

الجمهورية
الجزائرية
الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي و
البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر
بلقايد - تلمس - ان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

Par : **Mlle BEKKAYE Chaima**
Mlle HASNAOUI Sara

Thème

**Allocation de ressources avec l'agrégation de porteuses
dans la norme LTE-A**

Soutenu publiquement, le 04/07/2021, devant le jury composé de :

Mr MERZOUGUI Rachid	PR	Univ. Tlemcen	Président
Mr. HADJILA Mourad	MCA	Univ. Tlemcen	Directeur de Mémoire
Mr. ZERROUKI Hadj	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur

Année Universitaire 2020-2021

Remerciement

Nous remercions en premier lieu ALLAH dieu qui nous a aidés à surmonter tous les obstacles et les difficultés pour suivre nos études et élaborer ce travail.

On tient à remercier vivement en cette occasion notre directeur de mémoire Dr. HADJILA Mourad pour leur contribution efficace, leurs conseils, leur soutien et leur aide précieuse dans la réalisation de ce travail.

Nous avons l'honneur de remercier également les membres du jury composé

De Dr. MERZOUGUI Rachid pour avoir accepté de présider le jury,
et Dr. ZERROUKI Hadj pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous a aidés et soutenue tout au long de la réalisation de ce mémoire fin d'étude.

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier le fruit de ce mémoire :

À mes chers parents Mohammed et Fatma que j'aime énormément
Et qui n'ont cessé de m'aider par leur prière et leur soutien permanent

À mes chères sœurs Sihem , Amel, Soumia, Fatima

À mes adorables neveux Nibrasse, Hossam ,Belkisse ,Nada ,Joudi

Ainsi qu'à toute la famille Bekkaye et Laaz

À mon cher amis Soumia

À mon cher binôme Sarah

À tous mes camarades de promotion

À toutes les personnes que je porte dans mon cœur

Et tous ceux qui mon aider de près ou de loin

Ainsi qu'à toi cher lecteur.

Chaïma Bekkaye

Je dédie ce thème à :

*Ma famille qui m'a doté d'une éducation digne.
Son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui.
Avant tout, mon père رحمه الله, un homme fort que
j'aurais aimé avoir à mes côtés lors de cet
événement important de ma vie.*

*À ma très chère mère, une femme au grand cœur,
qui m'a beaucoup encouragé pendant mes études et
qui n'a épargné aucun effort pour me rendre
heureuse.*

*À ma tante qui est aussi la raison pour laquelle je
suis arrivée là où je suis maintenant.*

*À mon frère Ismail et ma sœur Hadjer qui ont été
un réel soutien et une source de joie tout au long
de mon parcours. Que Dieu les protège, leur
accorde santé, succès et bonheur dans leur vie.*

Et à ma chère amie Chaima.

Sara Hasnaoui

Résumé

Au cours des dernières années, le nombre d'abonnés à la téléphonie mobile a augmenté rapidement. Les abonnés mobiles utilisent plusieurs applications simultanément sur leurs Smartphones qui nécessitent une bande passante plus élevée. La technologie LTE-Advanced offre des débits de données supérieurs aux premières versions de LTE. L'agrégation de porteuses est l'une des principales caractéristiques du LTE-A, qui permet aux opérateurs de maximiser et d'améliorer la qualité de leurs services. Grâce à cette technique, les utilisateurs peuvent accéder à une bande passante totale allant jusqu'à 100 MHz. Chaque utilisateur est assuré d'une allocation minimale de ressources. De plus, une allocation de ressources prioritaire est attribuée aux UEs, la priorité est accordée aux UE utilisant des applications en temps réel. Le but de notre étude est de garantir une qualité de service (QoS) optimale qui varie en fonction du type d'application de l'utilisateur. Nous présentons un algorithme d'allocation de débit d'agrégation de porteuses qui est basé sur le type d'application de l'utilisateur pour attribuer de manière optimale les ressources de deux porteuses entre les utilisateurs.

Mots clés : LTE, LTE-A, Agrégation de porteuses (CA), Allocation de ressources, UE, QoS.

Abstract

In recent years, the number of mobile subscribers has increased rapidly. Mobile subscribers are using multiple applications simultaneously on their smartphones that require higher bandwidth. LTE-Advanced technology offers higher data rates than early versions of LTE. Carrier aggregation is one of the key features of LTE-A, which allows operators to maximize and improve the quality of their services. With this technique, users can access a total bandwidth of up to 100 MHz each user is guaranteed a minimum resource allocation. In addition, priority resource allocation is given to UEs, with priority given to UEs using real-time applications. The goal of our study is to ensure an optimal quality of service (QoS) that varies according to the user's application type. We present a carrier aggregation rate allocation algorithm that is based on the user's application type to optimally allocate the resources of two carriers between users.

Keywords: LTE, LTE-A, Carrier Aggregation (CA), Resource allocation, UE, QoS.

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : LES RÉSEAUX LTE ET LTE-ADVANCED

I.1.Introduction.....	2
I.2.Historique sur la 4G.....	2
I.3.Pourquoi la technologie LTE.....	3
I.4.Architecture du réseau 4G.....	3
I.4.1.UE (Équipement de l'Utilisateur).....	4
I.4.2.La partie radio E-UTRAN.....	4
I.4.3.Réseau cœur EPC (Evolved Packet Core).....	4
I.5.Les caractéristiques LTE.....	5
I.5.1.Mobilité.....	5
I.5.2.Flexibilité de la bande passante.....	6
I.5.3.Débit sur interface radio.....	6
I.5.4.Support du multicast.....	6
I.5.5.Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G.....	6
I.5.6.Connexion à haut débit.....	7
I.5.7.Couverture des zones urbaines et rurales.....	7
I.6.La QoS en LTE.....	7
I.7.Allocation des blocs de ressource dans LTE.....	7
I.8.Le système LTE-Advanced.....	8
I.9.Avantages de la LTE-A.....	9
I.10.Conclusion.....	9

Chapitre II : AGRÉGATION DE PORTEUSES DANS LA NORME LTE- ADVANCED

II.1.Introduction.....	10
II.2.Agrégation de porteuses dans LTE-Advanced.....	10
II.3.Évolution de l'agrégation de porteuses.....	12
II.3.1.Release 10	12
II.3.2.Release 11	13
II.3.3.Release 12.....	13
II.4.Principe de fonctionnement	14
II.5.Avantages et performances de l'agrégation de porteuses	14
II.6.Type de l'agrégation de porteuses	15
II.6.1.Intra-bande	15
II.6.2.Inter-bande non contiguë	17
II.7.Scénarios de déploiement	18
II.7.1.Scénario 1	18
II.7.2.Scénario 2	18
II.7.3.Scénario 3	19
II.7.4.Scénario 4	19
II.7.5.Scénario 5	20
II.8.Les composantes d'agrégation de porteuses LTE.....	20
II.8.1.Porteuse composante primaire.....	20
II.8.2.Porteuse de composante secondaire.....	21
II.9.Largeurs de bande d'agrégation de porteuses	21
II.9.1.Classes de largeur de bande d'agrégation de porteuses	21
II.10.L'agrégation de porteuses TDD FDD	22
II.11.Impact de l'agrégation de porteuses sur l'UE	23
II.11.1.Cross-Carrier Scheduling (CCS)	23
II.11.2.Procédure de transfert de la capacité de l'UE via le RRC.....	23
II.12.Conclusion	23

Chapitre III : ALLOCATION DE RESSOURCES A PLUSIEURS NIVEAUX AVEC AGREGATION DE PORTEUSE

III.1.Introduction	24
III.2.Allocation de ressources distribuée avec agrégation de porteuses	24
III.3.Fonctions d'utilités.....	24
III.3.1.Fonction d'utilité sigmoïde	25
III.3.2.Fonction d'utilité logarithmique	25
III.4.Formulation du problème	25
III.4.1.Problème d'optimisation de la porteuse unique	26
III.5.Problème d'optimisation des porteuses primaires et secondaires	26
III.5.1.Porteuse principale	26
III.5.2.Porteuse secondaire	27
III.6.Algorithme d'allocation de ressources distribuées à plusieurs niveaux	28
III.6.1.Algorithme 1:première étape de l'algorithme d'agrégation des porteuses de l'UE.....	29
III.6.2.Algorithme 2 : la première étape de l'eNodeB d'agrégation de porteuses.....	29
III.6.3.Algorithme 3 : Algorithme d'agrégation des porteuses de l'UE de deuxième étape	30
III.6.4.Algorithme 4 : la deuxième étape de l'eNodeB d'agrégation de porteuses	31
III.7.Simulation et résultats	31
III.8.Résultats numériques de l'allocation optimale des débits	32
III.8.1.Première étape de l'algorithme.....	33
III.8.2.Deuxième étape de l'algorithme.....	35
III.9.Conclusion.....	37
Conclusion générale.....	38
Bibliographie.....	39

Liste des figures

Figure I.1. Architecture générale du LTE.....	4
Figure I.2. Le fonctionnement du multicast.....	6
Figure I.3. Canaux sélectifs en fréquence.....	8
.....	
Figure II.1. Agrégation de cinq porteuses.....	10
Figure II .2. Exemple d'agrégation de porteuses.....	11
Figure II .3 .évolution de l'agrégation de porteuses.....	12
Figure II.4. Type d'agrégation de porteuses.....	15
Figure II.5. intra-bande Contiguës.....	15
Figure II.6 .Spectre de l'agrégation à deux porteuses de 20 MHz contiguës	16
Figure II.7. intra-bande Non-contiguës.....	16
Figure II.8. Spectre de l'agrégation non contiguë à 4 porteuses de 20 MHz	17
Figure II.9. Inter-bande non contiguë.....	17
Figure II .10. Scénario 1 de mise en œuvre de l'AC.....	18
Figure II .11. Scénario 2 de mise en œuvre de l'AC.....	19
Figure II .12 .Scénario 3 de mise en œuvre de l'AC.....	19
Figure II .13 .Scénario 4 de mise en œuvre de l'AC.....	20
Figure II .14 .Scénario 5 de mise en œuvre de l'AC.....	20
Figure II.15.Définitions de la largeur de bande de l'agrégation de porteuses LTE pour le cas intra-bande.....	21
Figure II.16.Exemple de CA TDD-FDD.....	22
.....	
Figure III.1.Schéma de circulation de distribué en plusieurs étapes à plusieurs étages.....	28
Figure III.2. Modèle de système.....	32
Figure III.3. Les fonctions d'utilité des utilisateurs $U_i(r_i)$	33
Figure III.4.Les débits $r_{i,p}(n)$ avec le nombre d'itérations n pour différents utilisateurs et $R_p=70$	34
Figure III.5. La convergence des offres $w_{i,p}(n)$ avec le nombre d'itérations n pour différents utilisateurs et pour $R_p=70$	34
Figure III.6 variations de prix en fonction d'itérations.....	35

Figure III.7. Les débits $r_{i,s}(n)$ avec le nombre d'itérations n pour différents utilisateurs et $R_s=50$	36
Figure III.8. Les offres de convergence $w_{i,s}(n)$ avec le nombre d'itérations n pour différents utilisateurs et $R_s=50$	36
Figure III.9. Variation du prix en fonction d'itérations.	37

Liste des tableaux

Tableau I.1 .Nombre de sous-porteuse et de RB en fonction de la largeur de bande.....	8
.....	
Tableau II .1.Options d'agrégation de porteuses de la version 10.....	12
Tableau II .2.Options d'agrégation de porteuses de la version 11.....	13
Tableau II .3.Classes d'agrégation de porteuses.	22

Liste des abréviations

3GPP	3rd Generation Partnership Project.
4G	Quatrième génération des téléphones mobiles
B	
BSS	Base Station Subsystem
C	
CA	Carrier Aggregation
CCS	Cross-Carrier Scheduling
CC	Component Carrier
D	
DL	Downlink.
E	
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
eNB	Evolved Node B
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
F	
FDD	Frequency Division Duplex
G	
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	Generalized Packet Radio Service.

H

HSS	Home subscriber server
HSUPA	High Speed Up-link Packet Access.
HSDPA	High Speed Down-link Packet Access.
HLR	Home Local Register
HetNet	Heterogeneous Network

I

IMT	International Mobile Telecommunication.
------------	---

L

LTE	Long Term Evolution.
LTE-A	LTE-Advanced.

M

MIMO	Multiple-Input Multiple-Output.
MME	Mobility Management Utility
MSC	Mobile Switching Center

N

NTT	Nippon Telegraph & Telephone.
------------	-------------------------------

O

OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Acces.
--------------	---

P

PGW	Packet Gateway
PS	Packet Switched
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDCCH	Physical Downlink Control Channel

Pcell	Primary Cell
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
Q	
QoS	Quality of Service.
R	
RF	Radio frequency.
RRHs	Remote radio heads.
RE	Resource Element
RN	Relay Nodes
RRC	Radio Resource Control
S	
SGW	Serving Gateway
SGSN	Service GPRS Support Node
Scell	Secondary Cell
T	
TDD	Time Division Duplex
U	
UIT	Union Internationale des télécommunications
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UE	User Equipment.
UL	Uplink.
W	
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access.

Introduction générale

Introduction générale

La demande croissante de services mobiles à large bande avec haut débit, vitesse et qualité de service (QOS) ont motivé le développement de la technologie LTE par le 3GPP. Les systèmes LTE ont été continuellement mis à jour depuis le lancement de la version 8 afin d'améliorer les performances des réseaux sans fil, la version 12 étant la plus récente à avoir été adoptée en 2014. En ciblant les exigences IMT-Advanced définies par l'Union internationale des télécommunications (UIT), le 3GPP a lancé une nouvelle étude pour faire évoluer le LTE vers le LTE-Advanced.

Le LTE-A est imposé comme l'une des technologies mobiles qui se sont développées le plus rapidement dans le monde. D'autres améliorations du LTE-A sont toujours en cours de développement et ses futures versions comporteront des fonctions améliorées de MIMO, d'agrégation de porteuses.

