

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE  
CONCENTRATION RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATION  
M. Ing.

PAR  
Stéphanie ALLOGBA

ALGORITHME D'ALLOCATION DE RESSOURCES CENTRALISÉES POUR LES  
RÉSEAUX SANS FIL AVEC FEMTOCELLULES

MONTREAL, LE 14 AVRIL 2015

©Tous droits réservés, Stéphanie Allogba, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Dziong Zbigniew, directeur de mémoire  
Département de génie Électrique à l'École de technologie supérieure

M. Witold Suryn, président du jury  
Département du génie Logiciel et TI à l'École de technologie supérieure

Mme Christine Tremblay, membre du jury  
Département de génie Électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 02 AVRIL 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Avant tout développement, je tenais à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire. Ainsi, mes remerciements vont à l'endroit du professeur Dziong Zbigniew pour m'avoir accordé sa confiance pour la réalisation de ce mémoire. Je tiens également à le remercier pour ses conseils et son encadrement tout au long de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également aux différents membres du jury pour leur commentaire leur remarque sur mon travail.

Je remercie également Rebeca Estrada, pour son encadrement, ses précieux conseils et son soutien pour l'accomplissement de mon mémoire.

À tous mes amis, en particulier Idrissa Coulibaly, Landry Aguehoude, Sandrine Thiombiano et Ela Gbeasor, je vous adresse mes remerciements et ma reconnaissance pour tous vos conseils durant le déroulement de mon mémoire.

À Fiogbé Parfait, je tenais à te remercier pour ta patience et ton encouragement, en particulier dans les périodes les plus dures de ce travail, mais également pendant toute cette maîtrise.

À mes frères et ma mère Allogba Valérie, sans vous et vos prières je n'aurai pu être celle que je suis actuellement. Je vous remercie infiniment pour vos appels, et vos soutiens, quelles que soient les périodes que je traverse.

À mon père, Allogba Alain, je te dédie ce rapport. Certes, tu n'es plus là pour observer mes pas futurs, mais j'espère te rendre fier de mon travail.



# **ALGORITHME D'ALLOCATION DE RESSOURCES CENTRALISÉES POUR LES RÉSEAUX SANS FIL AVEC FEMTOCELLULES**

Stéphanie ALLOGBA

## **RÉSUMÉ**

L'évolution des utilisateurs des systèmes de télécommunication a conduit les opérateurs et les fournisseurs de réseau à mettre en place plusieurs techniques permettant de répondre à leur demande. Aussi, le déploiement de nouveaux réseaux ainsi que de nouvelles cellules, notamment les femtocellules, est l'une des techniques les plus utilisées. Elles permettent en effet de décharger les macrocellules tout en répondant aux besoins des utilisateurs. Cependant, la coexistence de ces différentes cellules représente un défi pour les opérateurs tant pour la qualité du réseau que pour l'amélioration des ressources de celui-ci. Ainsi, afin d'améliorer les performances du réseau plusieurs méthodes et algorithmes ont été développés.

Ce mémoire a pour but de mettre en place un algorithme utilisant la méthode de recherche Tabou et permettant d'améliorer les performances d'un réseau. Ainsi, le réseau considéré pour la réalisation de l'algorithme et l'analyse de ses caractéristiques est un réseau contenant à la fois des femtocellules et une macrocellule. Cet algorithme est principalement basé sur l'amélioration du débit ainsi que l'utilisation des ressources telles que la bande passante et la puissance. Par ailleurs, une comparaison a été également effectuée avec d'autres algorithmes existants afin de mieux observer les caractéristiques de l'algorithme mis en place sur le réseau.

**Mots clés** : femtocellule, macrocellule, méthode Tabou, allocation des ressources



# **ALGORITHME D'ALLOCATION DE RESSOURCES CENTRALISÉES POUR LES RÉSEAUX SANS FIL AVEC FEMTOCELLULES**

Stéphanie ALLOGBA

## **ABSTRACT**

To meet the changing demands of users of telecommunications systems, operators and networks providers implement several technologies. The deployment of new networks and new cells, including femtocells, is one of the most used technologies. Indeed, they provided the unloading of macrocells while meeting the needs of users. However, the coexistence of these cells brings a big challenge to operators for both network quality and network performance. Thus, in order to improve network performance, several methods and algorithms have been developed.

This project aims to develop an algorithm using Tabu Search method for improving the performance of a network. Thus, the network considered to implement the algorithm and analyse its features is a network containing both femtocells and a macrocell. This algorithm is mainly based on improving of the throughput and the use of resources such as bandwidth and power. Furthermore, a comparison of many simulations, using MATLAB, was also realised with other existing algorithms to better observe the properties of the algorithm implemented in the network.

**Keywords:** Macrocell, Femtocell, Tabu Search, Resource Allocation



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Femtocellule : présentation générale .....	6
1.2.1 Fonctionnement.....	6
1.2.2 Type d'accès .....	7
1.2.3 Répartition spectrale .....	10
1.2.4 Interférences.....	11
1.3 Méthodes d'optimisation – algorithme heuristique .....	12
1.3.1 Algorithme génétique (GA) .....	14
1.3.2 Algorithme « Weighted Water Filling ».....	16
1.3.3 Algorithme « Tabu search ».....	17
1.4 Méthodes d'allocation des ressources.....	19
1.4.1 Allocation des ressources via les algorithmes heuristiques .....	19
1.4.2 Allocation des ressources via d'autres techniques d'optimisation .....	20
1.5 Conclusion .....	22
CHAPITRE 2 ALGORITHME D'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES .....	23
2.1 Introduction.....	23
2.2 Implémentation de la méthode « Tabu Search ».....	24
2.2.1 Phase d'initialisation.....	24
2.2.2 Phase d'optimisation.....	24
2.3 Allocation des ressources – adaptation de la méthode TS .....	26
2.3.1 Présentation de l'algorithme avec SBS.....	26
2.3.1.1 Étape 1 : sélection optimale de la BS.....	26
2.3.1.2 Étape 2 : répartition de la puissance .....	32
2.3.1.3 Étape 3 : allocation de la bande passante.....	33
2.3.2 Présentation de l'algorithme sans SBS .....	39
2.4 Détermination des paramètres de l'algorithme – condition d'arrêt .....	41
2.5 Conclusion .....	43
CHAPITRE 3 SIMULATIONS ET RÉSULTATS .....	45
3.1 Introduction.....	45
3.2 Paramètres de la simulation – Architecture du réseau .....	46
3.3 Étude des résultats de la simulation – optimisation et comparaisons .....	49
3.3.1 Description.....	49
3.3.2 Débit.....	50
3.3.3 Puissance.....	52
3.3.4 Bande passante.....	53

3.3.5	Temps de convergence.....	56
3.4	Conclusion .....	58
	CONCLUSION.....	59
	RECOMMANDATIONS .....	61
	ANNEXE I      DESCRIPTIF DES UTILISATEURS – ÉTAPE DE L’OPTIMISATION	63
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	65

## LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Récapitulatif type d'accès.....	9
Tableau 2.1	Récapitulatif de l'assignation des femtocellules.....	41
Tableau 3.1	Récapitulatif des paramètres des femtocellules du réseau.....	47
Tableau 3.2	Paramètres de simulation .....	48



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Architecture comparative femtocellule vs macrocellule.....6
Figure 1.2	Fonctionnement d'une femtocellule .....7
Figure 1.3	Illustration des interférences entre les cellules .....12
Figure 2.1	Exemple d'attribution des cellules.....29
Figure 2.2	Critère d'arrêt – Itération en fonction du nombre des utilisateurs .....42
Figure 3.1	Représentation de l'architecture du réseau étudié .....46
Figure 3.2	Débit du système en fonction du nombre d'utilisateurs – Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS – Cas de 50 MHz.....50
Figure 3.3	Débit du système en fonction du nombre d'utilisateurs – Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS – Cas de 10 MHz.....51
Figure 3.4	Puissance en fonction du nombre d'utilisateurs – Cas de 50 MHz et de 10 MHz confondus.....53
Figure 3.5	Bande passante utilisée en fonction du nombre d'utilisateurs – Comparaison algorithme WWF vs algorithme TS – Cas 50 MHz .....54
Figure 3.6	Bande passante utilisée en fonction du nombre d'utilisateurs – Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS – Cas 10 MHz .....55
Figure 3.7	Répartition du temps de convergence – Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS – Cas 50 MHz.....56
Figure 3.8	Répartition du temps de convergence - Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS - Cas 10 MHz.....57



## LISTE DES ALGORITHMES

	Page
Algorithme 1.1	Étapes de l'algorithme génétique.....14
Algorithme 1.2	Étapes de l'algorithme « Tabu search ».....18
Algorithme 2.1	Algorithme d'initialisation de la SBS pour un utilisateur.....27
Algorithme 2.2	Algorithme de sélection de la cellule pour la SBS .....31
Algorithme 2.3	Algorithme d'allocation optimale de la bande passante .....37



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BP	Bande Passante
FBS	Femtocell Base Station
FFR	Fractional Frequency Reuse
GA	Genetic Algorithm
ILP	Integer Linear Programming
IP	Internet Protocol
MBS	Macrocell Base Station
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SA	Simulated Annealing
SBS	Sélection optimale de la BS
SVM	Support Vector Machines
SON	Self-organizing network
QoS	Quality of Service
TS	Tabu Search
WF	Water Filling
WWF	Weighted Water Filling



## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

dBm	Décibel
GHz	Gigahertz
KHz	Kilohertz
Mbps	Méga bits par seconde
MHz	Mégahertz
mW	milliwatt
s	seconde
W	Watt



## INTRODUCTION

L'importance de la croissance des utilisateurs de télécommunication a conduit les fournisseurs d'accès et les opérateurs de réseau à mettre en place plusieurs techniques ayant pour but d'élargir leur zone de couverture. Cependant, ces différents développements ont été sujets à plusieurs contraintes de qualité de service, à savoir :

- le transport des informations dans de bonnes conditions,
- la réduction des pertes de paquets et du délai de transmission,
- la meilleure couverture réseau,
- le faible coût.

Aussi, indépendamment de ces contraintes, on assiste à une évolution des technologies, tant pour la fourniture des services que pour la couverture des réseaux. Parmi ces dernières, nous avons les cellules externes ou « **outdoor cell** », principalement utilisées pour le renforcement des puissances de rayonnement des stations de base, aussi bien dans les zones rurales qu'urbaines. Malheureusement, avec cette technique, la puissance de transmission est fonction de l'environnement. Celle-ci peut en effet avoir une atténuation plus ou moins importante (Zhang et De la Roche, 2010).

