



# Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BENZITOUNI Mounira

&

MOUMEN Radia

pour l'obtention du diplôme de Master2 en Électronique option TISE

---

Thème

---

***Implémentation d'une stratégie d'offloading dans un milieu « 4G/WIFI »  
en utilisant NS3***

---

Proposé par : Mme AIT ABDESSLAM Houria

Année Universitaire 2013-2014

## Remerciements

---

**Nous tenons à remercier le bon Dieu de nous avoir données la capacité d'aller au bout de ce modeste travail.**

**Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.**

**On remercie notre promotrice Mme AIT ABDESSLAM Houria, d'avoir encadré notre travail.**

**Nous remercions nos professeurs d'avoir accepté d'examiner notre travail et de présider le jury.**

**Nos chaleureux remerciements vont à nos amis et collègues d'Algérie Télécom qui se sont toujours montrés à l'écoute et disponibles tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, leurs encouragements, leurs patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges.**

**Nos remerciements s'adressent également à Mr KASSOUS Samih pour le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et son immense générosité.**

**Enfin nous tenons à témoigner tout notre amour à nos familles, parents frères et sœurs et enfants pour leurs encouragements, leurs contribution, leur soutien et leurs patience au cours de la réalisation de ce mémoire**

---

## ملخص:

تهدف هذه المذكرة إلى معاينة الحلول الرئيسية المتعلقة بتصوير و تطوير الشبكات المتجانسة على قاعدة شبكة (4G) LTE و كذا شبكات الدخول اللاسلكية Wi-Fi المخصصة لإسناد متعامل الاتصالات اللاسلكية بهدف تحديد أمثل إستراتيجية انتشار على المستوى الاقتصادي وهذا مع الأخذ بعين الاعتبار ملتزمات توعية الخدمة وكذا آليات التسليم المعروفة على الخصوص تحت اسم (handover) عمودية.

**كلمات المفاتيح:** شبكات متجانسة ، خلق توازن offloading ; LTE, WIFI

---

## Résumé :

Ce mémoire a pour objectif de faire le point sur les principales solutions de conception et de développement de réseaux hétérogènes à base d'un réseau LTE (4G) et de réseaux d'accès Wi-Fi devant servir d'appui à un opérateur de télécommunication mobiles pour définir une stratégie de déploiement optimale sur le plan économique en tenant compte des exigences de qualité de service et donc des mécanismes de handover dit vertical en particulier.

**Mots clés :** réseau hétérogène ; délestage (offloading) ; LTE, WIFI.

---

## Abstract :

This work is aiming to give a progress report on the major solutions of conception and development of a heterogeneous networks based on LTE (4G) network and on Wi-Fi access which serves as a support to mobile telecommunications operator, in order to determine an optimal deployment strategy at the economical level, taking in account the service quality requirements and thus the mechanisms called vertical handover, in particular.

**Keywords:** heterogeneous network; unballasting (offloading) ; LTE, WIFI

---

## Listes des acronymes et abréviations

3GPP : 3rd Generation Partnership Project.

AP : Access point

AS: Access Stratum

BSA : Basic Set Area

BSS : Basic Service Set

BTS : Base Transceiver Station

CCA : Clear Channel Assessment

CDMA : Code Division Multiple Access

CDR : Call Detail Record

CS: Circuit switched

CSMA : Carrier Sense Multiple Access

CW : Contention Window

DECT : Digital Enhanced Cordless Telecommunication

DES: Discrete Event-Based Simulation

DIFS : Distributed Inter Frame Space

EDGE : Enhanced Data Rates for GSM Evolution

eNodeB: enhanced NodeB

ESSID : Service Set Identifier

ETSI : European Telecommunications Standards Institute

ETSI HiperMAN : High Performance Radio Metropolitan Area Network

FDD: Frequency Division Duplexing

FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum

GPRS : General Packet Radio Service

GSM : Global System Mobile

GSM: Global System for Mobile communications

hiperLAN2 : High Performance Radio LAN 2.0

HSS: Home Subscriber Server

IBSS : Independent Basic Service Set

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineering

IMT-2000 : Télécommunications Mobiles Internationales-2000

IR : Infrarouge  
ISM : Industrial, Scientific and Medical  
LLC : Logical link Control  
LPDU : Logical Protocol Data Unit  
LTE : Long Term Evolution  
MAC : Media Access Control  
MBWA : Mobile Broadband Wireless. Access  
MIMO: Multiple-Input Multiple-Output  
MME : Mobility Managment Entity  
NAS: Non-Access Stratum  
NIC : Network Interface Controller  
OCS : Online Charging System  
OFCS : Offline Charging System  
OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiple Access  
OSI: Open Systems Interconnection  
PAPR: Peak-to-Average Power Ratio  
PCEF: Policy and Charging Enforcement Function  
PCRF: Policy and Charging Rules Function  
SPR : Subscriber Profile Repository  
PDCP: Packet Data Convergence Protocol  
PDN-GW/P-GW : Packet Data Network Gateway  
PDU: Protocol Data Unit  
PHY: Physical layer  
PLCP : Physical Layer Convergence Sublayer Procedure  
PR : Polling Request  
PRU: Physical Resource Unit  
PS: Packet Switched  
RLC: Radio Link Control  
RRC: Radio Ressource Control  
RSRP :Reference Signal Recieved Power  
RSRQ: Reference Signal Recieved Quality

RRM :Radio Ressource Managment

SC-FDMA: Single Carrier- - Frequency Division Multiple Access

SDMA: Semi Distributed Mobility Anchoring

SDU: Service Data Unit

S-GW : Serving Gateway

SINR: Signal to Interference-plus-Noise Ratio

SIR : Signal Interference Ratio

SNR : Signal to Noise

RatioTD-CDMA : Time Division Synchronous Code Division Multiple Access

TDD: Time Division Duplexing

UMTS : Universal Mobile Telecommunication System

U-NII : Unlicensed National Information Infrastructure

UWB : Ultra Wide Band

WAP : Wireless Application Protocol

W-CDMA : Wideband Code Division Multiple Access

WECA : Wireless Ethernet Compatibility Alliance

WEP : Wired Equivalent Privacy

Wi-Fi : Wireless Fidelity

Wimax : Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN : Wireless Local Area Network

WMAN : Wireless Metropolitan Area Network

WPAN : wireless personal area network

WWAN: Wireless World Area Network

XML : eXtensible Markup Language

---

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 GENERALITES SUR LES TECHNOLOGIES WIRELESS .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Introduction aux réseaux sans fil.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Classification des réseaux sans fil.....</b>	<b>5</b>
1.2.1 Les réseaux sans fil personnels WPAN :.....	6
1.2.2 Les réseaux sans fils personnels WLAN :.....	7
1.2.3 Les réseaux sans fils personnels WMAN :.....	8
1.2.4 Les réseaux sans fils personnels WWAN :.....	9
<b>1.3 Problèmes spécifiques lié aux réseaux sans fil.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Introduction au réseau Wi-Fi .....</b>	<b>12</b>
<b>1.5 Les évolutions de la norme 802.11 .....</b>	<b>14</b>
<b>1.6 Les topologies d'un réseau Wi-Fi .....</b>	<b>15</b>
1.6.1 Le mode Ad-Hoc .....	15
1.6.2 Le mode infrastructure.....	16
<b>1.7 Architecture des réseaux Wi-Fi .....</b>	<b>18</b>
<b>1.8 Le modèle en couche du standard IEEE 802.11.....</b>	<b>19</b>
➤ La couche physique du standard IEEE 802.11.....	20
➤ La couche liaison de données du standard IEEE 802.11.....	22
<b>1.9 Les techniques d'accès :.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 LES RESEAUX MOBILES LTE.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.1 Généralités.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.2 Les motivations pour l'introduction du LTE .....</b>	<b>28</b>
a La Capacité .....	28
b Les Débits .....	29
c La Latence .....	30
d L'adaptation au spectre disponible .....	30
e L'émergence de l'OFDM .....	31
f Le contexte industriel .....	32
<b>2.2 Architecture Générale du LTE .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3 Architecture de l'interface radio .....</b>	<b>35</b>
2.3.1 Les couches de l'interface radio .....	35
2.3.2 Plan usager et plan de contrôle .....	38
2.3.3 Interactions entre les couches .....	39

<b>2.4</b>	<b>Principes de la technologie LTE</b>	<b>41</b>
2.4.1	Aperçu	41
2.4.2	Performances du LTE	43
2.4.3	Liaison descendante	44
2.4.4	Liaison ascendante	44
2.4.5	MIMO	45
 <b>CHAPITRE 3 TECHNIQUES DE HANDOVER /OFFLOADING</b>		<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>Procédures de Handover</b>	<b>48</b>
3.2.1	Collecte de l'information et initiation de Handover	49
3.2.2	Décision de Handover et sélection d'un réseau	49
3.2.3	Exécution du Handover	50
<b>3.3</b>	<b>Contrôle de Handover</b>	<b>50</b>
3.3.1	Handover contrôlé par le mobile (MCHO)	51
3.3.2	Handover contrôlé par le réseau (NCHO)	51
3.3.3	Handover assisté par le mobile (MAHO)	51
3.3.4	Handover assisté par le réseau (NAHO)	51
<b>3.4</b>	<b>Stratégie de sélection du réseau</b>	<b>52</b>
<b>3.5</b>	<b>Paramètres d'évaluation des performances</b>	<b>53</b>
3.5.1	Le retard	53
3.5.2	Nombre de Handover	54
3.5.3	Débit binaire	54
3.5.4	Taux d'erreurs binaires	55
<b>Conclusion</b>		<b>55</b>
 <b>CHAPITRE 4 PARTIE PRATIQUE ET IMPLEMENTATION</b>		<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>Modules du simulateur NS3 :</b>	<b>57</b>
4.2.1	Core Module:	57
4.2.2	Common Module :	57
4.2.3	Simulator Module :	58
4.2.4	Mobility Module :	58
4.2.5	Node Module	58
4.2.6	Helper Module :	58
4.2.7	Application Module :	58
4.2.8	InternetStack Module :	59
4.2.9	Devices Module :	59
4.2.10	Routing Module :	59
<b>4.3</b>	<b>Terminologie et abstractions</b>	<b>59</b>

---

4.3.1	Un nœud <i>Node</i> :	.....	60
4.3.2	Une application <i>Application</i> :	.....	60
4.3.3	Un canal de communication <i>Channel</i>	.....	60
4.3.4	Une interface de communication, ou interface réseau :	.....	60
<b>4.4</b>	<b>Notre approche</b>	.....	<b>61</b>
<b>4.5</b>	<b>Notre proposition</b>	.....	<b>61</b>
4.5.1	Implémentation :	.....	61
4.5.2	Algorithme de décision :	.....	63
4.5.3	Interprétation des résultats :	.....	65
<b>CONCLUSION GENERALE</b>			<b>.....68</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>			<b>..... 76</b>

## Liste des figures

*Figure 1.1* Classification des réseaux sans fils.

*Figure 1.2* Différents cas d'attaques.

*Figure 1.3.* Un réseau Wi-Fi en mode Ad-Hoc.

*Figure 1.4* Réseau Wi-Fi en mode infrastructure.

*Figure 1.5* Un pont Wi-Fi.

*Figure 1.6* Architecture d'un réseau Wi-Fi.

*Figure 1.7.* Couches 802.11

*Figure 1.8.* Format de la trame MAC.

*Figure 1.9.* Recouvrement des canaux dans la bande ISM

*Figure 2.1.* Architecture EPS.

*Figure 2.2.* Piles protocolaires des plans usager et de contrôle sur l'interface radio.

*Figure 2.3* La modélisation en couches protocolaires de l'interface radio

*Figure 2.4* Efficacité du spectre avec diverses technologies de radiocommunication mobile.

*Figure 2.5.* Exemple de répartition des blocs de ressources (fréquence et temps) entre 3 utilisateurs.

*Figure 3.1.* Représentation schématique du spectre émetteur en liaison ascendante pour trois utilisateurs.

*Figure 4.1.* : Principe de la transmission multi-antennes avec MIMO (3x3)

*Figure 4.2* : Environnement du réseau hétérogène sans fil.

*Figure 4.3* : Architecture logicielle de NS3.

*Figure 4.4.* Topologie du réseau à simuler

*Figure 4.5.* Algorithme de décision de Handover

*Figures 4.6 à 4.7.* Répartition des utilisateurs dans les deux réseaux.

## Liste des annexes

*Annexe 1.* Photo prise par le logiciel montre la répartition des sept (07) eNodeB

*Annexe 2.* Photo prise par le logiciel montre l'ajout des points d'accès.

*Annexe 3.* Photo prise par le logiciel montre l'ajout du réseau WIFI et les Remote Host

*Annexe 4.* Photo prise par le logiciel montre la *signalisation LTE*

*Annexe 5 .* Photo prise par le logiciel montre la *signalisation WIFI*

*Annexe 6.* Photo prise par le logiciel montre *l'envoi du trafic et calcul du througput.*

## **Liste des tableaux**

Tableau 1.1 Techniques de modulations

Tableau 2.1 Eléments de la partie radio.

Tableau 3.1 Eléments de la partie EPC.

# Introduction

---

Le trafic mobile devrait selon les sources [1], être multiplié par un facteur compris entre 13 et 25 durant la période s'étalant de 2011 à 2017. Une multiplication par 10 entre 2013 et 2019 du trafic à travers ces réseaux est prévue et selon les hypothèses les plus prudentes, il est projeté de voir multiplié par 30 ce trafic alors que d'autres hypothèses dites plus optimistes prévoient un facteur multiplicatif de 300 en 2030. L'augmentation de ce trafic est due à une augmentation forte de l'utilisation de l'Internet mobile devant croître de 70 % en 2014 et de services innovants qui en résultent notamment les services de vidéo.

En effet, au niveau mondial, la croissance des données transmises en mobilité devient de plus en plus forte non seulement parce que la consommation individuelle augmente mais aussi parce que le taux de pénétration de l'internet croît de par son adoption par tous qu'ils soient dans des pays riches ou dans des pays pauvres. Il y a plus de 1,5 milliard d'utilisateurs de *smartphones* et 5 milliards d'abonnés au téléphone mobile en 2013 et, déjà aujourd'hui, environ la moitié des nouveaux appareils de téléphonie mobiles sont des *smartphones*. Quant à la croissance du parc de tablettes, il suit un cheminement voisin.

En 2015, 430 millions de personnes dans le monde auraient un abonnement 4G, technologie d'accès mobile de quatrième génération selon certains analystes. Les opérateurs qui disposent aujourd'hui de 100 MHz de spectre pourraient avoir besoin de 1 GHz dans 10 ans pour atteindre des débits plus élevés pour répondre aux besoins de leurs clients.

Afin de faire face à cette montée en puissance des besoins en volume et en qualité, les évolutions sont attendues au niveau des technologies de l'interface radio d'une part et d'autre part au niveau des solutions de déploiement de technologies différentes dans les réseaux des opérateurs de manière à continuer d'utiliser leurs réseaux existants auxquels viennent s'ajouter de nouvelles technologies ou stations radioélectriques appelés réseaux hétérogènes. Dans ces réseaux, nous pouvons ainsi disposer d'un réseau 3G ou 4G, d'un réseau Wifi et d'un réseau WiMAX par exemple et grâce aux procédés de délestage de trafic de manière transparente à l'utilisateur, le service continue à être délivré par n'importe quel équipement d'accès de proximité offrant la

meilleure qualité à l'utilisateur. Ces procédés de délestage de trafic d'un type de réseau vers un autre est appelé offloading vertical.

Vu que le déploiement des réseaux mobiles à base de macro stations RF (Macro cellules) est relativement cher et n'est pas approprié pour une couverture en indoor (par indoor il y a lieu de comprendre la maison, la cage d'escalier, le bas de l'immeuble où la rue étroite en cas d'habitat dense ou zone urbaine dense), l'emploi de stations RF miniatures est généralement préféré et a donné lieu aux : micro BTS, nano BTS, pico BTS et FEMTO cellules et aussi à la mixtiture de réseau avec le WIFI essentiellement (technologie de courte portée mais pouvant atteindre quelques centaines de mètres, voire dépasser le KM): cette diversité de stations radio donne lieu à des réseaux dits hétérogènes.

Pour faire face à la montée des besoins en débit et/ou l'augmentation des utilisateurs, que la densification du réseau en BTS est nécessaire afin de répondre aux besoins en capacités et en qualité d'expérience. Le débit reçu dépend de la distance Terminal – BTS et du nombre d'utilisateurs simultanés rattachés à celle-ci, il peut chuter très sensiblement avec un nombre d'utilisateurs qui dépasse la dizaine ou quelques dizaines.

Par ailleurs, les sites 3G/4G additionnels pour ces besoins en capacités des réseaux (devant prendre en charge le volume de trafic élevé) sont de plus en plus complexes à développer pour des raisons de rareté d'espaces et également de coûts. Particulièrement en zones urbaines et à forte densité où les capacités de réseaux 3G/4G nécessaires sont de plus en plus difficiles à augmenter par ces contraintes d'extension des antennes, la solution qui est adoptées consiste à déployer des systèmes de délestage, en particulier par l'utilisation des technologies de micro/femto cellules ou Wi-Fi (norme IEEE 802.11x) moins exigeantes en espaces et mieux tolérées. Vers 2020, les projections sont que 80% du trafic Internet devrait passer par des solutions de type Wi-Fi.

Beaucoup de travaux [2], sont en cours pour permettre à des terminaux de plus en plus intelligents (smartphone, tablette et autres portables) de se connecter sur des points d'accès Wi-Fi en mode Hotspot comme si la connexion était réalisée sur une antenne classique 3G/4G. Cette faculté est exécutée dans un environnement contenant des fonctions logicielles dans le terminal de l'utilisateur et dans le(s) réseau(x) de l'opérateur capables de découvrir les réseaux alentours et de sélectionner le meilleur réseau possible par rapport à l'application du moment de façon à ce que la qualité de service soit toujours optimisée.

Cette sélection devrait s'effectuer automatiquement sans intervention de l'utilisateur de telle sorte que celui-ci ne sait pas s'il est connecté sur un hotspot Wi-Fi ou sur une

antenne 3G/4G et aussi avec un niveau de sécurité équivalent au cas où le terminal client était connecté sur une antenne 3G/4G. De nouvelles propriétés sont déjà ajoutées par la Wi-Fi alliance et par 3GPP en juin 2013 et d'autres sont projetées pour être étudiées afin de permettre la possibilité à un utilisateur de se connecter à un hotspot de nouvelle génération. En outre, les opérateurs pourront ajouter des politiques plus complexes de gestion des connexions pour permettre par exemple des handovers entre hotspot et antenne 3G/4G. Les implémentations réelles des nouvelles solutions notamment celles qui s'appuient sur les algorithmes d'intelligence artificielle ne sont pas encore déployées et restent encore au stade d'évaluations ou de simulations.

Les opérateurs mobiles en Algérie sont en cours de déployer les réseaux HSPA (3G) et les déploiements de la 4G (LTE/LTE advanced) sont projetés à partir de 2016. Ils devraient être confrontés aux mêmes problématiques de sites et d'augmentation des volumes de trafic que celles évoquées précédemment, à savoir, optimiser sur le plan économique les différents déploiements et construire par là même des réseaux hétérogènes HSPA/LTE/LTE Advanced (Macrocellules, Microcellules) et WIFI. Des stratégies adaptées devraient être étudiées et arrêtées afin de rentabiliser les investissements déjà en cours et de mettre en place des solutions qui garantissent la meilleure qualité de services à leurs clients. Pour cela, des développements d'algorithmes "personnalisés" sont déjà perçus par les architectures en cours d'évaluation aujourd'hui.

Ce sujet de mémoire de Master traite de la problématique des réseaux mobiles des opérateurs de télécommunications qui consiste à s'intéresser aux nouvelles solutions d'« offloading », solutions de délestage, pour la prise en charge des terminaux mobiles 3G/4G dans un environnement de réseaux hétérogènes. En effet, les volumes de trafic sur les réseaux mobiles notamment augmentent de l'ordre de 100% par an et cela jusqu'en 2017 pour les pays développés en au-delà dans les pays comme le notre, il en est de même des débits moyens ou crêtes qui connaissent des taux de croissance élevés.

Le travail demandé a pour objectif de faire le point sur les principales solutions de conception et de développement d'un réseau LTE (4G) et d'un d'accès Wi-Fi devant servir d'appui à opérateur de télécommunications mobiles de définir une stratégie de déploiement. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la stratégie devant être utilisée par un opérateur qui n'a pas encore de réseau 4G mobile pour dimensionner un réseau LTE avec des Hotspots WIFI tout en tenant compte des mécanismes de handover et de l'optimisation des performances, de la sécurité, de la consommation énergétique dans cet environnement d'accès à l'Internet. Le but est que le terminal mobile puisse se connecter sur un environnement Wi-Fi avec les mêmes caractéristiques que s'il se connectait sur une antenne 3G/4G (Node B/eNodeB). Pour

cela, il faut inclure l'examen des spécificités liées à la qualité de service pour des applications comme la voix, la vidéo ou les services de navigation à travers le web. L'objectif est ambitieux puisqu'il s'agit de concevoir et d'évaluer une approche permettant de confirmer les ambitions de la solution de déploiement et le processus d'offloading proposés et arrêtés.

Le travail à effectuer lors de ce mémoire est présenté comme suit:

- **Le chapitre 1** : porte sur les généralités relatives aux normes de la technologie des réseaux sans fil ;
- **Dans le chapitre 2** : nous parlerons des principes, de l'architecture et des performances de la technologie des réseaux mobiles LTE ;
- **Dans le chapitre 3** : nous décrivons les différents techniques de handovers et principalement l'algorithme de contrôle du choix du point d'accès qui répond le mieux à la demande de l'utilisateur ;
- **Le chapitre 4** : concernera à la modélisation et l'évaluation d'une proposition d'une stratégie de Handover pour optimiser un déploiement LTE/WIFI par un opérateur local avec comme objectif de permettre une planification et un déploiement du réseau de façon économique et qui optimise la qualité de service. Cette implémentation se fera à l'aide du simulateur de réseau NS3.