Ce mémoire est organisé dans un document comportant trois chapitres :

Dans le premier chapitre intitulé « LES RÉSEAUX LTE ET LTE-ADVANCE », nous présentons une vue générale sur la technologie LTE ainsi ses objectifs et aussi l'architecture du réseau LTE, nous allons mentionner ses caractéristiques, sa qualité de service. Ensuite, nous parlons de l'amélioration du système LTE qui est le LTE-A. Ce dernier utilise des techniques avancées comme l'agrégation de porteuses (CA) qui est un mécanisme essentiel pour augmenter le débit par utilisateur et par le système. C'est ce que nous avons présenté dans le deuxième chapitre qui décrit son principe de fonctionnement, ses avantages et ses performances. D'autre part, nous avons vu les types d'agrégation de porteuses, les scénarios de déploiement, ...

Notre troisième chapitre sera consacré aux résultats de simulation du problème d'optimisation de l'allocation des ressources d'agrégation de porteuses CA.

Nous finalisons notre mémoire par une conclusion générale qui résume le travail proposé pour mettre en évidence les résultats obtenus et nous proposerons d'autres perspectives.

Chapitre I

LES RESEAUX LTE ET LTE-ADVANCED

I.1 Introduction

Le LTE (Long Term Evolution) est une amélioration des normes de téléphonie cellulaire (GSM, EDGE, UMTS...). La norme LTE, définie par le groupe 3GPP, a été initialement proposée comme une norme 3.9G de troisième génération. Elle ne répondait pas à toutes les exigences techniques imposées pour les normes 4G par l'Union internationale des télécommunications (UIT). Le groupement 3GPP la fait évoluer en permanence continuellement. Le LTE utilise des bandes de fréquences dont la largeur varie de 1,4 MHz à 20 MHz.

Cette toute nouvelle norme introduit une nouvelle technique de transmission sur plusieurs porteuses complètement différente de l'étalement de spectre des releases précédentes. Elle définit également une architecture de réseau simplifiée et entend ainsi offrir de meilleures performances. LTE n'est pas à proprement parler une technologie de quatrième génération (4G) ou de l'IMT Advanced pour utiliser le vocabulaire de l'UIT [1].

La technologie LTE est basée sur une combinaison de technologies avancées qui permettent d'augmenter considérablement les performances (très haut débit et faible latence) par rapport aux réseaux 3G actuels.

I.2 Historique sur la 4G

L'évolution du nombre d'abonnés à la téléphonie mobile au cours des dernières années a créé un nouveau secteur de l'industrie mondiale des télécommunications.

- La première génération de téléphones portables (appelée 1G), offrant un service limité et très coûteux, tels que l'absence de système d'itinérance (Roaming). Avec le passage au traitement numérique des données, la 1G a été abandonnée et a été remplacée par la deuxième génération (2G).
- Le réseau 2G est mis en place en 1990. Il représente le passage de l'analogique au numérique. La 2G est suffisante pour appeler et envoyer des SMS et même des MMS. Elle atteint un débit de 9600bits/s, cette norme est exploitée par le GSM (Global System for Mobile communications). Ce réseau a subi trois améliorations successives avec le réseau GPRS appelé aussi 2.5G et le réseau EDGE (évolution du GPRS) également appelé 2.75G [2].
- Le système 3G (UMTS) est basé sur les communications de données cellulaires, il atteint un débit de 2Mbit/s.

- UMTS a été développé en 2004 sous sa première version Release99 (R99). Elle fonctionne sur la bande de fréquences 1900-2000 MHz et permet un débit réel de l'ordre de 384 Kbits/s (8 fois plus rapide que le GPRS) [3].
- Pour répondre à la nécessité d'augmenter encore les débits de données, deux technologies sont en concurrence depuis 2005[4]. le WiMAX standardisé par IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) et le LTE standardisé par la 3GPP [5] qui a été développé à partir des normes cellulaires GSM. Le LTE possède des améliorations comparées à celles des trois premières générations.
- En octobre 2015, la 3GPP a approuvé la version 13 comme un réseau amélioré LTE-A, tout en gardant toujours les mêmes spécificités du réseau mère (LTE) [6].

I.3 Pourquoi la technologie LTE

Le LTE (Long Term Evolution) est la technologie par excellence des réseaux sans fil dans le monde, nettement supérieure aux réseaux et aux technologies précédentes comme les réseaux 3G. LTE est l'évolution d'UMTS après HSDPA/HSUPA.

Voici quelques-unes des exigences architecturales établies par l'organisme de normalisation 3GPP pour la technologie LTE :

- Atteindre des débits de 100Mbits/s pour la liaison descendante et 50Mbits/s pour la liaison montante.
- Améliorer l'efficacité spectrale.
- Possède une bande passante modulable avec un espace de sous-porteuses de 15kHz.
- Modèle de QoS simple.
- Haut niveau de sécurité dans le réseau d'accès (AN) ainsi que dans le réseau central (CN).

I.4 Architecture du réseau 4G

Tandis que le mot « LTE » englobe l'évolution du réseau d'accès du système UMTS vers un réseau d'accès évolué appelé E-UTRAN et un réseau cœur appelé EPC.

La figure I.1 représente l'architecture générale du système LTE.

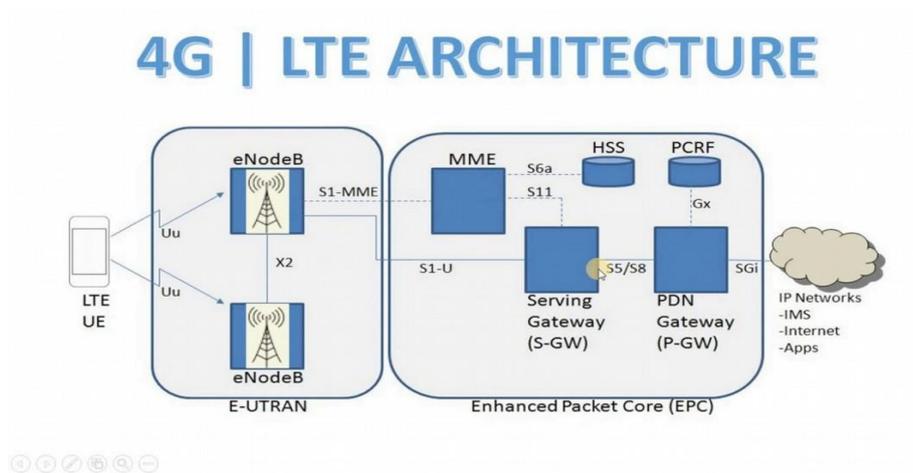


Figure I.1. Architecture générale du LTE.

I.4.1 UE (Équipement de l'Utilisateur)

UE est un terme normalisé, qui désigne un élément d'un réseau de la téléphonie mobile cellulaire de troisième ou de quatrième génération. Il peut être un simple téléphone mobile, ou bien un Smartphone, un ordinateur portable équipé d'une clé 3G/ou 4G. L'UE est authentifiée et autorisée à accéder au réseau mobile de l'opérateur [6].

I.4.2 La partie radio E-UTRAN

L'E-UTRAN est la partie d'accès radio du réseau LTE. Il ne contient que des eNodeBs qui assurent l'échange radio avec L'E-UTRAN. Elle permet la connexion entre l'UE et le réseau cœur EPC par les antennes eNodeBs [6].

I.4.2.1 eNodeB

- ✓ L'eNodeB est l'équivalent de la BTS dans Réseau GSM et Node B dans l'UMTS.
- ✓ Ce sont des antennes qui relient les UE s avec le réseau cœur de LTE via les RF air interface [2].
- ✓ Responsable de la gestion de ressource radio.
- ✓ Gère l'allocation du UpLink et DownLink.

I.4.3 Réseau cœur EPC (Evolved Packet Core)

L'EPC est le cœur du LTE basée sur les protocoles internet pour la signalisation et le transport de la voix et des données. Il permet l'interconnexion via les réseaux des autres opérateurs mobiles, les réseaux de téléphonie fixe et le réseau internet.

Il comporte plusieurs blocs fonctionnels:

I.4.3.1 Entité MME (Mobility Management Entity)

C'est une entité de contrôle qui est responsable de :

- La sélection S-GW et P-GW.
- La sélection d'un autre MME pendant le Handover.
- L'authentification des UE s à partir des informations recueillies du HSS.

I.4.3.2 Entité Serving GW (Serving Gateway)

Les fonctions de l'entité Serving GW incluent :

- Transfère localement les paquets de données à l'utilisateur.
- Permet la connexion entre des réseaux LTE et d'autres réseaux.

I.4.3.3 Entité PDN-GW (Packet Data Network Gateway) [7]

- Fournit la connectivité au terminal mobile (UE) vers le paquet externe du réseau de l'information.
- Alloue les adresses IP d'un UE, ainsi que les applications de la QoS.
- Maintient la connexion mobile entre LTE/UMTS/GSM systèmes et le non 3GPP système.

I.4.3.4 HSS (Home Subscriber Service)

HSS est une base de données HLR évoluée qui contient toutes les informations pour les réseaux GSM/GPRS/3G/LTE.

Désignée à l'authentification, l'autorisation, la sécurité, le débit fournit une localisation détaillée à l'utilisateur [7].

I.4.3.5 PCRF (Policy and Charging Rules Function)

- Fournit les règles de taxation lorsque un (default) est activé ou modifier par l'utilisateur.
- Il fournit une QoS d'autorisation pour décider le traitement des données en respectant l'abonnement des utilisateurs [7].

I.5 Les caractéristiques LTE

I.5.1 Mobilité

Cette technologie assure le bon fonctionnement à des vitesses élevées où le Handover pourra s'effectuer dans des conditions où l'UE se déplace à grande vitesse.

I.5.2 Flexibilité de la bande passante

Elle offre une possibilité d'opérer dans des allocations de bande de fréquence avec différentes tailles [1.25 ,2.5, 10, 15,20] MHz [8].

I.5.3 Débit sur interface radio

La technologie LTE propose pour la voie descendante un débit de 100Mbit/s et 50Mbit/s pour la voie montante.

L'interface radio doit avoir la possibilité de supporter un débit maximum de 100Mbit/s toute en considérant une allocation de la bande de fréquence de 20MHz pour la voie descendante et un débit maximum de 50Mbit/s pour la voie montante.

I.5.4 Support du multicast

Il est utilisé surtout pour les applications multimédias par exemple : diffuser la télévision.

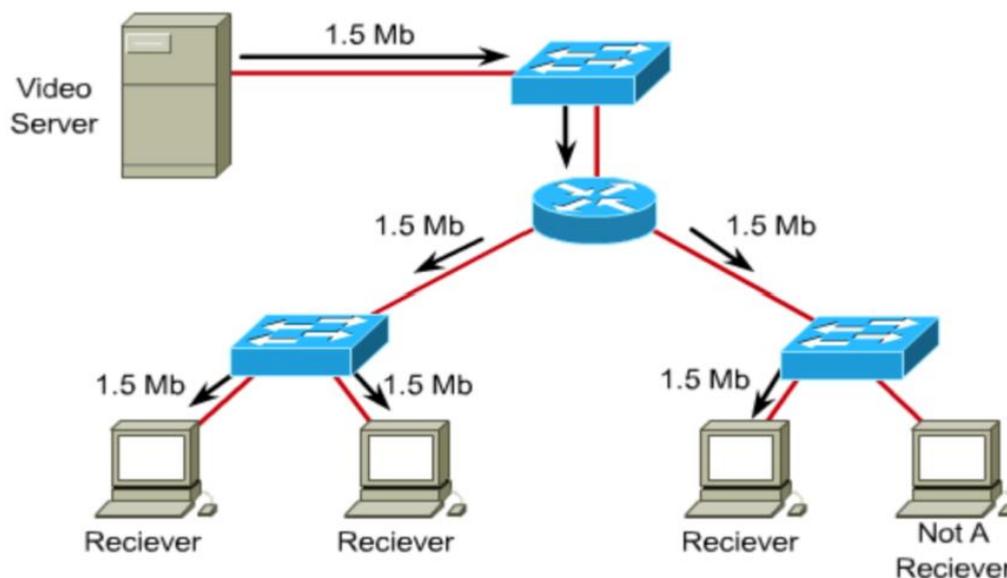


Figure I.2. Le fonctionnement du multicast.

I.5.5 Coexistence et Interfonctionnement avec la 3G

Le Handover entre E-UTRAN (LTE) et UTRAN (3G) doit être réalisé en moins de 300 ms pour les services temps-réel et 500 ms pour les services non temps-réel. Il est clair qu'au début du déploiement de la LTE peu de zones seront couvertes. Il s'agira pour l'opérateur de s'assurer que le Handover entre LTE et La 2G/3G est toujours possible [8].

I.5.6 Connexion à haut débit

Le LTE possède une connexion d'Internet à haut débit permanente c'est à dire le changement d'état des UEs est très rapide lorsqu'il veut échanger du trafic avec d'autres terminaux [6].

I.5.7 Couverture des zones urbaines et rurales

Avec la mise en place de la 4G et les demandes croissantes de l'UE, la couverture des zones urbaines et rurales en haut débit s'est fortement développée grâce à l'amélioration des petites cellules à faible puissance [6].

I.6 La QoS en LTE

Le but de la qualité de service est d'optimiser les ressources du réseau et de garantir de bonnes performances aux applications du LTE.

Elle permet d'offrir aux utilisateurs des débits et des temps de réponse différenciés par application suivant les protocoles mis en œuvre au niveau de la couche réseau [9].

I.7 Allocation des blocs de ressource dans LTE

Dans une trame LTE, l'allocation des ressources doit être dynamique et se fait dans le domaine temporelle et fréquentiel, la ressource est allouée uniquement lorsque les utilisateurs l'ont besoin.

Le fonctionnement de l'interface radio en liaison descendante est divisé en trames de 10 ms chacune. De même, une trame radio est divisée en 10 sous-trames appelées TTI (intervalle de temps de transmission) d'une durée de 1 ms chacune. Chaque sous-trame est divisée en deux slots temporels, de 0,5 ms chacun. D'autre côté, dans le domaine des fréquences, la bande passante du système est divisée en sous-bandes de 180 kHz. Chacune de ces sous-bandes est composée de 12 sous-porteuses uniformément espacées de 15 kHz. Les ressources physiques dans le domaine temporel et fréquentiel sont appelées bloc de ressources (RB).

Un bloc de ressources dure 0.5 ms soit un slot et est constitué de symboles OFDM (6 ou 7 symboles selon la durée du préfixe cyclique utilisé). Chaque symbole OFDM est composé de symboles de modulations appelés unité de ressource (UR) ou élément de ressources (RE). En OFDM, une unité de ressource porte un symbole de modulation. Ainsi, le système peut être modélisé par une grille dans le repère temps fréquence comme le montre la figure I.3 [10].