Afin de régler le problème de l'atténuation de la puissance due à l'environnement, les répéteurs ont vu le jour. Leur but était, soit d'amplifier le signal transmis dans une plage de fréquence donnée (répéteur passif), soit de le modifier avant la transmission (répéteur actif). Cependant, le taux d'erreurs observé par cette technique s'est avéré important (Zhang et De la Roche, 2010).

Les erreurs observées par les répéteurs ont conduit les opérateurs à déployer les systèmes d'antennes distribuées. Cette technique consistait à répartir la puissance de transmission entre les différentes antennes, soit par l'intermédiaire de composants passifs (répartiteurs, atténuateurs, filtres, etc...), soit par l'intermédiaire de composants actifs. Cependant, les

systèmes d'antennes distribuées ne sont pas assez avantageux. En effet, on observe une dégradation du signal à de très hautes fréquences (Zhang et De la Roche, 2010).

Vient ensuite le tour de la technique du câble rayonné. Pouvant être assimilée à une grande antenne connectée directement à la station de base, cette technique consiste à fournir l'énergie dans les environnements étroits dans le but de fournir une bonne couverture réseau. Le principal problème de cette technique réside dans la complexité de son installation (Zhang et De la Roche, 2010).

En dépit du fait que les différentes techniques précitées offraient une bonne couverture réseau, elles s'avéraient également être toutes onéreuses. Aussi, d'autres méthodes, à savoir les picocells et les femtocellules, ont été déployées. Elles offrent chacune les mêmes caractéristiques que les techniques précédentes, tout en étant moins coûteuses. Considérées comme des petites stations de base reliées directement à la BSC (Base Station Controller) de l'opérateur tout en étant implémentées à l'intérieur des immeubles, elles facilitent l'augmentation de la couverture et de la capacité du réseau. De plus, elles gèrent la transmission de données vers le réseau de l'opérateur. Par ailleurs, les femtocellules sont également reliées au réseau Internet afin de faire transiter toutes les communications du réseau de l'opérateur vers celui de l'utilisateur sans avoir besoin d'une BSC (Zhang et De la Roche, 2010).

Comme souligné précédemment, toutes ces différentes techniques ont vu le jour dans le but de répondre aux besoins accrus des utilisateurs. Cependant, causant souvent la dégradation des signaux de transmission ou des différentes interférences dans le réseau, en particulier dans le cas des femtocellules, il convient d'assurer une meilleure gestion de leurs ressources. Elles doivent en effet être des renforts pour les techniques existantes et non un poids pour ces dernières.

À cet effet, l'objectif principal de ce mémoire est de proposer une méthode de gestion des ressources dans un réseau comptant plusieurs femtocellules. Cette méthode basée sur l'algorithme de recherche Tabou doit permettre de maximiser les ressources allouées à un utilisateur afin de minimiser les interférences avec les autres utilisateurs. Pour ce faire, plusieurs objectifs secondaires sont établis :

- la maximisation des débits alloués en prenant compte des demandes de chaque utilisateur, mais également de leur position dans le réseau,
- la répartition efficace de la puissance de transmission dans chaque station de base,
- la minimisation des interférences et du bruit à travers les cellules du réseau.

Ainsi, ce projet est divisé en trois parties. Dans la première partie, une étude est effectuée sur les femtocellules. Celle-ci, axée sur ses caractéristiques et ses enjeux, a pour but d'avoir un meilleur aperçu de cette technologie et d'identifier les principaux problèmes rencontrés dans le but de proposer de meilleures solutions. Par ailleurs, le monde de la télécommunication est sujet à une affluence de la demande des utilisateurs. Il devient donc primordial de répondre aux besoins de ces utilisateurs en leur fournissant un service de qualité. De plus, enclins à une forte évolution technologique, les opérateurs sont également amenés à allier l'existant au nouveau, tout en améliorant les performances de leur système. De ce fait, cette partie présente également les différentes méthodes d'optimisation utilisées dans les réseaux de télécommunication en particulier pour les réseaux femtocellules. Elle est également le lieu de faire un récapitulatif des avantages et faiblesses de ces méthodes élaborées.

Une fois la seconde partie terminée, une idée plus claire sur les méthodes d'optimisation est faite. Ainsi, au regard des différents points forts et points faibles de ces dernières, la troisième partie est le lieu de présenter l'algorithme de gestion de ressources du réseau mis en place. Pour ce faire, une description plus détaillée sur le principe de fonctionnement ainsi que les avantages de l'algorithme « Tabu Search » y est effectuée. De plus, l'algorithme mis en place étant subdivisé en trois sections : la répartition de la puissance, l'allocation de la bande passante, et la sélection de la station de base (BS), une explication sur le

fonctionnement de celles-ci est effectuée. En effet, chacune de ces sections représente respectivement un mini algorithme permettant d'optimiser les performances du réseau.

Enfin, la présentation de l'algorithme « Tabu Search » effectuée, une partie est consacrée aux différents résultats obtenus. Elle a pour but de vérifier la validité et la pertinence de l'algorithme « Tabu Search » dans l'optimisation des performances d'un réseau. Cette partie est subdivisée en deux sous-sections :

- la présentation des résultats de simulation : elle permet d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus à l'issue de la simulation du réseau composé de femtocellules avec l'algorithme d'optimisation développé;
- la comparaison de l'algorithme « Tabu Search » avec un autre algorithme existant : elle consiste à analyser les résultats faits à partir de scénario commun effectué entre l'algorithme « Tabu Search » et l'algorithme existant choisi.

Aussi, l'une des caractéristiques du projet est d'optimiser les performances d'un réseau contenant des femtocellules en mettant en place une technique d'allocations de ressources basée sur la méthode « Tabu Search ». Comme décrit dans les paragraphes précédents, l'algorithme développé est composé de trois parties : la répartition de la puissance, l'allocation de la bande passante et la sélection de la station de base. Elle permet ainsi d'assurer une meilleure gestion du réseau en se basant sur les caractéristiques primordiales d'un réseau de télécommunication, à savoir la puissance, la bande passante et la cellule.

# CHAPITRE 1

## REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 1.1 Introduction

Dans le but de fournir une multitude de services aux utilisateurs tout en respectant les exigences de qualité de service des opérateurs et fournisseurs d'accès réseau, plusieurs techniques de couverture de réseau ont été déployées. Parmi celles-ci, les femtocellules voient le jour. Aussi, afin de mieux saisir leur fonctionnement, un descriptif de leurs caractéristiques sera mis en exergue dans ce chapitre ainsi que les différents problèmes rencontrés.

Cependant, lors de la conception et du déploiement d'un réseau de télécommunication, les opérateurs et fournisseurs d'accès font face à plusieurs défis. L'un des défis principaux est de répondre aux besoins des clients tout en leur offrant un service de qualité. En plus de cette contrainte de qualité de service, est également ajoutée l'évolution technologique. En effet, les opérateurs doivent être capables d'adapter l'existant aux technologies nouvelles. Dans notre contexte, cela revient à adapter le fonctionnement des femtocellules à celle des macrocellules. Différentes méthodes d'optimisation et de gestion des réseaux rendent cette adaptation possible. Ainsi, ce chapitre présentera également les différentes techniques d'optimisation utilisées dans les réseaux de télécommunication, principalement les réseaux constitués de femtocellules.

## 1.2 Femtocellule : présentation générale

### 1.2.1 Fonctionnement

Principalement utilisées dans les réseaux domestiques, les femtocellules peuvent être assimilées à des stations de base ou des cellules installées au sein du domicile de l'utilisateur le connectant au réseau de l'opérateur (voir « Figure 1.1 »).

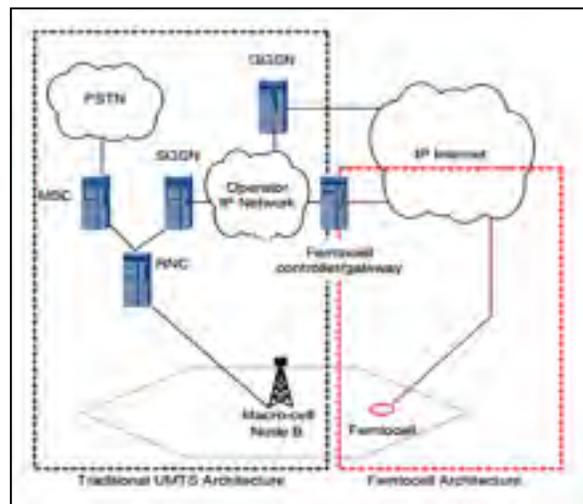


Figure 1.1 Architecture comparative femtocellule vs macrocellule  
Tirée de Claussen, Ho et Samuel (2008)

Elles possèdent de ce fait les mêmes caractéristiques que les stations de base. Elles sont donc des points d'accès reliant les utilisateurs aux différents réseaux des opérateurs, et ce, en passant par le réseau Internet (voir « Figure 1.2 »).

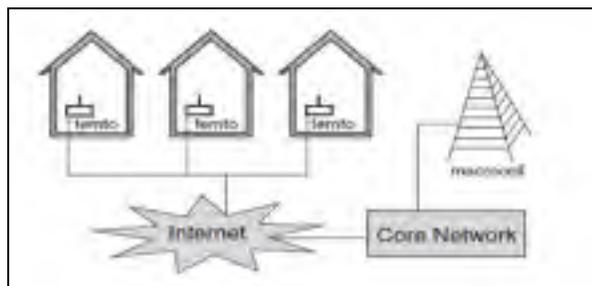


Figure 1.2 Fonctionnement d'une femtocellule  
Tirée de Zhang et De la Roche (2010)

Les femtocellules viennent ainsi en renfort aux macrocellules dans les zones non desservies par celles-ci tout en déchargeant le trafic et améliorant les capacités de ces dernières dans le cas des réseaux domestiques.