# Chapitre 1 Généralités sur les technologies

## Wireless

---

### 1.1 Introduction aux réseaux sans fils

Les réseaux sans fils, de nos jours, nous envahissent sans que nous ayons la moindre sensation de leurs présences et les ondes radioélectriques parcourent les airs jusqu'à la limite de leur puissance. Ils ont été mis en place pour régler les problèmes de câblage rencontrés dans les réseaux filaires, ils séduisent de nombreux internautes car ils leur offrent la possibilité de rester connectés en permanence tout en se déplaçant dans un périmètre géographique plus ou moins étendu et c'est la raison pour laquelle on entend parler de mobilité.

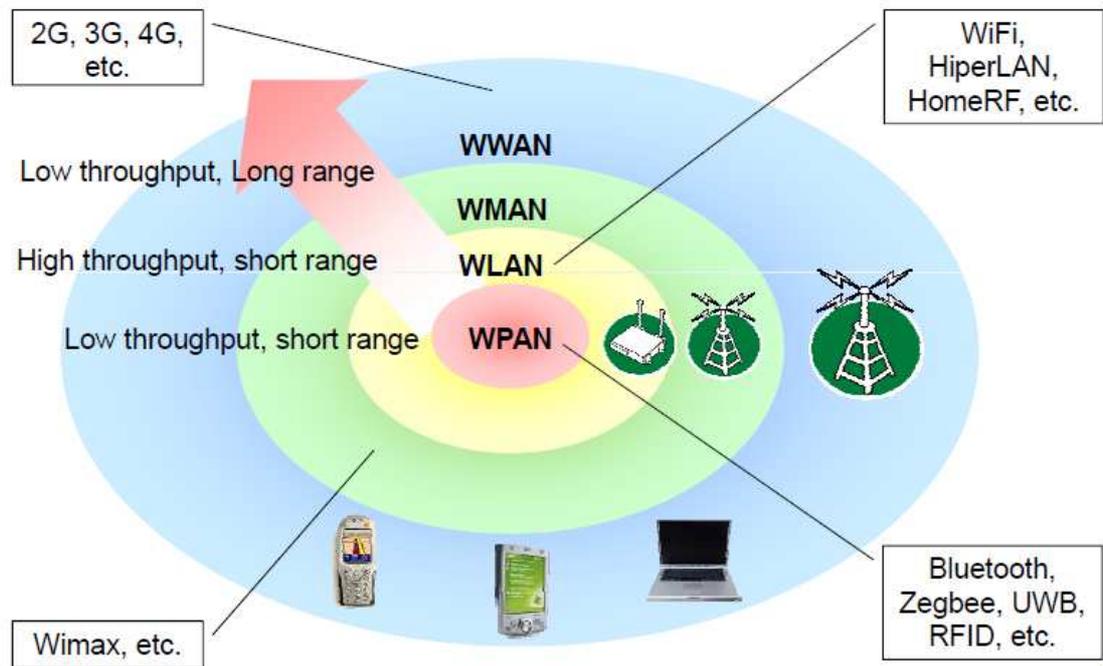
Les réseaux sans fils sont basés sur une liaison utilisant des ondes radio ou infrarouges, ils permettent de relier facilement des équipements distants d'une dizaine de mètres à quelques kilomètres. De plus l'installation des équipements d'accès de tels réseaux ne demandent pas de lourds aménagements comme c'est le cas avec les réseaux filaires, ils peuvent être déployés sur des infrastructures existantes.

Cependant, ils nécessitent la disponibilité de ressources spectrales (fréquences) régies par une réglementation souvent restrictive pour les transmissions radioélectriques demeurant parfois un obstacle pour les déploiements. En outre, les ondes hertziennes restent difficiles à confiner dans une surface géographique restreinte, ce qui rend possible, voire facile, pour un pirate l'écoute des communications dans un réseau sans fil si les informations circulent en clair. Il devient ainsi nécessaire de mettre en place les outils requis devant assurer une confidentialité des données circulant sur ces réseaux sans fils.

### 1.2 Classification des réseaux sans fil

Plusieurs technologies de réseaux sans fil standardisées sont disponibles aujourd'hui [3] il n'existe pas de technologie parfaite et chacune d'elle représente un équilibre entre plusieurs facteurs dont les plus importants sont la fréquence d'émission utilisée, le type de modulation, la puissance du signal radio, la sensibilité des équipements de

réception et le débit ; le choix d'une technologie sans fil dépend donc de l'usage que l'on souhaite en faire.



**Figure 1.1** Classification des réseaux sans fil.

Actuellement, les principales catégories des réseaux sans fil sont :

### 1.2.1 Les réseaux sans fil personnels WPAN :

Les réseaux personnels servent à relier différents appareils dans un rayon réduit de l'ordre de la dizaine de mètres, les plus connus sont [4] :

- La technologie Bluetooth standardisée sous le nom IEEE 802.15.1, elle permet de faire communiquer un appareil maître avec d'autres appareils esclaves pour des débits allant jusqu'à 750 Kb/s dans un rayon de moins de 10 mètres, il utilise la bande de fréquence des 2.4 GHz ;
- La technologie UWB répondant au standard IEEE 802.15.3 permet de transmettre plusieurs centaines de Mbps et utilise une grande partie du spectre pour échanger des données, le signal pour chaque bande de fréquences est très faible et ne perturbe pas les autres signaux qui se trouvent sur leur propre bande ;

- La technologie Zigbee : particulièrement adaptée à la communication d'objet à objet (M2M : Machine To Machine) ne nécessite pas de grands débits ou une forte consommation d'énergie, elle est destinée à transporter essentiellement les commandes et non des données ; ce qui la rend particulièrement utile et pratique pour être intégrée dans de petits appareils électroniques. Deux versions de cette technologie sont mises en place selon les deux standards IEEE 802.15.4 et IEEE 802.15.4a.

### **1.2.2 Les réseaux sans fils personnels WLAN :**

Ces réseaux fournissent un accès local sans fil pour le transfert des données et de la voix aux ressources dites partagées tels que les serveurs permettant de couvrir l'équivalent d'un réseau local d'entreprise, elles ont une large bande et couvrent une étendue de l'ordre de la centaine de mètres. Les technologies correspondantes sont :

- Le Wi-Fi ou IEEE 802.11, soutenu par l'alliance WECA offre des débits allant jusqu'à 54 Mbps utilise la bande de fréquence de 2.4 GHz sur une distance de plusieurs centaines de mètres dans ses versions antérieures, elle sera détaillée davantage dans le chapitre qui se suit;
- hiperLAN2 : norme européenne élaborée par l'ETSI, permet d'obtenir un débit théorique de 54 Mbps sur une zone d'une centaine de mètres de rayon dans la gamme de fréquences comprises entre 5150 et 5300 MHz.
- DECT : norme de téléphones sans fils domestiques ; les deux sociétés Alcatel et Ascom développent pour les environnements industriels, telles que les centrales nucléaires, une solution basée sur cette norme qui limite les interférences, les points d'accès résistent à la poussière et à l'eau.

### 1.2.3 Les réseaux sans fils personnels WMAN :

Les réseaux sans fils destinés à la couverture de grandes zones comme les villes et des villages en entier sont venus quelques années après les réseaux locaux sans fils de type Wi-Fi. Nous y distinguons trois grandes familles :

- Le WiMax, nom donné à une organisation appelée à labéliser des équipements compatibles avec le standard américain IEEE 802.16 et la norme européenne ETSI HiperMAN, il permettait déjà à ses débuts un débit théorique de 70 Mbps sur un rayon pouvant atteindre 50 Km. Cette technologie est particulièrement bien adaptée pour interconnecter entre eux à l'échelle d'une ville des hot spots locaux moyennant des points d'accès Wi-Fi par exemple;
- Les réseaux mobiles de 3<sup>e</sup> génération sont avant tout des réseaux nationaux ou régionaux et dont la taille des cellules nécessite la mise en place d'équipements conséquents dans chaque ville concernée, l'objectif recherché est de permettre l'utilisation de tels réseaux en situation de mobilité quelle que soit la vitesse du véhicule. Ils ont succédé à la première génération de la téléphonie mobile analogique GSM et à sa deuxième génération dite numérique dans ses différentes formes permettant le transport des données tel que le type GPRS ou 2.5<sup>e</sup> génération. Les réseaux mobiles de 3<sup>e</sup> génération intègrent à la fois le transport de la voix et des données à haut débit, la normalisation des systèmes mobiles de 3<sup>e</sup> génération est coordonnée au sein de l'ensemble de normes IMT-2000 de l'union internationale des télécommunication et est menée essentiellement par le 3GPP (Third Generation Project Partnership ), il existe plusieurs normes de téléphonie mobile de 3<sup>e</sup> génération :
  - L'UMTS, qui permet à l'origine un débit théorique jusqu'à 2 Mbps même si les premiers déploiements se faisaient plutôt à 384 Kbps, en fait deux grands types d'UMTS existent suivant l'interface radio utilisé : W-CDMA ou TD-CDMA ;

- Le Cdma 2000, suivi par le consortium 3GPP2, permet également un débit théorique de 2Mbps, il est plutôt soutenu par les américains;

-EDGE est une évolution du GPRS qui permet des débits de 384 ou 200 Kbps suivant la version avec un maximum de 474 Kbps, il permet de conserver la compatibilité ascendante GSM/GPRS dans sa version EDGE Classique, la version EDGE Compact permet d'utiliser des bandes de fréquences inférieures à 1 MHz .

- MBWA, est un standard en cours de développement IEEE 802.20, il devrait permettre la mise en place de réseaux métropolitains mobiles avec des vitesses allant jusqu'à 250 Km/h. Le but est de permettre le déploiement mondial de réseaux sans fils très haut débit à un coup accessible et disponible partout, le MBWA est relativement bien adapté à la mobilité pour la voix et les données avec des terminaux centrés sur les données.

#### **1.2.4 Les réseaux sans fils personnels WWAN :**

Les réseaux d'accès étendus sans fil, également appelés réseaux cellulaires mobiles, sont les réseaux les plus répandus, ils fournissent une connectivité réseau directe sur de grands secteurs, y compris les sites isolés et distants, les principales technologies de cette famille sont [5]:

-Le réseau GSM, constitué au début du 21<sup>ème</sup> siècle est le standard le plus utilisé en Europe utilise les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz, Aux Etats-Unis par contre les fréquences utilisées sont les bandes 850 MHz et 1900 MHz, ainsi on qualifie de tri-bande les téléphones portables pouvant fonctionner en Europe et aux Etats-Unis et de bi-bande ceux qui fonctionnant uniquement en Europe. Cette norme est une évolution de la norme GSM, ce qui lui vaut parfois l'appellation GSM++ permettant de faire la transition vers la troisième génération, le débit théorique maximum est de l'ordre de 171.5 kbps en pratique jusqu'à 114 Kbps, il permet de nouveaux usages comme la capacité à

se connecter en mode client-serveur à une machine d'un réseau IP, envoyer un paquet à un groupe de destinataire et les services de messages courts ;

-Le réseau UMTS vient se combiner aux réseaux déjà existants GSM et GPRS, qui apportent des fonctionnalités respectives de voix, de données et des fonctionnalités multimédia, les fréquences allouées sont 1885-2025 MHz et 2110-2200 MHz, L'UMTS permet théoriquement des débits de transfert de 1.920Mbps, faut savoir que le débit est différent suivant le lieu d'utilisation et la vitesse de déplacement des utilisateurs, les nouveaux services concernent surtout l'aspect vidéo : visiophonie, MMS vidéo, Télévision,...etc.

On parlera par la suite de la technologie la plus récente de tous les réseaux cités auparavant, qui est la LTE ou la 4G que nous étudierons plus en détail dans le chapitre trois.

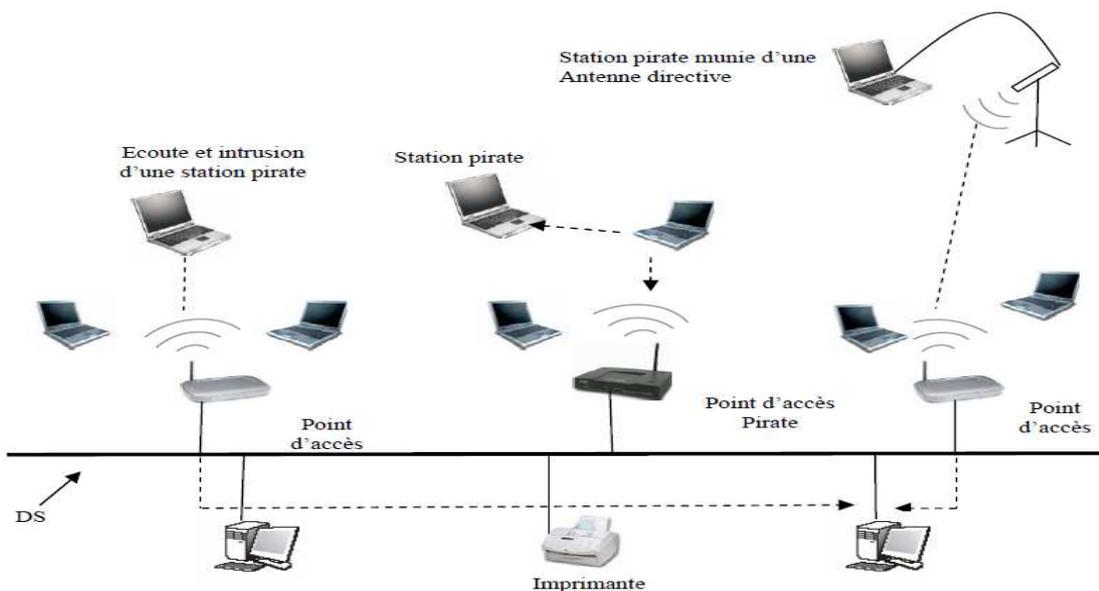
### **1.3 Problèmes spécifiques lié aux réseaux sans fil**

Contrairement aux réseaux filaires, les réseaux sans fil et malgré leurs nombreux avantages posent d'énormes problèmes liés aux supports de transmission [3], les ondes radio se propageant dans l'air en ligne droite à la vitesse de la lumière peuvent être déviées par réflexion, réfraction ou diffraction à cause des obstacles rencontrés sur leur trajectoire ou altérées à leur réception par d'autres signaux sur les mêmes fréquences provenant d'autres sources constituant ainsi des interférences.

On parle d'interférences lorsque deux ou plusieurs ondes se superposent et interagissent l'une avec l'autre, il est fréquent pour les fréquences supérieures à quelques centaines de kilohertz qu'une antenne de réception reçoive simultanément l'onde directe en provenance de l'émetteur et une ou plusieurs ondes réfléchies par un obstacle, l'existence d'interférences a des conséquences néfastes sur les paramètres de qualité de la liaison comme le taux d'erreur, la portée ainsi que sur le débit.

Bien que les réseaux sans fils offrent la mobilité ainsi que la rapidité et la facilité de déploiement, la sécurité demeure un réel problème. La propagation dans l'espace fait que n'importe quel individu ayant des équipements d'écoute appropriés (adaptateur radio, antenne directive) peut écouter le trafic sur le réseau. L'écoute nécessite

l'utilisation d'une station espionne situé dans la zone de couverture ou en dehors de celle-ci à condition qu'elle soit munie d'une antenne directive, ou bien il suffit de mettre en place un point d'accès étranger dans la zone de couverture du réseau WLAN afin d'intégrer le réseau, les stations cherchent alors à se connecter à ce point d'accès pirate en fournissant ainsi les informations concernant le réseau auquel elles sont rattachées, l'exploitation de ces informations permet aux pirates de se connecter au réseau comme le monte la figure ci dessous :



**Figure 1.2** Différents cas d'attaques.

D'autres attaques menacent l'intégrité d'un réseau sans fil on cite :

- L'intrusion : un étranger pénètre un système de communication puis accède au système d'information d'une l'entreprise, la solution préconisée est le contrôle d'accès ;
- La dissimulation d'identité : un destinataire reçoit un message en prévenance d'une personne qu'il croit connaitre mais dont l'identité a été usurpée, la solution préconisée est l'identification.

L'un des problèmes majeurs des réseaux sans fil est aussi la gestion de la mobilité des utilisateurs à commencer par la difficulté qui réside dans la conservation de l'adressage IP, en se déplaçant, une station terminale doit donc disposer de deux adresses IP, une fixe pour identifier le mobile de manière unique et une temporaire qui

varie à chaque changement de point d'accès et cela doit être fait de façon automatique ; ceci peut amener à des conflits d'adresse qu'il faut éviter, par exemple l'adresse attribuée dans la nouvelle cellule peut être identique à une adresse existante sur le réseau visité.

Tout comme l'adressage, le routage doit être dynamique, il est intéressant et essentiel lorsqu'un mobile se déplace que tous les paquets qui lui sont destinés soient dirigés vers la nouvelle localisation et non vers l'ancienne du mobile, tout en utilisant un routage le plus optimal possible.

Il arrive que les protocoles de routage limitent le nombre de sites qu'ils peuvent supporter dans un sous réseau donné, avec une telle méthode le nombre de mobiles dans un réseau est alors limité par le nombre d'adresses disponibles et non pas seulement par la largeur de bande passante utilisable.

Un paramètre très important de caractérisation des accès mobile demeure la qualité de service (QoS), définie comme un ensemble de garanties à assurer par le réseau pour le transfert d'un trafic d'une source vers une autre. Selon le type d'applications, les besoins de la QoS diffèrent selon que les applications sont à temps réel comme la voix et la vidéo ou des applications non à temps réel comme le transfert de données. Elle est mise en œuvre dans un réseau afin de satisfaire les besoins explicites des applications lors de l'acheminement des flux de données

## **1.4 Introduction au réseau Wi-Fi**

L'origine du terme Wi-Fi est la contraction de Wireless Fidelity correspondant au nom de la certification délivrée par la Wi-Fi Alliance (WECA : Wireless Ethernet Compatibility Alliance), organisme ayant pour mission de spécifier l'interopérabilité entre les matériels conformes à la norme 802.11[4], et de commercialiser le label « Wi-Fi » avec les matériels répondant à ses spécifications. C'est une technologie qui permet de créer des réseaux informatiques locaux sans fil à haut débit. Elle opérait à ses débuts sur des fréquences dans la bande des 2.4 GHz et est sécurisée par l'emploi de différents cryptages relativement sûrs (WEP et WAP), offrant des débits qui ont été passés de 1 Mbps à 2Mbps avec la première norme

802.11 jusqu'à 54 Mbps avec la norme 802.11g ; des débits encore plus importants sont devenus possibles avec des versions plus avancées à savoir la norme 802.11n qui permet un débit théorique dépassant 600 Mbps et 1,3 Gbps en standard 802.11 ac normalisé depuis janvier 2014.

La technologie Wi-Fi offre la faculté de déployer un réseau local dont les performances sont semblables à celles d'un réseau filaire avec une mobilité de l'utilisateur dans des zones de couverture limitées étant donnée la réduction de portée des points d'accès par l'affaiblissement du signal en fonction de la distance d'une part et d'autre part, par des obstacles qui caractérisent la zone à couvrir ou les problèmes d'interférences pouvant être rencontrés en cas de plusieurs réseaux (bornes) fonctionnant sur des canaux recouvrant par exemple. Cette portée varie de quelques dizaines de mètres à l'intérieur des bâtiments ou en indoor jusqu'à quelques centaines de mètres à l'extérieur ou en outdoor.

Les réseaux sans fils locaux, de type IEEE 802.11 ou WiFi, sont intrinsèquement un remplacement ad hoc des réseaux filaires Ethernet classiques, ils reprennent de nombreux concepts de ceux-ci à savoir la méthode d'accès CSMA/CA basée sur CSMA/CD, la reprise d'une architecture en couche physique (PHY) et MAC, l'utilisation d'une machine à état permettant de reproduire l'état connecté/déconnecté d'une connexion par câble et bien évidemment, support de la couche protocolaire TCP/IP.

Cette norme a été très répandue dans les usages à domicile et encore plus dans les entreprises pour les coûts relativement faibles et la facilité de déploiements qui la caractérisent. Toutefois, la performance du Wi-Fi s'est trouvée limitée essentiellement en termes de débit pour répondre aux besoins croissants des entreprises et cela a motivé la recherche d'évolutions de la technologie encore plus améliorées.

Les solutions à cette problématique ont été des évolutions multiples de la norme IEEE 802.11 pour augmenter les débits et améliorer d'autres caractéristiques dont les plus importantes sont la sécurité des communications et la qualité de service ou d'expérience perçue par l'utilisateur.

Le but de ce standard demeure la fourniture d'une connectivité sans fil aux machines automatiques, aux équipements, ou aux stations qui requièrent un déploiement rapide, pouvant être portables ou même dans la main, ou montés à bord de véhicules mobiles dans une zone délimitée et la réponse à un besoin de connectivité sans fil, dans un environnement contraint, avec une réglementation souple (c'est à dire sans licence, mais sous réserve de respect des conditions de puissance/fréquence).

Ces réseaux présentent l'immense avantage par rapport aux autres types de réseaux sans fil d'être multirôles. De par les débits et les portées considérés, ils assument parfaitement une connectivité à tous les niveaux, que ce soit personnelle (liaison radio d'ordinateur à ordinateur, ou d'ordinateur à périphérique), locale (remplacement des réseaux Ethernet traditionnels), métropolitaines (accès à internet par un réseau de bornes métropolitaines formant un unique réseau d'opérateur ou d'une ville) ou globales (accès à un hotspot).

## 1.5 Les évolutions de la norme 802.11

Le standard IEEE 802.11 d'origine n'est pas resté figé, de nombreuses améliorations lui ont été apportées dont les plus employées durant les années précédentes sont standards IEEE 802.11b, IEEE 802.11a et IEEE 802.g. Ces évolutions ont concerné essentiellement les bandes de fréquences et les modulations pour atteindre des débits plus élevés et répondre ainsi aux différents besoins des clients. Ces évolutions sont essentiellement [5]:

**802.11** La norme 802.11 est la norme originale et elle permet d'obtenir un débit de 1 à 2 Mbps ;

**802.11a** (ou Wifi5) La norme 802.11 a permis d'obtenir un débit plus élevé dans un rayon de 10 mètres, il est de 54 Mbps en théorie et de 27 Mbps réels dans ses déploiements ;

**802.11b** (ou Wifi) La norme 802.11 b est aussi largement répandue dans la décennie qui vient de s'écouler. Elle offre un débit théorique de 11 Mbps (6

Mbps réels) avec une portée pouvant aller jusqu'à 300 mètres dans un environnement dégagé qui est supérieure à la version a ;

**802.11g** La norme 802.11 g est la norme la plus répandue actuellement. Elle offre un haut débit (54 Mbps théoriques, 25 Mbps réels) sur la bande de fréquences des 2.4 GHz ;

**802.11s** (ou réseau Mesh) Elle vise à implémenter la mobilité pour des réseaux de types ad-hoc. Tout point qui reçoit le signal est capable de le transmettre. L'un des protocoles de routage qu'elle utilise est OSLR et permet des liaisons qui peuvent atteindre des débits de 10 à 20 Mbps selon la couche physique utilisé (802.11a/b/g/n..) ;

**802.11u** La norme 802.11u est disponible depuis le 25 février 2011. Elle vise à permettre une reconnaissance et une sélection plus facile des réseaux, le transfert d'information provenant des réseaux externes, afin de permettre une interopérabilité entre les différents fournisseurs de services. Cette norme permettra de faciliter le délestage du trafic ou « offload » qui sera détaillé dans le chapitre 4.