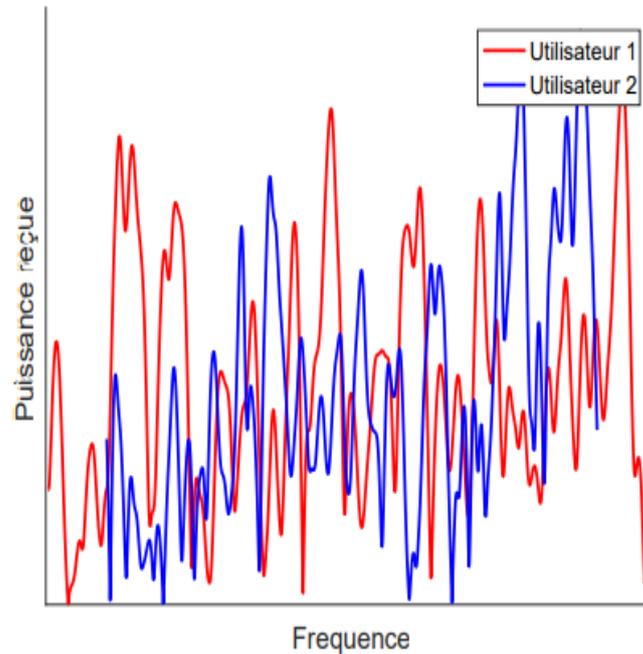


Figure I.3. Canaux sélectifs en fréquence.

En LTE, la largeur de bande varie de 1.4 MHz à 20 MHz. Le nombre de RB dans une grille de ressources dépend de la largeur de la bande passante.

Le tableau ci-dessous montre le nombre de sous-porteuses et de RB en fonction de la largeur de bande.

Bande(MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Nombre de sous porteuses	72	180	300	600	900	1200
Nombre de ressources block	6	15	25	50	75	100

Table I.1. Nombre de sous-porteuse et de RB en fonction de la largeur de bande [11].

I.8 Le système LTE-Advanced

Le système LTE-Advanced est nommé aussi Release 10 du 3GPP. C'est une amélioration du système LTE qui offre une capacité de cellule supérieure et des débits utilisateur plus élevés.

Cette technologie, tout comme les autres systèmes normalisés par le 3GPP (GSM, UMTS, HSPA) évolue au cours du temps, notamment en fonction des progrès techniques et des demandes du marché. Chaque palier d'évolution est appelé une Release. La première Release du LTE est la Release 8, dont les spécifications fonctionnelles ont été finalisées en décembre 2008.

Les spécifications fonctionnelles de la Release 10 ont-elles été finalisées en mars 2011 [12].

Le LTE-Advanced est capable de fournir des débits pics descendants supérieurs à 1 Gb/s à l'arrêt et à plus de 100 Mbit/s pour un terminal en mouvement, grâce aux technologies réseaux intelligentes qui permettent de maintenir des débits plus élevés en tout point de la cellule radio, alors qu'ils baissent fortement en bordure des cellules UMTS et LTE [13]. Les principales innovations introduites dans le LTE-A sont l'agrégation de porteuses (CA), des techniques multi antennes améliorées et de nouveaux supports appelés RN. En plus, cette technologie garde la compatibilité totale avec le LTE au niveau du terminal et au niveau du réseau.

I.9 Avantages de la LTE-A

Le LTE-A offre les avantages suivants :

- Suggérer des améliorations techniques afin de garder une compatibilité croissante tout en offrant des vitesses plus élevées que le Gbps.
- Permet d'agréger jusqu'à cinq bandes de 20 MHz pour atteindre 100 MHz [14].
- Évoluer la technologie LTE vers une meilleure efficacité du spectre afin d'absorber la croissance des trafics mobiles.
- Offre une meilleure expérience à l'utilisateur avec des débits plus élevées.
- Allocation dynamique d'une bande passante variable [15].
- Nouveaux schémas MIMO [15].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une idée générale sur le réseau de quatrième génération (4G). Nous avons parlé un peu de l'objectif de la 4G, de l'architecture de ce réseau avec les différents blocs qui le constituent. Ensuite, nous avons cité les caractéristiques de la 4G avec sa qualité de service et nous avons également mentionné le concept de l'allocation des blocs de ressources. Enfin, nous avons évoqué l'amélioration du LTE pour arriver à une nouvelle norme plus performante qui est le LTE-A.

La LTE-A utilise les techniques avancées comme l'agrégation des porteuses et la MIMO combinées avec l'OFDM. Dans le chapitre suivant, nous verrons plus en détail la notion de L'agrégation de porteuse ou « Carrier Aggregation ».

Chapitre II

AGRÉGATION DE PORTEUSES DANS LA NORME LTE-ADVANCED

II.1 Introduction

L'une des différences entre le LTE-Advanced et le LTE est la possibilité d'agréger différents types de données. Pour améliorer la capacité du réseau, il est nécessaire d'ajouter de la bande passante. L'augmentation de la bande passante dans le LTE-Advanced est réalisée par les porteuses. L'agrégation de porteuses de la 4G LTE Advanced permet de combiner plusieurs porteuses LTE afin de bénéficier des débits élevés nécessaires à la 4G. Elle peut être utilisée à la fois pour FDD ainsi que pour TDD [16]. Cette configuration peut être faite de manière contiguë ou non-contiguë. Il est possible d'agréger jusqu'à 5 porteuses avec un total maximum de 100 MHz [17].

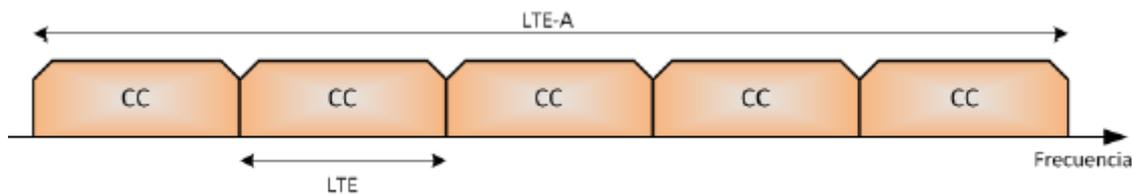


Figure II.1. Agrégation de cinq porteuses.

Le nombre de porteuses agrégées peut être différent dans la liaison montante et la liaison descendante. Toutefois, leur nombre de porteuses agrégées est le même. La quantité pour la voie montante n'est jamais supérieure à la voie descendante.

L'agrégation de porteuses peut être réalisée à partir de trois configurations de spectre. La première, plus simple à mettre en œuvre est l'utilisation continue de porteuses dans la même bande de fréquence de fonctionnement, appelée intra-bande continue. La deuxième configuration serait un système non continu, mais au sein de la même fréquence de fonctionnement, elle est appelée intra-bande non continue. Dans la troisième configuration, nous avons une attribution appelée inter-bande non continue [17]. Dans ce chapitre, nous verrons plus de détails sur ce terme (l'agrégation de porteuses).

II.2 Agrégation de porteuses dans LTE-Advanced

Le LTE-Advanced offre des débits théoriques allant jusqu'à 1 Gb/s en liaison descendante et 500 Mb/s en liaison montante sur une bande passante maximale de 100 MHz grâce à l'agrégation de porteuses, une nouvelle technologie d'accès radio qui permet d'allouer plusieurs composantes porteuses LTE (version 8) à un même équipement utilisateur LTE-A

[16] pour augmenter la largeur de bande de transmission globale. Ces canaux peuvent se trouver dans des éléments de spectre voisins ou dans des éléments différents. La disponibilité du spectre est un problème majeur pour la 4G LTE. Dans de nombreuses régions, seules de petites bandes sont disponibles généralement par petits fragments de 10 MHz. Même en améliorant l'efficacité spectrale, il n'est pas possible de fournir les débits de données spécifiques nécessaires dans le canal de 20 MHz maximum, la seule façon d'atteindre des débits de données plus élevés est d'augmenter la largeur de bande globale utilisée, l'IMT-Advanced place la limite supérieure à 100 MHz mais avec une prévision de 40MHz [17]. Lorsque les divisions du spectre ne sont plus utilisées, elles peuvent être réaffectées, cela conduit à des niveaux importants de fragmentation. Pour un terminal LTE, chaque porteuse composante apparaît comme une porteuse LTE, alors que pour un terminal LTE-Advanced, il est possible de bénéficier de la largeur de bande totale agrégée.

L'agrégation de porteuses peut servir à la fois FDD et TDD, chaque porteuse agrégée est appelée porteuse composante. La porteuse composante peut avoir une largeur de bande de [1,4 ; 3 ; 5 ; 10 ; 15 ; 20] MHz et un maximum de cinq porteuses composantes peuvent être agrégés. Le nombre de porteuses d'agrégats peut être différent en DL et en UL pourtant, le nombre de porteuses composantes UL n'est jamais supérieur au nombre de porteuses composantes DL [17].

La figure II.2 montre :

- a) Agrégation de cinq composantes porteuses contiguës avec de bandes passantes similaire.
- b) Agrégation de trois composantes porteuses non- contiguës avec de bandes passantes distinctes.

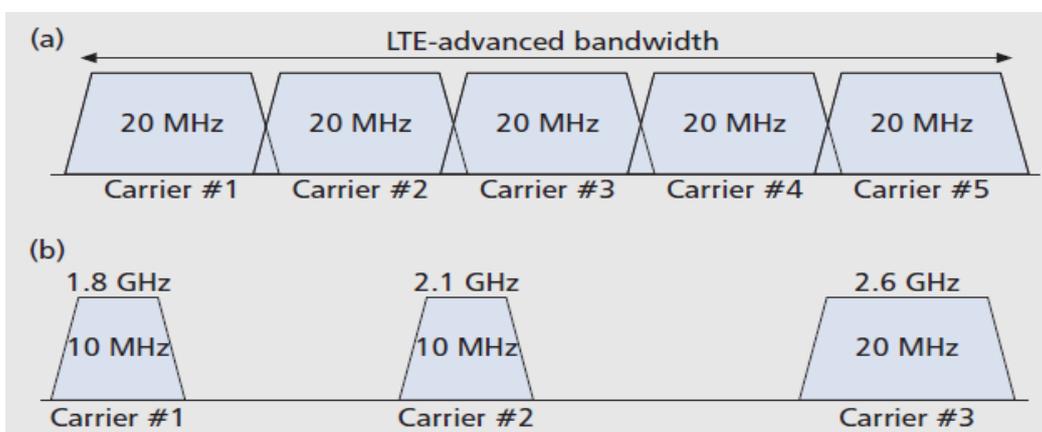


Figure II.2.Exemple d'agrégation de porteuses [16].

II.3 Évolution de l'agrégation de porteuses

L'agrégation de porteuses est l'une des rares fonctions qui permettent d'améliorer la capacité et la vitesse au niveau du réseau, avec l'évolution de ces versions, la capacité de vitesse de pointe a considérablement augmenté.

La figure II.3 illustre les principales étapes de l'évolution de l'agrégation de porteuses LTE.

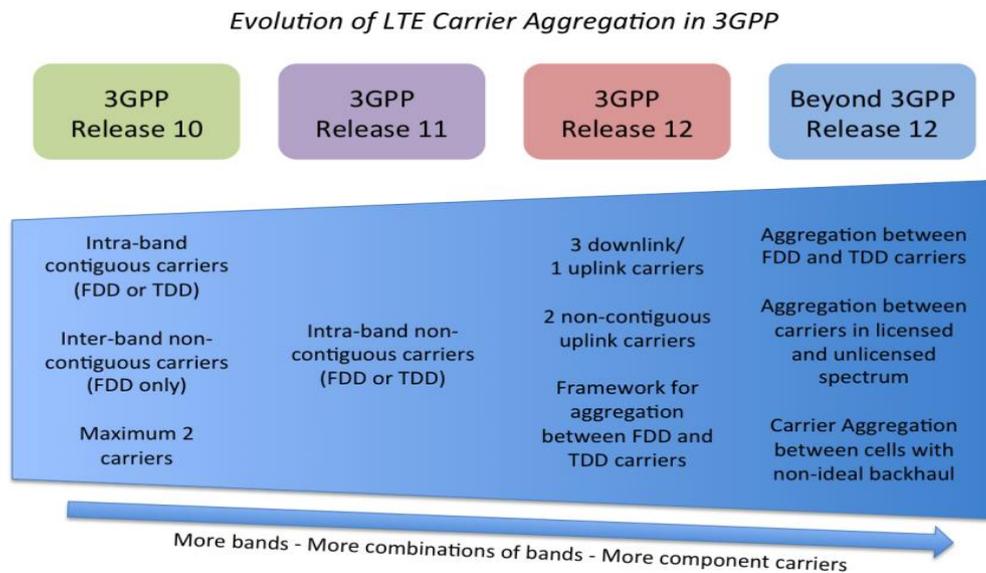


Figure II.3. Evolution de l'agrégation de porteuses.

II.3.1 Release 10 :

La version 10 du 3GPP a introduit un ensemble limité d'options d'agrégation de porteuses comme le résume le tableau II.1 :

Type	Duplex	Porteurs max	Spectre max	Bande LTE
Intra-bande contiguë	FDD	2	40MHz	2,1GHz
Intra-bande contiguë	TDD	2	40MHz	2,3GHz
Inter-bande non contiguë	FDD	2	20MHz	2,1 GHz 850 MHz

Tableau II.1.Options d'agrégation de porteuses de la version 10 [18].

La version 10 a créé un précédent pour l'agrégation de porteuses LTE et a répondu à certaines exigences spécifiques initiales, mais ce n'était qu'un départ. Le système LTE est capable de fonctionner dans plus de 40 bandes de fréquences différentes, afin de s'adapter aux différentes allocations de fréquences dans différentes parties du monde.

II.3.2 Release 11 :

La version 11 du 3GPP ajoute beaucoup plus d'options de bande aux modes de fonctionnement existants et introduit également la possibilité d'un fonctionnement intra-bande non contiguë en FDD et TDD, comme le résumé le tableau II.2 :

Type	Duplex	Porteurs max	Spectre max	Bande LTE
Intra-bande contiguë	FDD	2	40MHz	2.1GHz 2.6GHz
Intra-bande contiguë	TDD	2	40MHz	2.6GHz 2.3GHz 2.6GHz
Intra-bande non contiguë	FDD	2	20MHz	1.9GHz
Intra-bande non contiguë	TDD	2	20MHz	2.6GHz
Inter-bande non contiguë	FDD	2	20-40MHz (selon les bandes)	21 paires de bande

Tableau II.2.Options d'agrégation de porteuses de la version 11 [18].