### 1.2.2 Type d'accès

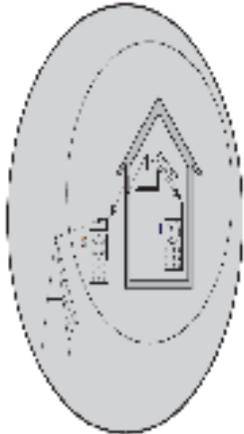
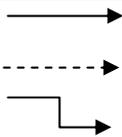
Comme vu précédemment, l'un des objectifs principaux des femtocellules est la décharge du trafic dans les macrocellules. En effet, elles peuvent avoir, soit un usage domestique, le cas le plus fréquent (3 à 5 utilisateurs connectés simultanément à la même femtocellule), soit un usage d'entreprise ou de campus (8 à 16 utilisateurs connectés simultanément à la même femtocellule) (Zhang et De la Roche, 2010). Ainsi, avec les femtocellules, deux catégories d'utilisateurs se distinguent :

- les abonnés aux femtocellules : correspondant aux utilisateurs ayant souscrit à la femtocellule,
- les non-abonnés : correspondant aux utilisateurs n'ayant pas souscrit à la femtocellule.

Par ailleurs, indépendamment de la capacité maximale d'utilisateurs supportés, la femtocellule est règlementée par le type d'accès offert par la cellule, présenté dans le « Tableau 1.1 ». Il en existe trois (Lopez-Perez et al., 2009). Ces derniers correspondent aux différents modes d'accès des femtocellules :

- accès ouvert : mode sans contrainte. Dans ce type d'accès, toutes les catégories d'utilisateurs peuvent se connecter à la femtocellule. Aussi, en fonction de la qualité de service offert par les différentes cellules ou de la disponibilité de ces dernières, les utilisateurs ont la possibilité de se connecter soit à une femtocellule, soit à une macrocellule pour accéder au réseau. Dans ce type d'accès, la femtocellule peut être considérée comme une macrocellule en desservant toutes les zones mortes de cette dernière (Zhang et De la Roche, 2010). Accès très peu sécuritaire, il ne requiert aucun contrôle d'identification afin de se connecter à la femtocellule;
- accès fermé : il correspond au mode ayant le plus de restrictions. Dans cet accès, les non-abonnés ne se connectent qu'à la macrocellule et cela indépendamment de la disponibilité des femtocellules présentes ou de la qualité du service offert. Ce type d'accès peut être utile dans les réseaux qui exigent un niveau de sécurité élevé ainsi qu'un accès au réseau limité (Zhang et De la Roche, 2010). Cependant, sa restriction peut conduire à un temps de latence important lors du « roaming » d'un utilisateur non autorisé à se connecter à une femtocellule;
- accès hybride : cet accès correspond au mixte des deux accès précédents. Aussi, indépendamment de certains critères fixés par les opérateurs ou les fournisseurs d'accès au réseau, les utilisateurs non abonnés ont la possibilité de se connecter à l'une ou l'autre des cellules (macrocellule ou femtocellule).

Tableau 1.1 Récapitulatif type d'accès  
Tiré de Zhang et De la Roche (2010)

	Accès ouvert	Accès fermé	Accès hybride
Type d'accès			
Remarque	Les utilisateurs 1 et 2 ont accès à la femtocellule.	Seul l'utilisateur 1 a accès à la femtocellule. L'utilisateur 2 ne peut se connecter qu'à la macrocellule malgré sa distance par rapport à la zone d'émission de la femtocellule.	Les utilisateurs 1 et 2 ont accès à la femtocellule. L'utilisateur 2 a un accès plus limité à la femtocellule contrairement à l'utilisateur 1.
Symbole	 <p>Fort signal Faible signal Interférence</p>		

Ainsi, afin d'optimiser le déploiement de leur réseau, les opérateurs ou fournisseurs d'accès doivent tenir compte de ces divers critères que sont les types d'utilisateurs et les modes

d'accès. En effet, la diversité des caractéristiques aura un impact sur le dimensionnement du réseau, qui sera variable d'un mode à un autre.

Par ailleurs, les utilisateurs ne possédant pas tous les mêmes demandes dans le réseau, les caractéristiques d'une cellule telles que la puissance ou la capacité différeront d'une cellule à une autre. Il convient donc de pouvoir en tenir compte également lors du dimensionnement du réseau. Aussi, pour le déploiement d'une femtocellule, il est important de tenir compte de ces critères.

### **1.2.3 Répartition spectrale**

En plus des méthodes d'accès utilisées avec les femtocellules, une des caractéristiques importantes à prendre en compte lors du déploiement et du dimensionnement du réseau est la répartition spectrale des femtocellules dans tout le réseau. En effet, la coexistence des femtocellules avec la macrocellule nécessite à la fois la gestion de la bande passante, la gestion de la puissance et la répartition des utilisateurs dans toutes les cellules du réseau. Aussi, cette répartition représente un critère indispensable pour le bon fonctionnement du réseau.

Il existe plusieurs méthodes de répartition des ressources. Parmi celles-ci, trois méthodes se distinguent :

- le partage des ressources : dans cette méthode les utilisateurs de la macrocellule ou de la femtocellule partagent les mêmes ressources (bande passante, puissance). Les utilisateurs disposent ainsi de beaucoup plus de ressources (Yong, Juejia et Lan, 2009) et le déploiement est plus efficace (Guvenc et al., 2008). Cependant, malgré les avantages qu'elle présente, les interférences entre les cellules (macrocellule et femtocellule) sont importantes;
- la division des ressources : elle consiste à séparer les ressources des utilisateurs pour chacune des cellules. Ainsi, les abonnées aux femtocellules utilisent des ressources

- différentes (bande passante) des non-abonnés (Guvenc et al., 2008). Cette approche permet de résoudre le problème d'interférence rencontré avec le partage des ressources. Cependant, elle requiert beaucoup plus de ressources pour les besoins des utilisateurs;
- l'approche hybride : afin de remédier aux problèmes des deux approches précédentes, la méthode suivante consiste à tenir compte de certains critères (distance des utilisateurs par rapport aux cellules, demande des utilisateurs ...) afin d'allouer les ressources aux utilisateurs. Ces ressources seront allouées selon l'une des premières approches (partage de ressource ou division de ressource) (Yong, Juejia et Lan, 2009).

#### 1.2.4 Interférences

Dans un réseau, les cellules voisines s'interfèrent entre elles provoquant ainsi des erreurs de transmission. Aussi, ce phénomène s'observe dans les réseaux comportant une ou plusieurs femtocellules. En effet, comme illustré dans la « Figure 1.3 », deux types d'interférences se distinguent dans les réseaux femtocellules :

- les interférences entre « femtocellule – femtocellule » ou « **co-layer interference** » : représentant le signal non désiré d'une femtocellule reçu par une ou plusieurs autres femtocellules voisines. Elles peuvent être dues à la mauvaise isolation des habitations de la zone géographique. En outre, plus le niveau de puissance de la femtocellule voisine est élevé, plus l'interférence est grande. Par ailleurs, il existe deux causes d'interférences entre femtocellules, qui dépendent du sens de la transmission : les utilisateurs pour le sens montant et les femtocellules pour le sens descendant. Afin d'éviter ou de réduire ce type d'interférence, plusieurs recommandations sont mises en place, notamment sur la réduction de la puissance de transmission des femtocellules (Zhang et De la Roche, 2010);
- les interférences entre « femtocellule – macrocellule » : elles apparaissent principalement si les femtocellules ou macrocellules n'appartiennent pas au même réseau. Elles sont causées par une distorsion du signal de transmission de la femtocellule ou de la macrocellule, par la puissance d'émission de ces dernières ainsi que par le nombre de

femtocellules présentes dans le réseau. Ainsi, afin de réduire ou d'éviter ce type d'interférences, plusieurs approches sont proposées telles que la réduction du nombre de femtocellules ainsi que le contrôle de la puissance (Zhang et De la Roche, 2010).

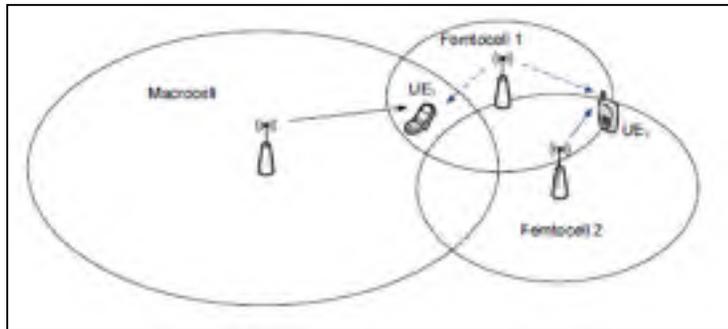


Figure 1.3 Illustration des interférences entre les cellules  
Tirée de Kulkarni, Chin et Farnham (2010)

Au vu des différents avantages qu'apportent les femtocellules tant aux utilisateurs qu'aux fournisseurs ou opérateurs d'accès réseau, elles ont une place de plus en plus importante dans le secteur de la télécommunication. Cependant, afin de fournir un réseau stable et une grande qualité de service aux utilisateurs, il convient de tenir compte des différentes ressources des cellules à savoir la puissance et la bande passante dans le dimensionnement du réseau. Aussi, il est important de se demander quelles sont les différentes techniques à utiliser afin d'assurer une meilleure gestion du réseau. À cet effet, la partie suivante traitera des différentes méthodes utilisées pour assurer une meilleure gestion d'un réseau.

### 1.3 Méthodes d'optimisation – algorithme heuristique

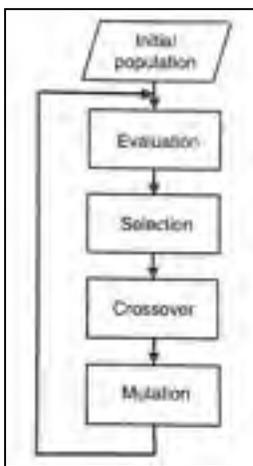
Comme vu dans le chapitre 1.2, mises en place pour renforcer les macrocellules en fournissant des services dans les zones désertes et en déchargeant ces dernières, les femtocellules peuvent également constituer des sources de problème dans le réseau si leur implémentation est mal conçue. Aussi, afin d'en assurer une meilleure implémentation et de ce fait une bonne optimisation du réseau, plusieurs outils de simulation sont développés pour le suivi et la gestion du réseau (Kokash, 2005) à savoir :

- la méthode exhaustive : elle consiste à choisir la solution avec le meilleur résultat parmi toutes les solutions prédéterminées;
- la méthode locale : ayant le même principe que la méthode exhaustive, elle détermine sa meilleure solution en restreignant le problème sur certains critères prédéfinis par le concepteur;
- la méthode « diviser et conquérir » : elle subdivise le problème principal en plusieurs sous- problèmes. Ainsi, la solution optimale est obtenue par la combinaison de toutes les solutions optimales prédéterminées dans chaque sous-problème. L'inconvénient principal de cette méthode est le fait qu'elle ne peut pas être utilisée pour des problèmes avec beaucoup de variables;
- la méthode de la branche : dans cette méthode, toutes les possibilités de zones de recherche sont détaillées. Seules sont exclues les zones ne pouvant posséder la solution optimale;
- la méthode de programmation dynamique : elle est basée sur le même principe que la méthode exhaustive en stockant toutes les solutions trouvées dans une base de données. Aussi, de façon récursive, les solutions trouvées sont utilisées seulement si elles ne sont pas présentes dans la liste stockée. Cette méthode permet ainsi d'éviter les boucles dans l'algorithme.