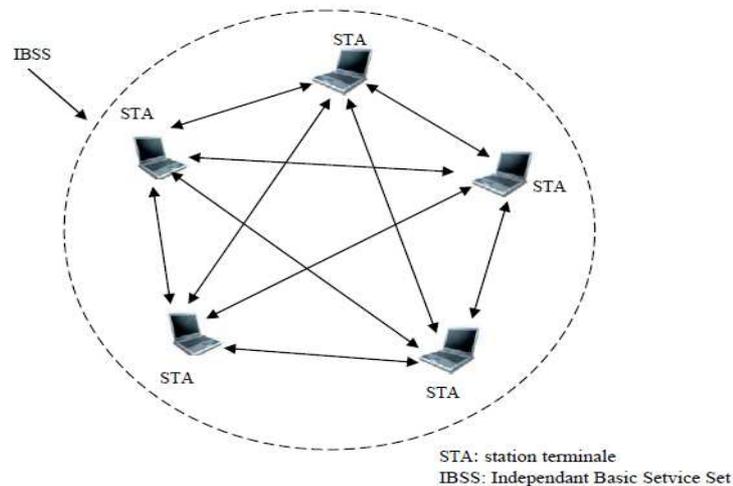
## **1.6 Les topologies d'un réseau Wi-Fi**

Le Wi-Fi connaît deux modes d'utilisation distincts ayant chacun des caractéristiques propres. Il s'agit du mode ad-Hoc et du mode infrastructure, ces deux modes de fonctionnement permettent de définir la topologie du réseau :

### **1.6.1 Le mode Ad-Hoc**

Les réseaux Ad-Hoc sont composés d'un ensemble de stations utilisant chacune une interface radio, toute station peut communiquer directement avec toute autre station du réseau pourvu qu'elle soit à portée, c'est-à-dire, dans la zone définie par les limites induites par les conditions de propagation radio. C'est une architecture totalement décentralisée. Ce mode qui nécessite que chaque station soit à portée radio des autres stations pour se connecter les unes aux autres donne lieu à un réseau point à

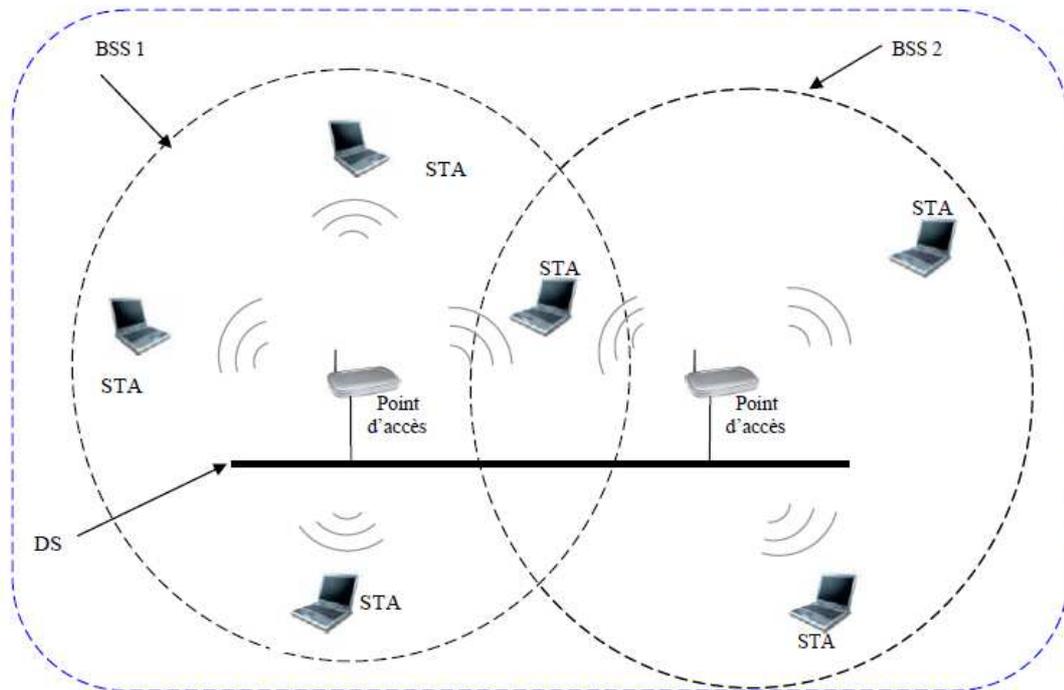
point où chaque machine ou terminal joue en même temps le rôle de client et le rôle de point d'accès, ceci limite la taille du réseau et l'ensemble constitué par les différentes stations est appelé un IBSS.



**Figure 1.3** Un réseau Wi-Fi en mode Ad-Hoc.

## 1.6.2 Le mode infrastructure

En mode infrastructure, les réseaux se caractérisent par la présence de points d'accès (AP : Access Point) où chaque station stationnaire ou en mouvement, notée STA, se connecte à un point d'accès via une liaison sans fil. Ceci permet d'assurer la communication entre une station d'un BSS avec toutes les autres stations du même BSS ou même la communication avec d'autres stations plus éloignées mais connectées à un réseau filaire ou sans fil à travers un système de distribution. Cette architecture permet d'étendre les réseaux, c'est une architecture centralisée où toute communication doit passer par l'AP même s'il s'agit d'une communication entre deux stations du même BSS.



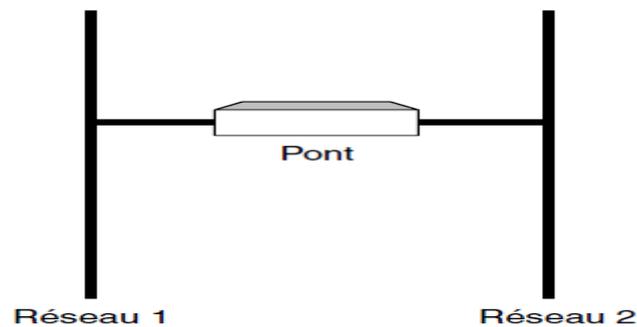
**Figure 1.4** Réseau Wi-Fi en mode infrastructure.

Les équipements d'infrastructure ont pour fonction d'interconnecter le réseau Wi-Fi au réseau filaire servant de système de distribution, il est possible de relier plusieurs points d'accès entre eux ou plus exactement plusieurs BSS par une liaison appelée système de distribution notée DS afin de construire un ensemble de services étendu ESS.

Essentiellement, il existe trois catégories d'équipements d'infrastructure :

- Point d'accès : noté AP (Access Point) est le composant principal d'un réseau Wi-Fi qui fonctionne comme un concentrateur et centralise les communications provenant de toutes les stations d'utilisateurs ou clients qui sont associées, permettant de fournir un accès pour les différents stations avoisinantes équipées de cartes Wi-Fi au réseau filaire auquel il est raccordé.
- Pont Wi-Fi : est utilisé principalement pour interconnecter plusieurs réseaux filaires Ethernet via une interface sans fil. Cette solution est bien adéquate pour

relier des réseaux filaires ou sans fil de différents bâtiments en évitant le câblage entre eux.



*Figure 1.5* Un pont Wi-Fi.

- Les adaptateurs sans fil ou carte d'accès notée NIC, il s'agit d'une carte réseau satisfaisant les caractéristiques d'interface de la norme 802.11 permettant à une machine de se connecter à un réseau sans fils, les adaptateurs Wi-Fi sont disponibles selon de nombreux formats ; tout équipement possédant cette carte est appelé station.

## **1.7 Architecture des réseaux Wi-Fi**

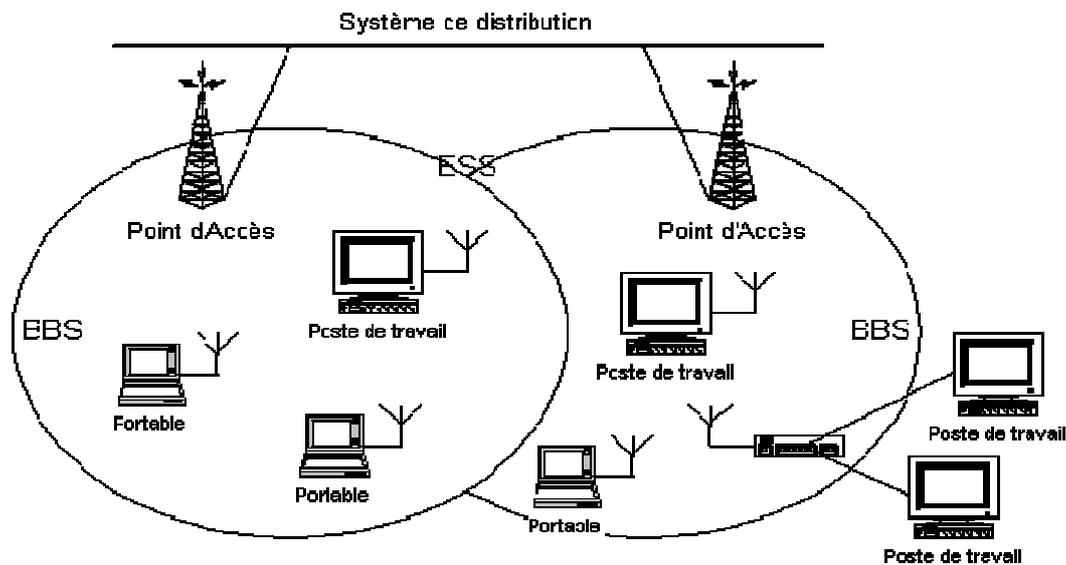
Un réseau 802.11 possède une architecture cellulaire BSS dans laquelle chaque cellule est construite autour d'un point d'accès. Les points d'accès sont reliés par un réseau de distribution on parlera de BSS, IBSS et ESS.

Le BSS peut être défini comme un ensemble de stations localisées dans la même zone géographique et sous le contrôle d'une seule fonction de coordination: DCF ou PCF. La zone de couverture d'un BSS est appelée BSA. Toutes les stations dans un BSS peuvent communiquer avec les autres stations du même BSS à travers un AP. La dégradation de la qualité de la porteuse due aux différents types d'interférences ou d'atténuation, peut causer le problème du nœud caché ou une plusieurs stations sont accessibles par le point d'accès mais cachées pour quelques stations du BSS.

Le groupement de stations en un seul BSS dans le but de les interconnecter sans l'intervention d'un AP est considéré comme réseau Ad-Hoc. Dans ce cas on parle plutôt

d'un IBSS ou toute station peut communiquer avec une autre station sans passer par l'AP.

Un BSS est identifié par son BSSID qui représente l'adresse MAC du point d'accès et qui est diffusé par le point d'accès. Dans le cas d'un IBSS, il est identifié par un SSID diffusé par une station configurée comme station d'initiation au niveau des beacons.

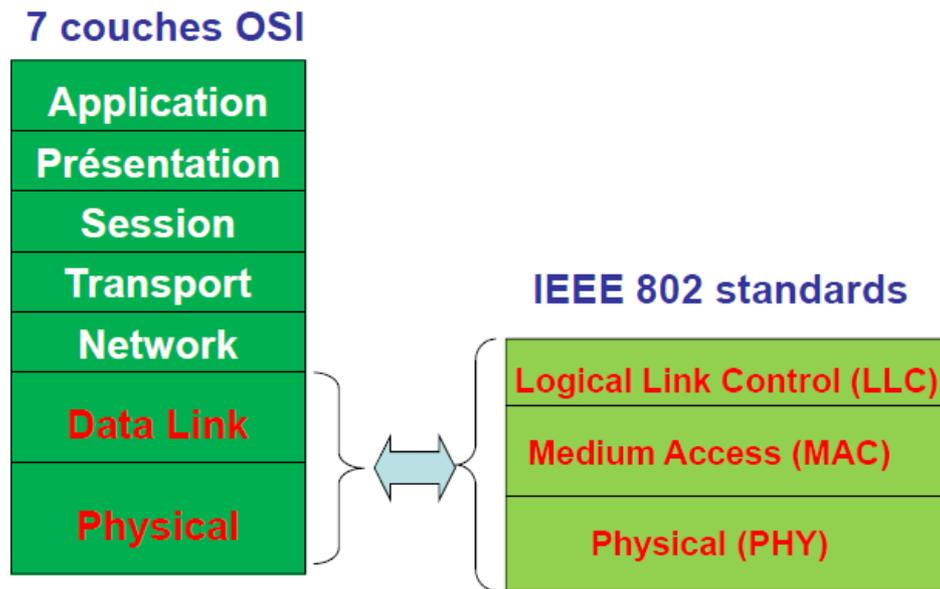


*Figure 1.6*. Architecture d'un réseau Wi-Fi

Les réseaux en mode infrastructure permettent aux utilisateurs d'élargir la zone de couverture géographique du réseau Wi-Fi en offrant une connexion réseau entre plusieurs BSS pour former ainsi un ESS. Un ESS consiste en un groupe de BSSs intégrés ensemble en utilisant un système de distribution commun. Un système de distribution comme défini par l'IEEE 802.11 est indépendant de l'implémentation. Dans ce cas, il peut s'agir d'un réseau filaire Ethernet, un Token Ring IEEE 802.5 ou encore un autre réseau sans fil IEEE 802.11. L'ESS est identifié par son ESSID et tous les APs seront configurés suivant cet ESSID.

## 1.8 Le modèle en couche du standard IEEE 802.11

La norme IEEE 802.11 repose sur une architecture en couche qui couvre les deux premières couches du modèle OSI, c'est à dire la couche physique et la couche liaison données :



**Figure 1.7** Couches 802.11

➤ **La couche physique du standard IEEE 802.11**

La couche physique définit la modulation des ondes radioélectriques et les caractéristiques de la signalisation pour la transmission de données, elle est composée de deux sous couches PMD et PLCP :

- La sous couche PMD : spécifie le type de support de transmission, le type d'émetteur-récepteur, le type de connecteur et la technique de modulation et de démodulation ;
- La sous couche PLCP: s'occupe de la détection du support et fournit un signal appelé CCA à la sous couche MAC pour lui indiquer si le support est occupé ou non. L'IEEE a défini quatre types de couches physiques différentes caractérisées chacune par une technique de modulation précise. Il s'agit des techniques décrites dans le tableau 1 illustré ci-après :

Les ondes radio appelées aussi ondes hertziennes car elles furent découvertes par le physicien allemand Heinrich Hertz en 1888 sont des oscillations combinées d'un champ magnétique et d'un champ électrique caractérisées par une fréquence d'onde, une période, une vitesse de propagation, une longueur d'onde, une amplitude, une puissance et une phase, ces ondes transportent de l'énergie sans avoir besoin d'un quelconque support matériel elles se propagent dans le vide.

Les normes 802.11 proposent des modes de fonctionnement permettant d'obtenir différents débits en fonction de la portée du signal, des études ont montrés que plus la puissance est importante plus la portée du signal est grande et plus les ondes traversent les obstacles.

Technique	Avantages	Inconvénients
DSSS	Propose des vitesses de transmissions importantes.	Système ayant une sensibilité aux interférences dû à l'utilisation d'un seul canal.
FHSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Technique de transmission par saut qui empêche une perte totale du signal ;</li> <li>– Constitue une solution efficace dans un environnement ou il y a les multi trajets.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Faible largeur de bande par canal ne lui permettant pas d'atteindre des vitesses élevées ;</li> <li>– Charge supplémentaire sur le réseau</li> </ul>
Infrarouge	– Transmission relativement économique et garantit la confidentialité.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Transmission se fait par une longueur d'onde très faible ;</li> <li>– Sensible aux obstacles.</li> </ul>

OFDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vitesse de transmission jusqu'à 54Mbps ;</li> <li>– Offre un mécanisme de corrections d'erreurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Nécessite de mettre en place des méthodes de filtrage ou de codage qui réduisent les débits.</li> </ul>
------	--	--

**Tableau 1.1** Techniques de modulations

Par ailleurs, dans un environnement très bruyant, le rapport signal sur bruit SNR est crucial pour bénéficier d'une bonne qualité de communication, il s'exprime en décibels (dB) et correspond simplement à la différence entre la puissance du signal reçu et la puissance du bruit exprimé en dBm :

$$\text{SNR (dB)} = \text{Puissance du signal reçu} / \text{Puissance du bruit (en dB)}$$

Par exemple pour certaines cartes à la norme 802.11b, le rapport signal sur bruit doit être au minimum de 4 dB pour qu'une communication à 1 Mbps puisse être soutenue.

Parmi les sources du bruit, on trouve bien sûr les réseaux sans fil et tous les équipements radio situés à proximité, mais il ya également le bruit lié à l'activité humaine et le bruit électromagnétique naturel qui est de l'ordre de -100 dBm pour les fréquences du Wi-Fi.

### ➤ **La couche liaison de données du standard IEEE 802.11**

La couche liaison de données de la norme 802.11 est le cerveau du Wi-Fi, elle définit un certain nombre de fonctionnalités cruciales pour le transport des données telles que le partage de la parole entre utilisateurs, les modalités de connexion au réseau, le contrôle d'erreur ou encore la sécurité, elle définit également les adresses du réseau. Faut savoir que tous les périphériques possèdent un identifiant connu sous le nom d'adresse MAC censée être unique au monde.

En effet, la deuxième couche du modèle OSI ne peut répondre complètement aux besoins des réseaux locaux pour cette raison que l'IEEE a donc divisé cette couche en sous-couches MAC et LLC, le sous-comité IEEE 802.2 a donc standardisé une couche de

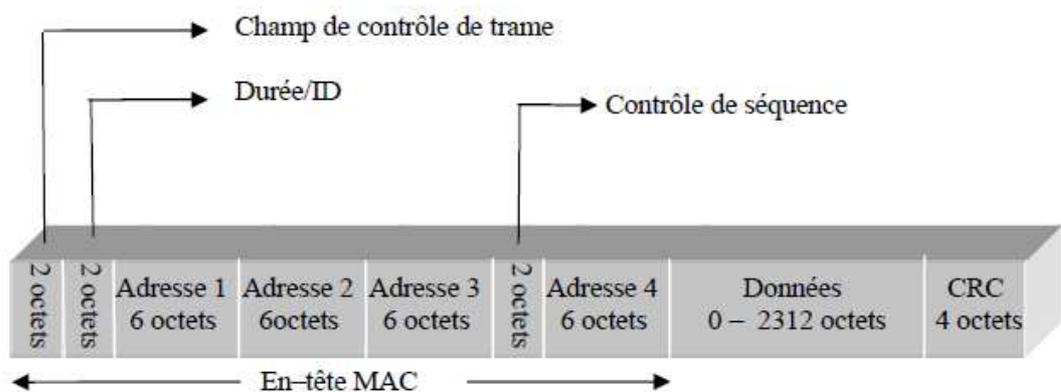
niveau LLC indépendante de la technologie du média utilisé, définissant plusieurs types d'opération offrant des services de différentes qualités,

➤ La sous-couche LLC :

Est une entité de la couche de liaison dédiée au service, elle permet de fonctions entre la sous couche MAC qui sera détaillée par la suite et les couches supérieures, à ce niveau quel que soit le type des données ils sont structurés sous la forme d'un LPDU, le premier type LLC est un service minimum il est sans connexion pas de liaison logique et sans acquittement c'est-à-dire pas de retour d'information sur le bon déroulement de l'acheminement, ce type permet des connexions point à point ou de diffusion. Le deuxième type d'opération est un service orienté connexion, avec acquittement, contrôle de flux et vérification de l'ordre des trames assure une détection des doubles et correction d'erreurs. Le troisième type d'opération est un service sans connexion, acquitté mais avec retransmission pas de corrections d'erreurs offrant une prestation de qualité intermédiaire simple et performante.

➤ La sous-couche MAC :

C'est la sous couche qui décrit la méthode d'accès, le tramage ainsi que les mécanismes de détection d'erreurs, elle fournit un contrôle d'accès au support, la trame MAC est la trame encapsulé au niveau de la sous couche MAC, son format est le suivant :



**Figure 1.8** .Format de la trame MAC.

Dans les trames de contrôle, il en existe plusieurs parmi lesquelles on peut citer la trame RTS envoyé par la station source avant le paquet de données suivie par la trame CTS envoyée par la station destination après avoir reçu le paquet, la trame d'accusé de réception .

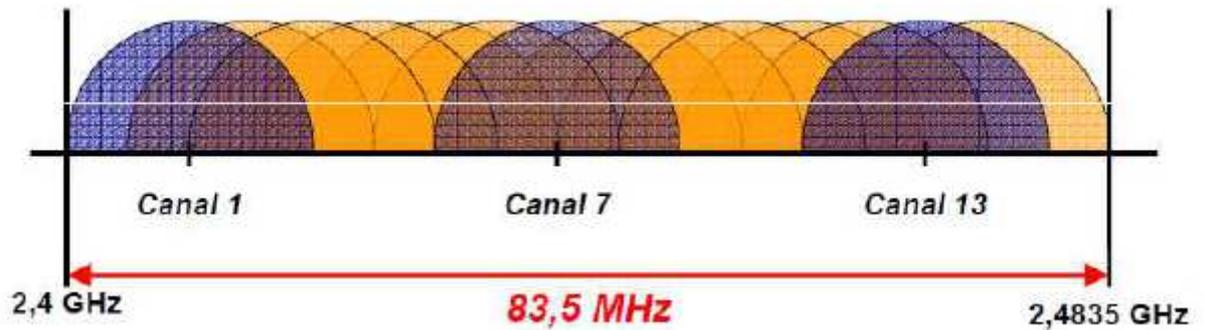
Les champs d'adresse 1, 2, 3 et 4 correspondent à des adresses MAC de stations de destination, spécifient des types de transmissions bien précis l'adresse1 est toujours l'adresse du récepteur, l'adresse2 est toujours l'émetteur, quand à l'adresse3 peut être celle du récepteur ou de l'émetteur et l'adresse4 est spécialement utilisée dans le cas d'une communication point à point faisant intervenir le système de distribution.