II.3.3 Release 12 [18]

La version 12 du 3GPP ajoutera de nouvelles bandes de fréquences et combinaisons de bandes aux modes d'agrégation de porteuses existants. Elle introduira également deux nouveaux modes, permettant trois porteuses en liaison descendante/une porteuse en liaison montante ainsi que deux porteuses non contiguës en liaison montante.

Le 3GPP examine également un certain nombre d'autres développements intéressants :

- Agrégation de porteuses entre cellules.
- Agrégation de porteuses TDD avec des porteuses FDD.
- Agrégation de porteuses sur des bandes sous licence et sans licence.

II.4 Principe de fonctionnement

La normalisation 3GPP définissant que la largeur de bande doit être comprise entre 1,4 MHz et 20 MHz et la plupart des opérateurs disposant d'allocations de spectre inférieures à 20 MHz dans des blocs contigus ou de plusieurs bandes dans des blocs de spectre non contigus, il y a des limites à l'utilisation d'une seule porteuse en LTE avec un bloc de 20 MHz, et encore plus si l'on considère que l'objectif principal du LTE-Advanced est de prendre en charge jusqu'à 100 MHz de largeur de bande.

D'autre part, en raison des conditions imposées par l'utilisation limitée du spectre radio, il existe des obstacles à l'attribution de grands blocs et du spectre disponible sur chaque bande établie par le 3GPP. Pour résoudre ce problème et en raison de la nécessité d'étendre la capacité du réseau en optimisant l'expérience de navigation de l'utilisateur, il faut accroître le trafic liée à la fourniture de services vocaux et de données.

Le LTE-Advanced, à partir de la version 10, introduit une nouvelle technique appelée agrégation de porteuses (CA), qui selon le LTE-Advanced et selon le 3GPP qu'un terminal mobile (UE) peut émettre et recevoir sur un maximum de 5 porteuses distinctes, chacune ayant une largeur de bande maximale de 20 MHz, ce qui permet une largeur de bande maximale de 100 MHz [19].

II.5 Avantages et performances de l'agrégation de porteuses

L'AC est un outil efficace pour regrouper le spectre fragmenté des opérateurs et offrir des débits plus élevés avec un canal de spectre plus grand. Toutefois, l'AC présente plusieurs avantages supplémentaires :

- L'agrégation des porteuses augmente les ressources du spectre, ce qui permet d'obtenir des vitesses plus élevées.
- L'agrégation de plusieurs porteuses augmente le spectre. Cela permet d'augmenter la capacité des cellules et l'efficacité du réseau et améliore l'expérience de tous les utilisateurs.
- La majorité des opérateurs utilisent un spectre fragmenté qui couvre différentes bandes et largeurs de bande. L'agrégation de porteuses permet de les combiner en une ressource spectrale plus efficace.
- Parmi les domaines d'application des agrégations de porteuses, on cite :
 - Augmentation de la capacité du réseau LTE.
 - Ajouter une couche de fréquences supplémentaire couche d'agrégation.
 - Améliorations UL pour les couches de fréquences plus élevées.

- Plus de sous-porteuses parmi lesquelles choisir des sous-porteuses de meilleure qualité.

II.6 Type de l'agrégation de porteuses

Trois types d'agrégation de porteuses sont définis dans le 3GPP afin de répondre aux scénarios de spectre des opérateurs.

Ces trois types de CA sont illustrés à la figure II.4 :

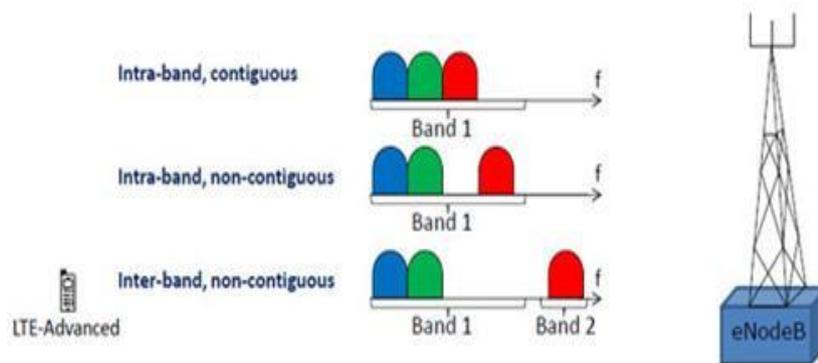


Figure II.4.Type d'agrégation de porteuses.

II.6.1 Intra-bande

Cette forme d'agrégation de porteuses utilise une seule bande. Il y a deux formats principaux pour ce type d'agrégation de porteuses :

II.6.1.1 Contiguës

L'agrégation des porteuses contiguës se fait en continu dans le spectre, c'est-à-dire que les différents porteurs sont agrégés côte à côte en fréquence.

Voici quelques exemples de cette configuration :

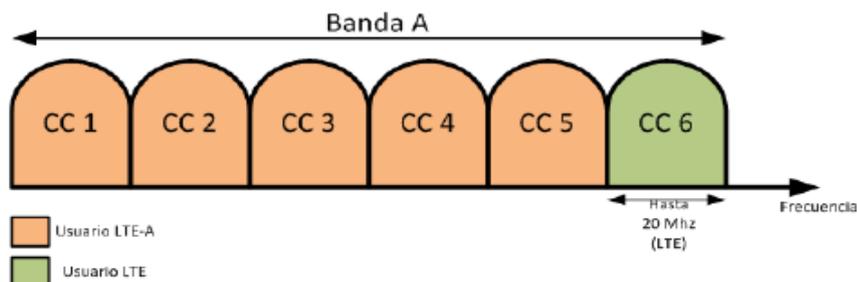


Figure II.5.Intra-bande contiguës [20].

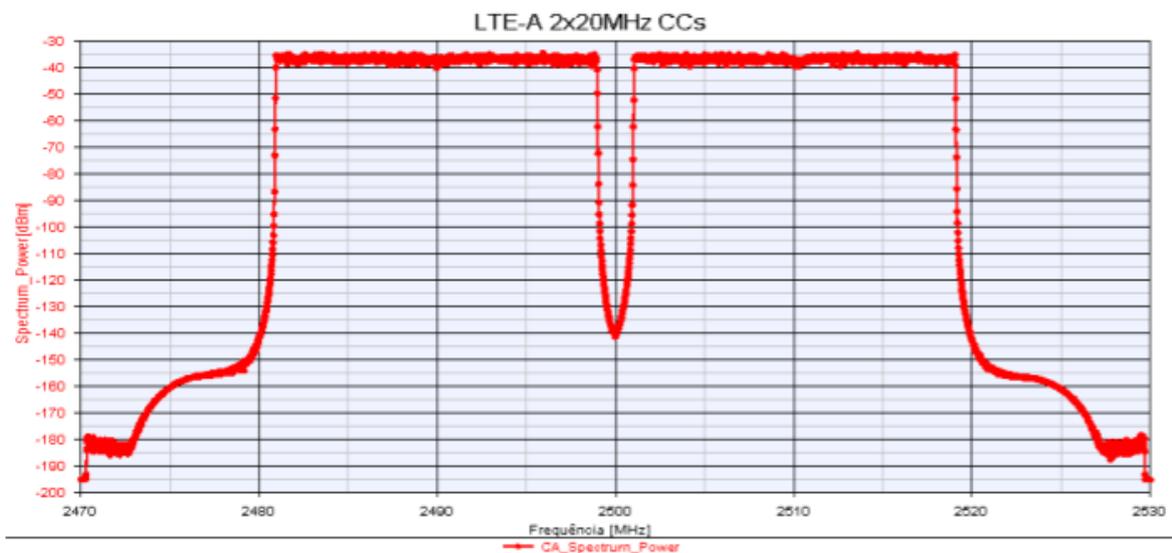


Figure II.6. Spectre de l'agrégation à deux porteuses de 20 MHz contiguës (2x20 MHz) [20].

La mise en œuvre matérielle de ce type d'AC n'est pas compliquée car elle peut être réalisée par une seule chaîne RF [21].

II.6.1.2 Non-contiguës

Agrégation intra bande avec des composants non contigus. Elle consiste à utiliser des porteuses qui se trouvent sur la même bande de fonctionnement mais ne sont pas adjacentes en fréquence.

Ce type d'AC est plus difficile à mettre en place car le signal ne peut pas être exploité comme une seule transmission, de sorte qu'il faut au moins deux émetteurs ou plus, ce qui augmente le coût de l'équipement [17].

Voici des exemples qui montrent les porteuses dans le spectre :

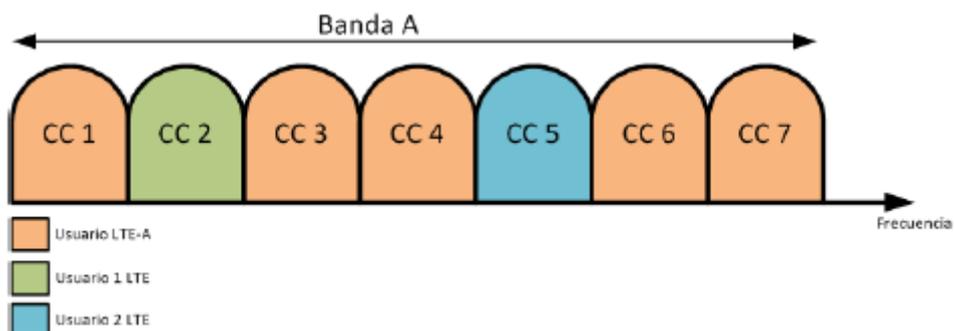


Figure II.7. Intra-bande non-contiguës [22].

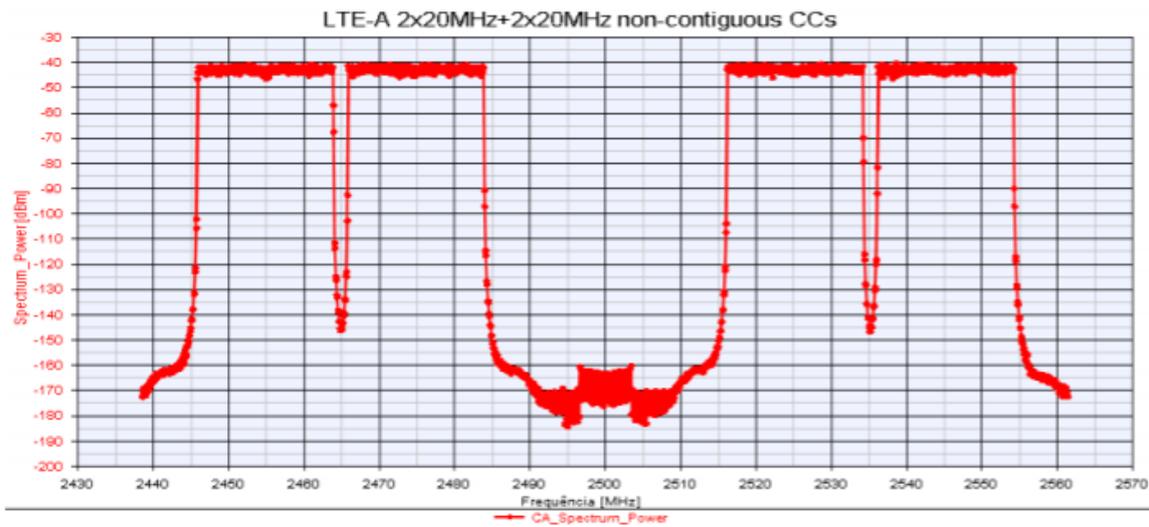


Figure II.8. Spectre de l'agrégation non contiguë à 4 porteuses de 20 MHz (2x20 MHz+2 x 20 MHz) [20]

II.6.2 Inter-bande non contiguë

Dans ce type de CA, les deux porteuses se trouvent dans des bandes différentes. Ces porteuses agrégées peuvent être transmises en parallèle à destination ou en provenance du même terminal, ce qui permet d'obtenir une performance spécifique beaucoup plus élevée [17].

La mise en œuvre du matériel utilisateur pour ce type est la plus complexe, car une seule chaîne RF est limitée en termes de bande de fréquences [21].

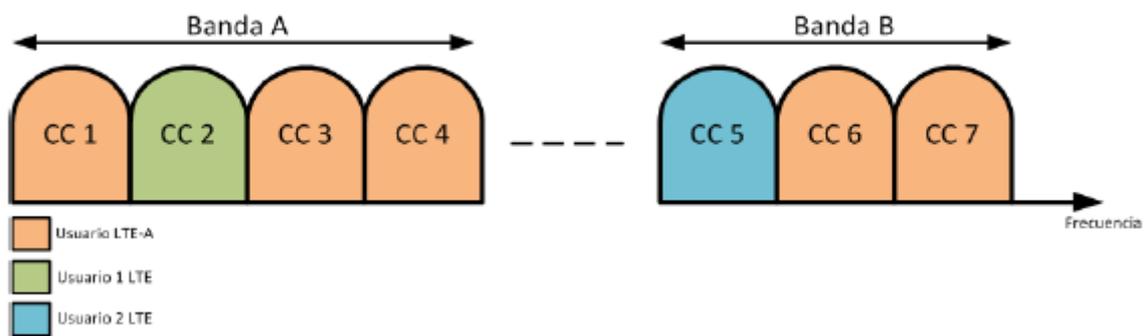


Figure II .9. Inter-bande non contiguë [22].

II.7 Scénarios de déploiement

L'objectif de l'agrégation de porteuses est d'améliorer la vitesse offerte aux utilisateurs. Avec ce type de technologie, il est possible de présenter différents types de déploiements au niveau du réseau. Cependant, l'agrégation de porteuses peut aussi être utilisée pour réduire les interférences entre les cellules dans les réseaux hétérogènes. De plus, elle simplifie la gestion du trafic multi bande en équilibrant la charge entre les différentes porteuses. Dans cette section, on présente cinq scénarios de déploiement différents avec deux porteuses F1 et F2 [23], dont la fréquence F1 représente la couche macro. La fréquence F2 est déployée de cinq manières différentes.