Malgré toutes ces diversités dans le choix des techniques d'algorithmes, il existe plusieurs problèmes récurrents, à savoir la complexité dans la mise en place de l'algorithme, la fiabilité et la qualité de la solution optimale trouvée ainsi que la lenteur dans le temps de convergence et dans son exécution. Aussi, d'autres méthodes basées sur ces techniques précitées ont été mises en place afin de pallier ces problèmes. Parmi ces méthodes se trouve l'« algorithme heuristique ». Les prochains paragraphes aborderont cette méthode ainsi que de leurs avantages.

### 1.3.1 Algorithme génétique (GA)

Basé sur les algorithmes évolutionnaires, l'algorithme génétique est utilisé dans les environnements variables. Il est caractérisé par une optimisation des solutions trouvées en trois phases essentielles (Pham et Karaboga, 2000) présentées dans l' « Algorithme 1.1 » suivant :



Algorithme 1.1 Étapes de l'algorithme génétique  
Tirée de Pham et Karaboga (2000)

- la phase de sélection : cette phase permet de prédéterminer un ensemble de solutions répondant le mieux aux critères fixés par le problème. Il existe plusieurs techniques de sélection :
  - la sélection par rang ou classement : la solution est déterminée selon qu'elle possède les meilleurs résultats à l'issue de l'évaluation du problème;
  - la « roulette » ou sélection proportionnelle à l'adaptation : la solution est déterminée à l'issue d'un tirage au sort homogène effectué sur un ensemble de solutions contenant chacun un coefficient d'adaptation au problème. Dans ce type de cas, la solution choisie peut ne pas être forcément la solution la plus optimale;

- la sélection par tournoi : elle est un mélange des deux types précédents. En effet, une paire de solutions est d'abord choisie par tirage au sort, puis la meilleure solution est déterminée en fonction du résultat obtenu avec la fonction d'évaluation;
- la sélection uniforme : la solution optimale est déterminée à l'issue d'un tirage au sort uniforme et aléatoire;
- la phase de croisement ou de recombinaison : dans cette phase, les paramètres des solutions sont intervertis les uns avec les autres;
- la phase de mutation : les paramètres d'une solution peuvent être modifiés ou intervertis entre eux afin de tester la qualité de la solution.

Chacune de ces phases est établie en fonction des critères du problème. Par ailleurs, il existe également deux autres phases importantes dans l'implémentation de l'algorithme GA :

- la phase d'initialisation : elle permet de choisir une solution initiale au problème;
- la phase d'évaluation : elle permet d'évaluer la qualité et la performance de la solution trouvée.

En outre, la condition d'arrêt de l'algorithme est définie soit par le nombre d'itérations effectué soit par un seuil à atteindre par la solution optimale.

Malgré le fait que l'algorithme GA permet de trouver une solution optimale à des problèmes complexes, il possède également de nombreuses limites :

- temps de calcul élevé : le temps d'exécution de l'algorithme GA est important du fait des différents calculs qui sont utilisés pour son implémentation, en particulier pour la réalisation de la fonction d'évaluation utilisée pour valider la qualité et la performance des solutions trouvées;
- la complexité de mise en œuvre : les paramètres des phases de croisement et de mutation étant définis en fonction de la complexité du problème, une bonne implémentation de ces derniers est nécessaire. Par ailleurs, la fonction d'évaluation jouant un rôle important

dans la convergence de l'algorithme ainsi que dans l'efficacité de la solution, la définition des paramètres fait également partie des exigences dans la réalisation de l'algorithme;

- l'exactitude de la solution : avec l'algorithme GA, la solution optimale n'est pas garantie, seule une solution proche de cette dernière est assurée;
- la qualité de la solution : l'évolution des éléments du problème et de ce fait la modification de ces derniers peut entraîner une modification de la solution optimale et influencer ainsi sur son exactitude.

### **1.3.2 Algorithme « Weighted Water Filling »**

La méthode « Water-filling » (WF) est un algorithme permettant d'obtenir des solutions optimales d'un problème donné. Dans le domaine de la télécommunication, elle est utilisée dans les problèmes d'allocation de réseau (Mingyi et Alfredo, 2011). Aussi, elle peut être utilisée pour optimiser la capacité du réseau, tant au niveau de la répartition de la bande passante que dans la répartition des utilisateurs dans les différentes cellules du réseau. Elle permet également d'offrir une meilleure gestion optimale de la puissance.

Se réalisant par itération, la solution optimale est déterminée en maximisant l'ensemble des données (puissance ou capacité) allouées dans le réseau (He et al., 2014). Cependant, la méthode WF possède plusieurs inconvénients. En effet, en plus de la complexité lors de sa mise en place, elle est fonction des données du réseau et est de ce fait très variable, suivant des paramètres extérieurs au réseau (interférences, ...). Aussi, afin de pallier ces différents problèmes, plusieurs solutions sont mises en place. Parmi celles-ci l'algorithme WWF (« Weighted Water Filling »).

Dérivé de la méthode WF, l'algorithme WWF est conçu en affectant des poids aux différents paramètres du problème. Ces poids peuvent varier d'un critère à un autre et peuvent représenter différents aspects. Ils peuvent ainsi être dus à la distance entre les paramètres du problème ou à l'impact de la puissance ou de la bande passante sur ces derniers.

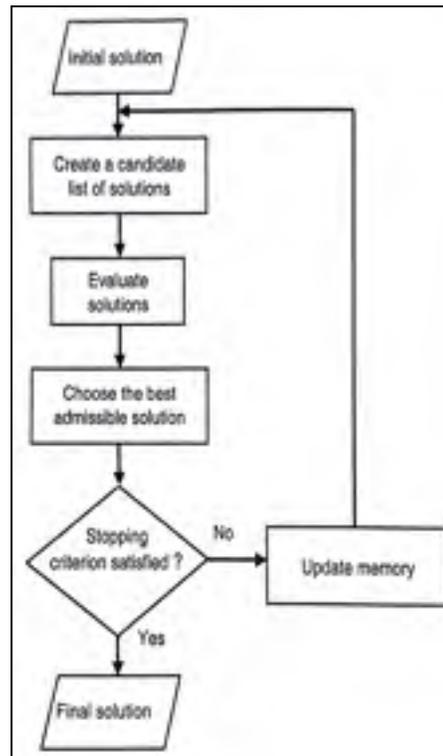
Quand bien même, l'algorithme WWF permet de pallier les problèmes de la méthode WF, son temps de convergence demeure néanmoins très important et ses résultats peu exacts.

### **1.3.3 Algorithme « Tabu search »**

L'algorithme de recherche Tabou ou « Tabu search » est un algorithme heuristique basé sur l'étude des solutions voisines. Ainsi, dans le but de trouver la solution la plus optimale, la recherche Tabou, à chaque itération, la solution répondant le mieux aux exigences de la fonction d'évaluation en comparant la solution trouvée aux solutions précédentes.

Par ailleurs, une liste appelée « liste Tabou » est créée dans le but d'éviter les boucles de redondance tout en permettant d'optimiser la solution. En effet, elle renferme toutes les solutions voisines interdites, à savoir les solutions ne répondant pas aux exigences de la fonction d'évaluation ainsi que les étapes permettant d'y parvenir (Pham et Karaboga, 2000).

L'algorithme « Tabu search », tout comme l'algorithme « GA », est implémenté à partir de trois étapes, comme illustré dans l'« Algorithme 1.2 » :



Algorithme 1.2 Étapes de l'algorithme « Tabu search »  
Tirée de Pham et Karaboga (2000)

- initialisation : première étape de l'algorithme, elle consiste à déterminer une solution initiale au problème, répondant à chacune de ses exigences;
- optimisation : elle représente le nœud de l'algorithme. C'est dans cette étape que la solution optimale est déterminée et que la « liste Tabou » est mise à jour. En effet, la solution est calculée et comparée aux solutions précédentes. Si celle-ci a de meilleurs résultats que la solution précédente, elle est considérée comme la solution optimale, dans le cas contraire, la solution précédente est optimale et la « liste Tabou » est mise à jour;
- arrêt : l'algorithme prend fin lorsque le critère d'arrêt est atteint. Celui-ci peut représenter soit le nombre d'itérations atteint, soit le temps de calcul écoulé ou encore le nombre d'itérations exécutées sans amélioration de la solution.

L'algorithme « Tabu Search » présente plusieurs avantages :

- temps de calcul élevé : contrairement à l'algorithme GA, le temps d'exécution de l'algorithme « Tabu Search » est beaucoup moins important. En effet, la « liste Tabou » utilisée dans l'algorithme permet d'éviter les boucles de redondance dans le déroulement de celui-ci en contenant les solutions pouvant se répéter ainsi que les étapes qui permettent d'y arriver;
- l'exactitude et la qualité de la solution : l'algorithme « Tabu Search » permet d'avoir une solution se rapprochant le plus de la solution optimale. Cela est possible grâce à un autre aspect de la « liste Tabou » qui est de contenir toutes les solutions donnant des résultats moins performants.

Par ailleurs, indépendamment des paramètres choisis, notamment dans la phase d'initialisation de la solution, l'algorithme « Tabu Search » peut être complexe à mettre en œuvre et ainsi la solution plus complexe à trouver. Ainsi, afin d'utiliser l'algorithme « Tabu Search » de façon optimale, il convient de bien définir les paramètres à utiliser.

## **1.4 Méthodes d'allocation des ressources**

Optimiser les performances d'un réseau revient à optimiser les principales caractéristiques d'un réseau, à savoir la bande passante, la puissance et la répartition des utilisateurs entre les différentes cellules du réseau. Aussi, chacune des méthodes présentées se focalise sur une ou plusieurs de ces caractéristiques tout en se basant sur les algorithmes d'optimisation.