Les trames de données, quant à elles, contiennent les données utilisateurs, notamment les adresses source et destination ce qui permet aux points d'accès d'acheminer correctement les trames vers leurs destinations. Quand au CRC qui s'étend sur 32 bits, sert au contrôle d'erreur.

## **1.9 Les techniques d'accès :**

La norme 802.11 ne prévoit pas un système d'accès multiple, se pose alors un problème de partage du canal de communication entre les différentes stations. Les standards Wi-Fi utilisent deux bandes de fréquences : La bande ISM et la bande U-NII :

La bande ISM se compose de trois sous bandes : 902-928 MHz, 2.400-2.4835 GHz, 5.725-5.850 GHz. Seule la bande comprise entre 2.400 et 2.485 GHz est utilisée par la norme 802.11. La largeur utilisée de cette bande et la puissance d'émission diffère d'un pays à un autre selon les réglementations.



**Figure 1.9** Recouvrement des canaux dans la bande ISM

Pour la bande U-NII, elle se compose des deux parties de bande de fréquence : de 5.15 à 5.35 GHz et de 5.825 GHz. Elle offre une bande passante de 300 MHz avec des puissances de signal différentes.

C'est ainsi que le l'IEEE définit au niveau de la sous couche MAC deux techniques d'accès que sont la DCF et la PCF :

- La technique DCF est conçue pour prendre en charge le transport des données dans lequel tous les utilisateurs désirant transmettre ont une chance égale d'accéder au support, ce mode repose sur la technique CSMA/CA dont le principe est avant de transmettre la station écoute d'abord le support et si aucune activité n'est détectée pendant une durée bien déterminée elle peut alors transmettre. Par contre si le support est occupé elle prolonge son écoute jusqu'à ce que le support devient libre, comme sa on évite les collisions en utilisant des trames d'acquiescement ACK, qui sont envoyés par la station de destination pour confirmer que les données ont été reçues de manière intacte.
- La technique PCF est un mode d'accès sans contention, basée sur l'interrogation successive des stations(polling) contrôlées par le point d'accès de façon à organiser les transmissions suivant un multiplexage temporel dynamique du canal de communication. Pour cela, les stations

envoient des trames spéciales appelées PR auxquelles le point d'accès dispose d'une priorité supérieure en utilisant des inter trames plus courtes que celles envoyées par les stations, toute fois le point d'accès doit s'assurer que les stations puissent accéder au support au moyen de la technique DCF, c'est pourquoi les deux modes sont alternés.

## Chapitre 2 Technologie LTE

---

### 2.1 Les réseaux mobiles LTE

#### 2.1.1 Généralités

Le LTE a été envisagé dès novembre 2004 comme l'évolution à long terme de l'UMTS (d'où son nom de Long Term Evolution), lors d'un atelier organisé par le 3GPP appelé Future Evolution Workshop [7]. Cette évolution était alors destinée à maintenir la compétitivité de l'UMTS sur un horizon de dix ans et au-delà. Les travaux sur cette nouvelle norme ont débuté au 3GPP en janvier 2005 avec une étude de faisabilité qui s'est conclue en septembre 2006 avec la définition des grands principes de la technologie LTE (3GPP 25.912, 2006). Les travaux de spécification proprement dits se sont alors déroulés jusqu'à décembre 2008, date où la première version des spécifications a été approuvée. Le LTE est ainsi défini dans la Version (Release) 8 du 3GPP. Du fait du saut technologique qu'il représente par rapport au HSDPA, le LTE est considéré comme constituant une quatrième étape de l'évolution des réseaux d'accès mobiles, ou 4G. On peut ainsi véritablement parler d'une révolution de l'UMTS, plutôt que d'une évolution.

À l'instar de chaque nouvelle génération de réseau d'accès, le LTE a pour objectif de proposer une capacité accrue et fait appel à une nouvelle technique d'accès à la ressource fréquentielle. Ce chapitre décrit la norme LTE, et explique les choix de conception effectués. En particulier, les évolutions technologiques par rapport au HSPA sont largement documentées.

Notons que le développement de la famille de systèmes CDMA 2000 ne connaîtra pas d'évolution comparable au LTE. En effet, les opérateurs ayant déployé ces systèmes ont fait le choix du LTE pour la quatrième génération de réseaux mobiles, de sorte que le développement de la famille CDMA 2000 est destiné à s'arrêter.

## 2.1.2 Les motivations pour l'introduction du LTE

L'émergence du LTE est liée à une conjonction de facteurs techniques et industriels qui sont décrits au sein de cette section

### *a La Capacité*

La capacité d'une cellule correspond au volume de trafic total maximal par unité de temps qu'elle peut écouler en situation de forte charge au cours d'une période donnée. La capacité d'une cellule est conditionnée par l'efficacité spectrale du système et la ressource spectrale disponible. Il est connu que les techniques employées par les évolutions HSPA impliquent un partage des ressources entre les UE (utilisateurs) connectés simultanément à une même cellule. Aussi, la présence de plusieurs UE actifs sous une même cellule se traduit par une réduction du débit fourni à chacun. En particulier, le débit moyen par utilisateur en situation de forte charge peut être approché par la capacité divisée par le nombre d'UE actifs dans la cellule sous certaines conditions (interférences, emplacements des utilisateurs,...). La capacité d'un réseau limite donc la valeur des débits dans un scénario impliquant plusieurs UE actifs, où le nombre d'UE pouvant être servis simultanément avec un débit donné.

L'accroissement des besoins de capacité est une constante dans l'évolution des réseaux mobiles. En effet, le progrès technologique des réseaux encourage de nouveaux types d'usages, grâce à une expérience utilisateur plus confortable et un coût pour l'abonné généralement stable ou décroissant.

Ces nouveaux usages, couplés à la démocratisation de leur accès, incitent en retour à une utilisation plus intensive des réseaux. Les besoins de capacité vont donc croissants et la technologie se doit d'évoluer constamment pour les satisfaire.

Les gains associés aux évolutions HSPA et HSPA+ ont renforcé la capacité des réseaux par rapport à la Release 99 et au GSM. Toutefois, cet accroissement est jugé trop faible à terme par les opérateurs. La mise sur le marché de terminaux tels que les smartphones (téléphones portables intelligents) ou les clés 3G+ a entraîné l'explosion des usages de services de données mobiles. L'utilisation de réseaux mobiles comme alternative aux réseaux de données résidentiels est aussi à l'origine de la très forte

croissance du trafic de données mobiles. Le facteur de croissance annuelle de ce dernier au niveau mondial était supérieur à 100 % en 2011 et ce rythme devrait se maintenir dans les années suivantes. Face à cette augmentation du trafic, les opérateurs de réseaux 3G doivent activer de nouvelles porteuses s'ils souhaitent maintenir des débits satisfaisants. Cette activation est envisageable sous réserve de disponibilité des ressources fréquentielles nécessaires. Or, dans de nombreux pays, le nombre de porteuses disponibles par opérateur est trop limité pour permettre un accompagnement de la montée en charge des réseaux. Cette limitation se traduit aux heures chargées par des rejets d'appels et par une réduction des débits fournis aux abonnés.

Fin 2004, date à laquelle le LTE a été pour la première fois discuté au 3GPP, les prévisions de trafic indiquaient déjà clairement que les besoins de capacité augmenteraient significativement. On constate a posteriori que cette anticipation s'est vérifiée. Une raison majeure ayant motivé l'introduction du LTE est par conséquent le besoin d'accroître la capacité des réseaux mobiles.

### ***b Les Débits***

L'évolution des débits suit une progression semblable à celle de la capacité, chaque nouvelle technologie de réseaux mobiles augmentant les débits et suscitant une attente de débits supérieurs. Il était ainsi également clair dès 2004 que le LTE devrait fournir de très hauts débits. Au-delà des limitations capacitaires, le débit fourni à un utilisateur dépend de ses conditions radio, liées en particulier à sa position dans la cellule, des techniques de transmission employées et de la ressource spectrale disponible.

Les valeurs des débits fournis aux abonnés ont nettement crû avec l'introduction des techniques HSPA et HSPA+. L'introduction de débits supérieurs à ceux fournis par les technologies HSPA est toutefois une demande forte des utilisateurs et donc des opérateurs. Cette exigence est principalement guidée par la volonté d'offrir en mobilité une expérience utilisateur comparable à celle offerte par les réseaux résidentiels. L'utilisateur peut ainsi accéder à ses services favoris chez lui ou hors de son domicile avec une fluidité homogène. En complément, le débit est jugé comme un

facteur de comparaison entre opérateurs et une course aux débits est en marche dans certains pays. Enfin, des débits toujours plus élevés ouvrent la porte à l'introduction de nouveaux services, sources de revenus et/ou de différenciation pour les opérateurs.

L'attente des opérateurs de fournir des débits supérieurs à ceux offerts par les réseaux HSPA s'est donc confirmée au cours du temps, et est aujourd'hui un des motifs de déploiement du LTE.

### ***c La Latence***

La latence d'un système est la mesure du délai introduit par ce système. On distingue deux types de latence :

- la latence du plan de contrôle,
- la latence du plan usager.

La latence du plan de contrôle représente le temps nécessaire pour établir une connexion et accéder au service. La latence du plan usager représente le délai de transmission d'un paquet au sein du réseau une fois la connexion établie.

De manière générale, la latence traduit donc la capacité du système à traiter rapidement des demandes d'utilisateurs ou de services. Une latence forte limite l'interactivité d'un système et s'avère pénalisante pour l'usage de certains services de données.

L'UMTS et ses évolutions HSPA [12] offrent une latence du plan usager supérieure à 70 ms, valeur trop importante pour offrir des services tels que les jeux vidéo en ligne. L'amélioration de la latence est un des éléments ayant concouru à la décision de définir un nouveau système.

### ***d L'adaptation au spectre disponible***

La technologie UMTS contraint les opérateurs à utiliser des canaux de 5 MHz. Cette limitation est pénalisante à deux titres.

- Les allocations spectrales dont la largeur est inférieure à 5 MHz ne peuvent pas être utilisées (sauf pour le TD-SCDMA), ce qui limite le spectre disponible.
- En cas de disponibilité de plusieurs bandes spectrales de largeur de 5 MHz, un opérateur est dans l'incapacité d'allouer simultanément plusieurs porteuses à un même UE. Cette contrainte limite le débit maximal potentiel du système ainsi que la flexibilité de l'allocation des ressources spectrales aux utilisateurs. Il faut noter que cette contrainte a été partiellement levée en HSPA+ Release 8 avec la possibilité de servir un UE sur deux porteuses de 5 MHz simultanément.

Un consensus s'est ainsi imposé sur le besoin d'un système dit agile en fréquence, capable de s'adapter à des allocations spectrales variées. Cette agilité est un objectif de conception fort du LTE.

#### ***e L'émergence de l'OFDM***

Les travaux scientifiques sur la technique d'accès OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [8], considérée pour les systèmes de radiodiffusion dès la fin des années 1980, se sont multipliés au début des années 2000 dans l'optique d'une application aux réseaux mobiles. L'adaptation de cette technique aux terminaux mobiles pour supporter de hauts débits fut possible grâce aux progrès conjugués en traitement du signal et dans les équipements hyperfréquences. L'histoire récente des réseaux mobiles montre qu'une nouvelle génération est associée à une nouvelle méthode d'accès aux ressources radio. Or, l'OFDM offre plusieurs avantages pour des systèmes radio mobiles. En particulier, il bénéficie d'une grande immunité contre l'interférence entre symboles créée par les réflexions du signal sur les objets de l'environnement. En outre, l'OFDM permet de gérer simplement des largeurs de bande variables et potentiellement grandes, ce qui, comme nous l'avons vu à la section précédente, était une motivation de l'introduction du LTE.

Enfin, l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) assure un partage aisé des ressources fréquentielles entre un nombre variable d'utilisateurs bénéficiant

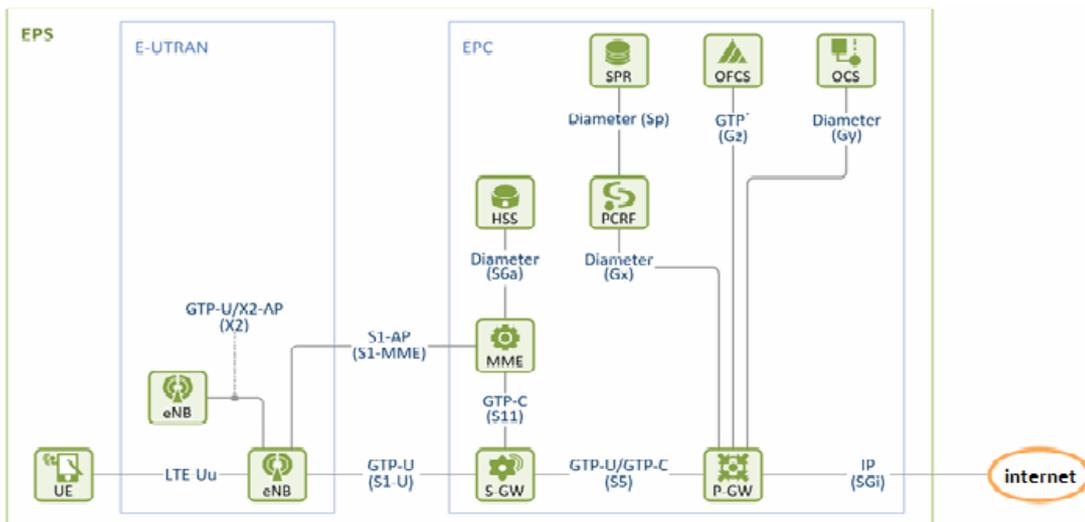
de débits divers. Pour ces raisons, il fut décidé de baser le LTE sur l'OFDM, en rupture avec le CDMA. Les progrès scientifiques ont donc également eu leur importance dans la décision prise par le 3GPP de définir un système de nouvelle génération.

### ***f Le contexte industriel***

Un élément clé ayant déclenché les premiers travaux du 3GPP sur la définition d'un nouveau système fut l'émergence du système WiMAX mobile (Worldwide Interoperability for Microwave Access mobile), normalisé par l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) et le WiMAX Forum. Le 3GPP regroupe les entreprises qui ont accompagné le développement des réseaux mobiles basés sur le GSM ces vingt dernières années. L'IEEE et le WiMAX Forum regroupent quant à eux certaines de ces entreprises dites « historiques », mais aussi des challengers qui avaient pour objectif de pénétrer le marché des télécommunications mobiles sur la base d'une rupture technologique : le WiMAX mobile, également connu sous le nom IEEE 802.16e. Les travaux de définition du WiMAX mobile commencèrent au début des années 2000 et aboutirent à une première version de spécifications en 2005. Le WiMAX mobile, basé sur une technique d'accès OFDM, offre alors une capacité supérieure à celle fournie par l'UMTS et son évolution HSDPA Release 5. Les entreprises membres du 3GPP se devaient de réagir, et c'est en 2005 que débutèrent les études sur le LTE. Certains membres du 3GPP virent là l'opportunité de reprendre des parts au sein d'un marché de la 3G dominé par un cercle restreint d'entreprises, tant au niveau des terminaux qu'au niveau des infrastructures réseau. Un dernier point majeur est celui des droits de propriété intellectuelle. L'UMTS fut développé sur la base d'une technique CDMA dont les brevets fondateurs sont détenus par un nombre très réduit de sociétés. La redistribution des droits de propriété intellectuelle associés aux produits implémentant ces brevets est donc particulièrement inégale et affecte significativement les marges des entreprises ne disposant pas d'un portefeuille de brevets conséquent. La définition d'un nouveau système basé sur une technique bien connue du monde scientifique et industriel était donc une opportunité pour équilibrer la balance des royalties entre les différents acteurs du monde des télécoms. Au delà des aspects techniques, on constate donc que les enjeux industriels, stratégiques et financiers ont largement contribué à l'avènement du LTE.

## 2.2 Architecture Générale du LTE

Les efforts de standardisation du groupe 3GPP ont mené à la définition du EPS (Evolved Packet System) [11] qui est composé d'une partie réseau cœur connu sous le nom de EPC ( Evolved Packet Core) et d'une partie radio E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network). Ci-dessous (Figure.1) un schéma synoptique d'interconnexion des différents éléments composant le système EPS[9].



**Figure 2.1** Architecture EPS.

L'eNodeB dispose de deux interfaces de type S1, dont S1-AP avec le MME pour la partie plan de control et S1-U avec le S-GW pour la partie plan utilisateur. L'interface X2 définie entre deux eNodeB permet de transporter les paquets entre deux eNodeB et donc minimiser les pertes de paquets lors de la mobilité du UE dans le E-UTRAN.

A la différence des réseaux 2G et 3G où on distinguait les deux domaines de commutation de circuit (CS, Circuit switched) et commutation de paquets (PS, Packet Switched) dans leur réseau cœur, l'EPC du LTE comprend que le domaine PS. On dit que l'EPC est un cœur de réseau tout IP. Cela signifie que tous les services devront être offerts sur IP y compris ceux qui étaient auparavant offerts par le domaine circuit tels que la voix, le SMS et tous les services de téléphonie, etc.

Entité	Fonction
<b>UE</b>	L'UE se connecte à l'eNodeB via l'interface LTE-Uu,
<b>eNodeB</b>	<p>Fournit l'interface radio de transmission avec le UE incluant modulation/démodulation et codage/décodage.</p> <p>Gestion des ressources radio (RRM Radio Ressource Managment) sous le contrôle du MME</p> <p>Chiffrement et compression des entêtes IP</p>

**Tableau 2.** Eléments de la partie radio.

Entité	Fonction
<b>MME</b>	<p>Le module Mobility Managment Entity est l'élément principal de contrôle de la partie radio, il permet entre autres:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Suivi des UE Mode Inactif(idle),</li> <li>➤ Authentification des utilisateurs et Roaming via HSS,</li> <li>➤ Le choix du S-GW pour un UE</li> <li>➤ Activation et désactivation des Bearer</li> </ul>
<b>S-GW</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Termine les communications vers la partie radio.</li> <li>➤ Point d'ancrage pour le handover inter-eNodeB.,</li> </ul>
<b>PDN-GW/P-GW</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Interfaçage avec le PDN</li> <li>➤ Allocation d'adresse Ip aux UE</li> <li>➤ Routage Ip</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Filtrage des paquets</li> <li>➤ Handover avec les réseaux 3GPP et non 3GPP et entre les S-GW</li> <li>➤ Fonctions PCEF</li> </ul>
<b>HSS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Base de données des profils des utilisateurs</li> <li>➤ Elle alimente le MME en information d'authentification et profil.</li> </ul>
<b>PCRF</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Envoie les règles à appliquer au PCEF (P-GW)</li> </ul>
<b>SPR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fournit les informations de souscription au PCRF</li> </ul>
<b>OCS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Gestion du crédit des UE</li> <li>➤ Fournit au PCEF(P-GW) les informations sur le crédit selon le temps, le volume ou l'évènement.</li> </ul>
<b>OFCS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Envoi au système de facturation les CDR construits à partir des informations fournis par le PCEF(P-GW).</li> </ul>

**Tableau 3.1** Eléments de la partie EPC.

## 2.3 Architecture de l'interface radio

### 2.3.1 Les couches de l'interface radio

#### *a La couche physique*

La couche physique, appelée également Layer 1 (L1) ou couche PHY, représente la couche physique. Son rôle est d'assurer la transmission des données sous une forme capable de se propager dans l'air et de résister aux différentes perturbations inhérentes au canal radio

mobile. D'un point de vue fonctionnel, la couche physique offre un service de transport sur l'interface air à la couche MAC.

La couche physique réalise les fonctions suivantes pour la transmission de données :

- le codage de canal, qui protège les bits d'information contre les erreurs de transmission, en introduisant de la redondance dans la séquence de bits transmis ;
- la modulation, qui associe les bits à transmettre à des symboles de modulation capables d'imprimer une onde électromagnétique ;
- les traitements spatiaux (dits MIMO), qui précodent les symboles de modulation afin de les transmettre de plusieurs antennes (par exemple pour donner une direction au signal émis) ;
- la modulation multiporteuse, qui associe le signal à transmettre sur chaque antenne à des porteuses multiples, selon le principe de l'OFDM pour la voie descendante et du SC-FDMA en voie montante

### ***b La couche MAC***

La couche MAC est constituée de trois sous-couches :

- ***PDCP (Packet Data Compression Protocol) :***

Assure des fonctions de sécurité et de transfert des données :

1. compression d'en-tête ;
2. chiffrement des données et de la signalisation RRC ;
3. protection de l'intégrité de la signalisation RRC ;
4. détection et suppression des doublons (unité de données PDCP reçues deux fois) ;
5. remise en séquence des paquets.

- ***RLC (Radio Link Control) :***

Assure les fonctions de contrôle du lien de données dévolues à la couche 2 du

modèle OSI (Data Link Control) :

1. détection et retransmission des PDU manquantes (en mode acquitté) permettant la reprise sur erreur ;
2. remise en séquence des PDU pour assurer l'ordonnancement des SDU à la couche supérieure (PDCP) ;
3. utilisation de fenêtres d'émission et de réception pour optimiser la transmission de données.

➤ **MAC (Medium Access Control) :**

permet l'accès et l'adaptation au support de transmission grâce aux fonctions suivantes :

1. le mécanisme d'accès aléatoire sur la voie montante ;
2. la correction d'erreurs par retransmission HARQ lors de la réception d'un acquittement HARQ négatif ;
3. les allocations dynamiques et semi-statiques de ressources radio (scheduling) ;
4. le maintien de la synchronisation sur le lien montant ;
5. la priorisation des flux sur le lien montant

**c La couche RRC**

La couche RRC, pour Radio Ressource Control, sert au contrôle de l'interface radio. On peut en effet constater sur la figure3, que la couche RRC est connectée aux quatre autres couches, via des points d'accès de contrôle : RRC est responsable de la configuration et du contrôle des couches de niveau 1 (PHY) et 2 (MAC, RLC et PDCP). C'est la spécificité de cette couche, véritable chef d'orchestre de l'interface radio.