II.7.1 Scénario 1

Dans ce scénario, les cellules avec les fréquences porteuses F1 et F2 sont (géographiquement) co-localisées. Les deux couches fournissent une couverture suffisante et assure la prise en charge de la mobilité [23]. Ce scénario s'applique tant que les composantes de la porteuse appartiennent à la même bande de fréquences, par exemple 2GHz, 800 MHz.

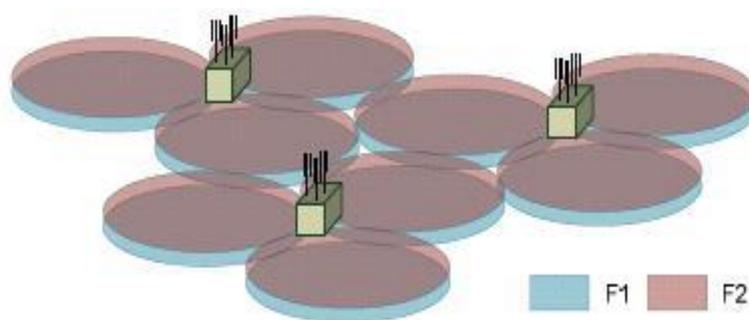


Figure II.10. Scénario 1 de mise en œuvre de l'AC [19].

II.7.2 Scénario 2

Dans ce scénario, les cellules avec les fréquences porteuses F1 et F2 sont situées sur le même emplacement et correspondent à des bandes de fréquences différentes. Dans ce cas, la couverture de F2 est plus faible en raison des conditions de propagation car sa fréquence est plus élevée que celle de F1. En d'autres termes, seul F1 fournit une couverture suffisante et F2 est utilisée pour améliorer le débit. Un exemple de scénario serait le cas où $F1 = \{800 \text{ MHz}, 2000 \text{ MHz}\}$ et $F2 = 3500 \text{ MHz}$ où l'agrégation est possible entre les cellules superposées [24].

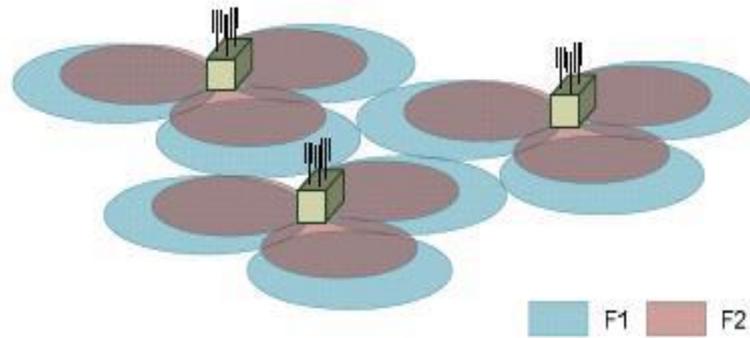


Figure II.11.Scénario 2 de mise en œuvre de l'AC [19].

II.7.3 Scénario 3

Les cellules F1 et F2 sont co-localisées, mais les antennes F2 sont dirigées vers les limites de la cellule F1 de façon à augmenter la performance des limites de la cellule. F1 fournit une couverture suffisante mais F2 a potentiellement des trous, en raison d'une perte plus importante [23]. C'est le scénario typique lorsque F1 et F2 sont dans des bandes différentes, par exemple 800 MHz et 3GHz respectivement [19].

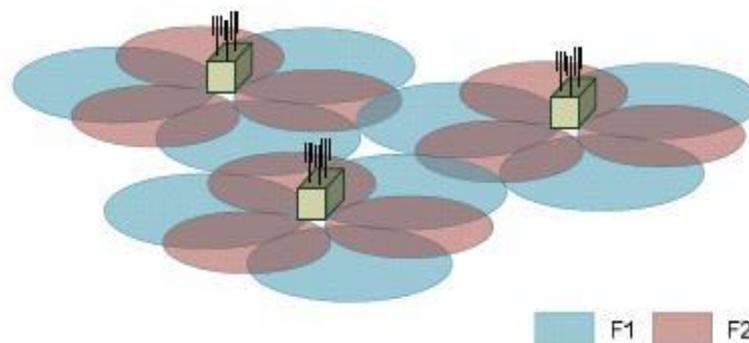


Figure II.12.Scénario 3 de mise en œuvre de l'AC [19].

II.7.4 Scénario 4

Dans ce scénario, la fréquence porteuse F1 assure une macro-couverture et des têtes radio distantes (RRH) correspondant à la fréquence porteuse F2 sont utilisées pour améliorer le débit aux points d'accès [24]. Ce scénario se produit lorsque F1 et F2 sont des porteuses non contiguës dans la même bande de fréquences (par exemple, 1,7 GHz) ou dans des bandes différentes (F1 = 800 MHz et F2 = 3,5 GHz) [19].

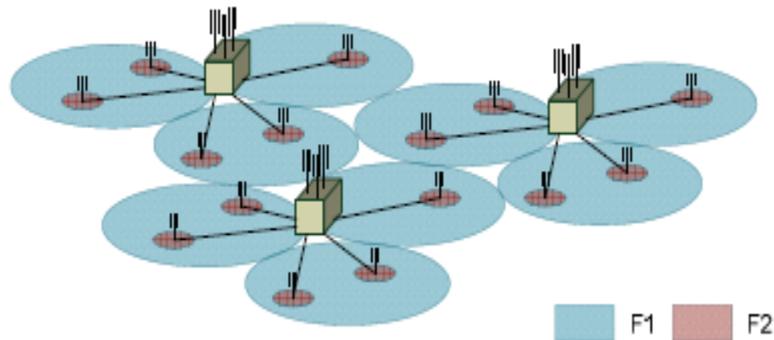


Figure II.13.Scénario 4 de mise en œuvre de l'AC [19].

II.7.5 Scénario 5

Similaire au scénario 2, mais des répéteurs sélectifs en fréquence sont déployés de manière à étendre la couverture pour l'une des fréquences porteuses. Il est probable que les fréquences F1 et F2 de la même eNB peuvent être agrégées lorsque la couverture se couvre [23].

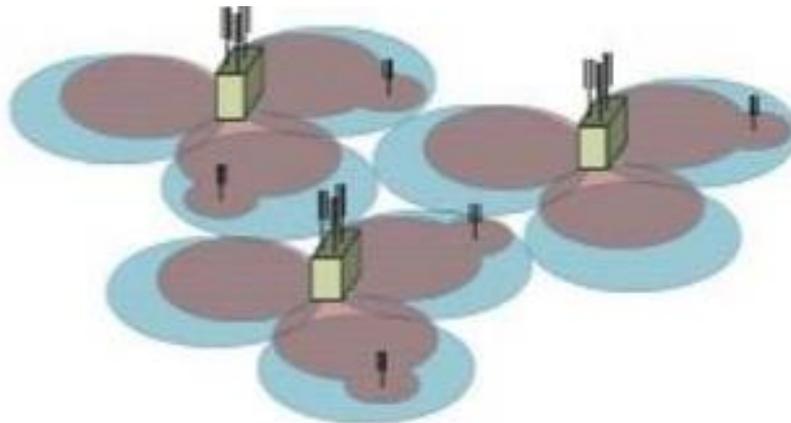


Figure II.14.Scénario 5 de mise en œuvre de l'AC [23].

II.8 Les composantes d'agrégation de porteuses LTE

Lorsque les porteuses sont agrégées, chaque porteuse est appelée porteuse composante. Il existe deux catégories :

II.8.1 Porteuse composante primaire

Il s'agit de la porteuse primaire de tout groupe. Il y aura une porteuse primaire descendante et une porteuse primaire montante associée.

II.8.2 Porteuse de composante secondaire

Il peut y avoir une ou plusieurs porteuses de composants secondaires.

- Il n'y a pas de définition de la porteuse à utiliser comme porteuse de composante primaire, différents terminaux peuvent utiliser différentes porteuses. La configuration de la porteuse de composant primaire est spécifique au terminal et sera déterminée en fonction de la charge sur les différentes porteuses ainsi que d'autres paramètres pertinents.
- En outre, l'association entre la porteuse primaire de la liaison descendante et la porteuse primaire correspondante de la liaison montante est spécifique à la cellule.

II.9 Largeurs de bande d'agrégation de porteuses

La largeur de bande du canal dans le LTE, va de 1,4 MHz à 20 MHz selon la normalisation 3GPP qui définit l'interface radio et les configurations des équipements mobiles.

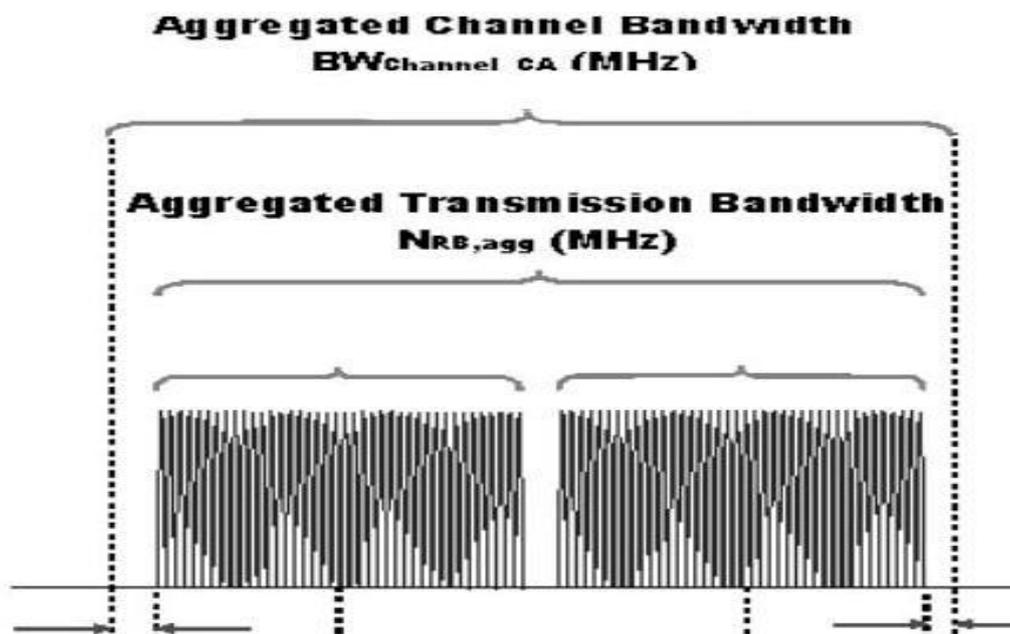


Figure II.15. Définitions de la largeur de bande de l'agrégation de porteuses LTE pour le cas intra-bande [17].

II.9.1 Classes de largeur de bande d'agrégation de porteuses

Il existe au total six agrégations différentes de porteuses, les classes de largeur de bande sont définies dans le tableau II.3 :

CARRIER AGGREGATION BANDWIDTH CLASS	AGGREGATED TRANSMISSION BW CONFIGURATION	NUMBER OF COMPONENT CARRIERS
A	≤ 100	1
B	≤ 100	2
C	100 - 200	2

Tableau II.3. Classes d'agrégation de porteuses [17].

NB : les classes D, E et F sont en phase d'étude [17].

II.10 L'agrégation de porteuses TDD FDD

Précédemment, l'AC n'était réalisable uniquement entre le spectre FDD et FDD ou entre le spectre TDD et TDD. Le 3GPP a terminé les travaux sur l'AC TDD-FDD, qui offre la possibilité d'agréger simultanément des porteuses FDD et TDD. Le but principal de ce support pour l'AC TDD-FDD est de fournir au réseau la possibilité d'augmenter le débit de l'utilisateur en agrégeant à la fois TDD et FDD vers le même UE. Cela lui permettra d'augmenter le débit de l'UE sans tenir compte de l'endroit où il se trouve dans la cellule. L'AC TDD et FDD permettrait également de distribuer plus rapidement la charge entre les fréquences TDD et FDD. En bref, l'AC TDD-FDD permet à l'AC d'être également applicable dans les cas où un opérateur possède une allocation de spectre dans les deux bandes TDD et FDD.

La conception de l'AC TDD-FDD Release 12 prend en compte une cellule TDD ou FDD comme cellule primaire.

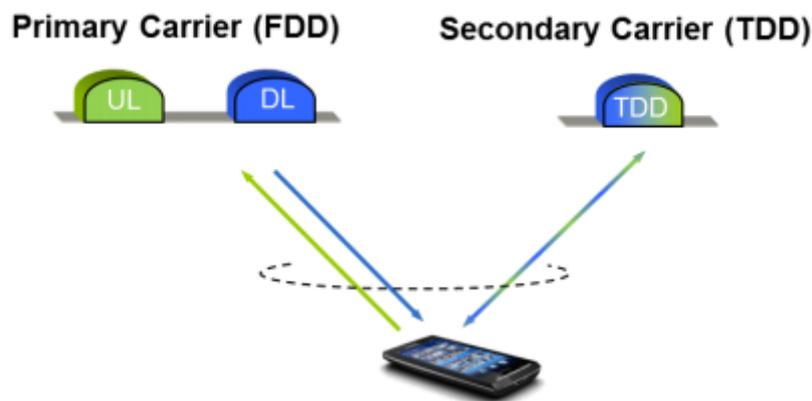


Figure II.16. Exemple de CA TDD-FDD.

II.11 Impact de l'agrégation de porteuses sur l'UE [23]

II.11.1 Cross-Carrier Scheduling (CCS)

Il s'agit d'une fonction supplémentaire pour l'UE présentée dans la version 10. Son objectif est de limiter les interférences dans les scénarios HetNet, c'est-à-dire avec une agrégation de porteuses dans laquelle une association de macros, de petites cellules et de relais est utilisée. Son utilisation permet de programmer des ressources sur SCell sans PDCCH.

II.11.2 Procédure de transfert de la capacité de l'UE via le RRC

En raison de la flexibilité de l'AC, le réseau E-UTRAN doit être informé des données de l'UE concernant l'AC. Les informations concernant l'AC transmises par l'UE concernant cette procédure sont récapitulées ci-dessous :

- Prise en charge du CCS : indique si l'UE peut recevoir des ordres de planification pour les SCells de la part du PCell.
- Prise en charge simultanée des transmissions PUCCH et PUSCH.
- Allocation non contiguë des ressources de la voie montante.
- Transmission périodique de BSS sur tous les CC.