### **1.4.1 Allocation des ressources via les algorithmes heuristiques**

Effectuer une répartition optimale des ressources revient à effectuer une bonne conception de son réseau, mais également une bonne optimisation de celui-ci. Il existe ainsi plusieurs méthodes permettant d'effectuer une répartition adéquate des ressources, soit à travers l'une ou l'autre des classes (distribution de la bande passante et sélection de la cellule), soit à travers ces deux classes combinées.

Aussi, parmi ces techniques, se trouvent la méthode d'auto-organisation ou « Self-organizing networks » (SON), dans un réseau femtocellule, utilisant l'algorithme « Tabu Search » (Han et al., 2012). Cette méthode a pour but de maximiser le débit dans les femtocellules tout en minimisant les interférences entre les cellules du réseau (femtocellules). Elle est basée à la fois sur la distribution de la puissance transmise par les femtocellules ainsi que la répartition des fréquences entre chacune d'elles. Bien que permettant d'obtenir des résultats performants, cette technique ne considère que les utilisateurs privés (abonnés à une femtocellule).

Par ailleurs, il existe une méthode utilisant à la fois la puissance, la bande passante et la répartition des utilisateurs entre les cellules (Marshoud et al., 2012). Tenant compte des utilisateurs non abonnés aux femtocellules, cette méthode se base sur l'algorithme génétique. Elle permet ainsi de maximiser le débit total dans le réseau.

#### **1.4.2 Allocation des ressources via d'autres techniques d'optimisation**

Lors de la conception d'un réseau, plusieurs facteurs sont à prendre en compte. Parmi ceux-ci se trouvent les caractéristiques des cellules du réseau. En effet, ces dernières identifient la zone de couverture du réseau et de ce fait la zone de couverture du signal. Elles sont influencées par l'environnement géographique dans lequel le réseau sera déployé (zone urbaine, zone rurale, etc. ...), mais également l'emplacement des utilisateurs par rapport aux cellules identifiant le réseau. Aussi, afin de tenir compte de ces facteurs pour assurer un bon dimensionnement du réseau, la puissance fait son apparition. En effet, la puissance a un effet important sur le rayonnement de la cellule. Plus celle-ci est grande, plus la zone de rayonnement de la cellule est grande, plus elle est petite, plus la zone de rayonnement devient faible (Goldsmith, 2005). Par ailleurs, la puissance n'est pas qu'utilisée pour la conception d'un réseau. Elle est également importante dans les interactions entre les différentes cellules du réseau. En effet, selon la puissance allouée (grande ou petite) à chacune des cellules, elle a un impact sur les interférences présentes dans le réseau (Goldsmith, 2005). Il devient donc

primordial d'effectuer une bonne gestion et une bonne répartition de la puissance afin d'accroître les performances du réseau en minimisant les interférences et en effectuant une bonne conception de celui-ci. Aussi, parmi les méthodes utilisées pour la répartition de la puissance se trouve la minimisation de la puissance de transmission dans les cellules (Lopez-Perez et al., 2014). Réalisée dans un réseau contenant des femtocellules et utilisant la méthode d'optimisation linéaire ou « Integer Linear Programming » (ILP), cette technique a pour but de parvenir à minimiser les interférences entre les différentes cellules (macrocellule et femtocellule) tout en offrant une bonne gestion des zones non utilisées. Elle est basée selon deux principes :

- minimiser la puissance des utilisateurs situés en bordure de cellules,
- répartir de façon uniforme la puissance entre les différentes cellules du réseau.

Bien que permettant de réduire les interférences entre les cellules du réseau, les problèmes majeurs que rencontre la méthode de minimisation de la puissance de transmission dans les cellules se trouvent être dans la complexité d'implémentation de la méthode ainsi que de son temps d'exécution pouvant être important. De plus, la bande passante disponible dans les femtocellules doit être assez élevée pour pouvoir utiliser cette méthode. Aussi, une autre méthode consiste à configurer de façon automatique les cellules du réseau. Cette configuration est effectuée selon deux techniques. La première, basée sur le principe de gestion de la puissance suivant des événements déjà produits dans le réseau (Li et al., 2011), est réalisée à partir de l'algorithme d'apprentissage par renforcement ou « Q-learning ». Elle consiste à améliorer les capacités du réseau en se basant sur les activités déjà produites, en particulier les demandes des utilisateurs d'un point de vue de bande passante et de puissance. Aussi, cette méthode permet non seulement de minimiser les interférences dans le réseau, mais également offre une allocation dynamique de la puissance dans le réseau. Cependant, elle n'est utilisée que dans les réseaux avec des femtocellules de type d'accès ouvert.

## 1.5 Conclusion

Afin d'améliorer les performances d'un réseau, de nombreuses méthodes sont possibles. Basées à la fois sur les différents paramètres du réseau, tels que la bande passante, la puissance et la cellule, ainsi que différents algorithmes et principe (algorithme génétique, algorithme « Tabu Search, méthode FFR, etc. ...), elles ont pour caractéristique principale soit d'augmenter le débit du réseau, soit de minimiser les interférences entre les cellules.

Cependant, il existe de nombreuses contraintes dans ces méthodes. Parmi celles-ci se trouvent :

- la gestion de nombreux paramètres du réseau,
- la gestion des types d'accès des femtocellules.

Ainsi, dans ce contexte, il est donc nécessaire de mettre en place un algorithme pouvant à la fois utiliser chacun des utilisateurs du réseau (abonnés ou non) tout en optimisant les performances de celui-ci. Aussi, la méthode proposée dans ce mémoire se base sur le principe utilisé dans l'allocation de ressource utilisant l'algorithme génétique (Marshoud et al., 2012) avec l'utilisation de l'algorithme « Tabu Search ».

## CHAPITRE 2

### ALGORITHME D'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES

#### 2.1 Introduction

La simulation effectuée, basée sur l'algorithme de recherche « Tabou », a pour but d'implémenter un système permettant d'améliorer les performances d'un réseau. De plus, celles-ci étant principalement caractérisées par la qualité de service offerte aux utilisateurs, l'algorithme mis en place tient compte de trois critères importants :

- répartition optimale de la bande passante,
- distribution de la puissance,
- choix idéal de la station de base (BS).

Par ailleurs, afin de fournir une meilleure analyse et une meilleure interprétation des résultats obtenus par la simulation, une deuxième simulation est réalisée. Celle-ci, également basée sur l'algorithme TS est utilisée à titre comparatif. Contrairement au premier algorithme, il ne contient aucune étape de sélection optimale des stations de base. Ainsi, pour la différenciation des deux algorithmes décrits, l'algorithme utilisé à titre comparatif est intitulé « algorithme sans la Sélection optimale de la BS » (algorithme sans SBS) tandis que l'algorithme utilisé pour l'optimisation du réseau est intitulé « algorithme avec la Sélection optimale de la BS » (algorithme avec SBS).

Ce chapitre présente donc les principaux critères de la méthode TS basés sur l'allocation des ressources. Une fois cette description effectuée, les différentes étapes mises en place dans les deux algorithmes pour l'amélioration des performances du réseau sont établies.

## **2.2 Implémentation de la méthode « Tabu Search »**

Comme décrit précédemment (voir 1.3.3 Algorithme « Tabu search »), cette méthode est composée de trois phases essentielles : l'initialisation, l'optimisation et l'arrêt; l'optimisation et l'arrêt pouvant être regroupés dans une même étape. Par ailleurs, chacune de ses phases est conditionnée par plusieurs critères et joue un rôle important dans le fonctionnement de cette méthode. Aussi, afin de fournir de meilleures solutions, il convient d'insérer ces différents critères dans les algorithmes d'optimisation des performances mis en place (algorithme avec SBS et algorithme sans SBS).

### **2.2.1 Phase d'initialisation**

Étape importante lors de l'utilisation de la méthode « Tabu Search », elle consiste à définir une solution initiale pouvant être utilisée dans les phases d'optimisation. L'étape d'initialisation de la méthode « Tabu Search » est la même que les étapes d'initialisation utilisées dans les différentes parties des algorithmes.

### **2.2.2 Phase d'optimisation**

« Tabu Search » est une méthode basée sur la comparaison des résultats actuels et précédents dans le but de trouver une solution optimale. Ces résultats sont déterminés à partir d'algorithmes insérés dans la méthode Tabou (JW, 2006). Pour ce faire, la méthode « Tabu Search » utilise plusieurs paramètres afin de fournir une meilleure optimisation de la solution tout en améliorant son fonctionnement. Parmi ces paramètres se trouvent :

- la liste Tabou : elle renferme toutes les solutions non optimales trouvées lors de l'exécution de l'algorithme. Indépendamment de l'algorithme choisi, algorithme avec SBS ou algorithme sans SBS, elle peut être différente. Ainsi, dans le cas de l'algorithme avec SBS, elle représente le choix non optimal des cellules attribuées à l'utilisateur et la répartition non optimale de la bande passante, tandis que dans le cas de l'algorithme sans SBS, elle représente la répartition non optimale de la bande passante;

- le paramètre d'évaluation : il permet de déterminer les éléments à insérer dans la liste Tabou ou les solutions optimales. Il est déterminé en fonction de l'algorithme utilisé dans la méthode TS :
  - cas de l'algorithme avec SBS : l'algorithme utilisé est subdivisé en trois étapes : la sélection de la BS, la répartition de la puissance et l'allocation de la bande passante. Cependant, seulement les étapes de sélection de la BS et d'allocation de la bande passante sont utilisées pour déterminer les solutions à mettre dans la liste Tabou ou les solutions à considérer comme optimales;
  - cas de l'algorithme sans SBS : subdivisée en deux parties, la répartition de la puissance et l'allocation de la BP, seulement l'allocation de la BP est utilisée pour déterminer la solution Tabou ou la solution optimale;
- le critère d'arrêt : il représente le paramètre mettant fin à l'algorithme « Tabu Search ». Il peut être caractérisé par différentes conditions :
  - la solution optimale : l'algorithme prend fin si une solution optimale, selon les critères fixés, est trouvée;
  - la stabilisation de la solution : l'algorithme prend fin si malgré les itérations exécutées, la solution trouvée semble être constante;
  - le temps de convergence : déterminé par le nombre d'itérations ou le temps de calcul effectué, l'algorithme prend fin si ce temps de convergence est atteint.

Les prochains paragraphes décrivent les différents algorithmes utilisés avec l'algorithme « Tabu Search » à savoir l'algorithme avec SBS et l'algorithme sans SBS.