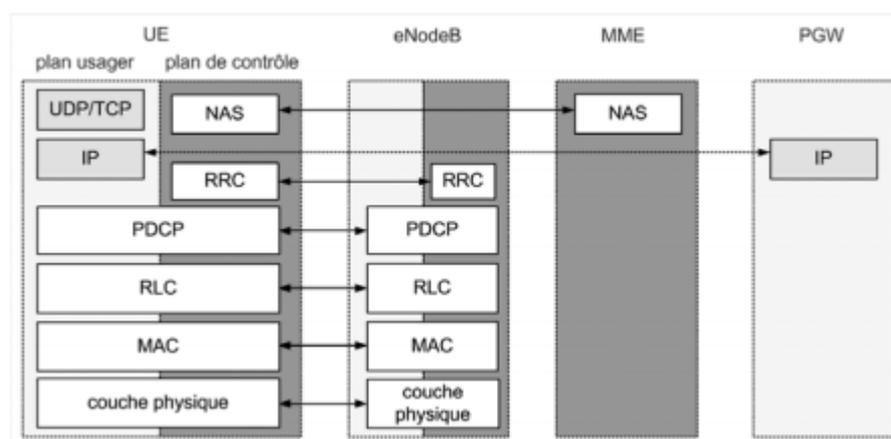
Cette couche assure ainsi les fonctions suivantes :

1. la diffusion et le décodage d'Informations Système de niveaux AS et NAS sur la cellule, pour tous les UE en mode veille présents sur celle-ci, donnant notamment les paramètres d'accès à la cellule, de mesure et de re sélection en mode veille ;

2. l'envoi et la réception de paging, pour l'établissement d'appel destiné à un UE en mode veille, pour informer les UE de la cellule que les Informations Système sont modifiées ou encore pour les alerter en cas de force majeure (par exemple, en cas de tremblement de terre ou de tsunami) ;
3. la gestion de la connexion RRC (établissement, reconfiguration et relâche) ;
4. le contrôle des radio bearers (planificateurs de ressources radiofréquences) associés à des services ou à la signalisation ;
5. le contrôle des mesures de l'UE et leur remontée à l'eNodeB en mode connecté ;
6. la mobilité en mode connecté ;
7. le contrôle de la mobilité en mode veille (sélection et re sélection de cellule)
8. et la transmission de la signalisation des couches supérieures NAS

### 2.3.2 Plan usager et plan de contrôle

Ces deux plans sont matérialisés par des piles protocolaires qui partagent un tronc commun (la partie inférieure) et qui se distinguent notamment dans les interactions avec les couches supérieures : alors que la signalisation NAS est véhiculée par le plan de contrôle de l'interface radio, son plan usager permet de transporter sur celle-ci les paquets délivrés ou à destination de la couche IP. Ces deux piles protocolaires sont représentées sur la figure ci après.



**Figure2.2** . Piles protocolaires des plans usager et de contrôle sur l'interface radio.

En LTE comme en GSM et UMTS, les protocoles du plan usager de l'interface radio correspondent aux deux premières couches du modèle OSI. La structure de l'interface radio du système LTE possède de nombreuses similitudes avec celle définie pour l'UMTS. La principale différence réside dans le rôle de la couche PDCP (Packet Data Convergence Protocol). Ce protocole n'est pratiquement pas utilisé sur les réseaux UMTS actuels. En LTE en revanche, le protocole PDCP est utilisé systématiquement, car il est impliqué dans la sécurité de l'Access Stratum (chiffrement et intégrité). On notera cependant que toutes ces couches, si elles portent le même nom en UMTS et en LTE, sont néanmoins très différentes dans ces deux systèmes.

Les données traitées par PDCP, RLC, MAC et PHY appartiennent :

- **au plan de contrôle** lorsqu'il s'agit de données de signalisation communiquées par la couche RRC ;
- **au plan usager** lorsqu'il s'agit d'autres données (transmises par la couche IP).

Les notions de plan de contrôle et de plan usager sont transparentes aux couches RLC, MAC et PHY : celles-ci traitent les données délivrées par la couche supérieure, suivant la configuration indiquée par RRC, sans distinction a priori entre données de contrôle et données de l'utilisateur. Nous verrons plus loin que le traitement effectué par PDCP diffère en revanche suivant la nature des données reçues.

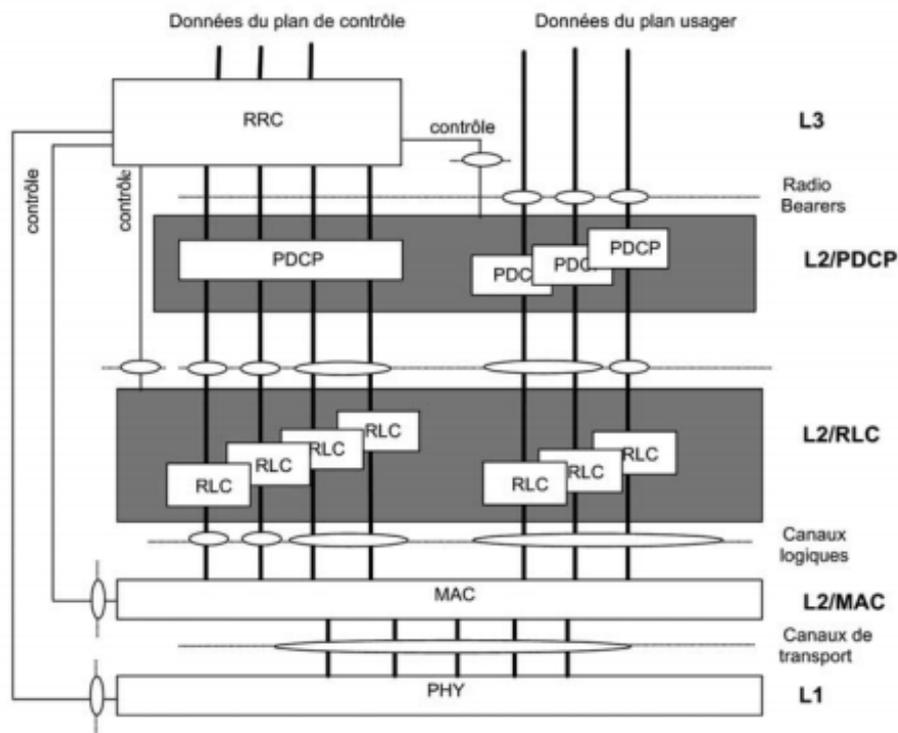
Indépendamment de ces deux plans, chaque couche utilise dans son protocole des informations de contrôle qu'elle échange avec l'entité paire distante, dans l'en-tête ajouté par la couche à l'unité de donnée. Cela permet à l'entité paire distante de traiter les données transmises de façon appropriée. Il s'agit donc d'informations de contrôle propres à la couche.

### 2.3.3 Interactions entre les couches

La figure 3 détaille le découpage en couches et les interactions logiques entre celles-ci pour les données du plan de contrôle et celles du plan usager. Cette architecture s'applique à l'UE et à l'eNodeB.

Deux entités paires distantes d'une couche (N) échangent entre elles des unités de données appelées Protocol Data Unit (PDU), formées d'un en-tête du protocole associé à cette couche N et de blocs de données. Ces blocs sont des unités de données délivrées par la couche

supérieure (M), ou des segments de ces unités de données si ces dernières doivent être segmentées avant la transmission sur l'interface radio. L'unité de données de la couche M est appelée Service Data Unit (SDU) dans le contexte de la couche N, car elle porte des données de service que la couche N n'interprète pas. Ainsi, une PDU est-elle aussi une SDU pour la couche immédiatement inférieure, et ainsi de suite.



**Figure 2.3** La modélisation en couches protocolaires de l'interface radio

Par exemple, la couche PDCP de l'UE traite un paquet reçu de la couche IP et lui ajoute un en-tête, contenant notamment un numéro de séquence PDCP. Cette unité de donnée forme une nouvelle PDU PDCP, qui doit être transmise à la couche PDCP distante (celle de l'eNodeB). Pour cela, PDCP délivre la PDU à l'entité de la couche RLC associé au service. Cette entité RLC reçoit donc une nouvelle SDU RLC, qu'elle peut éventuellement segmenter ou concaténer avec d'autres SDU RLC précédemment reçues de la couche PDCP, afin de constituer une PDU RLC qui pourra être transmise sur l'interface radio sans segmentation ultérieure.

À son tour, la couche RLC ajoute un en-tête à cette PDU qu'elle a formée, en-tête qui permet à l'entité distante de reconstituer la SDU RLC d'origine en rassemblant les segments reçus dans différentes PDU ou en identifiant les blocs concaténés dans cette PDU.

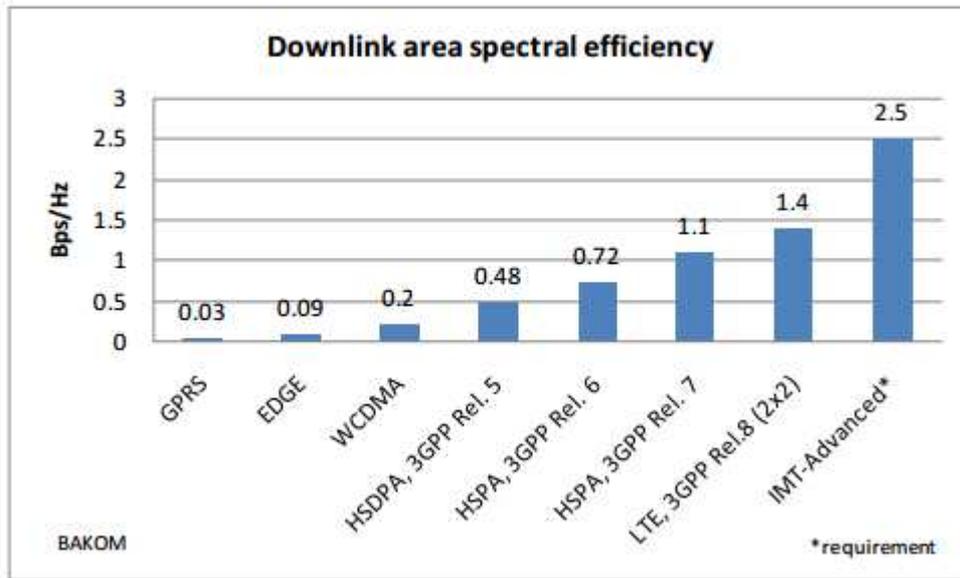
Ce transfert vertical de SDU entre couches du même équipement s'effectue via des points d'accès logiques entre couches, désignés par le terme générique Service Access Points (SAP) et représentés par des ellipses sur la figure précédente. Ils portent des noms spécifiques selon le niveau considéré :

- radio bearer au niveau RLC/PDCP,
- canal logique entre RLC et MAC,
- canal de transport entre MAC et PHY.

## **2.4 Principes de la technologie LTE**

### **2.4.1 Aperçu**

Par rapport à la norme UMTS actuelle, la principale nouveauté du LTE réside dans l'introduction du procédé de codage par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous porteuses OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour les liaisons descendantes et au SC-FDMA (Single Carrier- - Frequency Division Multiple Access), une méthode voisine de l'OFDM, pour les liaisons ascendantes. Ces procédés permettent l'exploitation du système avec des largeurs de bande du canal allant de 1,4 MHz à 20 MHz et l'utilisation de systèmes de radiocommunication mobile dans diverses largeurs de bande, sans qu'ils soient liés à l'écart habituel entre les canaux de 5 MHz. A partir du LTE Version 10, plusieurs canaux descendants adjacents peuvent être réunis dans une bande de fréquences. La figure 4 montre l'évolution de l'efficacité du spectre en liaison descendante avec différentes technologies de radiocommunication mobile.



**Figure 2.4** . Efficacité du spectre avec diverses technologies de radiocommunication mobile.

Grâce à des largeurs de bande flexibles et une division très fine des porteuses, le LTE atteint des vitesses nettement plus élevées que ses prédécesseurs. Il permet d'adapter rapidement les paramètres radio au canal radio en recourant au nouveau procédé de codage OFDMA. Avec ce procédé, le LTE constitue aussi une plateforme remarquable pour la transmission de services de radiodiffusion (Multicast, Broadcast) dans les réseaux de radiocommunication mobile. En outre, le LTE permettra pour la première fois de franchir la barre des 100 MBps en liaison descendante: la nouvelle norme promet – du moins en théorie – des débits pouvant aller jusqu'à 326 MBps en liaison descendante et 86 MBps en liaison ascendante. Cette augmentation est possible surtout grâce à l'utilisation d'un nombre d'antennes pouvant aller jusqu'à 8 dans la station de base et le terminal (MIMO) ainsi qu'à l'exploitation d'un multiplexage spatial (SDMA) par un codage adéquat de chacun des signaux d'antennes.

Dans la première phase de construction déjà, on devrait pouvoir atteindre des débits de 100 MBps. Le LTE offre non seulement des débits nettement plus élevés et une meilleure utilisation du spectre que ses prédécesseurs, mais aussi un temps de transfert des paquets de l'expéditeur au destinataire (temps de latence) d'environ 5 millisecondes, au lieu des 70 millisecondes nécessaires avec l'UMTS.

## 2.4.2 Performances du LTE

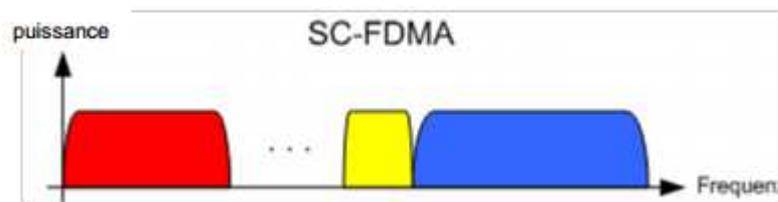
Les objectifs de performance pour le LTE ont été définis par l'organisation de normalisation 3GPP [13] (Third Generation Partnership Project) au cours des années 2005/2006. Les principales données techniques de la nouvelle interface radio sont les suivantes :

- augmentation **importante** du débit en liaison descendante pouvant atteindre jusqu'à 100 Mbps pour une largeur de bande de 20 MHz et augmentation de l'efficacité du spectre jusqu'à 5 Bit/s/Hz avec deux antennes au niveau du téléphone mobile (3 à 4 fois l'efficacité du spectre de l'UMTS version 6 avec une antenne émettrice et deux antennes réceptrices);
- augmentation **importante** du débit en liaison ascendante pouvant atteindre jusqu'à 50 Mbps pour une largeur de bande de 20 MHz et augmentation de l'efficacité du spectre jusqu'à 2,5 Bit/s/Hz (2 à 3 fois l'efficacité du spectre de l'UMTS version 6 avec une antenne émettrice et deux antennes réceptrices);
- largeurs de bandes de 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz et 20 MHz;
- le temps de latence (délai) par l'interface radio entre le téléphone portable et le réseau fixe doit être inférieur à 5 ms; le délai de propagation aller-retour est inférieur à 10 ms;
- les procédures en mode duplex FDD et TDD sont supportées;
- débits de données supérieurs dans les bords de la cellule;
- mobilité jusqu'à 500 km/h (optimisée pour 0 à 15 km/h);
- respect de plusieurs exigences relatives à la qualité de services (QoS) et en matière de mobilité ;
- intégration d'antennes intelligentes (MIMO);
- Faibles coûts de transmission par bit pour l'interface radio;
- architecture simple, éléments de réseau moins nombreux, interfaces ouvertes;
- consommation d'énergie aussi faible que possible des terminaux (grande autonomie).



des fréquences porteuses. La complexité de la liaison ascendante vers la station de base a été en grande partie placée dans la station de base, ce qui a permis de concevoir des terminaux moins chers et plus performants du point de vue énergétique. Le procédé d'accès multiple SC-FDMA en liaison ascendante constitue une nouveauté dans le monde de la radiocommunication mobile.

Chaque utilisateur reçoit de la station de base une part du canal de fréquence ascendant pour une durée déterminée. Cette attribution se fait à de courts intervalles de temps. La figure 6 présente l'exemple d'un signal reçu à la station de base pour trois utilisateurs.



**Figure 2.6** Représentation schématique du spectre émetteur en liaison ascendante pour trois utilisateurs.

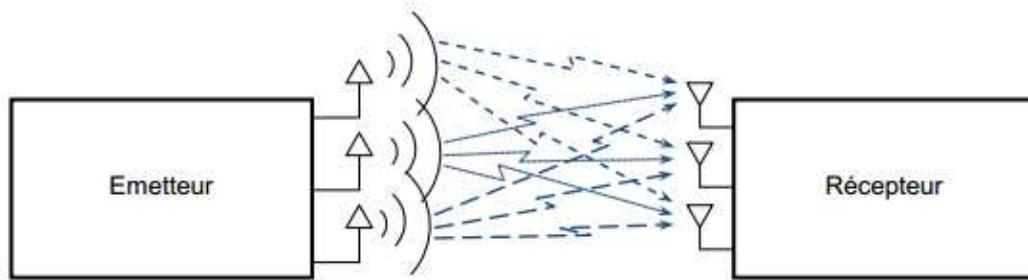
Comme avec l'OFDM, les données sont réparties sur les sous-porteuses, une transformation de Fourier (FT) étant appliquée comme précorrection. C'est pourquoi, dans le cas du SC-FDMA, on parle de quasi-sous-porteuses. Les quasi-sous-porteuses utilisées par un utilisateur sont toujours adjacentes, de sorte qu'elles forment un seul bloc. En liaison ascendante, il en résulte un accès FDMA simple. La répartition des quasi-sous porteuses entre les utilisateurs est conçue de manière à ce qu'à un moment donné, dans la même cellule le même bloc de sous-porteuses ne puisse pas être utilisé par deux téléphones portables actifs.

## 2.4.5 MIMO

Les systèmes d'antennes MIMO (entrées multiples et sorties multiples) jouent un rôle important pour le LTE. Seule l'utilisation d'antennes intelligentes permet d'obtenir une efficacité du spectre élevée. Contrairement à l'UMTS, avec le LTE, les systèmes d'antennes MIMO font partie intégrante du système avec diverses options d'implémentation, aussi bien au niveau de la station de base qu'au niveau du téléphone mobile.

La technologie MIMO permet la transmission et la réception parallèle et simultanée de données sur la même fréquence avec plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du

récepteur. Plusieurs formes d'applications de MIMO sont prévues pour le LTE: elles peuvent être cataloguées comme multiplexage spatial (Space Multiplex), diversité spatiale (Space Diversity), formation de faisceaux (Beam forming - BF), ou dans un mélange adéquat de ces dernières. Le service utilisé, le débit de données, l'état du canal de télécommunication mobile et les propriétés du téléphone portable déterminent où et quand une forme de MIMO est utilisée. Le principe est représenté schématiquement par la figure 7.



**Figure2.7 :** Principe de la transmission multi-antennes avec MIMO (3x3)

La diversité spatiale permet d'améliorer sensiblement la qualité des canaux de radiocommunication en cas d'évanouissement lent et rapide du signal. L'information rétroactive (feedback), du téléphone mobile à la station de base, permet une attribution optimale des ressources temporelles et en fréquences (PRU) sur une liaison déterminée. Les ressources du canal (PRU) sont attribuées aux utilisateurs qui disposent des meilleures conditions momentanées du canal de transmission (Multi User Space Diversity) pour maximiser le débit de données. Le multiplexage spatial permet un très haut débit, à condition que le canal radio soit de bonne qualité (puissance de réception moyenne élevée, SIR élevé et faible corrélation entre les canaux radioélectriques des antennes).

Le multiplexage peut être mono-utilisateur ou multi-utilisateurs. Dans les deux cas, le débit du système est le même. Avec le multiplexage spatial mono-utilisateur, les flux de données parallèles des différentes antennes émettrices de la station de base sont transmis à un seul utilisateur. Le nombre des flux indépendants dépend de la configuration des antennes MIMO. Un MIMO 4x4 (4 antennes en réception/émission) permet, par exemple, au maximum de, quadrupler le débit par rapport à un système d'antenne conventionnel (1x1). Avec le multiplexage spatial multi-utilisateur, les flux de données partent de la station de base vers plusieurs utilisateurs (SDMA). Un MIMO 4x4 permet, en liaison descendante, de desservir 4

utilisateurs avec les mêmes ressources (PRU). Le débit de données par utilisateur correspond alors à un quart de celui du multiplexage spatial mono- utilisateur, le débit du système est le même puisque 4 utilisateurs utilisent les ressources.

Le rapport entre le multiplexage spatial et la diversité spatiale a été analysé en fonction du débit du système (débit de données total dans la cellule) et du débit des utilisateurs. Avec le multiplexage spatial mono-utilisateur, il est possible d'obtenir des débits élevés pour un seul utilisateur, si le rapport signal-interférence (SIR) est élevé. Toutefois, des simulations montrent que dans un système limité par des interférences, les zones présentant un SIR élevé sont relativement restreintes, raison pour laquelle le multiplexage spatial semble inapproprié. Le multiplexage spatial mono-utilisateur peut ce pendant être utilisé pour des cellules isolées ou pour des utilisateurs se trouvant à proximité de la station de base, pour la transmission de débits très élevés. Pour les systèmes de radiocommunication mobile, en général limités par les interférences et présentant des SIR peu élevés, la diversité spatiale présente plus d'avantages que le multiplexage spatial et permet dans l'ensemble d'obtenir un débit du système plus élevé.

Avec la formation de faisceaux (beam forming), plusieurs utilisateurs peuvent être desservis simultanément avec les mêmes ressources (SDMA). Par ailleurs, de forts signaux d'interférence peuvent être supprimés.

Dans la pratique, des formes mixtes combinant les différentes applications MIMO deviendront importantes pour le LTE. Par exemple, la formation de faisceaux permet de créer des secteurs et d'y utiliser le multiplexage spatial ou la diversité spatiale, selon la qualité du canal radio et la distance entre l'utilisateur et la station de base.

## Chapitre 3 Techniques de Handover /Offloading

---

### 3.1 Introduction

Les nouveaux réseaux intégrés sans fil et mobiles font leur apparition pour offrir une large gamme de services partout et à tout moment à travers des réseaux hétérogènes. Les nouveaux terminaux mobiles sont équipés des interfaces hétérogènes et peuvent fonctionner avec toutes les technologies d'accès disponibles pour fournir les services correspondants. Le concept Always Best Connected (ABC) assure aux utilisateurs situés dans un système hétérogène la meilleure connectivité n'importe où et à tout moment. Dans ce contexte, les terminaux mobiles sont toujours en mesure de choisir le lien d'accès le plus approprié parmi les choix possibles. La stratégie de sélection représente un des éléments essentiels pour supporter le concept ABC et également assurer un handover transparent entre une multitude de technologies d'accès prenant en compte à la fois les préférences des utilisateurs et les caractéristiques des réseaux disponibles. Dans la littérature, plusieurs techniques ont été proposées et analysées [10]. Nous présentons dans ce chapitre un état de l'art sur les techniques de sélection abordées dans la littérature introduisant les stratégies de sélection les plus récentes et les plus intéressantes et mettant en évidence leurs caractéristiques et limitations principales.

### 3.2 Procédures de Handover

Le processus de handover est l'ensemble des opérations mises en œuvre afin de permettre à un terminal mobile de passer d'un réseau à un autre sans aucune interruption de la conversation en cours. Les scénarios de handover peuvent être classés d'horizontal et de vertical. Le handover horizontal est le processus de transfert d'un appel entre des cellules différentes d'un même réseau. Il est généralement réalisé dans les réseaux cellulaires homogènes lors de déplacement d'un utilisateur entre deux cellules de la même technologie d'accès. Ce processus est requis normalement à cause de la mobilité et de l'impossibilité de la maintenance de la connexion avec la même station de base où l'accès au service devient indisponible. En revanche, le

handover vertical est le processus de transfert d'un appel entre deux différentes technologies d'accès. Ce processus est indispensable dans le domaine des réseaux hétérogènes et peut être impliqué pour des raisons de satisfaction des désirs des utilisateurs plutôt que des raisons de connectivité. Par exemple, le terminal mobile peut vouloir se connecter à un autre réseau pour une meilleure qualité de connexion même si la connexion avec l'ancien réseau est toujours possible. En général, le processus de handover peut être réalisé en passant par trois étapes principales.

### **3.2.1 Collecte de l'information et initiation de Handover**

Cette étape concerne la préparation et l'initiation de Handover. A cette étape, le terminal mobile détermine les réseaux disponibles dans son environnement et ensuite identifie leurs caractéristiques principales tels que la puissance du signal reçu, le niveau de l'interférence et le taux d'erreurs binaires. D'autres informations peuvent être également intéressantes telles que la vitesse de l'utilisateur, la capacité du terminal et le taux de charge de la batterie. Ces informations seront utilisées pour prendre la décision de Handover et ensuite l'effectuer en cas de nécessité. La consultation de ces informations peut être périodiquement réalisée ou reliée à l'arrivée de certains événements.

### **3.2.2 Décision de Handover et sélection d'un réseau**

Pendant la procédure de Handover, la décision de transfert est l'étape la plus importante qui affecte le fonctionnement normal de la communication. Une décision incorrecte peut dégrader la qualité de service et même interrompre la communication en cours. En général, cette étape assure la surveillance de la connexion avec le réseau en cours, la détermination de la nécessité de Handover, la sélection du réseau et le temps précis de transfert de l'appel.

En considérant les préférences des utilisateurs et les caractéristiques des réseaux disponibles, la stratégie de sélection adoptée permet à chaque utilisateur de choisir le réseau d'accès le plus approprié parmi les autres disponibles. Des instructions à la phase d'exécution seront fournies en fin de cette étape.

### **3.2.3 Exécution du Handover**

L'exécution de Handover concerne les démarches suivies afin de changer la connexion entre les deux réseaux concernés et finalement continuer la connexion avec le réseau choisi. Donc, cette étape est utilisée pour changer les canaux de l'ancien réseau vers le nouveau point d'accès (ou station de base) en suivant les instructions détaillées au cours de la phase de décision. Trois démarches sont incluses pendant cette période : l'établissement de la connexion avec le réseau cible, la libération des canaux avec le réseau en cours et l'invocation des services d'authentification nécessaires. Une fois le meilleur réseau d'accès sélectionné, et l'authentification avec le réseau cible réalisée, la session de communication se poursuivra par le nouveau réseau à travers une nouvelle interface radio. Il faut noter que l'exécution de Handover peut être réalisée de différentes méthodes générant plusieurs types de Handover. Dans le premier type, make-before-break, la connexion avec le nouveau réseau (AP ou BS) est établie avant la libération de la connexion avec l'ancien réseau et ce type de Handover est appelé soft Handover. Donc, le terminal mobile est relié à deux points d'accès (ou BS) pendant une certaine durée du temps. En revanche, avec le Handover de type break-before-make, la connexion avec l'ancien réseau est résiliée avant d'en établir une autre avec le nouveau réseau et ce type de Handover est appelé hard Handover. Le terminal mobile de ce type ne peut être relié qu'à un seul point d'accès (ou BS) en même temps.

Beaucoup de travaux avaient abordé les étapes de la décision et de l'exécution de Handover présentant des algorithmes de Handover ainsi que des protocoles de contrôle de la mobilité.

### **3.3 Contrôle de Handover**

Les étapes principales rencontrées afin d'effectuer le processus de Handover sont résumées par : la collection des informations, la décision et l'exécution. La décision de choix peut être faite soit par le réseau concerné, soit par le terminal mobile ou également en faisant participer les deux parties c.à.d. le réseau et le terminal mobile. Donc, du point de vue de la partie concerné par le contrôle, on peut distinguer quatre différents types de Handover.

### **3.3.1 Handover contrôlé par le mobile (MCHO)**

A ce type de handover, c'est le terminal mobile qui est le seul responsable de la décision de handover. Il effectue les mesures nécessaires et combine les informations requises pour la décision. Ensuite, en se basant sur la stratégie de sélection considérée, le terminal mobile prend la décision finale. Avec le handover MCHO, le réseau n'a aucune participation à la décision. Ce type de handover a l'avantage de la réduction de la complexité de réseau.

### **3.3.2 Handover contrôlé par le réseau (NCHO)**

Contrairement au handover contrôlé par le terminal mobile, la gestion de handover dans ce type est totalement effectuée par le réseau. Les mesures des paramètres ainsi que la décision de handover sont effectués dans la partie réseau. Il n'y a aucune participation du terminal mobile de la décision de handover.

### **3.3.3 Handover assisté par le mobile (MAHO)**

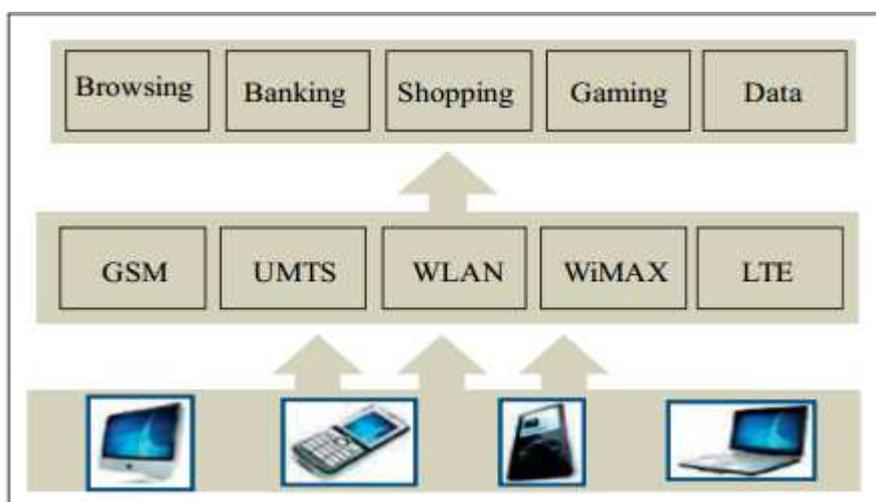
Dans ce type de handover, la décision finale est faite en combinant les efforts renforcés des deux parties concernées : le terminal mobile et le réseau. En fait, c'est le réseau qui s'occupe de prendre la décision de handover mais en se basant sur des informations et des mesures reçues de la part du terminal mobile. C'est le cas avec le système GSM.

### **3.3.4 Handover assisté par le réseau (NAHO)**

Dans le cas de handover assisté par le réseau, la décision finale de handover est également prise grâce à une participation conjointe du terminal et du réseau. Mais, dans ce cas, c'est le réseau qui combine des informations nécessaires à la décision de handover et les envoie au terminal mobile pour être utilisées lors de la décision de handover. Donc et contrairement au handover assisté par le mobile, c'est le terminal mobile qui a la responsabilité de prendre la décision finale de handover utilisant des informations envoyées de la part du réseau concerné.

### 3.4 Stratégie de sélection du réseau

Au sein du système hétérogène, une large gamme de services est toujours disponible pour les utilisateurs et plusieurs réseaux d'accès peuvent être exploités pour accéder à ces services. Comme illustré par la figure 8, l'utilisateur peut choisir n'importe quel réseau disponible pour effectuer ses services. La stratégie de sélection du réseau est le processus de choix du meilleur réseau d'accès parmi les autres disponibles. Le réseau d'accès sélectionné doit respecter à la fois les propres préférences de l'utilisateur et les caractéristiques des réseaux disponibles.



**Figure 3.1** : Environnement du réseau hétérogène sans fil.

La technique de sélection du réseau dans un système hétérogène permet d'évaluer normalement un grand nombre de critères concernant la capacité du terminal mobile, les contraintes des utilisateurs, le type d'application et les paramètres des réseaux. Ceci implique des compromis et d'autres considérations plus complexes lors de la décision.

Paramètres d'évaluation des performances. L'évaluation des performances d'un système hétérogène est une étape importante pour juger l'efficacité de la stratégie de sélection adoptée. En plus au niveau de la complexité accompagnée, les stratégies de sélection ou les algorithmes de handover peuvent également être évalués en plusieurs façons. Nous allons détailler les différents paramètres qui peuvent être mesurés afin d'estimer les performances d'un système hétérogène basé sur une stratégie de

sélection donnée : le retard, le nombre de handovers, le débit binaire, la taux d'erreurs binaires, la qualité de connexion des appels, les probabilités de blocage des appels et les probabilités de défaillance des appels.

### **3.5 Paramètres d'évaluation des performances**

L'évaluation des performances d'un système hétérogène est une étape importante pour juger l'efficacité de la stratégie de sélection adoptée. En plus au niveau de la complexité accompagnée, les stratégies de sélection ou les algorithmes de handover peuvent également être évalués en plusieurs façons. Nous allons détailler les différents paramètres qui peuvent être mesurés afin d'estimer les performances d'un système hétérogène basé sur une stratégie de sélection donnée : le retard, le nombre de handovers, le débit binaire, le taux d'erreurs binaires, la qualité de connexion des appels, les probabilités de blocage des appels et les probabilités de défaillance des appels.

#### **3.5.1 Le retard**

Le retard est la durée du temps qui sépare entre le déclenchement et la terminaison du processus de handover. Cette valeur devient plus importante pour les applications sensibles au retard tels que la voix ou les sessions multimédia. Une grande valeur du retard peut dégrader la qualité de l'appel et dans quelques cas couper la conversation en cours. Il est donc important de garder une réaction rapide de transfert de la connexion entre les réseaux concernés ce qui permet de garder la session en cours sans aucune perturbation notable au niveau de la qualité de service. Plusieurs facteurs peuvent influencer la durée du retard tel que le nombre de métriques de choix considérés, le nombre de réseaux disponibles ainsi que la complexité de la stratégie de sélection adoptée. En général, des stratégies de sélection (ou des algorithmes de handover) avec une valeur minimale de retard accompagné de la décision sont préférables dans le domaine hétérogène.

### **3.5.2 Nombre de Handover**

Le nombre de handover est un terme indiquant le nombre de transferts effectués au cours d'un appel pendant le déplacement d'un utilisateur entre les réseaux disponibles au sein de la zone de service. Dans quelques cas, des fluctuations rapides sur la puissance de signal reçu peuvent se produire, conduisant à une confusion pour la décision de handover. En conséquence, plusieurs décisions de transfert de l'appel entre les stations de base voisines dans les deux directions peuvent être réalisées. Le phénomène de répétition de handover entre deux stations de bases (ou AP) est connu sous le nom de l'effet ping(pong. De plus, la connexion peut revenir au même point d'accès après une certaine durée de temps conduisant à un gaspillage des ressources de réseaux (signalisation entre les réseaux concernés). En conséquence, la réduction du nombre superfétatoire de handover est un point intéressant pour maintenir des ressources de réseaux. Généralement, une meilleure stratégie de sélection est celle qui minimise le nombre de handover inutile.

### **3.5.3 Débit binaire**

Le débit binaire est un terme important indiquant le débit moyen de données présenté aux utilisateurs par les réseaux disponibles dans la zone de service (le système hétérogène). En général, le débit binaire présenté à un utilisateur est relié directement au niveau SINR, à la bande passante allouée ainsi que le type de modulation considérée. D'autres facteurs peuvent affecter le débit moyen de données. Le choix de réseau selon quelques métriques peut jouer un rôle important dans la favorisation du débit moyen de données au sein du système hétérogène en comparaison avec celui obtenu à partir d'autres métriques. En conséquence, pour la même bande passante et le même type de modulation, les stratégies de sélection peuvent conduire à augmenter ou diminuer le débit binaire de données. Une stratégie de sélection conduisant à un débit de données plus élevé est évidemment souhaitable.

### 3.5.4 Taux d'erreurs binaires

Le taux d'erreurs binaires est défini comme le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total des bits transférés. Ce facteur représente une indication importante à la fiabilité de la communication en cours. En général, la valeur du taux d'erreurs binaires est directement reliée à la valeur reçue en termes du rapport du signal à bruit plus interférence (SINR). La réduction maximale de la valeur des bits erronés est un but souhaitable dans les stratégies de sélection.

## Conclusion

Dans la prochaine génération de réseaux sans fil et mobiles, les utilisateurs pourront se déplacer entre les réseaux hétérogènes en utilisant des terminaux équipés par interfaces d'accès de plusieurs types. Dans ce contexte, les terminaux mobiles choisissent le réseau désiré en fonction de leur préférence entre plusieurs métriques prédéfinies telles que la disponibilité de bande passante, la consommation d'énergie, la puissance du signal reçu ou le coût. L'interférence représente également un facteur important dans cet environnement puisqu'elle peut affecter les performances du système surtout dans l'environnement multicellulaires. Dans la partie implémentation, décrite dans le prochain chapitre, nous présentons une stratégie de sélection basée sur la valeur estimée du SINR (Signal to Interference-plus-Noise Ratio) dans un système hétérogène sans fil. Les utilisateurs, selon cette stratégie, sélectionnent toujours le réseau présentant une valeur de SINR la plus élevée possible pour effectuer leur communication.

Ensuite, nous allons présenter les caractéristiques principales du système considéré ainsi qu'une estimation analytique des performances.

## Chapitre 4 Partie pratique et Implémentation

---

### 4.1 Introduction

Simuler c'est modéliser un système complexe, afin de prévoir son comportement dans le monde réel. Il s'agit d'une approche permettant de représenter le fonctionnement d'un système réel constitué de plusieurs entités, de modéliser les différentes interactions entre elles, et enfin d'évaluer le comportement global du système et son évolution dans le temps.

Les simulateurs réseaux sont utilisés par des personnes de différents domaines tels que les chercheurs universitaires, industriels et, d'assurance de qualité (AQ) pour concevoir, simuler, vérifier et analyser les performances des protocoles de différents réseaux. Ils peuvent également être utilisés pour évaluer l'effet des différents paramètres des protocoles étudié. En général, un simulateur de réseau est composé d'un large éventail de technologies et de protocoles réseaux et aide les utilisateurs à construire des réseaux complexes à partir de blocs de construction de base comme des grappes de nœuds et de liens. Avec leur aide, nous pouvons concevoir différentes topologies de réseau en utilisant différents types de nœuds tels que les nœuds terminaux, concentrateurs, ponts de réseau, routeurs, des dispositifs optiques de couche de liaison, et des unités mobiles.

La plupart des logiciels disponibles de simulation des réseaux sont basés sur la simulation à événements discrets DES (Discrete Event-Based Simulation), où les nœuds du réseau simulé déclenchent des événements. Le simulateur maintient une file d'événements triés suivant le moment planifié pour l'exécution de l'événement. La

simulation est elle-même effectuée par le traitement successif d'événements dans la file d'attente. L'approche DES a commencé à être appliquée à la simulation des réseaux informatiques durant les deux dernières décennies.

Parmi les simulateurs utilisés nous avons choisi NS3 qui est un simulateur réseau à événements discrets et écrit en C++ et Python, et peut être utilisé sur les plateformes Linux/Unix, OS X (Mac) et Windows. Il est ouvert et possède de bonnes propriétés en termes de performances de rapidité, de consommation mémoire et de souplesse d'utilisation.

Son développement a d'abord commencé en Juillet 2006, et devait durer quatre ans, Il est financé par les instituts comme l'Université de Washington, Georgia Institute of Technology et le Centre de l'ICSI pour la recherche sur Internet, la première version majeure publique et stable a été publiée en juin 2008.

## **4.2 Modules du simulateur NS3 :**

L'organisation du logiciel de NS-3 est illustrée dans la figure 9. Voici les modules de base de NS3[11] :

### **4.2.1 Core Module:**

Module de base, il est indépendant, il permet la création d'une structure de classes hiérarchiques dérivant de la classe Object de base. Cette hiérarchie possède plusieurs fonctionnalités conçus spécialement pour répondre aux besoins de la simulation.

Parmi lesquels : l'agrégation d'objets, l'enregistrement actif(TypeId) avec les attributs publiques etc.

### **4.2.2 Common Module :**

Ce module gère les actions liées à la génération et la réception des paquets, ce module est centré sur la classe Packet utilisé pour la simulation de réseau au niveau packet. L'utilisation de cette dernière classe est conçu de façon à optimiser la gestion de la mémoire en utilisant la méthode (copy on write) et en donnant la possibilité de

manipuler des paquets vides et dont la taille est le paramètre suffisant et nécessaire pour la simulation. La plupart des autres modules ont utilisé les fonctionnalités de ce module.

#### **4.2.3 Simulator Module :**

Les Simulations des événements sont gérées par le module de simulation. Il prévoit explicitement la possibilité de planifier des événements à des moments différents et ensuite d'exécuter ces événements. La classe Time représente le temps simulé à haute résolution en utilisant un entier de 128 bits. Cette classe est la classe la plus importante du simulateur.

#### **4.2.4 Mobility Module :**

Ce module permet de définir la position des nœuds et associe un modèle de mouvement aux agents de la simulation. NS-3 fournit sept modèles de mobilité.

#### **4.2.5 Node Module**

La classe Node peut contenir plusieurs NetDevices. Chaque NetDevice est attaché à un channel par lequel il envoie et reçoit des paquets.

Un nœud peut contenir plusieurs gestionnaires de protocole, qui acceptent les paquets reçus par le NetDevice. Pour lancer la transmission des paquets, chaque nœud peut également contenir une liste d'applications.

#### **4.2.6 Helper Module :**

Ce modèle peut être considéré comme un emballage de haut niveau. Il facilite la construction des scénarios complexes de simulation et l'installation des différents modules dans des agents différents.

#### **4.2.7 Application Module :**

Certaines applications sont intégrées et fournies par NS-3. Elles sont installées dans les nœuds et peuvent être démarrées/arrêtées à des moments précis dans la simulation.

## 4.2.8 InternetStack Module :

Les classes de ce module définissent les protocoles TCP/IP des couches réseaux trois et quatre (TCP/IP).

## 4.2.9 Devices Module :

Les composants de ce type représentent des périphériques réseaux et transmettent des paquets via un canal virtuel à d'autres instances de la même classe NetDevice.

## 4.2.10 Routing Module :

Deux algorithmes de routage sont disponibles dans NS-3. Le premier appelé GlobalRouter, utilise des routes statiques et le deuxième met en œuvre le protocole OLSR pour les réseaux dynamiques ad-hoc.

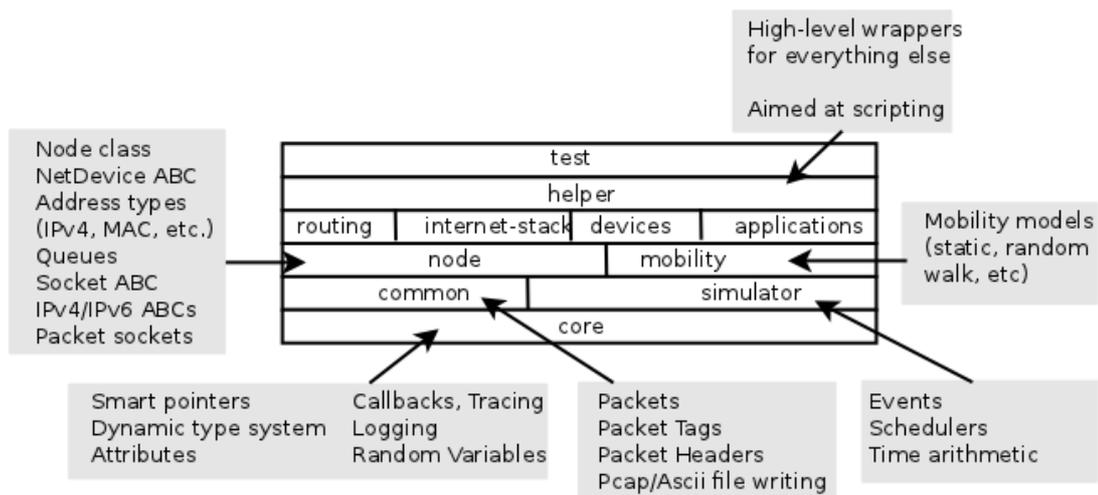


Figure 4.1 : Architecture logicielle de NS3.

## 4.3 Terminologie et abstractions

Il est important de bien comprendre le sens des termes employés au sein du simulateur, ainsi que les abstractions qui ont été faites. NS-3 utilise des termes

largement employés dans le domaine des réseaux, mais qui peuvent avoir une signification particulière au sein du simulateur. Voici les principaux :

#### **4.3.1 Un nœud *Node* :**

Représente tout élément de réseau. La composition d'un Node peut être gérée (ajout de composants, de protocoles, d'applications).

#### **4.3.2 Une application *Application* :**

Représente un code exécuté par un utilisateur. Ce code peut être nécessaire au déroulement d'une simulation. L'échange de paquets durant une simulation nécessite par exemple la description d'une Application au sein des nœuds participants (par exemple, `UdpEchoClientApplication` d'un côté et `UdpEchoServerApplication` de l'autre pour réaliser une application en mode client/serveur). NS-3 ne fait pas de distinction entre les "applications système" (souvent exécutées par le noyau) et les applications des utilisateurs (exécutées dans le user-space). Les applications peuvent ensuite être attachées à un Node.

#### **4.3.3 Un canal de communication *Channel***

Représente le lien qui relie des nœuds, ou plus exactement les NetDevices installés dans les nœuds. Des spécialisations de cette classe sont définies, comme par exemple `CsmaChannel` pour modéliser un lien Ethernet utilisant CSMA, ou encore `WifiChannel` pour modéliser un lien WiFi.

#### **4.3.4 Une interface de communication, ou interface réseau :**

Appelée NetDevice, qui modélise à la fois l'équipement (carte réseau) et le pilote dont un ordinateur a besoin pour pouvoir communiquer avec d'autres. Des spécialisations de NetDevice sont fournies, comme par exemple `CsmaNetDevice` qui simule une carte réseau Ethernet et peut être reliée à un `CsmaChannel`, ou encore `WifiNetDevice` pour un lien à un canal de type `WifiChannel`.

## **4.4 Notre approche**

Nous avons mis en place une stratégie d'offloading qui permet à des utilisateurs initialement connectés à un réseau LTE de se connecter à un réseau wifi une fois que les conditions dans le réseau initial sont jugées défavorables comparée à celle du réseau cible.

Ces paramètres sont le RSRP, le RSRQ et la distance entre l'utilisateur mobile et les points d'accès(AP) ainsi que le nombre de stations mobiles dans le réseau wifi.

Nous avons choisi les paramètres RSRP et RSRQ car ces derniers permettent de donner une bonne indication sur la puissance et la qualité du signal perçu par un utilisateur mobile dans un réseau LTE.

Dans les réseaux WIFI, le SNR d'une station mobile est intimement lié à la distance le séparant de l'AP, pour cela nous avons considéré dans les paramètres de choix pour l'offloading cette indication.

## **4.5 Notre proposition**

### **4.5.1 Implémentation :**

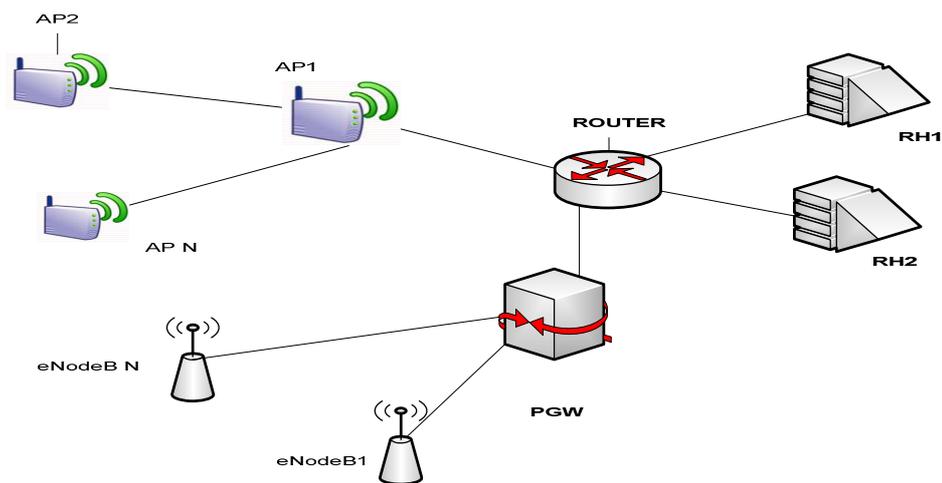
Dans notre travail nous avons utilisé une machine virtuelle sur laquelle nous avons installé le système ubuntu version 3.12. Nos simulations ont été faites sous NS3 version 3.20 qui possède des modules qui permettent de simuler le réseau Wifi et le LTE comme nous l'avons décrit précédemment.

Nous avons également utilisé NetAnim, un des composants de NS3 qui permet la visualisation du déroulement de la simulation à partir d'un fichier trace de type XML qui est un langage permet de structurer et hiérarchiser des données avec l'énorme avantage de pouvoir créer ses propres nom d'éléments ou balises, généré lors de l'exécution de la simulation.

Nous avons simulé un réseau hétérogène (4G/WIFI) composé de sept (07) eNodeB répartis avec une distance inter sites ISD entre 400 et 500m, et nous avons positionné les points d'accès selon deux variantes la première avec un nombre total de AP de neuf (09) et la seconde avec un nombre total de quinze (15).

Nous avons interconnecté les deux réseaux d'accès 4G et WIFI via un routeur « rout » auquel nous avons rattaché deux stations *Remote Host RH* qui servent à simuler l'envoi d'un trafic udp vers les terminaux mobiles 4G ou WIFI pour cela nous avons utilisé l'application *UdpEchoClientApplication* disponible dans la bibliothèque de NS3.

Ci après, une topologie simplifiée du réseau qui a été implémenté lors de la simulation.



**Figure 4.2 .** Topologie du réseau à simuler

Nous avons ajoutés des utilisateurs mobiles wifi et LTE auxquels nous avons affecté le modèle de mobilité *RandomWalk2dMobilityModel*.

Pour la partie radio LTE, nous avons considéré une plage de fréquences actuellement en exploitation en Algérie pour le service 4G soit :

- 1710-1730 Mhz pour le lien montant (uplink)
- 1805-1825Mhz pour le lien descendant (downlink)

Et qui correspond aux paramètres suivants :

- DLEarfcn =1200
- ULEarfcn=19200
- DLBandwidth=100
- ULBandwidth=100 ;

Les niveaux de puissances d'émission au niveau des eNodeB et terminaux mobiles 4G a été fixé respectivement à 47 et 23 dBm.

Les eNodeB mises en place sont configurées chacune avec trois antennes de type CosineAntennaModel, réparties de manière à assurer une couverture optimale.

Pour pouvoir modéliser réellement le phénomène de propagation « *path loss* », nous avons implémenté le modèle Cost231PropagationLossModel dans la partie radio LTE.

Le NS3 permet la simulation de plusieurs normes wifi, nous avons choisi la norme 802.11g, vu que celle-ci est très largement répandue et exploitée.

De même que pour le LTE, nous avons adopté un modèle de propagation pour les ondes radio wifi qui est le LogDistancePropagationLossModel.

#### **4.5.2 Algorithme de décision :**

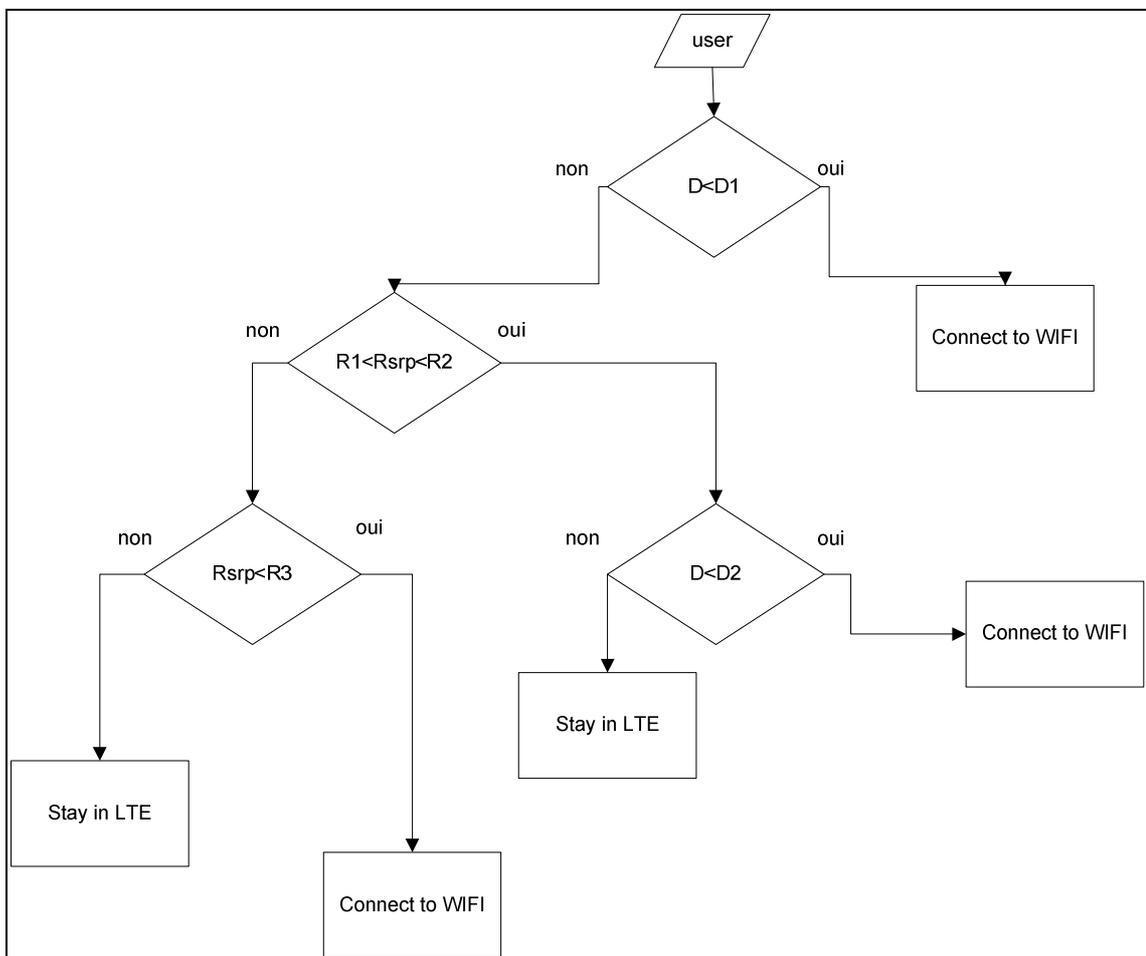
L'algorithme adopté pour décider de l'action de Handover ou non est basé sur deux paramètres qui sont le *rsrp* de l'utilisateur final 4G et la distance (D) séparant ce même utilisateur du point d'accès le plus proche.

Une première condition consiste à vérifier la valeur de D, si celle-ci est inférieure à 20m, il est considéré que les conditions de connexion dans le réseau WIFI sont très

favorables et donc il y aura un Handover de l'utilisateur final du réseau 4G vers le réseau WIFI.

Dans le cas contraire, une vérification de la valeur du rsrp se fera si celle-ci est considérée comme moyenne ( $-97 < \text{rsrp} < -85$ ) et que les conditions de connexion du réseau WIFI sont bonnes alors l'utilisateur se connectera au WIFI autrement il restera connecté au réseau 4G.

Pour des valeurs de rsrp supérieurs à -85, le réseau 4G est considéré comme réseau offrant une bonne qualité et donc il n'est pas nécessaire de basculer sur le WIFI.



**Figure 4.3** Algorithme de décision de Handover

### 4.5.3 Interprétation des résultats :

Pour chacune des variantes 1 et 2, nous avons pris des valeurs différentes de D1,D2,R1,R2 et R3. (voir programme en Annexe)

Et nous avons obtenu les résultats suivants :

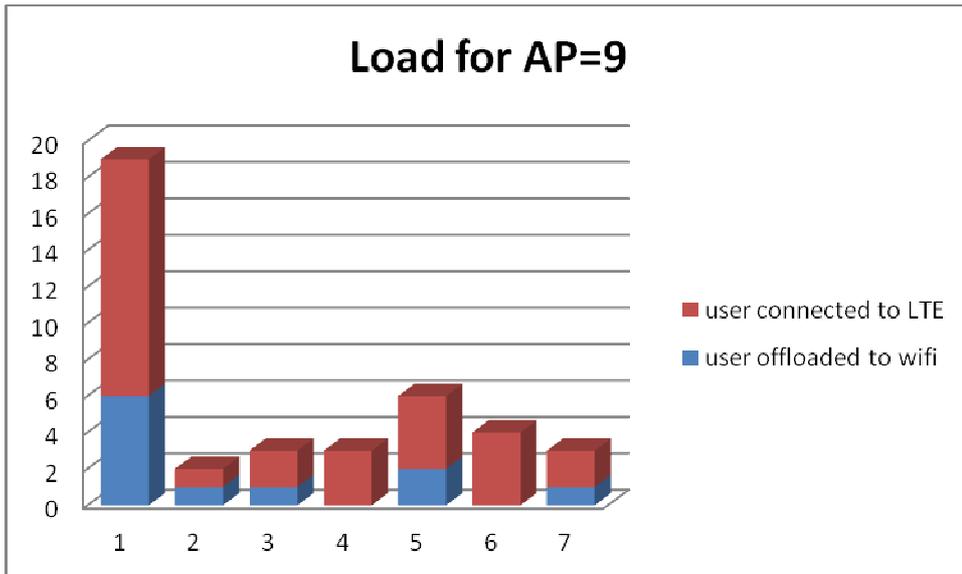


Figure 4.4 Répartition des utilisateurs sur les deux réseaux.

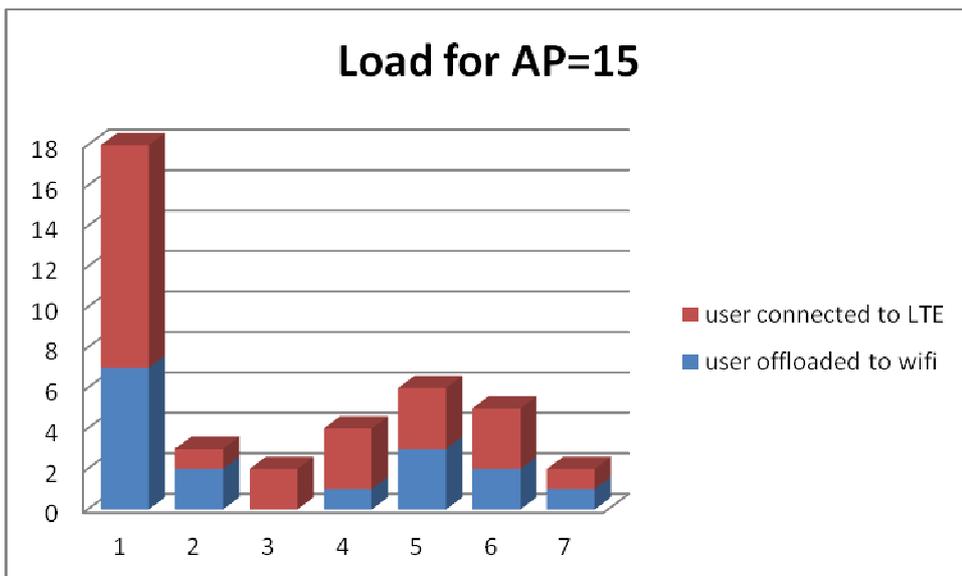
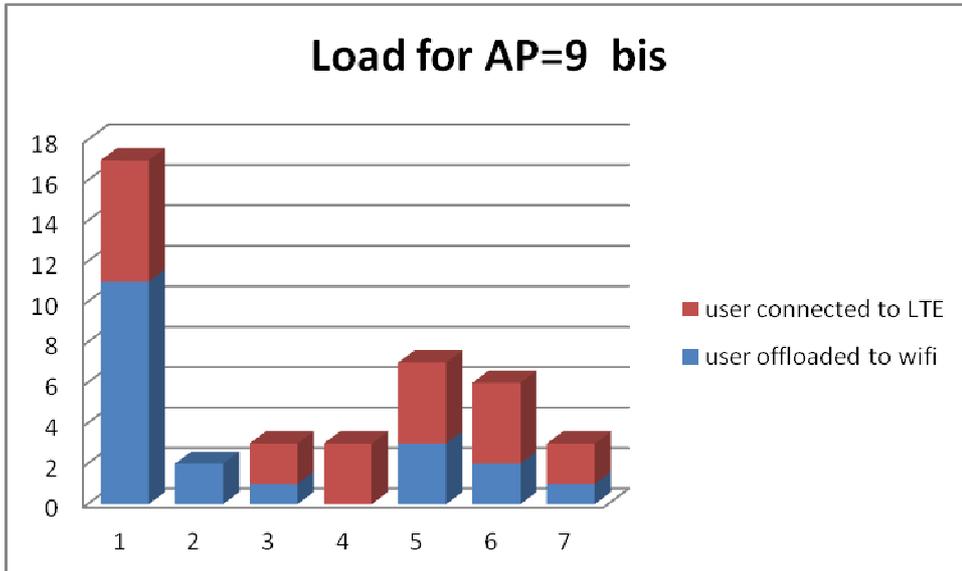
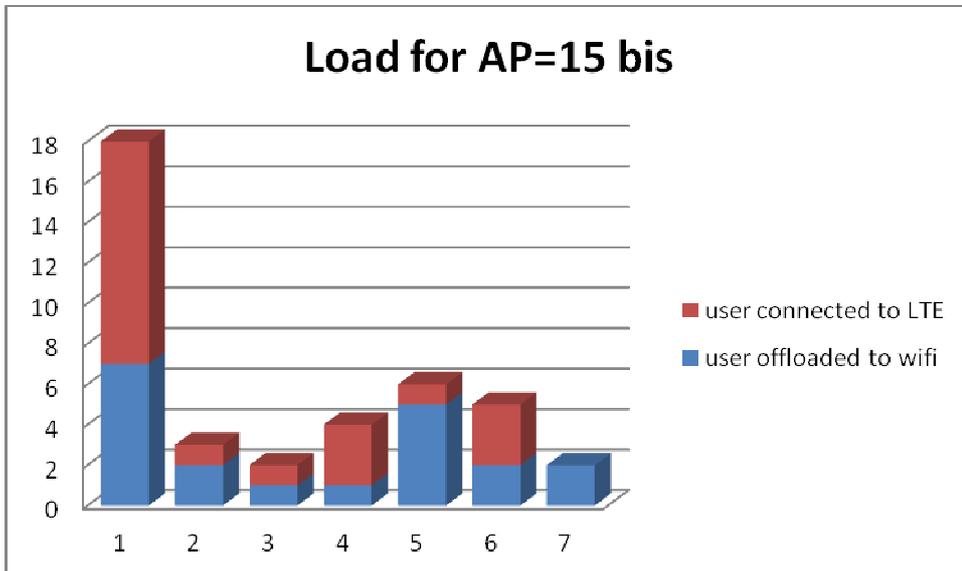


Figure 4.5 Répartition des utilisateurs sur les deux réseaux.

Ci-dessous les résultats obtenus pour les deux variantes en utilisant d'autres valeurs de D1,D2,R1,R2 et R3



**Figure 4.6** Répartition des utilisateurs sur les deux réseaux.



**Figure 4.7** Répartition des utilisateurs sur les deux réseaux.

Les résultats obtenus dans la simulation montrent que pour la variante 2 soit le nombre des AP =15 le nombre des utilisateurs pour qui il y a un Handover est supérieur à celui de la variante 1 où le nombre des AP est de 9. Ceci s'explique par le fait que la disponibilité du réseau WIFI favorise l'opération de Handover.

Nous avons également fait ressortir que pour un même nombre de points d'accès et des valeurs différentes des métriques et plus précisément un décalage vers les valeurs moins faibles du rsrp a fait en sorte que le nombre des utilisateurs qui se sont connectés au WIFI est plus important.

## Conclusion générale

Ce modeste travail de simulation nous a permis d'évaluer l'importance du choix des métriques pour arrêter une stratégie de Handover qui répond aux exigences de l'opérateur en ce qui concerne la qualité et la charge de son réseau.

Ainsi, un acteur 4G peut adopter une stratégie qui lui permet de procéder à des délestages de son réseau pendant les heures de pic de consommation ou en cas de saturation.

Un opérateur 4G qui souhaiterait augmenter les proportions d'opération de Handover de son réseau vers le WIFI pour améliorer les conditions de connexion du réseau LTE devra augmenter le seuil de décision du RSRP de manière à faire basculer même les utilisateurs pour qui la qualité 4G est considérée comme moyenne.

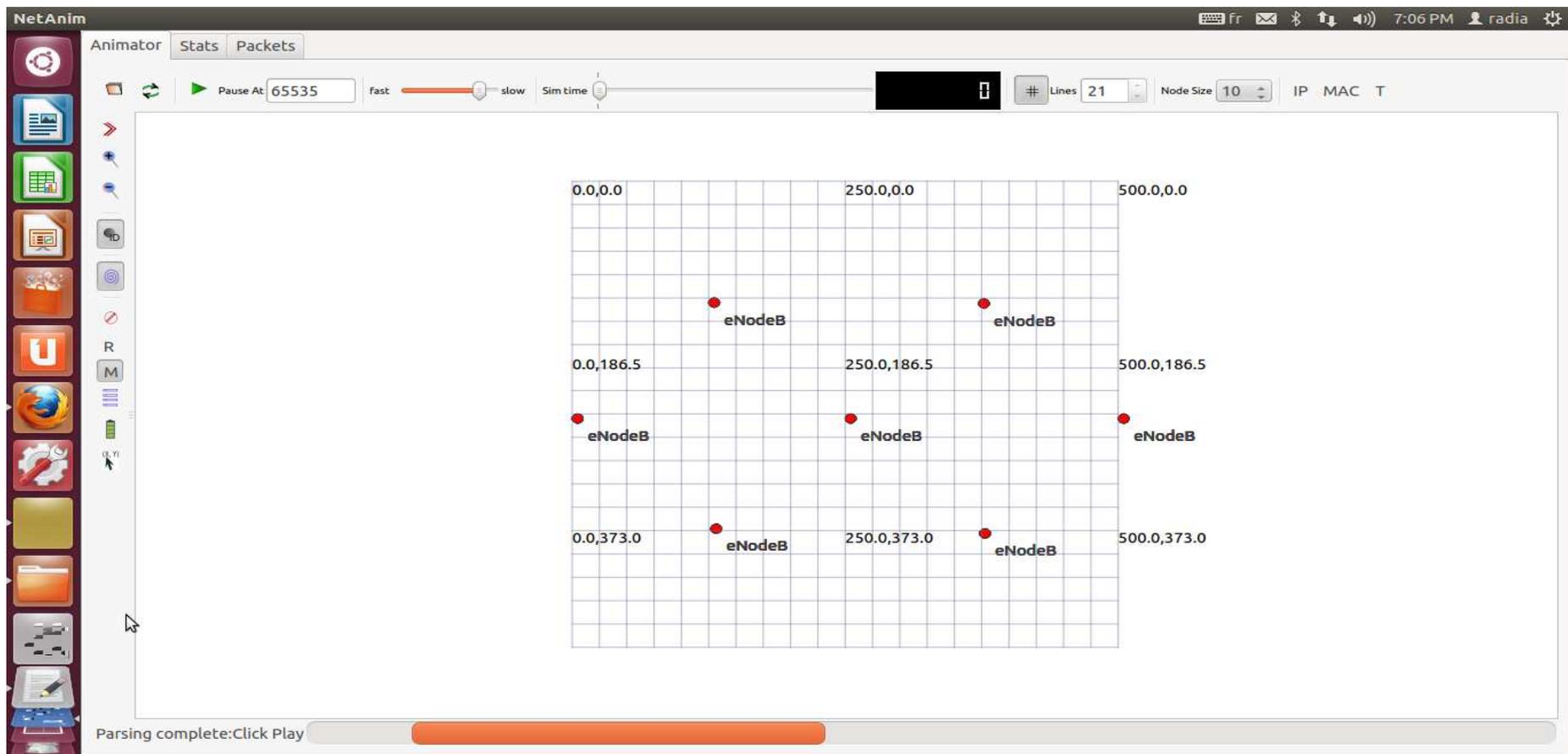
En plus des paramètres que nous avons choisis pour la prise de décision de Handover et qui sont le RSRP et la distance, d'autres paramètres aussi pertinents pourront être utilisés et qui sont :

- **Le type de trafic** : une décision de Handover peut être basée en partie sur le type de trafic data, vidéo ou voix, pour un trafic nécessitant une bande passante importante telle que la vidéo ou la data un basculement vers le wifi est souhaité, dans le cas d'un trafic voix non gourmand en capacité mais nécessitant des délais de réponse court, le réseau LTE est préféré.
- **Le *Throughput et/ou drop based*** : ces deux paramètres permettent de qualifier l'état du réseau si celui-ci est en grande charge ou non, et décider d'actionner le Handover en cas de saturation pour libérer des capacités et donc améliorer la qualité du réseau.

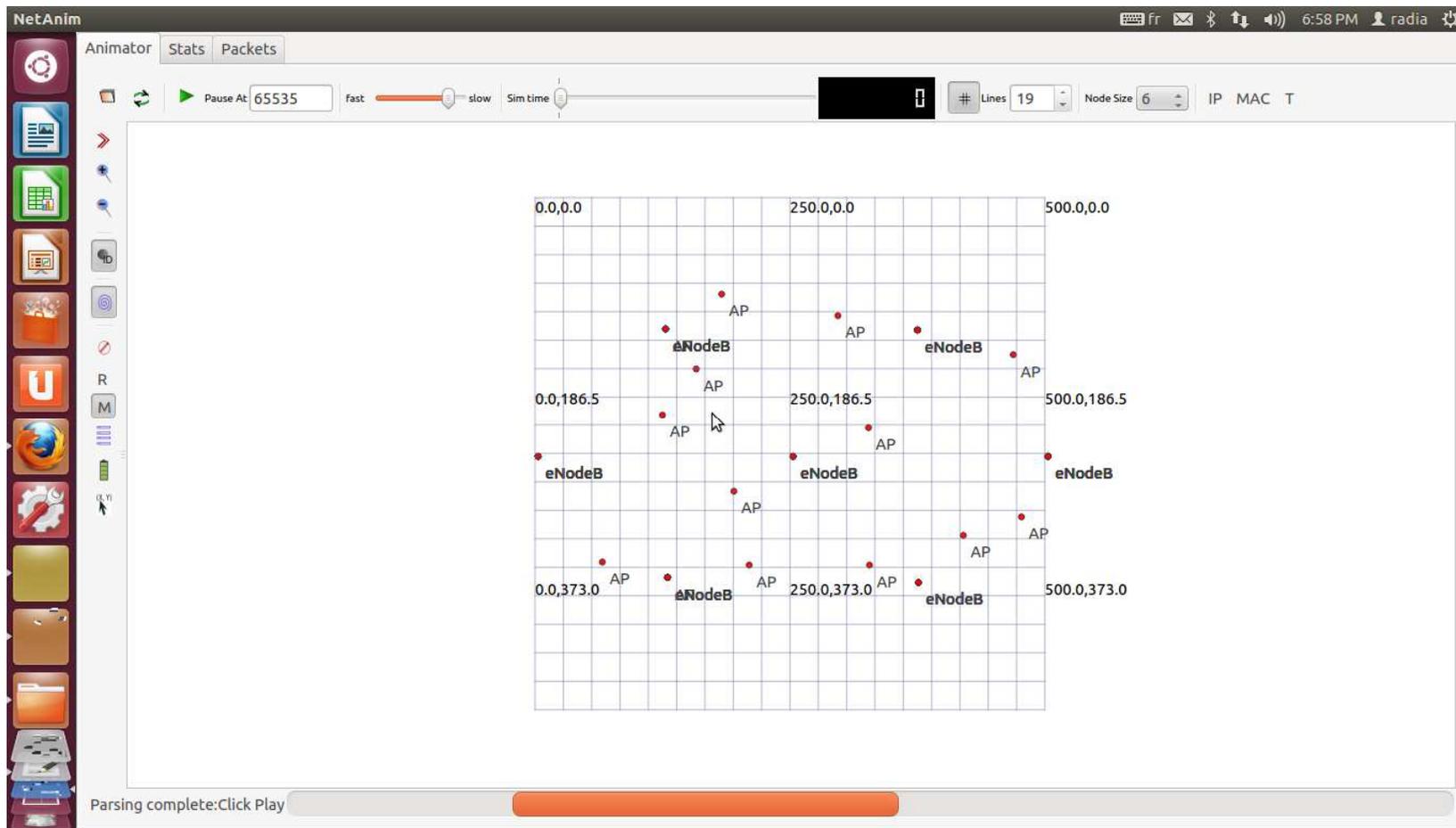
Vu que la prise de décision du Handover peut être liée à de nombreux métriques pour lesquelles il est quasiment impossible de faire des formulations analytiques il serait envisageable et astucieux d'utiliser la logique floue ou les réseaux de neurones

Ci après des imprimés écran pris étape par étape lors de la simulation.

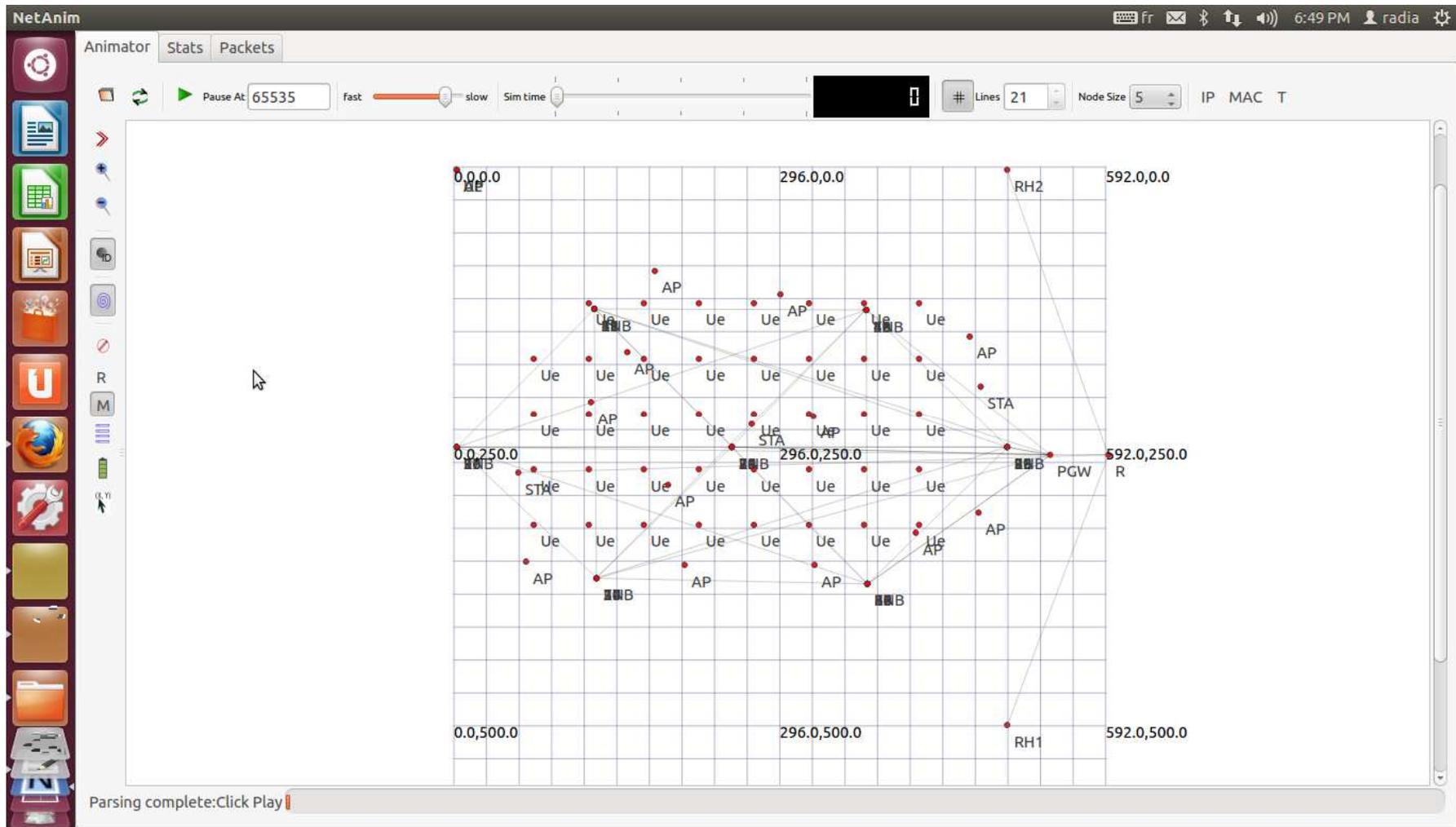




**Annexe 1.** Photo prise par le logiciel montre la répartition des sept (07) eNodeB

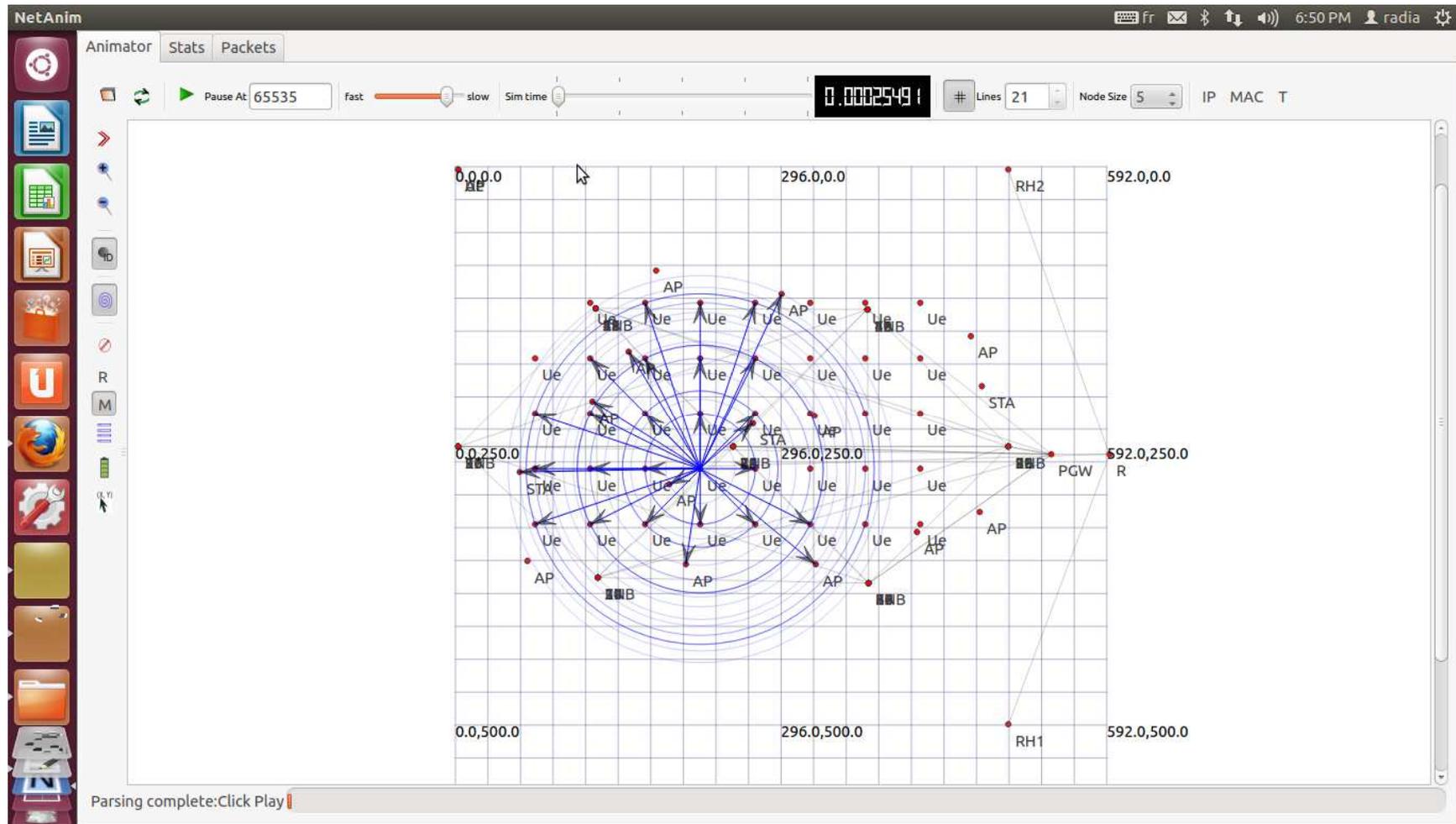


**Annexe 2.** Photo prise par le logiciel montre l'ajout des points d'accès.

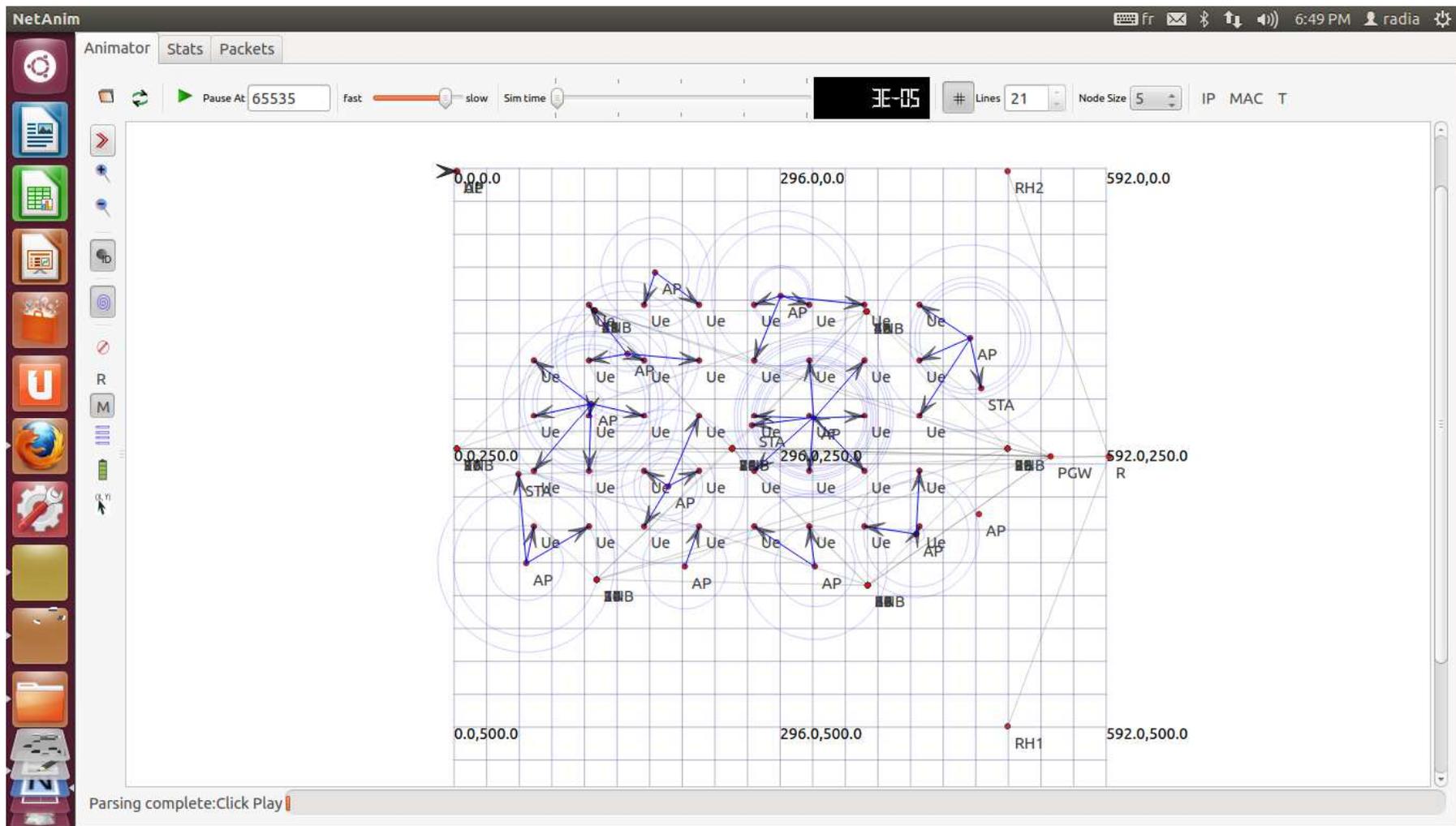


Figura

Annexe 3. Photo prise par le logiciel montre l'ajout du réseau WIFI et les Remote Host



**Annexe 4.** Photo prise par le logiciel montre la *signalisation LTE*



**Annexe 5.** Photo prise par le logiciel montre la *signalisation WIFI*

```

radia1@ubuntu: ~/workspace/bake/source/ns-3.20
UE measurement t: 8.8 s RNTI: 1 CellID: 8 RSRP: -inf RSRQ: -nan ServingCell: 0
UE measurement t: 8.8 s RNTI: 1 CellID: 9 RSRP: -inf RSRQ: -nan ServingCell: 0
UE measurement t: 8.8 s RNTI: 1 CellID: 10 RSRP: -inf RSRQ: -nan ServingCell: 0

t = 8.88 s (88 %) xUe=1.22421, yUe=-0.969944, zUe=1, Distance ue AP1 = 10.6609, Distance ue AP2 = 18.2105, Distance minimale = 10.6609

t = 8.95 s (89 %) xUe=6.31921, yUe=21.5619, zUe=0, Distance ue AP1 = 16.966, Distance ue AP2 = 5.11761, Distance minimale = 16.966

t = 8.97 s (89 %) Flow ID : 1 ; 5.0.0.3 -----> 3.0.0.15
Tx Packets = 9
Rx Packets = 0
Duration : -0.01
Last Received Packet : 0 Seconds
Throughput: -0 Mbps

-----
Flow ID : 2 ; 4.0.0.1 -----> 7.0.0.3
Tx Packets = 1
Rx Packets = 1
Duration : 0.0200094
Last Received Packet : 2.02001 Seconds
Throughput: 0.416369 Mbps

-----
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 1 RSRP: -75.028 RSRQ: -7.30379 ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 2 RSRP: -73.7135 RSRQ: -5.98933 ServingCell: 1 * rsrp max : -73.7135, user: 3, in Cellid :2 - IP :7.0.0.4
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 3 RSRP: -85.6008 RSRQ: -17.87666 ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 4 RSRP: -91.0652 RSRQ: -23.3415 ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 5 RSRP: -90.2242 RSRQ: -22.5 ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 6 RSRP: -86.1391 RSRQ: -18.41499 ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 7 RSRP: -84.468 RSRQ: -16.74388 ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 8 RSRP: -inf RSRQ: -nan ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 9 RSRP: -inf RSRQ: -nan ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 3 CellID: 10 RSRP: -inf RSRQ: -nan ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 1 CellID: 1 RSRP: -73.4152 RSRQ: -18.4835 ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 1 CellID: 2 RSRP: -58.2878 RSRQ: -3.355635 ServingCell: 1 * rsrp max : -58.2878, user: 1, in Cellid :2 - IP :7.0.0.2
UE measurement t: 9 s RNTI: 1 CellID: 3 RSRP: -76.1026 RSRQ: -21.17045 ServingCell: 0
UE measurement t: 9 s RNTI: 1 CellID: 4 RSRP: -84.903 RSRQ: -29.97088 ServingCell: 0

```

*Annexe 6. Photo prise par le logiciel montre l'envoi du trafic et calcul du througput*

## Bibliographie

---

[1] : « [www.globalsecuritymag.fr](http://www.globalsecuritymag.fr) ». Consulté en Septembre 2014.

[2] : « edite-de-paris.fr/ ». Consulté en Septembre 2014.

[3] :DIGALLO Frédéric : ' L'essentiel qu'il faut savoir ', Extrait de source diverses récoltées en 2003.

[4] :Paul Muhlethaler : ' 802.11 et les réseaux sans fils ', Groupes Eyrolles, 2002.

[5] :Tarek BCHINI : 'Gestion de la mobilité, de la qualité de service et Interconnexion de réseaux Mobiles de Nouvelles Génération ', doctorat de l'université de TOULOUSE ,2010.

[6] : Jean-François Pillou, Site CommentCaMarche.net 'Les réseaux sans fils et le Wifi', consulté en Septembre 2014.

[7] :François-Xavier Wolff, LTE et les réseaux 4G, Groupe Eyrolles, 2012.

[8] : Office fédéral de la communication OFCOM, Notice d'information 3GPP-LTE, janvier 2011.

[9] : « <http://fr.scribd.com> » . consulté en Octobre 2014.

[10] : Ahmad Jabban, Optimisation et analyse intelligents et des réseaux hétérogènes

[11] : BOUHENTOUF H Etude des performances des réseaux 4G (LTE) 2012/2013

[12] : COUZINET.H, NANFACK.J et NJOUDJI.R, « Analyse et suivi de la QoS dans le système LTE », Rapport de Stage, Université Telecom Bretagne, 2009

[13] : SEIDE.G, « Planification d'un réseau de quatrième génération à Partir d'un Réseau De Troisième Génération », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliquées (génie informatique), Université de MONTREAL, 2011.