II.12 Conclusion

Ce second chapitre nous a permis de connaître la notion d'agrégation de porteuses en LTE-A et ses évolutions, ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons cité quelques avantages avec ses performances, puis nous avons mentionné les types et les scénarios de déploiement et les deux composantes primaire et secondaire et nous avons défini les bandes passantes avec ces classes, de plus nous avons parlé de FDD et TDD. Finalement, dans l'impact, nous avons expliqué le Cross-Carrier Scheduling et la procédure de transfert de la capacité de l'UE via le RRC.

Dans le prochain chapitre, nous allons résoudre un problème d'optimisation d'allocation de ressources à plusieurs niveaux avec la méthode d'agrégation de porteuses.

Chapitre III

ALLOCATION DE RESSOURCES A PLEUSIEURS NIVEAUX AVEC AGREGATION DE PORTEUSES

III.1 Introduction [21]

Dans ce chapitre, nous présentons un problème d'optimisation d'allocation de ressources avec agrégation de porteuses pour attribuer les ressources porteuses de l'eNodeB de manière optimale entre les utilisateurs de la zone de couverture tout en considérant les débits alloués à chaque utilisateur par les autres porteuses pour les systèmes cellulaires. Nous proposons deux approches d'allocation des ressources en plusieurs étapes avec agrégation de porteuses :

- La première approche utilise des algorithmes distribués à plusieurs étapes pour attribuer aux utilisateurs les ressources de l'agrégation des porteuses, dans la zone de couverture d'une porteuse primaire et d'une porteuse secondaire.
- La deuxième approche utilise des algorithmes à plusieurs niveaux pour allouer aux utilisateurs les ressources de manière optimale à partir de toutes les porteuses en bande et permettre à chaque utilisateur de choisir ses porteuses primaires et secondaires en fonction des prix offerts, de manière à fournir un prix minimum pour les ressources allouées.

III.2 Allocation de ressources distribuée avec agrégation de porteuses

Dans cette partie, nous présentons une approche distribuée en plusieurs étapes pour l'allocation optimale des ressources des porteuses primaires et secondaires entre les utilisateurs mobiles, basée sur l'agrégation des porteuses. Nous nous intéressons à la recherche d'une solution optimale pour un groupe d'utilisateurs utilisant deux types d'applications présentées par des fonctions d'utilité logarithmiques ou des fonctions d'utilité de type sigmoïde [21].

III.3 Fonctions d'utilités

Une fonction d'utilité est une représentation de la satisfaction de l'utilisateur correspondant au service fourni. Nous supposons que deux types d'applications peuvent fonctionner sur le mobile de l'utilisateur, une application en temps réel avec une fonction d'utilité sigmoïde ou une application tolérante aux délais avec une fonction d'utilité logarithmique [27].

Ces applications des fonctions d'utilité ont les propriétés suivantes [21] :

- $U(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ et $U(\mathbf{r})$ est une fonction croissante de \mathbf{r} .
- $U(\mathbf{r})$ est deux fois continuellement différentiable en \mathbf{r} et bornée au-dessus.

III.3.1 Fonction d'utilité sigmoïde [28]

La fonction d'utilité sigmoïde est utilisée dans ce système cellulaire, elle peut être définie comme suit :

$$U(r) = c \left(\frac{1}{1 + e^{-a(r-b)}} - d \right) \quad (\text{III. 1})$$

Où :

$$\triangleright c = \frac{1+e^{ab}}{e^{ab}} \quad \text{et} \quad d = \frac{1}{1+e^{ab}}$$

Donc, il satisfait $U(0) = 0$ et $U(\infty) = 1$. Le point de départ de la fonction sigmoïde normalisée est à $r^{inf} = b$.

III.3.2 Fonction d'utilité logarithmique [28]

La fonction logarithmique est exprimée par :

$$U(r) = \frac{\log(1 + kr)}{\log(1 + kr^{max})} \quad (\text{III. 2})$$

Où :

- r^{max} : est le taux de satisfaction de l'utilisateur à 100%.
- k est le taux d'augmentation du taux r .

Donc, Il satisfait : $U(0) = 0$ et $U(r^{max}) = 1$. Le point de départ de la fonction logarithmique normalisée est à $r^{inf} = 0$. Nous utilisons trois fonctions sigmoïdes qui sont exprimées par l'équation (III. 2) avec différents paramètres [28] :

- $a = 5$ et $b = 10$, ce qui est une approximation d'une fonction échelon à un débit $r = 10$.
- $a = 3$, $b = 20$ qui est une approximation d'une application adaptative en temps réel avec un point d'inflexion au débit $r = 20$.
- $a = 1$, $b = 30$ qui est aussi une approximation d'une application adaptative en temps réel avec un point d'inflexion au débit $r = 30$.

III.4 Formulation du problème

Nous considérons un modèle, dans lequel nous avons un système mobile 4G-LTE à cellule unique, constitué de deux eNodeBs qui ont la même zone de couverture et de M équipements utilisateurs (UE).

L'un des eNodeBs est considéré comme la porteuse primaire et l'autre comme la porteuse secondaire. Chaque utilisateur se voit allouer une certaine largeur de bande r_i en fonction du type d'application qu'il exécute. Notre objectif est de déterminer la largeur de bande optimale qui doit être attribuée à chaque utilisateur par les deux eNodeBs. Nous supposons que les fonctions d'utilité $U_i(r_i)$ sont strictement concaves ou de type sigmoïde. Les fonctions d'utilité logarithmiques exprimées par l'équation (III. 2) et les fonctions d'utilité de type sigmoïde exprimées par l'équation (III. 3) sont utilisées pour représenter respectivement les applications tolérantes aux délais et les applications en temps réel [21].

III.4.1 Problème d'optimisation de la porteuse unique [21]

La formulation de base d'un problème d'allocation de ressources (RA) à une seule porteuse est donnée par l'équation suivante :

$$\max_{r_{single}} \prod_{i=1}^M U_i(r_{i,single}) \quad (III. 3)$$

Sous réserve de

$$\sum_{i=1}^M r_{i,single} \leq R$$

$$r_{i,single} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Où :

- R est le débit maximal réalisable de l'eNodeB.
- $r_{i,single}$ est le débit de l'utilisateur i.
- M est le nombre d'UE.

III.5 Problème d'optimisation des porteuses primaires et secondaires

III.5.1 Porteuse principale

Le problème de l'optimisation des deux porteurs se fait en deux étapes, primaire et secondaire.

Pour la première porteuse, on peut écrire le problème d'optimisation comme suit [21] :

$$\max_{r_p} \prod_{i=1}^M U_i(r_{i,p}) \quad (III. 4)$$

Sous réserve de

$$\sum_{i=1}^M r_{i,p} \leq R_p,$$

$$r_{i,p} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Où :

- $r_p = \{r_{1,p}, r_{2,p}, \dots, r_{M,p}\}$

- M est le nombre d'UEs dans la zone de couverture de l'utilisateur primaire eNodeB.
- R_p est le débit maximal réalisable de la porteuse primaire.

Il existe une solution optimale globale unique et traçable. La fonction objective du problème d'optimisation (III. 4) est équivalent à $\max_{r_p} \sum_{i=1}^M \log U_i(r_{i,p})$, cette solution optimale donne à chacun des M utilisateurs le débit optimal $r_{i,p}^{opt}$ seulement pour la porteuse primaire et pas encore le débit optimal final [29].

III.5.2 Porteuse secondaire

Dans la zone de couverture, une fois que l'opérateur primaire a fini d'allouer ses ressources aux M utilisateurs, l'opérateur secondaire commence à allouer ses ressources aux mêmes utilisateurs. Le problème d'optimisation pour la porteuse secondaire peut être formulé comme suit [21] :

$$\max_{r_s} \prod_{i=1}^M U_i(r_{i,s} + r_{i,p}^{opt}) \quad \text{(III. 5)}$$

Sous réserve de

$$\sum_{i=1}^M r_{i,s} \leq R_s$$

$$r_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Où :

- $r_s = \{r_{1,s}, r_{2,s}, \dots, r_{M,s}\}$ est le débit de l'utilisateur i .
- R_s est le débit maximal réalisable par la porteuse secondaire.
- $r_{i,p}^{opt}$ est le premier débit optimal attribué à l'utilisateur i par la porteuse primaire et estimé dans (III. 4).
- Le débit minimal alloué pour chaque utilisateur est égal au premier débit optimal $r_{i,p}^{opt}$ estimé dans (III. 4).

La solution de ce problème d'optimisation est : $\max_{r_s} \sum_{i=1}^M \log U_i(r_{i,s} + r_{i,p}^{opt})$

Le débit global de chaque utilisateur est obtenu par la somme de la solution donnée par (III. 4) $r_{i,p}^{opt}$ et de la solution donnée par (III. 5) $r_{i,s}^{opt}$ pour l'utilisateur i et est égal à

$$r_{i,agg}^{opt} = r_{i,s}^{opt} + r_{i,p}^{opt} .$$

Où :

$r_{i,agg}^{opt}$: représente la solution optimale globale qui donne à chacun des M utilisateurs le débit optimal provenant des porteuses primaire et secondaire et qui est considérée comme le débit optimal final.

III.6 Algorithme d'allocation de ressources distribuées à plusieurs niveaux

L'algorithme d'allocation des ressources est exécuté en plusieurs étapes basées sur le nombre de porteuses. Dans le cas d'une porteuse primaire et d'une porteuse secondaire, l'algorithme est divisé en deux étapes. Les algorithmes 1 et 2 sont respectivement les algorithmes de l'UE et de l'eNodeB exécutés lors de la première étape. Les algorithmes 3 et 4 sont respectivement les algorithmes de l'UE et l'eNodeB exécutés lors de la deuxième étape [21].

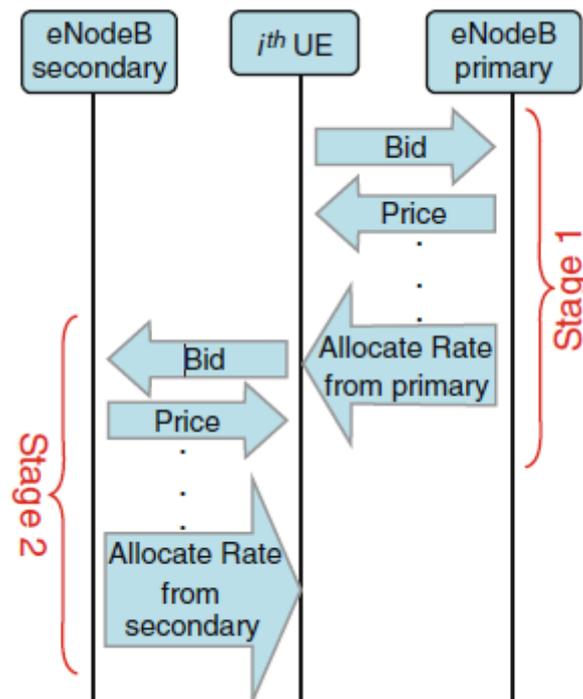


Figure III.1. Schéma de circulation de distribué en plusieurs étapes à plusieurs étages [21].

III.6.1 Algorithme 1 : première étape de l'algorithme d'agrégation des porteuses de l'UE

Algorithme 1 : Première étape de l'algorithme de CA de l'UE
<p>Envoi de l'offre initiale $w_{i,p}(1)$ à eNodeB</p> <p>loop</p> <p>Recevoir le prix fictif $P_p(n)$ de l'eNodeB</p> <p style="padding-left: 2em;">If STOP d'eNodeB alors</p> <p style="padding-left: 4em;">Calcul du débit alloué $r_{i,p}^{opt} = \frac{w_{i,p}(n)}{P_p(n)}$</p> <p style="padding-left: 2em;">Else</p> <p style="padding-left: 4em;">Résoudre $r_{i,p}(n) = \arg \max_{r_{i,p}} (\log U_i(r_{i,p}) - P_p(n)r_{i,p})$</p> <p style="padding-left: 4em;">Envoyer une nouvelle offre $w_{i,p}(n) = P_p(n)r_{i,p}(n)$ à eNodeB</p> <p style="padding-left: 2em;">End if</p> <p>End loop</p>

III.6.2 Algorithme 2 : la première étape de l'eNodeB d'agrégation de porteuses

Algorithme 2 : la première étape de l'eNodeB de CA
<p>loop</p> <p>Recevoir des offres $w_{i,p}$ des UE {Let $w_{i,p}(0)=\forall i$}</p> <p>If $w_{i,p}(n) - w_{i,p}(n-1) < \delta \forall i$ then</p> <p>STOP et attribuer des taux, ($r_{i,p}^{opt}$ à l'utilisateur i)</p> <p>Else</p> <p>Calculer $P_p(n) = \frac{\sum_{i=1}^M w_{i,p}(n)}{R_p}$</p> <p>Envoyer le nouveau prix fictif $P_p(n)$ à tous les UEs.</p> <p style="padding-left: 2em;">End if</p> <p>End loop</p>

Notre algorithme est divisé en deux étapes :

Dans la première étape, les algorithmes 1 et 2 sont respectivement l'UE et l'eNodeB. Chaque UE transmet une offre initiale $w_{i,p}(1)$ à l'eNodeB primaire. L'eNodeB vérifie si la différence entre l'offre actuelle reçue et la précédente est inférieure à un seuil δ . Si c'est oui, il sort.

Sinon, l'eNodeB calcule le prix fictif $P_p(n) = \frac{\sum_{i=1}^M w_{i,p}(n)}{R_p}$

Le résultat estimé $P_p(n)$ est ensuite envoyé à l'UE où il est utilisé pour calculer le débit $r_{i,p}(n) = \arg \max_{r_{i,p}} (\log U_i(r_{i,p}) - P_p(n)r_{i,p})$ qui est la solution du problème d'optimisation.

La nouvelle offre $w_{i,p}(n)$ est calculée en utilisant $r_{i,p}(n)$ où $w_{i,p}(n) = P_p(n)r_{i,p}(n)$. Tous les UE envoient leurs nouvelles offres $w_{i,p}(n)$ à l'eNodeB primaire. L'étape 1 de l'algorithme est finalisée par l'eNodeB primaire. Chaque UE calcule ensuite le débit qui lui est alloué

$$r_{i,p}^{opt} = \frac{w_{i,p}(n)}{P_p(n)}.$$

III.6.3 Algorithme 3 : Algorithme d'agrégation des porteuses de l'UE de deuxième étape

Algorithme 3 : Algorithme de CA de l'UE de deuxième étape

Envoi de l'offre initiale $w_{i,s}(1)$ à eNodeB

loop

Recevoir le prix fictif $P_s(n)$ de l'eNodeB

If STOP d'eNodeB alors

Calcul du débit alloué $r_{i,s}^{opt} = \frac{w_{i,s}(n)}{P_s(n)}$

Else

Résoudre $r_{i,s}(n) = \arg \max_{r_{i,s}} (\log U_i(r_{i,s} + r_{i,p}^{opt}) - P_s(n)r_{i,s})$

Envoyer une nouvelle offre $w_{i,s}(n) = P_s(n)r_{i,s}(n)$ à eNodeB

End if

End loop

III.6.4 Algorithme 4 : la deuxième étape de l'eNodeB d'agrégation de porteuses

<p>Algorithme 4 : la deuxième étape de l'eNodeB de CA</p> <pre> loop Recevoir des offres $w_{i,s}$ des UE $\{w_{i,s}(0)=\forall i\}$ If $w_{i,s}(n) - w_{i,s}(n-1) < \delta \forall i$ then STOP et attribuer des taux, ($r_{i,s}^{opt}$ à l'utilisateur i) Else Calculer $P_s(n) = \frac{\sum_{i=1}^M w_{i,s}(n)}{R_s}$ Envoyer le nouveau prix fictif $P_s(n)$ à tous les UEs. End if End loop </pre>
--

Après avoir alloué les prix de l'opérateur primaire, l'étape 2 démarre l'exécution. Chaque UE transmet une offre initiale $w_{i,s}(1)$ à l'eNodeB secondaire. L'eNodeB secondaire vérifie si la différence entre l'offre actuelle reçue et l'offre précédente est inférieure à un seuil δ , si c'est le cas il sort. Dans le cas contraire, l'eNodeB secondaire calcule le prix fictif $P_s(n) = \frac{\sum_{i=1}^M w_{i,s}(n)}{R_s}$. La valeur estimée de $P_s(n)$ est ensuite envoyée à l'UE où il est utilisé pour calculer le débit $r_{i,s}(n)$ qui est la solution du problème d'optimisation $r_{i,s}(n) = \arg \max_{r_{i,s}} (\log U_i(r_{i,s} + r_{i,p}^{opt}) - P_s(n)r_{i,s})$. Une nouvelle offre $w_{i,s}(n)$ est calculée à partir de $r_{i,s}(n)$ où $w_{i,s}(n) = P_s(n)r_{i,s}(n)$. Tous les UE envoient leurs nouvelles offres $w_{i,s}(n)$ à l'eNodeB secondaire. L'étape 2 de l'algorithme est finalisée par l'eNodeB secondaire. Chaque UE calcule ensuite le débit $r_{i,s}^{opt} = \frac{w_{i,s}(n)}{P_s(n)}$.

III.7 Simulation et résultats

Dans cette partie, nous utiliserons C++ pour exécuter le programme et MATLAB pour tracer les figures. Voici une petite définition de ces langages de programmation.

❖ MATLAB

Le nom MATLAB est l'abréviation de MATrix LABoratory. MATLAB est un langage de performant dédié pour le calcul technique. Il intègre le calcul, la visualisation et l'environnement de programmation. En outre, MATLAB est un langage de programmation

moderne et un environnement de résolution de problèmes : il possède des structures de données complexes, contient des outils d'édition et de correction intégrés et prend en charge la programmation orientée objet. Ces facteurs font de MATLAB un excellent outil d'enseignement et de recherche [30].

❖ Le langage C++

Le C++ est un langage de programmation. Il est notamment utilisé pour écrire des applications informatiques. C'est également l'un des langages de programmation les plus utilisés aujourd'hui. Chaque programme en C++ doit être écrit en respectant des règles d'écriture très précises [31].

III.8 Résultats numériques de l'allocation optimale des débits

Comme le montre la figure III.2, nous considérons deux eNodeBs avec la même zone de couverture et six UEs. L'une des eNodeB est la porteuse primaire et l'autre est secondaire.

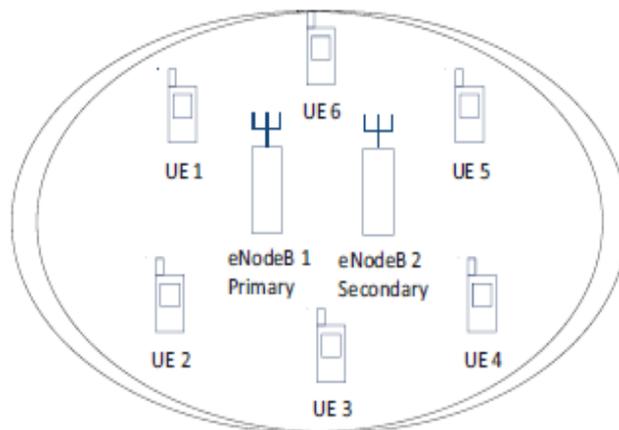


Figure III.2. Modèle de système [32].

Les algorithmes introduits dans les sections (III.6) ont été appliqués à différentes fonctions d'utilité de type sigmoïde et logarithmique en C++. Les résultats des simulations ont montré la convergence vers le point global optimal.

Nous montrons six fonctions d'utilité, chacune correspondant à une application utilisateur exécutée par un UE. Les trois premières fonctions sont de type sigmoïde et représentent les applications en temps réel exprimées par l'équation (III.1). Nous utilisons différents paramètres a et b pour chacune d'elles où :

- $a=5, b=10$ pour le premier utilisateur.
- $a=3, b=20$ pour le deuxième utilisateur.
- $a=1, b=30$ pour le troisième utilisateur.

Les trois fonctions d'utilité suivantes sont de type logarithmique et correspondent aux applications tolérantes aux délais exprimées par l'équation (III. 2) avec :

- $k=15$ pour le quatrième utilisateur.
- $k=3$ pour le cinquième utilisateur.
- $k=0.5$ pour le sixième utilisateur.
- Et on fixe r_{max} à 120.

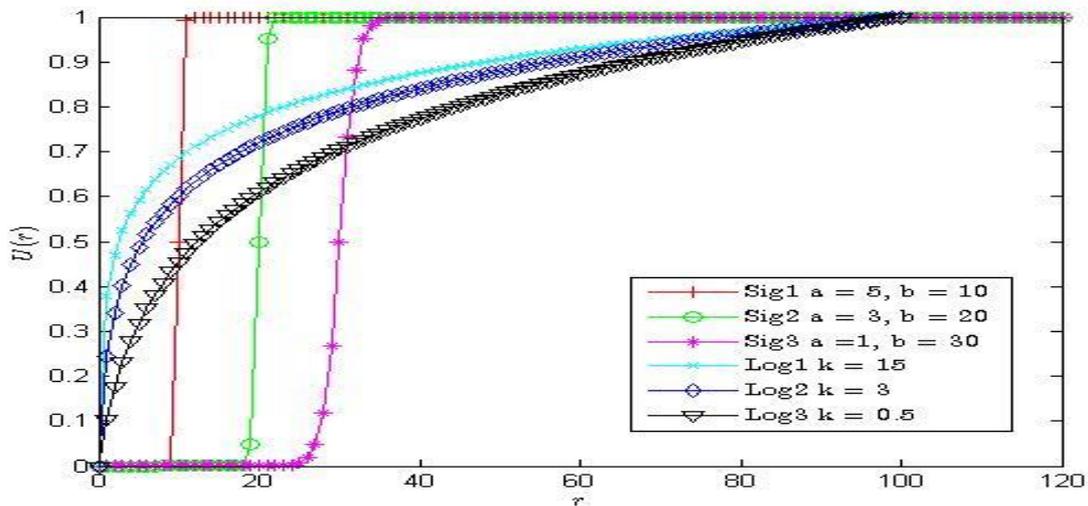


Figure III.3. Les fonctions d'utilité des utilisateurs $U_i(r_i)$

Dans la figure III.3, nous remarquons que la fonction d'utilité sigmoïde est prioritaire par rapport aux fonctions d'utilité logarithmique pour l'allocation des débits.

III.8.1 Première étape de l'algorithme

Nous appliquons les algorithmes 1 et 2 de la première étape en C++ aux fonctions d'utilité sigmoïde et logarithmique présentées dans la figure III.3.

Nous fixons le débit maximale de la porteuse primaire $R_p = 70$ et le seuil $\delta = 10^{-2}$.

Dans la figure III.4, nous voyons les résultats de la simulation pour les débits des différents utilisateurs en fonction du nombre d'itérations.

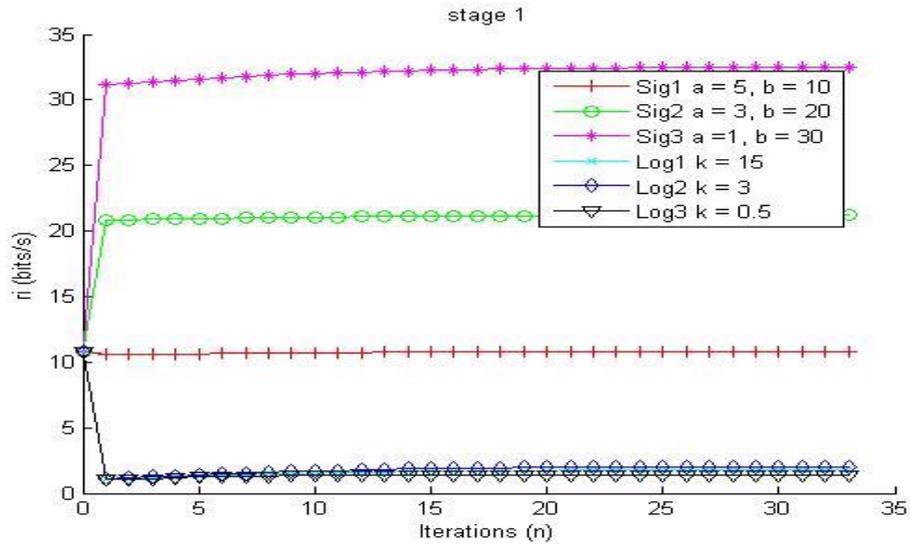


Figure III.4. Les débits $r_{i,p}(n)$ avec le nombre d'itérations n pour différents utilisateurs et $R_p=70$.

Nous remarquons que les applications en temps réel exécutées par les utilisateurs atteints des débits plus élevés que les autres utilisateurs qui exécutent des applications tolérantes au temps ce qui montre que le débit en état d'équilibre de chaque fonction de type sigmoïde dépasse le point d'inflexion b .

Dans la figure (III.5), nous présentons les offres (poids) des six utilisateurs en fonction du nombre d'itérations.

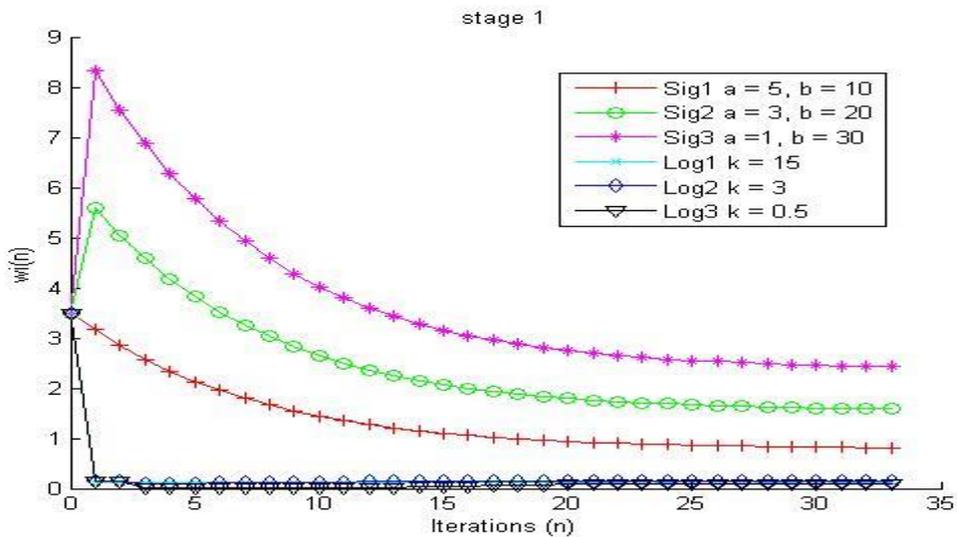


Figure III.5. La convergence des offres $w_{i,p}(n)$ avec le nombre d'itérations n pour différents utilisateurs et pour $R_p=70$.

On remarque que plus l'utilisateur fait une offre élevée, plus le débit alloué est élevé pour cet utilisateur.

Nous allons maintenant voir la variation de prix de la première étape en fonction du nombre d'itérations.

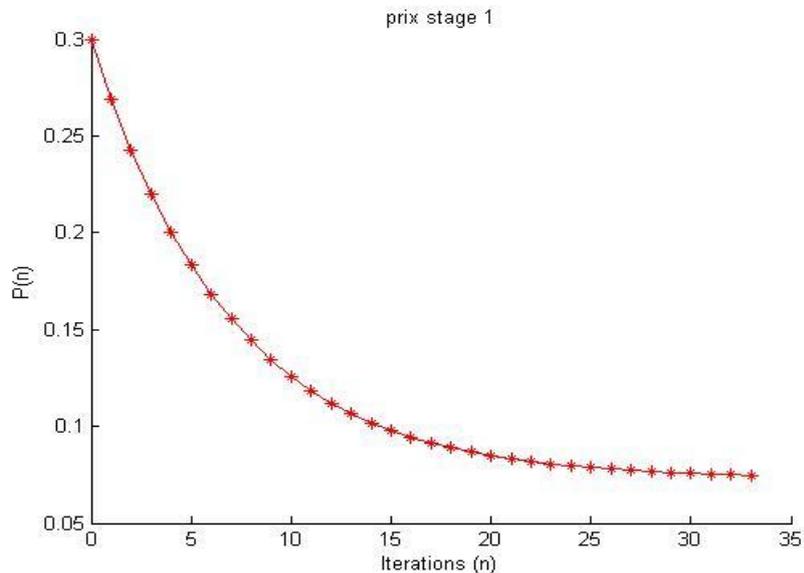


Figure III.6. Variation du prix en fonction d'itérations.

D'après cette figure, on remarque que le prix décroît en fonction d'itérations n ce qui montre que plus l'offre et le débit augmentent plus le prix diminue.

L'algorithme permet aux utilisateurs ayant des applications en temps réel de faire des offres plus élevées que les autres utilisateurs jusqu'à ce que chacun d'entre eux arrive à son point d'inflexion puis le réseau commence à diviser les ressources restantes entre eux en fonction de leurs paramètres.

Les premiers débits optimaux sont utilisés dans la simulation suivante, qui est effectuée pour l'eNodeB secondaire et les six mêmes UE.

III.8.2 Deuxième étape de l'algorithme

Cette fois, on fixe le débit maximal de la porteuse secondaire $R_s = 70$ et le seuil $\delta = 10^{-2}$.

La figure (III.7) présente les débits des différents utilisateurs en fonction du nombre d'itérations.

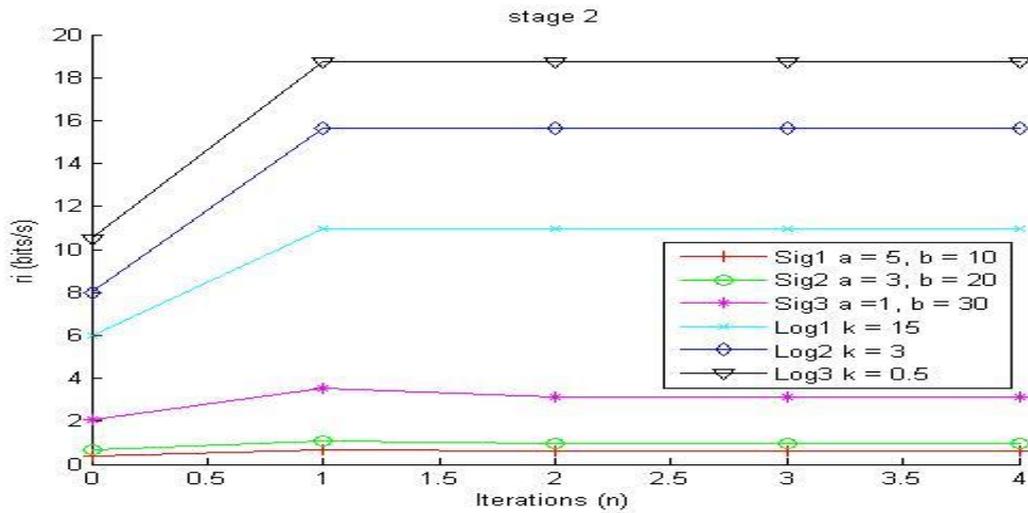


Figure III.7. Les débits $r_{i,s}(n)$ avec le nombre d'itérations n pour différents utilisateurs et $R_s=50$.

Nous remarquons que les fonctions d'utilité sigmoïde ont la priorité sur les fonctions d'utilité logarithmique pour l'attribution des débits, mais puisque chaque fonction sigmoïde a atteint son état d'équilibre à l'étape 1 de l'algorithme, la plupart des R_s sont attribués aux fonctions logarithmiques, ce qui montre une forte augmentation de leur deuxième débit optimal $r_{i,s}^{opt}$ par rapport à leur premier $r_{i,p}^{opt}$ obtenu à l'étape 1.

Dans la figure (III.8), nous présentons les offres des utilisateurs en fonction du nombre d'itérations.

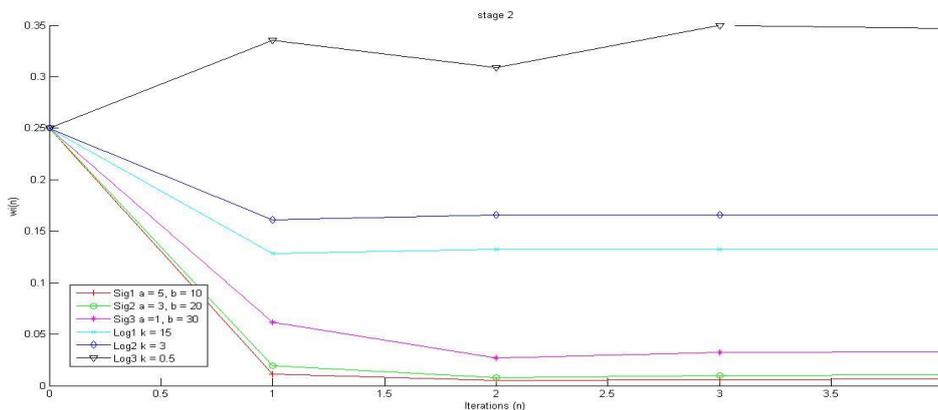


Figure III.8. Les offres de convergence $w_{i,s}(n)$ avec le nombre d'itérations n pour différents utilisateurs et $R_s=50$.

Mais cette fois, on remarque que les utilisateurs ayant des applications tolérantes aux retards font des offres plus élevées que les utilisateurs exécutant des applications en temps réel, et partagent entre eux les ressources de l'opérateur secondaire en fonction de leurs paramètres.

La figure (III.9) montre l'évolution du prix de la seconde étape en fonction du nombre d'itérations n .

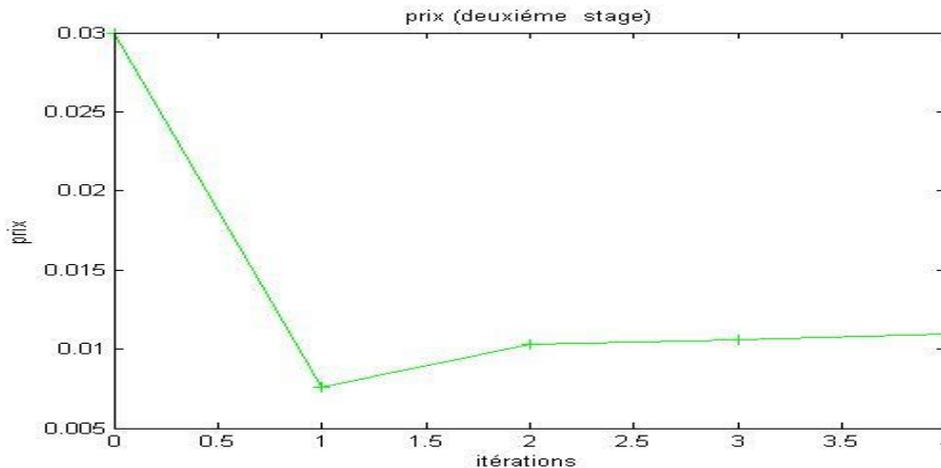


Figure III.9. Variation du prix en fonction d'itérations.

On voit que le prix diminue de 0.03 à 0.003 mais après la première itération, il commencera à augmenter, ce qui implique que plus le débit augmente, plus le prix diminue, c'est ce qu'on cherche à atteindre.

III.9 Conclusion

Afin de résoudre le problème d'optimisation de l'allocation des ressources avec l'agrégation de porteuses, nous avons proposé dans ce chapitre un algorithme en deux étapes.

Les résultats de la simulation montrent que l'algorithme proposé atteint de meilleures performances avec un débit élevé, un prix raisonnable et une qualité de service (QoS) optimale.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté une méthode d'allocation optimale des ressources d'agrégation de porteuses en 4G-LTE. L'agrégation de porteuses a déjà pris sa place dans le développement des réseaux sans fil 4G. Il a réussi à démontrer sa valeur en tant que méthode efficace pour augmenter la largeur de bande.

Le problème d'allocation des ressources d'agrégation de porteuses est composé de deux problèmes d'optimisation, le premier pour la porteuse primaire et le deuxième pour la porteuse secondaire.

La solution de ce problème est déterminée par les deux fonctions d'utilité basées sur le type d'application de l'utilisateur : la première représente les applications en temps réel et la deuxième correspond aux applications tolérantes aux retards.

A la suite de notre étude, nous avons présenté un algorithme distribué itératif avec CA divisée en deux étapes, pour allouer des ressources d'agrégation de porteuses aux utilisateurs dans la zone de couverture d'une porteuse primaire et d'une porteuse secondaire.

Nous avons montré par simulation que notre algorithme converge vers les débits optimaux et une QoS optimale et une bande passante élevée dans ses deux étapes.

Des améliorations peuvent être apportées à ce mémoire pour la rendre plus fiable à l'avenir.

Nous proposons une autre solution avec une seule application qui contient une combinaison des deux fonctions utilitaires en même temps.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] COUPECHOUX, Marceau et MARTINS, Philippe. Vers les systèmes radio mobiles de 4^e génération: De l'UMTS au LTE. Springer, 2013.
- [2] KHELIFI, S., & HADDAD, A. (2018). Planification et dimensionnement d'un réseau mobile 4G/LTE (Doctoral dissertation, Université Akli Mouhand Oulhadj-Bouira).
- [3] Meurisse, E. (2007). L'UMTS et le haut-débit mobile. L'Université de Marne-la-Vallée, en filière Informatique et Réseau.
- [4] HOLMA, Harri et TOSKALA, Antti (ed.). WCDMA forums: hspa evolution and lte. John Wiley & sons, 2007.
- [5] KHAN, Farooq. LTE for 4G mobile broadband: air interface technologies and performance. Cambridge university press, 2009.
- [6] HACHEMI, Mohammed Hicham. Etudes et modélisation des performances des réseaux LTE/LTE-A: vers le Handover. Université Aboubakr Belkaïd (Tlemcen). 2017. Thèse de doctorat.
- [7] HADJER, Bouchentouf et RIYAD, Boudghene Stambouli. Etude des performances des réseaux 4G (LTE). mémoire de master en télécommunication, département de génie électrique et électronique, université de Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2013.
- [8] TOUNSI, H. (2016). Optimisation de la couverture radio du réseau 4G de Tunisie Telecom (Doctoral dissertation, Université Virtuelle de Tunis).
- [9] Nabila, O., & Sara, S. (2018). Etude et optimisation des paramètres de base d'un réseau LTE d'ATM (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [10] Ezzaouia, M. (2018). Allocation de ressource opportuniste dans les réseaux sans fil multicellulaires (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire).
- [11] 3GPP TS 36.101. E-utra user equipment radio transmission and reception (rel.10), v.10.8.0. 2012-09.
- [12] BOUGUEN, Yannick, HARDOUIN, Éric, et WOLFF, François-Xavier. réseaux 4G. 2012.

- [13] KARAOUZENE, R. N., & HALFAOUI, N. N. Etude Comparative entre les réseaux cellulaires 3G et 4G Perspectives vers la5G (Doctoral dissertation).
- [14] AYAD, H., & MEKIDICHE, R. A. (2018). Optimisation de la couverture radio4G (LTE-A) des opérateurs de télécommunications (Doctoral dissertation).
- [15] BOUGUERRA, F. (2018). Contribution au développement d'algorithmes d'optimisation dans les réseaux mobiles (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [16] FELLAG, Nassima. Algorithme de courtoisie: ordonnancement dans la liaison montante des réseaux LTE-Advanced. 2016. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.
- [17] CABRERA RAMOS, Osmeiki. Descripción del estándar LTE-Advanced. 2014. Thèse de doctorat. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.
- [18] BRYDON, Alastair. Evolution of LTE-advanced carrier aggregation. Mar, 2014, vol. 25, p. 8.
- [19] ORTIZ CASALLAS, Diana Carolina, GÓMEZ SAAVEDRA, José Jhonatan, et al. Estudio de Carrier Aggregation para optimizar el usodelespectroasignado a los operadoresmóviles en Colombia. 2016.
- [20] GAMELAS, Maria João Alves. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre emEngenhariaInformática, Área de EspecializaçãomArquiteturas, Sistemas e Redes. 2013. Thèse de doctorat.
- [21] SHAJIAH, Haya, ABDELHADI, Ahmed, et CLANCY, Charles. Resource allocation with carrier aggregation in cellular networks: optimality and spectrum sharing using C++ and MATLAB. Springer, 2017
- [22] BRAVO CAMPOVERDE, Nelson Stalin et ÑAUTA ÑAUTA, Benito Estuardo. Análisis técnico, socio-económico y legal de la implementación del estándar Long Term Evolution Advanced en el Ecuador. 2013. Thèse de baccalauréat.
- [23] HARRIS, RAKOTOARIMALALA FenitraKoloinaRuddy, ALAIN, M. RAKOTOMALALA Mamy, MALALATIANA, Mme RAMAFIARISONA Hajaso, et al. MEMOIRE DE FIN D'ETUDES.
- [24] BOUGUERRA, Fateh. Contribution au développement d'algorithmes d'optimisation dans les réseaux mobiles. 2018. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [25] LEMOS, Niedson Almeida. Caracterização de cobertura de sinais na faixa de 700 MHz emambientes indoor. 2016. Thèse de maîtrise.
- [26] GONÇALVES, João Filipe Eloi AleluiaCarrasco. Análise de Desempenho dos Sistemas LTE e LTE-Advanced com. 2011.

- [27] ABDELHADI, Ahmed et SHAJIAH, Haya. Application-aware resource allocation with carrier aggregation using MATLAB. Technical Report, 2016.
- [28] Abdelhadi, A., &Shajaiah, H. (2016). Allocation optimale des ressources pour les réseaux cellulaires avec les instructions MATLAB. *arXivpréimpression arXiv:1612.07862*.
- [29] Shajaiah, H., Abdelhadi, A., &Clancy, C. (2015, mars). Un algorithme centralisé sélectif de prix pour l'allocation des ressources avec agrégation de porteuses dans les réseaux cellulaires LTE. En 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) (pp. 813-818). IEEE.
- [30] HOUCQUE, David, et al. Introduction to Matlab for engineering students. Northwestern University, 2005, p. 74.
- [31] https://www.fresnel.fr/perso/stout/langage_C/Chap_1_Notions_de_base.pdf: consulté le 20/06/2021.
- [32] SHAJIAH, Haya, ABDEL-HADI, Ahmed, et CLANCY, Charles. Utility proportional fairness resource allocation with carrier aggregation in 4G-LTE. In : MILCOM 2013-2013 IEEE Military Communications Conference. IEEE, 2013. p. 412-417.