## 2.3 Allocation des ressources – adaptation de la méthode TS

### 2.3.1 Présentation de l’algorithme avec SBS

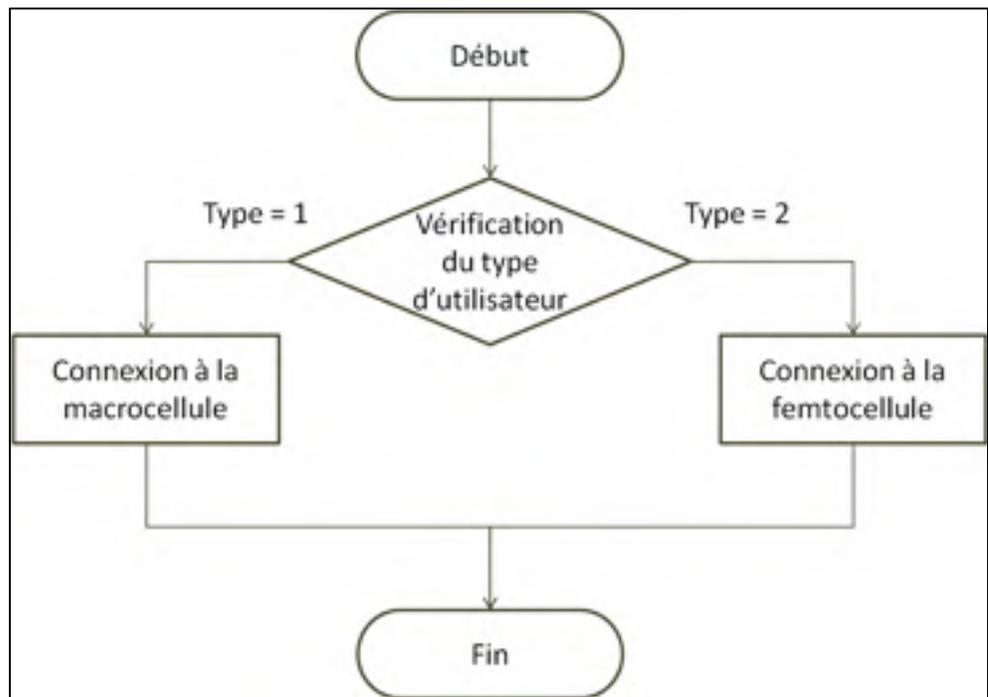
#### 2.3.1.1 Étape 1 : sélection optimale de la BS

Permettant d’identifier l’algorithme avec SBS de l’algorithme sans SBS, cette étape devient l’une des plus importantes de l’algorithme avec SBS. De plus, les utilisateurs ayant la possibilité d’utiliser soit la macrocellule soit une des femtocellules présentes dans le réseau, il est primordial de choisir la cellule la plus adaptée lors de leur connexion. En effet, ce choix permet d’éviter la saturation soit de la macrocellule, soit de la femtocellule, tout en fournissant de meilleurs débits. Parmi les critères d’optimisation des performances du réseau, le choix de la station de base fait donc partie d’une des priorités. Par ailleurs, lors de son implémentation dans l’algorithme, plusieurs exigences doivent être prises en compte :

- le type d’utilisateur : les utilisateurs ayant souscrit à une femtocellule ont la priorité sur tous les autres utilisateurs du réseau. Ainsi, en connectant un utilisateur  $U_i$  à une femtocellule  $F_i$ , il est important de vérifier si tous les utilisateurs  $U_n$ , abonnés à la femtocellule  $F_i$  pourront se connecter à cette dernière lorsque cela sera nécessaire;
- la disponibilité de la cellule : afin d’éviter la saturation dans le réseau, il est important de prendre en compte la disponibilité de connexion qu’offre chacune des cellules, principalement les femtocellules. En effet, ces dernières ont la possibilité d’accepter qu’un nombre maximal d’utilisateurs. Aussi, la répartition des utilisateurs devra être effectuée en tenant compte de ce nombre maximal d’utilisateurs;
- la distance : elle joue un rôle important dans la répartition des utilisateurs vers les cellules disponibles (macrocellule ou femtocellule). En effet, connecter un utilisateur à une macrocellule ou une femtocellule sans tenir compte de sa position par rapport à cette dernière pourrait engendrer des phénomènes d’atténuation du signal.

La méthode utilisée pour l’implémentation du choix optimal de la BS est composée de cinq parties :

- initialisation : correspondant également à la phase d'initialisation de la méthode TS, c'est le lieu d'affecter un choix initial de la cellule (macrocellule ou femtocellule) aux utilisateurs. Cette étape est importante, car elle permet de démarrer l'algorithme de sélection optimale de la BS. Elle est caractérisée par le type de l'utilisateur (abonné ou non abonné) (voir Algorithme 2.1). Ainsi, si l'utilisateur  $U_i$  est abonné à la femtocellule  $F_i$  (**type = 2**), il se connecte à celle-ci. Dans le cas contraire (non-abonné : **type = 1**), il se connecte à la macrocellule;



Algorithme 2.1 Algorithme d'initialisation de la SBS pour un utilisateur

- sélection des utilisateurs : une fois l'étape d'initialisation terminée, c'est le lieu de choisir l'utilisateur avec lequel l'algorithme sera effectué. Elle se fait selon les étapes suivantes :
  - classement des utilisateurs en fonction de la demande : elle permet de prioriser les utilisateurs ayant plus de besoins;
  - classement des utilisateurs en fonction de son type (abonné ou non-abonné à une femtocellule) : l'abonné ayant souscrit à une femtocellule étant prioritaire lors de la

connexion à celle-ci, il est important de considérer tout d'abord l'utilisateur ayant pour type « 2 » (abonné à une femtocellule);

- sélection de l'utilisateur : en combinant les deux étapes précédentes (classement en fonction de la demande et classement en fonction du type), la priorité sera effectuée tout d'abord en considérant les abonnés par ordre de demande, puis les non-abonnés par ordre de demande.
- classification des choix de connexion : c'est le lieu d'obtenir les cellules par lesquelles l'utilisateur peut se connecter pour accéder au réseau. Aussi, les différentes possibilités de connexion sont effectuées en tenant compte de la position l'utilisateur par rapport aux cellules considérées, la puissance d'émission dans ces dernières ainsi que l'atténuation du signal. Cela se traduit donc par l'inégalité (2.1) suivante :

$$\frac{P_i^{Fj}}{Pathloss^{Fj}} \geq \frac{P_i^M}{Pathloss^M} \quad (2.1)$$

Avec :

- $P_i^F$  et  $P_i^M$  représentent la puissance de l'utilisateur  $i$  émise respectivement dans la femtocellule et dans la macrocellule.
- $Pathloss^F$  et  $Pathloss^M$  représentent l'atténuation du signal respectivement dans la femtocellule ou la macrocellule.

Si l'inégalité (2.1) est vérifiée, l'utilisateur a la possibilité de se connecter à plusieurs femtocellules selon plusieurs critères. Dans le cas contraire, l'utilisateur se connecte à la macrocellule. Cette inégalité offre ainsi la possibilité d'avoir plusieurs cellules à sélectionner à savoir la macrocellule ou une ou plusieurs femtocellules du réseau.

- vérification des critères de connexion : elle représente l'étape la plus importante de la phase d'optimisation de la sélection de la cellule. En effet, c'est le lieu d'identifier la connexion optimale à effectuer en se basant sur les étapes précédentes. À chaque itération

de l'algorithme, un utilisateur sera choisi en fonction de la phase de « sélection des utilisateurs ». Celui-ci aura ensuite la possibilité de se connecter à une cellule dépendamment des cellules déterminées dans l'étape de « classification des choix de connexion » ainsi que de différents critères. Ces critères sont la disponibilité de la cellule et l'optimisation du *Throughput*. Aussi, pour une itération  $i$  donnée, l'utilisateur  $U_j$  pourra se connecter à la femtocellule  $F_k$  si celle-ci est disponible. Dans le cas contraire, l'utilisateur  $U_j$  aura la possibilité de se connecter à la macrocellule.

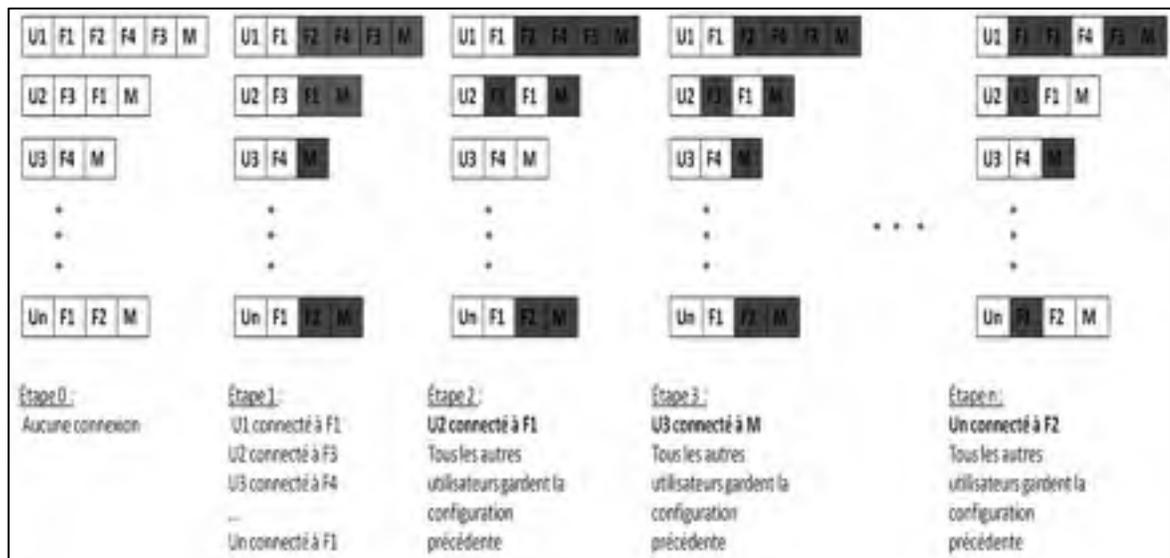


Figure 2.1 Exemple d'attribution des cellules

Aussi, comme le montre la « Figure 2.1 », à chaque itération, un utilisateur donné, choisi en fonction du tri effectué (demande et type), se connecte à une cellule du réseau (femtocellule ou macrocellule). Les autres utilisateurs gardent la configuration donnant le meilleur *Throughput* (solution de l'itération précédente ou solution d'une quelconque itération).

- détermination de la solution optimale et vérification du critère d'arrêt : l'algorithme de sélection de la cellule (voir Algorithme 2.2) est exécuté jusqu'à l'obtention d'une solution adéquate. Cette étape permet donc de vérifier si la configuration effectuée à l'étape précédente (*vérification des critères de connexion*) est la configuration optimale

ou pas. La solution optimale est donc déterminée en maximisant le débit dans tout le réseau, traduit par l'équation (2.2) suivante :

$$Throughout = \sum_{k \in \{M,F\}} \sum_{i \in N} x_i^k bw\_req_i \times \log_2(1 + x_i^k SNR_i) \quad (2.2)$$

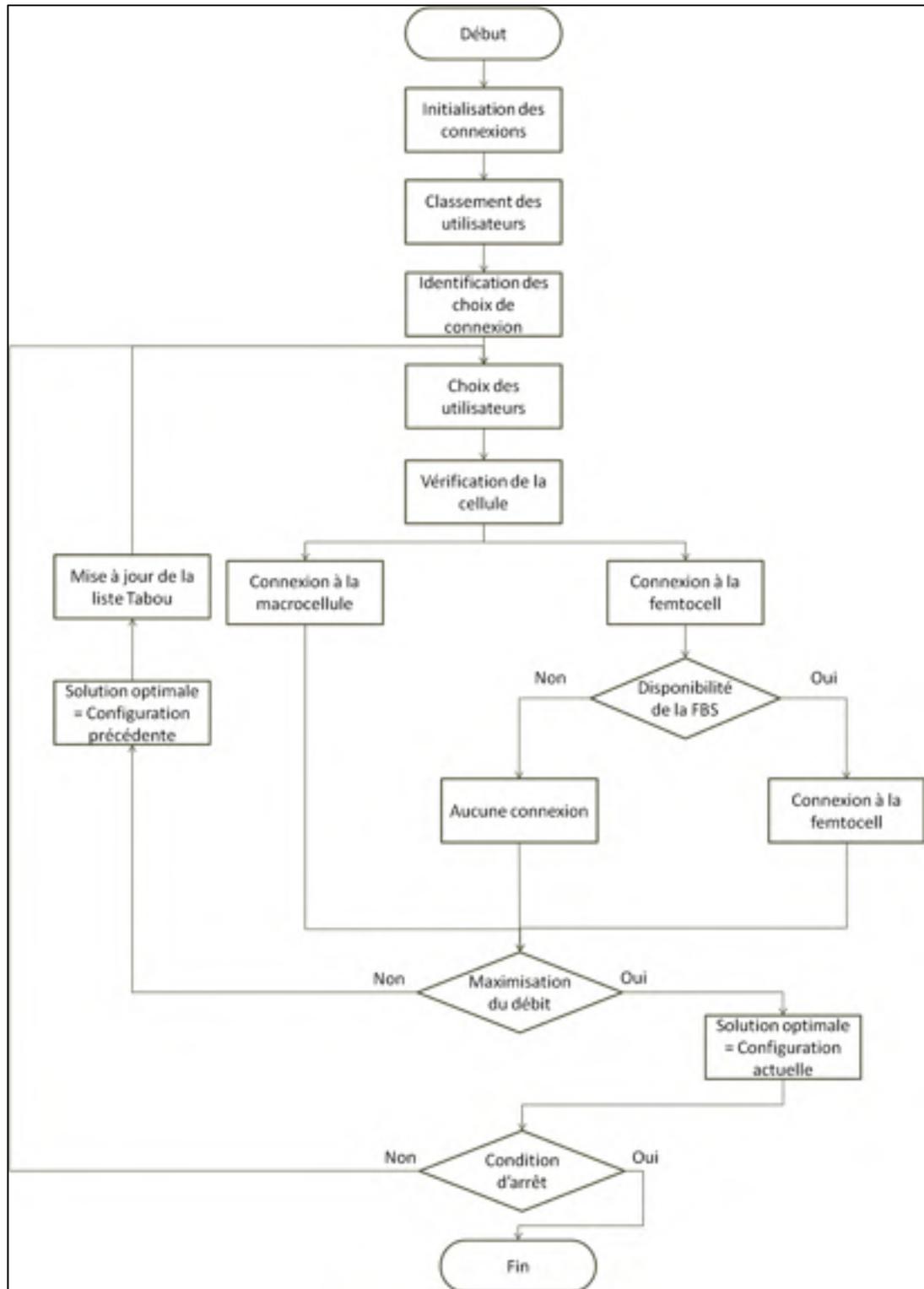
$$bw\_req_i = \frac{demande_i}{mod^k} \quad (2.3)$$

$$SNR_i = \frac{P_i}{Pathloss_i \times NOISE} \quad (2.4)$$

Avec :

- $P_i$  représente la puissance de l'utilisateur  $i$  émise,
- $Pathloss_i$  représente l'atténuation du signal dans la femtocellule ou la macrocellule,
- $N$  représente le nombre d'utilisateurs total dans le réseau,
- $bw\_req_i$ , la bande passante requise à l'utilisateur,
- $x_i^k$  identifie si l'utilisateur est connecté à la femtocellule ( $x_i^k = 0$ ) ou à la macrocellule ( $x_i^k = 1$ ),
- $demande_i$ , la demande d'un utilisateur  $i$ ,
- $mod^k$  représentant le type de modulation utilisée par la cellule  $k$ .
- $SNR_i$  le rapport signal sur bruit de la cellule  $i$ .

Par ailleurs, comme le présente l'Algorithme 2.2, si le débit est maximisé, la deuxième caractéristique de cette étape est de vérifier le critère d'arrêt de notre algorithme. Si celui-ci est atteint, l'algorithme est arrêté et la solution trouvée est considérée comme la solution optimale. Dans le cas contraire, l'algorithme reprend jusqu'à atteindre le critère d'arrêt.



Algorithme 2.2 Algorithme de sélection de la cellule pour la SBS

La solution optimale est déterminée en comparant le résultat du *Throughput* actuel avec le résultat précédent. Cela se traduit par l'inégalité (2.5) suivante :

$$Throughput^k > Throughput^{k-1} \rightarrow \begin{cases} \text{si oui } sol_{opt} = sol_k \\ \text{sinon } \begin{cases} sol_{opt} = sol_{k-1} \\ L_{tabu} = sol_k \end{cases} \end{cases} \quad (2.5)$$

Avec :

- $Throughput^k$  le débit trouvé à l'itération  $k$ ,
- $sol_{opt}$  la sélection optimale de la cellule,
- $sol_k$  la sélection de la cellule effectuée à l'étape  $k$ ,
- $L_{tabu}$  la liste Tabou.

Une fois, l'étape de sélection du choix optimal effectué, la prochaine étape est de déterminer la distribution optimale de la puissance et de la bande passante.

### 2.3.1.2 Étape 2 : répartition de la puissance

La puissance d'émission joue un rôle important dans le monde de la télécommunication. En effet, de par sa distribution entre les différents utilisateurs d'un réseau ou les différentes cellules d'un réseau, elle peut avoir un effet positif ou non sur la qualité du signal. Les interférences dépendant également de la puissance d'émission des utilisateurs, la répartition de façon équitable de cette dernière aura pour effet de les minimiser.

La puissance permet également de mieux exploiter la zone géographique (Goldsmith, 2005). Suivant la zone où sont installées les stations de base, la puissance d'émission doit être soit grande, soit faible, afin de pouvoir desservir la zone allouée. Aussi, dans un environnement montagneux ou avec de grands immeubles, la puissance d'émission doit être élevée. Dans ce même contexte, un environnement rural ne nécessite pas de grande puissance pour couvrir de grandes distances.

Il convient donc de faire un compromis avec la puissance à émettre lors de la conception d'un réseau, et ce dans le but d'optimiser les performances du réseau mis en place. De plus, la puissance d'émission dans le sens de la liaison montante est différente de celle dans le sens de la liaison descendante. Aussi, possédant plus de trafics dans le sens de la liaison descendante (Goldsmith, 2005), la puissance prise en compte sera celle de la liaison descendante. Par ailleurs, elle sera également répartie en fonction du nombre d'utilisateurs présents dans celles-ci. Cela se traduit ainsi par l'équation (2.6) suivante :

$$P_i = \frac{P^k}{\sum_{j \in \{k, k \in \{M, F\}\}} N_j} \quad (2.6)$$

Avec :

- $P_i$ , la puissance émise par l'utilisateur  $i$ ,
- $P^k$ , la puissance disponible dans la cellule  $k$ ,
- $k$  représentant une macrocellule ou une femtocellule,
- $N_j$ , le nombre d'utilisateurs présents dans la cellule  $k$ .

Une fois la puissance établie, la prochaine étape de la simulation est la distribution de la bande passante parmi les utilisateurs du réseau.

### 2.3.1.3 Étape 3 : allocation de la bande passante

Hormis la puissance, la cellule d'un réseau est également caractérisée par sa fréquence d'émission. Celle-ci est régie par les différentes normes cellulaires utilisées (Goldsmith, 2005). Par ailleurs, les bandes passantes allouées aux utilisateurs sont également dépendantes du codage utilisé dans la cellule. Ainsi, lors de l'allocation de la bande passante aux utilisateurs du réseau, il convient de tenir compte de tous les facteurs précités. La méthode utilisée pour l'allocation optimale de la bande passante aux utilisateurs est présentée dans trois étapes essentielles :

- initialisation : elle consiste à initialiser les bandes passantes à allouer à chacun des utilisateurs du réseau. Elle est caractérisée par trois principes :
  - vérification du codage : elle est fonction du type de modulation utilisée. Aussi, le type de modulation déterminé dans chacune des cellules pour déterminer la bande passante utilisée dans les cellules est présenté dans le Tableau 3.1 (p47);
  - détermination de la bande passante dans la cellule : définie en fonction du codage utilisé, elle se traduit par l'équation suivante :

$$BP^k = \frac{T\_Bw}{mod^k} \quad (2.7)$$

Avec :

- $T\_Bw$ , la bande passante totale disponible dans tout le réseau,
- $BP^k$ , la bande passante disponible dans la cellule  $k$ ,
- $mod^k$  représentant le type de modulation utilisé par la cellule  $k$ .
- initialisation de la bande passante pour chaque utilisateur : cela sera effectué selon l'équation suivante :

$$bw\_ass_i = \frac{BP^k}{\sum_{j \in \{k, k \in \{M, F\}\}} N_j} \quad (2.8)$$

Avec :

- $bw\_ass_i$ , la bande passante allouée à l'utilisateur  $i$ ,
- $BP^k$ , la bande passante disponible dans la cellule  $k$ ,
- $k$  représentant une macrocellule ou une femtocellule,
- $N_j$ , le nombre d'utilisateurs présents dans la cellule  $k$ .

L'étape d'initialisation est également importante, car elle permet de déterminer la bande passante de base pour chaque utilisateur afin de déterminer la bande passante optimale à allouer aux utilisateurs.

- sélection des utilisateurs : cette partie a le même principe que le choix des utilisateurs effectué lors de la sélection optimale de la BS (voir 2.3.1.1 Étape 1 : sélection optimale de la BS). Par ailleurs, pour la connexion des utilisateurs à l'une des cellules du réseau (femtocellule ou macrocellule), le résultat de l'étape de sélection optimale de la BS sera considéré;
- allocation de la bande passante : partie la plus importante de l'optimisation de la bande passante, la répartition de la bande passante entre les utilisateurs dépend à la fois de la demande de l'utilisateur que de la bande passante requise dans le réseau. Elle est ainsi répartie en trois étapes :
  - détermination de la bande passante requise : fonction de la demande de l'utilisateur et du type de modulation utilisée dans la cellule, la bande passante requise  $bw\_req$  par l'utilisateur est définie selon l'équation (2.3);
  - allocation de la bande passante : lors de l'implémentation de cette étape, la bande passante allouée à l'utilisateur est fonction de sa bande passante requise ainsi que de sa bande passante précédemment fournie. À la première itération, la bande passante précédemment fournie ( $bw\_ass^{t-1}$ ) correspond à la bande passante allouée à l'étape d'initialisation. Ainsi, si la bande passante requise est supérieure à la bande passante précédemment fournie ( $bw\_ass^{t-1}$ ), cette dernière ( $bw\_ass^{t-1}$ ) sera incrémentée d'un pas, dans le cas contraire, elle sera décrétementée de ce même pas. Cela se traduit par l'inégalité suivante :

$$bw\_ass_i^t = \begin{cases} bw\_ass_i^{t-1} + Pas & \text{si } bw\_req_i > bw\_ass_i^{t-1} \\ bw\_ass_i^{t-1} - Pas & \text{si } bw\_req_i < bw\_ass_i^{t-1} \end{cases} \quad (2.9)$$

Avec :

- $bw\_ass_i^t$ , la bande passante allouée à l'utilisateur  $i$  à l'itération  $t$ ,
- $bw\_req_i$ , la bande passante requise pour l'utilisateur  $i$ .

- vérification de l'allocation : la bande passante allouée à tous les utilisateurs ne doit pas être supérieure à celle disponible dans tout le réseau. Ainsi, lors de la répartition de celle-ci aux utilisateurs, la condition suivante doit être vérifiée :

$$\sum_{i=1}^N bw\_ass_i \leq T\_Bw \quad (2.10)$$

Avec :

- $bw\_ass_i$ , la bande passante allouée à un utilisateur  $i$ ,
- $T\_Bw$  représentant la bande passante disponible dans tout le réseau,
- $N$  le nombre total d'utilisateurs.

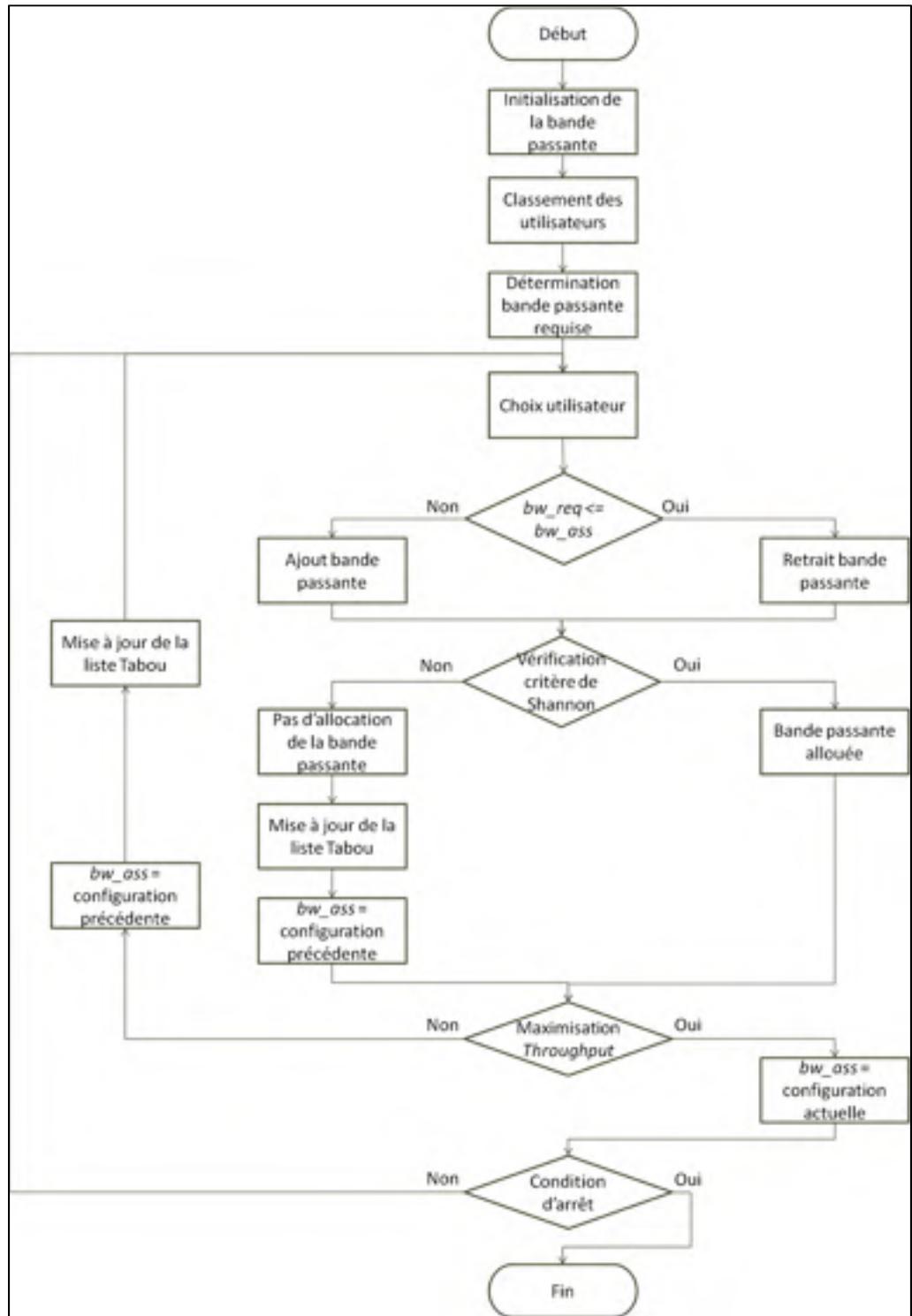
Aussi, si la condition d'allocation présentée dans l'inégalité (2.10) n'est pas vérifiée, aucune allocation de la bande passante n'est effectuée. Dans le cas contraire, la bande passante déterminée par l'équation (2.9) est allouée à l'utilisateur.

Par ailleurs, tout comme l'étape de sélection optimale de la BS, l'algorithme d'allocation de la bande passante est exécuté jusqu'à l'obtention d'une allocation optimale. Celle-ci est traduite en maximisant le gain *Throughput* suivant :

$$Throughput = \sum_{k \in \{M,F\}} \sum_{i \in N} x_i^k bw\_ass_i \times \log_2(1 + x_i^k SNR_i) \quad (2.11)$$

Avec :

- $SNR_i$  représente le rapport signal sur bruit de la cellule  $i$ , déterminée par l'équation (2.4),
- $N$  représente le nombre d'utilisateurs total dans le réseau,
- $bw\_ass_i$ , la bande passante allouée à l'utilisateur,
- $x_i^k$  identifie si l'utilisateur est connecté à la femtocellule ( $x_i^k = 0$ ) ou à la macrocellule ( $x_i^k = 1$ ).



Algorithme 2.3 Algorithme d'allocation optimale de la bande passante

La mise à jour de la liste Tabou est également effectuée lors de l'allocation de la bande passante (voir Algorithme 2.3 ). Elle contient les éléments ne permettant pas d'optimiser la solution, à savoir :

- la bande passante allouée ne respectant pas la condition vérifiée par l'inégalité (2.10),
- la bande passante ne permettant pas de maximiser le gain.

La liste Tabou est donc traduite par l'équation suivante :

$$L_{Tabu}^k = \begin{cases} Sol^k & \text{si } Throughput^k < Throughput^{k-1} \text{ ou} \\ Sol^k & \text{si } \sum_{i=1}^N bw\_ass_i \leq T_{Bw} & \text{ou} \\ L_{Tabu}^k & \text{dans aucun des cas précédents} \end{cases} \quad (2.12)$$

Avec :

- $Throughput^k$  le gain obtenu à l'itération  $k$ ,
- $Sol^k$  la solution obtenue à l'itération  $k$ . Celle-ci est une combinaison de la bande passante allouée à l'utilisateur  $i$  lors de l'itération  $k$ ,
- $bw\_ass_i$  la bande passante allouée à l'utilisateur  $i$ ,
- $T_{Bw}$  la bande passante totale,
- $L_{tabu}^k$ , la liste Tabou mise à jour lors de l'itération  $k$ .

La mise à jour de la liste Tabou est aussi l'occasion de mettre à jour la solution optimale :

$$Sol_{opt}^k = \begin{cases} Sol_{opt}^{k-1} & \text{si } Throughput^k < Throughput^{k-1} \\ Sol_{opt}^k & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec :

- $Throughput^k$  le gain obtenu à l'itération  $k$ ,

- $Sol_{opt}^k$ , la liste optimale obtenue à l'itération  $k$ . Elle contient l'ensemble des solutions obtenues à chaque itération selon les différents critères définis.

Par ailleurs, tout comme l'algorithme de sélection optimale de la BS, la condition d'arrêt permet de déterminer si l'algorithme prend fin dans le cas où elle est réalisée. Dans le cas contraire, l'algorithme est repris.

### 2.3.2 Présentation de l'algorithme sans SBS

L'algorithme sans SBS ne possède pas d'étape d'optimisation pour la sélection de la SBS. