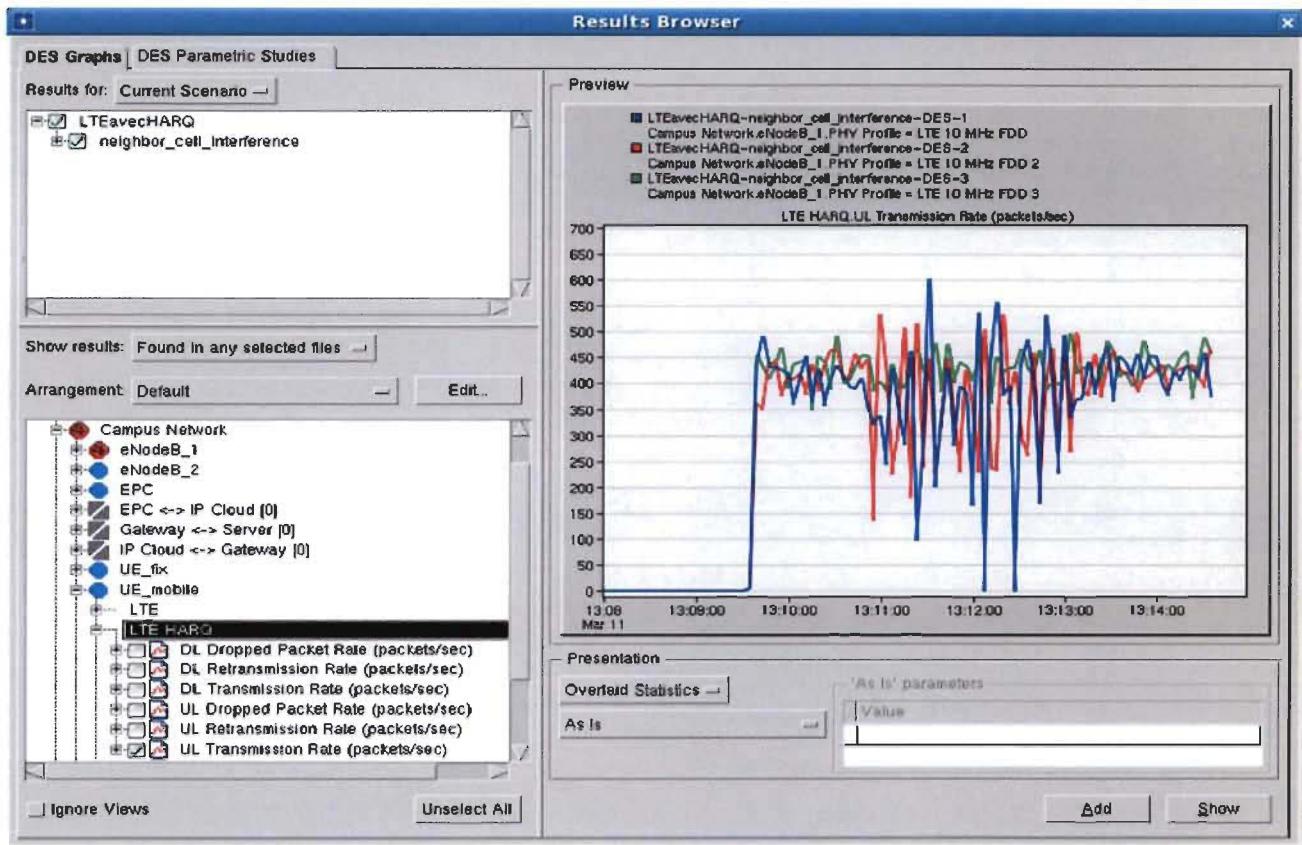


Figure 53: Le trafic reçu (bande passante 10Mhz).

Analyse

Dans les deux figures précédentes, on remarque que le trafic reçu est semblable pour les deux premiers cas (LTE 20Mhz FDD1 et LTE 20Mhz FDD2) en présence de 50 % d'interférence, ce qui est différent au niveau de la bande passante 10Mhz.

1.2 Résultats et conclusion

Le choix de la bande passante et notamment les fréquences des canaux montants et descendants (UL SC-FDMA et DL OFDMA) influencent le taux d'interférence et ce dernier joue un rôle direct sur le taux des paquets perdus et par conséquent l'obligation de faire appel à une retransmission qui est assurée par le protocole HARQ.

ANNEXE 2 : Configuration et paramétrage des composants LTE.

Dans cette annexe, nous décrivons les parties configurables de quelques composants de la technologie LTE qu'on a utilisée, cette partie sert à montrer une partie du paramétrage et des configurations de la simulation.

1 Contrôle d'admission

Au niveau d'EPS il existe plusieurs sortes de porteurs (bearers), comme (Platinum, Gold, Silver, Bronze). Chacun de ces porteurs possède une priorité différente, c'est le protocole ARP qui est le responsable d'attribuer ces priorités.

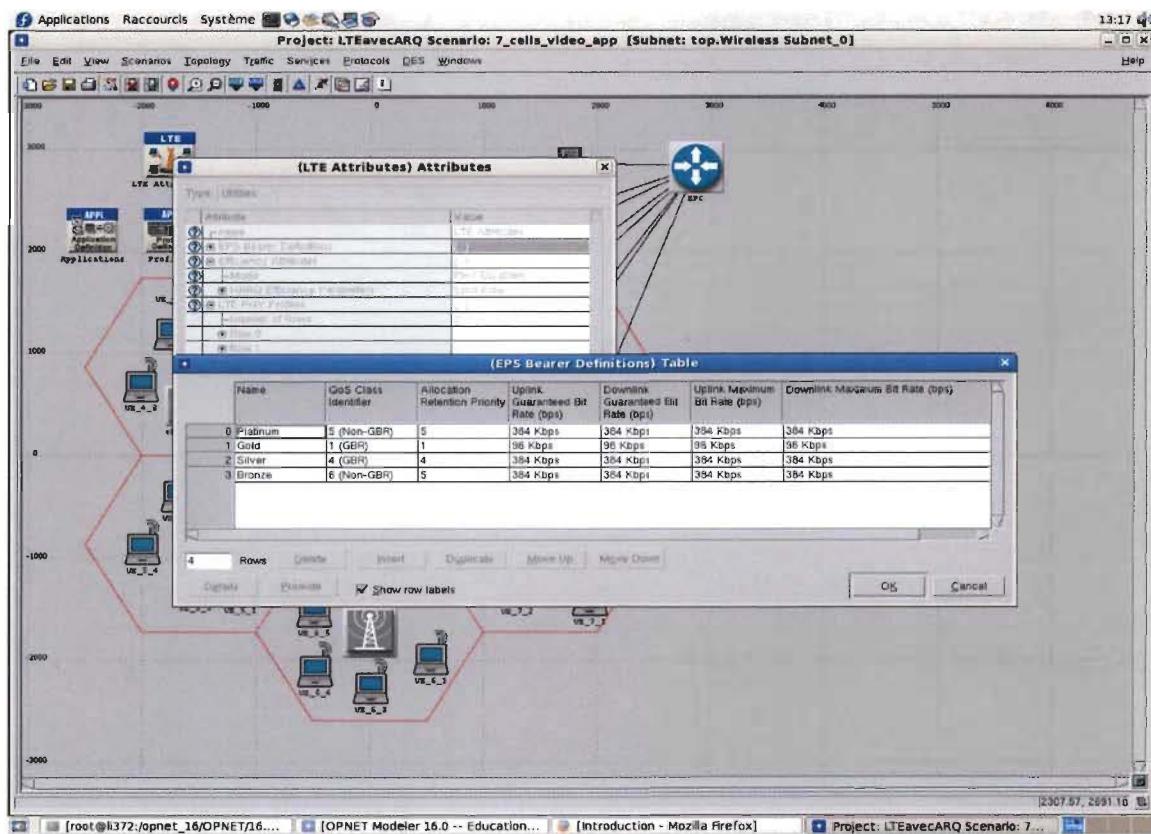


Figure 54: Exemple d'un projet avec quelques composants LTE.

1.1 L'entité Efficiency attributes (Efficacité des attributs)

Son rôle est de contrôler le mode dans lequel la simulation est exécutée. Si la couche physique est activée, chaque paquet passe par des pipelines (tunnel) sans fil et tous les effets de la couche physique sont simulés; cette précision influence la vitesse de simulation.

Si l'efficacité est activée, les paquets sont livrés directement au destinataire. L'utilisateur peut ajuster les différents attributs afin de provoquer une chute de paquets aléatoires et rendre la simulation la plus réaliste possible.

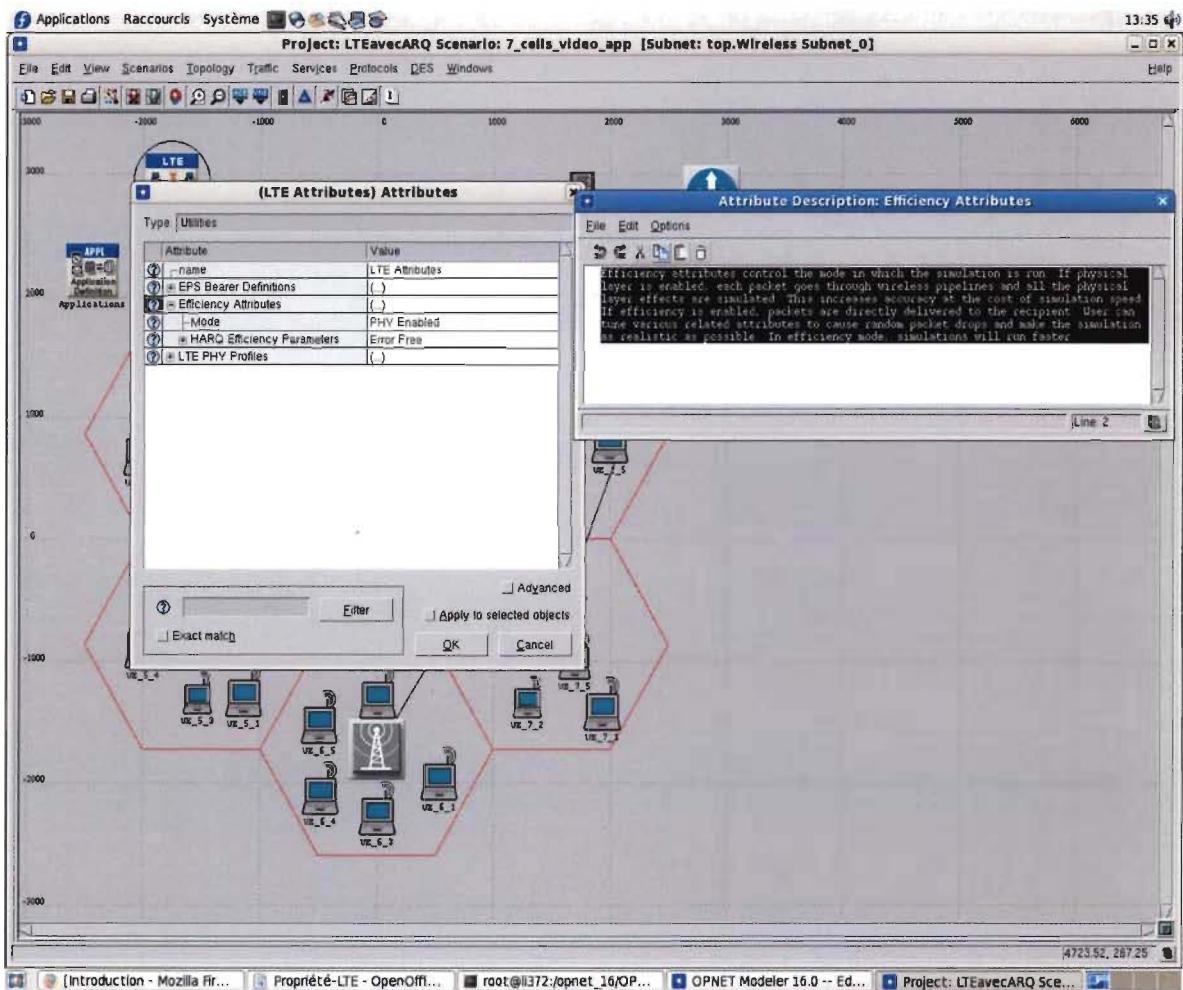


Figure 55: L'entité Efficiency attributes.

1.2 Mode (modalité)

Au niveau de l'attribut mode, si le mode physique est activé, toutes les transmissions soit MPDU ou signal sont engendrées avec tous les effets physiques. S'il est désactivé, tous les MPDU et les signaux sont livrés directement au destinataire sans aucune incidence physique.

Divers attributs de support peuvent être utilisés pour abroger les paquets au hasard dans ce mode.

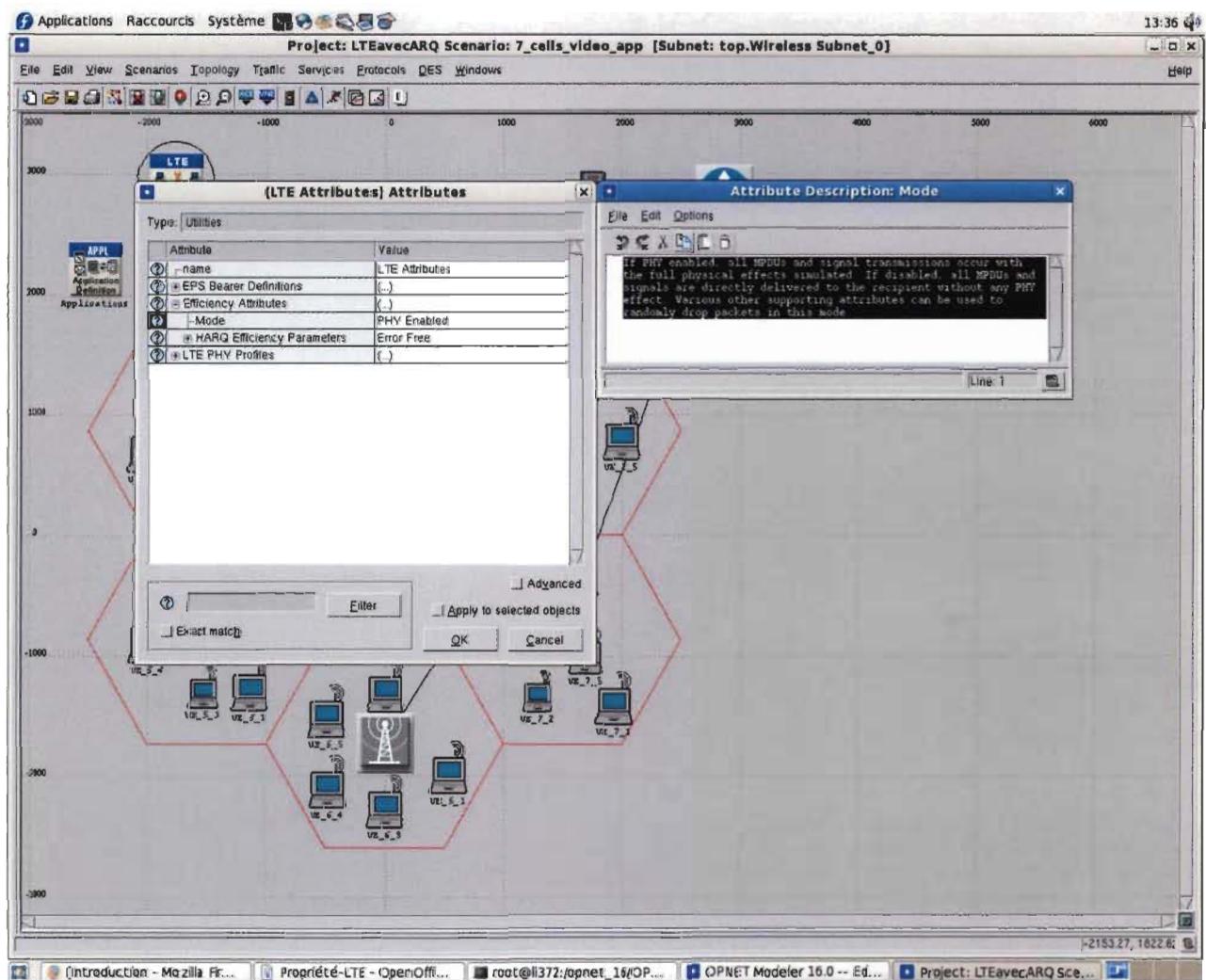


Figure 56: Le mode physique.

1.3 L'attribut HARQ specific parameters (paramètres de HARQ)

Cette entité est accessible à paramétrier si l'attribut mode physique est désactivé (PHY disabled).

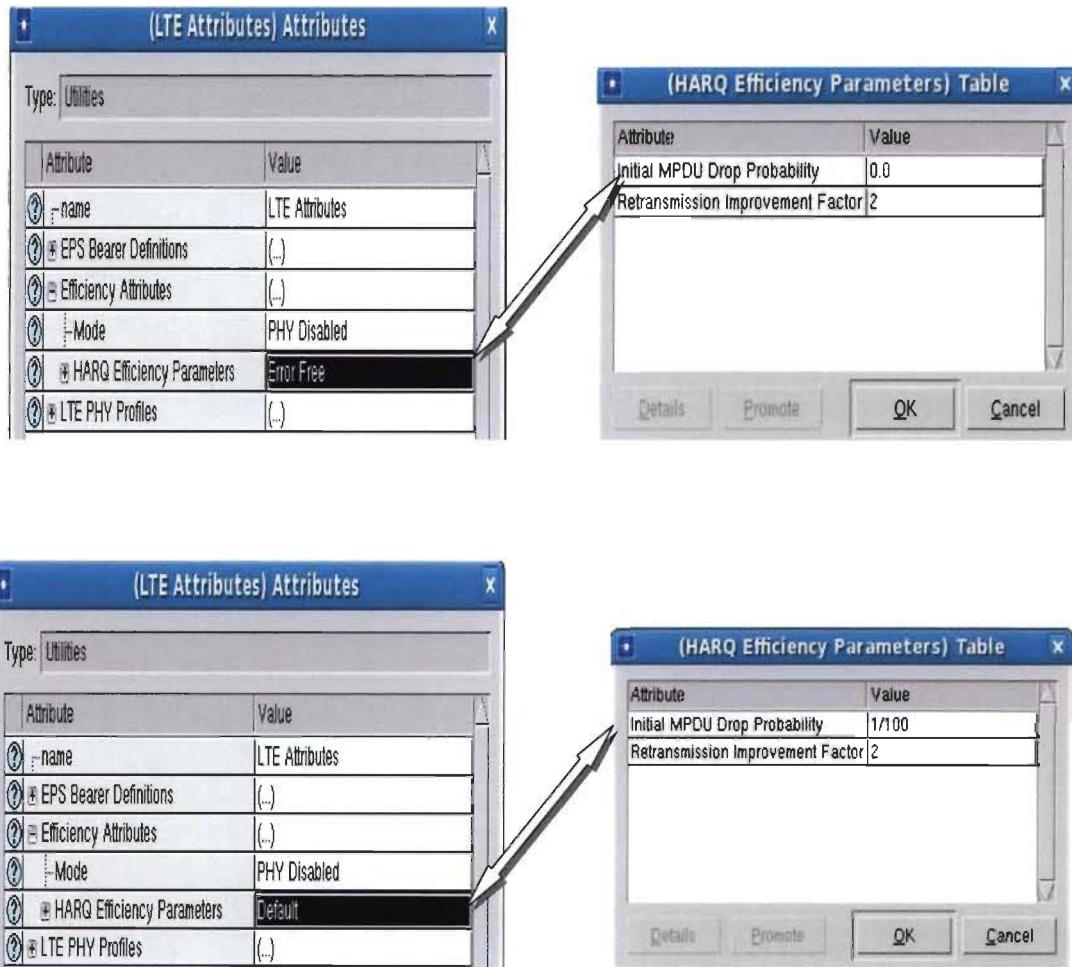


Figure 57: le paramétrage de l'attribut HARQ.

1.4 L'entité LTE physical profiles (profils physiques)

L'entité LTE physical profiles offre la possibilité de choisir entre les différentes bandes passantes, pour les transmissions montantes et descendantes de LTE. Chaque ensemble est identifié par un nom.

(LTE PHY Profiles) Table			
	Name	UL SC-FDMA Channel Configuration	DL OFDMA Channel Configuration
0	LTE 20 MHz FDD	Default UL 20 Mhz	Default DL 20 MHz
1	LTE 15 MHz FDD	Default UL 15 Mhz	Default DL 15 MHz
2	LTE 5 MHz FDD	Default UL 5 Mhz	Default DL 5 MHz
3	LTE 3 MHz FDD	Default UL 3 Mhz	Default DL 3 MHz
4	LTE 1.4 MHz FDD	Default UL 1.4 Mhz	Default DL 1.4 MHz

Figure 58: Les différents choix de bande passante.

2 L'entité eNodeB

L'eNodeB est responsable de la transmission et de la réception radio avec l'équipement utilisateur.

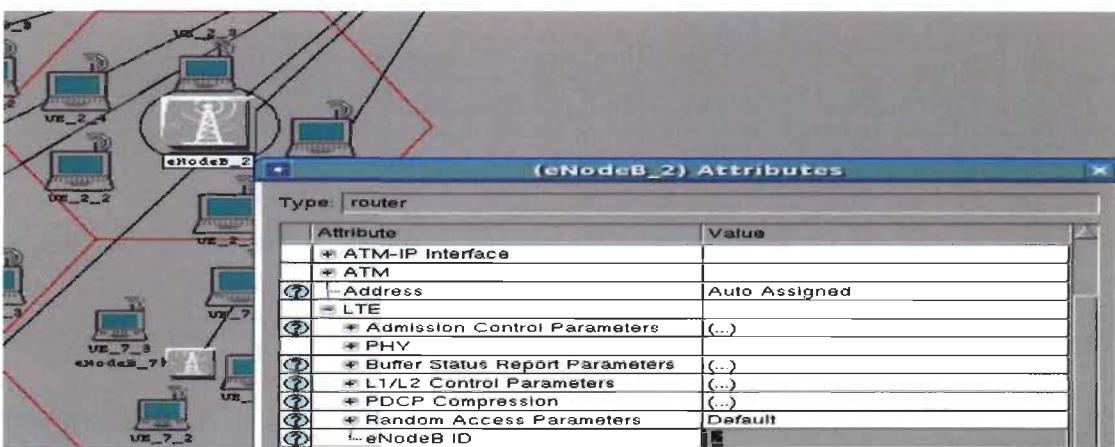


Figure 59: Les attributs d'eNodeB.

2.1 L'entité de paramétrage de contrôle d'admission

Cet attribut est utilisé pour rendre le contrôle d'admission souple.

(Admission Control Parameters) Table	
Attribute	Value
PDCCH symbols per Subframe	3
Loading Factor (UL)	0.25
Loading Factor (DL)	0.5
Inactive Bearer Timeout (seconds)	20

Figure 60: L'entité de paramétrage de contrôle d'admission.

2.1.1 L'entité Symboles PDCCH par sous-trame

Elle est utilisée pour transmettre les décisions d'ordonnancement aux équipements utilisateurs. Seules trois valeurs sont accessibles (1,2 ou 3). Le nombre réel des symboles utilisés par le PDCCH variera en fonction de la façon dont les signaux de commande sont transmis. Il informe les utilisateurs sur leur temps et la fréquence et les ressources à allouer selon en le format de transmission à utiliser.

2.1.2 Le taux de charge UL

La méthode par défaut consiste à utiliser le facteur de charge égale à 1, lorsque $x < 1$, le contrôle d'admission est conservateur, et quand $x > 1$, le contrôle d'admission est agressif. Une valeur spéciale de 0 est autorisée, ce qui indique que le contrôle d'admission est désactivé. Dans ce cas, nous traitons la fenêtre (frame) LTE comme elle possède une capacité infinie.

2.1.3 Porteur inactif en pause

Cette fonctionnalité ne sert qu'après un certain de temps que le porteur inactif est détruit par le système. Cela peut libérer des ressources pour d'autres porteurs. Cette option est applicable uniquement pour le porteur GBR, puisque seuls les porteurs GBR passent par le système de contrôle d'admission.

2.2 L'entité physique

Cette entité donne la possibilité de configurer le gain d'antenne et d'autre option comme, la puissance d'émission maximale et la sensibilité du récepteur.

PHY		
?	Antenna Gain (dBi)	15 dBi
?	Maximum Transmission Power...	0.5
?	PHY Profile	LTE 1.4 MHz FDD
?	Receiver Sensitivity (dBm)	-200dBm

Figure 61: Les paramètres physiques.

2.2.1 Le gain d'antenne dBi (Antenna gain)

Cet attribut peut être utilisé pour contourner les calculs de gain d'antenne, qui donne la possibilité d'utiliser une valeur de gain prévu pour toutes les directions.

2.2.2 La puissance d'émission maximale

La puissance spécifiée dans cet attribut fait référence à la puissance d'émission totale que cet émetteur peut envoyer sur la bande passante.

2.2.3 La sensibilité du récepteur en dBm

Il faut définir la valeur minimum à recevoir par radio du récepteur en dBm. Les paquets avec une puissance inférieure au seuil ne sont pas détectés et par la suite, ils ne sont pas décodés par le récepteur. Ces paquets vont être considérés comme bruit. Les paquets qui

sont reçus avec une puissance égale ou supérieure au seuil sont considérés comme des paquets valides.

2.3 Les paramètres de contrôle L1/L2

Cette entité offre la possibilité de paramétriser les valeurs qui sont liées aux canaux de contrôle physique.

1. temps mort
2. pause
3. temps de repos

(?)	L1/L2 Control Parameters	(...)
(?)	PUCCH Configuration	(...)
(?)	PDCCH Configuration	(...)
(?)	PHICH Configuration	(...)
(?)	PDCP Compression	(...)

Figure 62: Les paramètres de contrôle L1/L2.

2.3.1 La configuration de PUCCH

Pour l'entité eNodeB le paramétrage du canal physique de contrôle de liaison montante (uplink) est accessible à ce niveau.

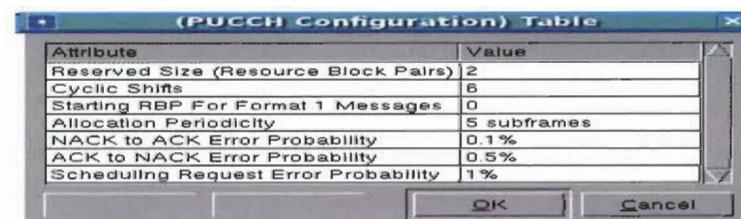


Figure 63: La configuration de PUCCH.

L'attribut Cyclic shifts qui donne une indication du nombre de quarts de travail est configurable à ce niveau.

2.3.2 La configuration de PDCCH

Pour l'entité eNodeB le paramétrage de canal physique de contrôle de liaison descendante (downlink) est accessible à ce niveau.

Attribute	Value
DL Scheduling Information Error Probability	1%
UL Scheduling Grant Error Probability	5%

Figure 64: La configuration de PDCCH.

2.3.3 La configuration de PHICH

Pour l'entité eNodeB, le paramétrage lié à l'indicateur du canal physique d'Hybrid ARQ est offert à ce niveau.

Attribute	Value
NACK to ACK Error Probability	0.5%
ACK to NACK Error Probability	0.1%

Figure 65: La configuration de PHICH.

2.3.4 La configuration de PDCP

Cet attribut permet de configurer les caractéristiques de compression d'en-tête du PDCP de l'eNodeB pour les transmissions descendantes.

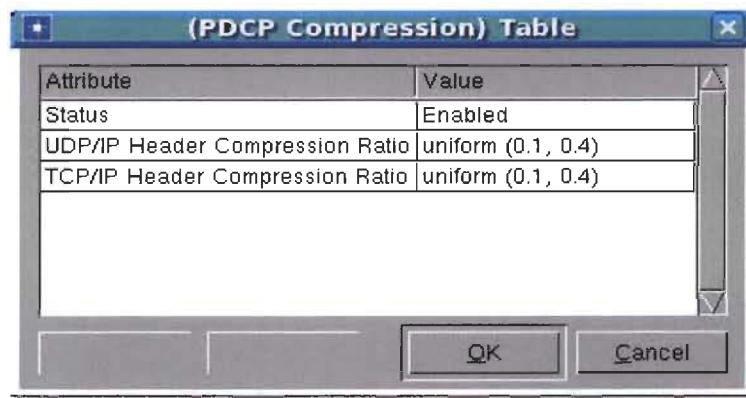


Figure 66: La configuration de PDCP.

2.4 Les paramètres d'accès aléatoire

Ce sont les valeurs des paramètres d'accès aléatoire offert par l'eNodeB aux équipements utilisateurs.

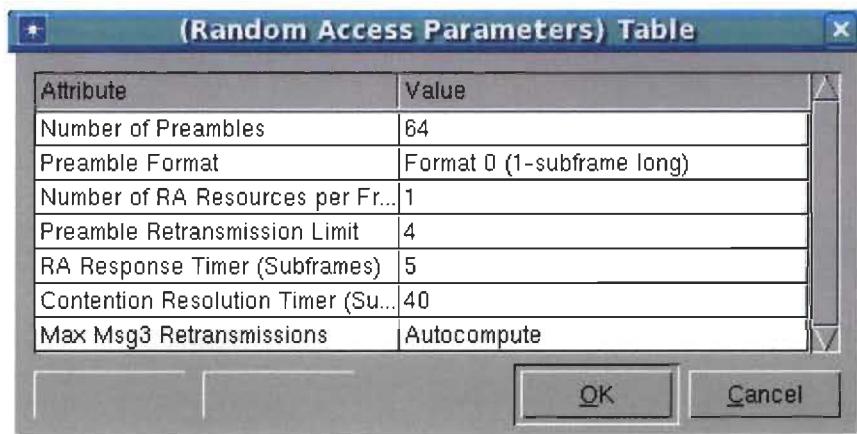


Figure 67: Les paramètres d'accès aléatoire.

Au niveau d'attribut **Preamble retransmission limit** (limite de retransmission préface); on indique le nombre maximal de tentatives d'accès aléatoire avant de signaler l'échec d'accès à la couche MAC.

Au niveau du dernier attribut **Max Msg3 retransmission** (le maximum de retransmissionMsg3). Il indique le nombre maximal de retransmissions HARQ pour la Msg3 en procédure d'accès aléatoire. L'intervalle contient les valeurs de 1 à 8.

3 EPC

À la différence des réseaux 2G et 3G, où l'on distinguait les domaines de commutation de circuits CS (Circuit Switched) et de commutation de paquet PS (Packet Switched), dans le réseau cœur, il ne possède qu'un domaine paquet appelé EPC (Evolved Packet Core), en plus tous les services devront être offerts sur IP.

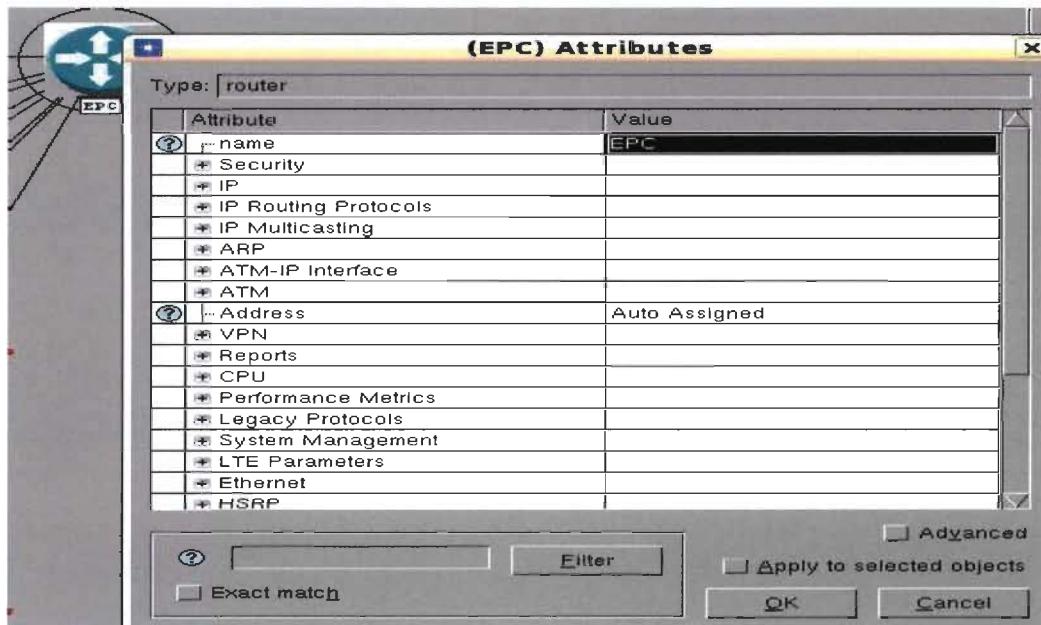


Figure 68: L'entité EPC.

3.1 Les paramètres de GTP

(GTP Parameters) Table	
Attribute	Value
T3 Response Wait Tim...	5.0
N3 Request Retry Limit	5
N3 Buffer Size (bytes)	8192
Processing Delay (sec...)	IP Datagram Forwarding Rate Bas...
Maximum Active Tunn...	10000

Figure 69: Les paramètres de GTP.

- L'attribut (**T3 response wait time**) qui indique le temps maximum que le protocole GTP attende une réponse d'un message de signalisation;
- Et d'autre part, on a (**N3 request retry limit**), qui indique le temps maximum, que le protocole GTP réessaye d'envoyer une demande de signalisation;
- L'attribut (**N3 buffer size**), spécifie la taille du temporisateur de la réception;
- L'attribut (**Maximum active tunnels**), indique le nombre maximal des passerelles actives, où le GGSN (**Gateway GPRS Support Node**) peut prendre en charge les interconnexions entre le réseau paquet mobile (GPRS ou UMTS) et les réseaux IP externes.

4 Équipement utilisateur (UE)

Il utilise deux plans de contrôle : le plan utilisateur qui contient les couches PHY (physique), MAC (Medium Access Control), RLC (Radio Link Control) et PDCP (Packet Data Convergence Protocol), et le plan de contrôle qui contient les couches NAS (Non Access stratum) et RRC (Radio Resource Control), avec le plan utilisateur.

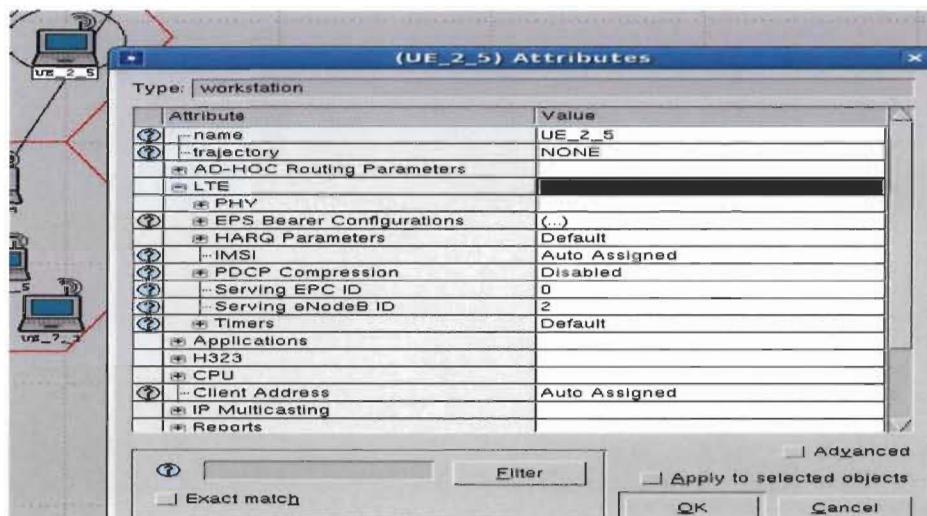


Figure 70: L'entité équipement utilisateur.

4.1 La partie physique d'équipement utilisateur

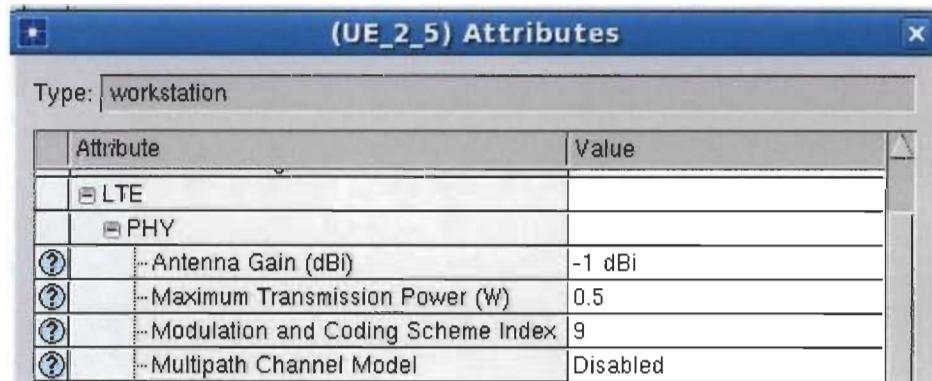


Figure 71: La partie physique d'équipement utilisateur.

L'attribut Modulation and coding scheme index : cet attribut définit la modulation et le codage (MCS), il indique l'indice que l'équipement utilisateur utilise au cours de la simulation.

4.2 La configuration des porteurs (Bearers) EPS

Spécifie les noms et les configurations des porteurs EPS qui seront utilisés entre l'équipement utilisateur et le cœur du réseau LTE.

(EPS Bearer Configurations) Table				
	Bearer Name	TFT Packet Filters	Radio Bearer RLC Configuration	Action If Not Admitted
0	Silver	(...)	(...)	Discard Data
1	Gold	(...)	Default	Discard Data
2	Bronze	(...)	Default	Discard Data

3 Rows Delete Insert Duplicate Move Up Move Down Details Promote Show row labels OK Cancel

Figure 72: La configuration des porteurs (Bearers).

4.2.1 Le filtrage des paquets TFT

(TFT Packet Filters) Table			
	Match Property	Match Value	Direction
0	IP ToS	Interactive Voice (6)	Bidirectional
1	Rows Delete Insert Duplicate Move Up Move Down Details Promote <input checked="" type="checkbox"/> Show row labels OK Cancel		

Figure 73: Le filtrage des paquets TFT.

L'attribut Match Property spécifie la propriété correspond à des critères de paquets IP comme :

1. La source et la destination de l'adresse IP doivent être envoyées avec IPv4;

2. La source et la destination de port peuvent être soit TCP ou UDP.

L'attribut Direction indique si le critère Match sera appliqué à la liaison montante (uplink) ou bien descendante (downlink) de la circulation ou (directionnelle).

4.2.2 La configuration de Radio porteur RLC

(Radio Bearer RLC Configuration) Table							X
	Direction	Mode	Reordering Timer Duration (msec)	Poll Retransmit Timer Duration (msec)	Status Report Prohibit Timer Duration (msec)	Maximum PDUs without Poll (PDUs)	Maximum Bytes without Poll (bytes)
0	Uplink	Unacknowledged	35	45	0	Infinity	Infinity
1	Downlink	Unacknowledged	35	45	0	Infinity	Infinity
2	Rows	Delete	Insert	Duplicate	Move Up	Move Down	

Details Promote Show row labels OK Cancel

Figure 74: La configuration de radio porteur RLC.

- La direction est un attribut qui indique si la configuration prévue de RLC sera utilisée pour la direction montante ou descendante;
- Le mode est utilisé par l'entité RLC de radio porteur. On possède trois modes RLC. Seul le mode unacknowledged (UM) et le mode acknowledged (AM) sont autorisés pour les porteurs de données;
- L'attribut Recording timer duration, quand il est positionné à 0, l'entité RLC n'attend pas les PDU manquantes et procède au traitement de toutes les PDU quand ils sont reçus. Par conséquent, les PDU qui sont reçus hors séquence seront rejettés;
- L'attribut Status report prohibit time duration, quand il est positionné à 0, un rapport d'état sera envoyé à la première occasion.

4.3 Les paramètres de HARQ

Cet attribut donne aux utilisateurs la possibilité de manipuler le protocole HARQ et de le paramétrier pour les liaisons montantes ou descendantes.

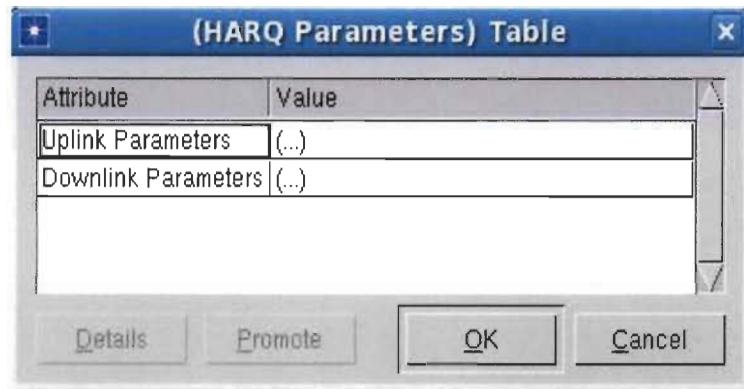


Figure 75: Les paramètres HARQ.

4.4 L'identification de l'entité EPC et eNodeB

Cet attribut donne la possibilité pour spécifier les équipements EPC et eNodeB auxquels l'équipement utilisateur est attaché.

(?)	Serving EPC ID	0
(?)	Serving eNodeB ID	2

Figure 76: L'identification de l'entité EPC et eNodeB.

4.5 Minuteries (Timers)

The screenshot shows a Windows-style dialog box with a title bar '(Timers) Table'. Inside, there is a table with two columns: 'Attribute' and 'Value'. The table contains four rows with the following data:

Attribute	Value
T3410 (seconds)	15.0
T3411 (seconds)	10.0
T3480 (seconds)	30.0
T300 (seconds)	0.4

At the bottom of the dialog box are three buttons: 'Details', 'Promote', 'OK' (highlighted with a red box), and 'Cancel'.

Figure 77: Les minuteries.

- T3410 est déclenché lors de l'envoi d'un message de demande d'attachement.
La durée du T3410 doit être supérieure à la durée de la T300.
- T3411 est déclenché quand la demande d'attachement EMM est expirer.
- T3480 est déclenché lors d'envoi d'un message de modification de ressources.
- T300 est géré par l'équipement utilisateur, quand il tente d'établir une connexion RPC avec une entité eNodeB.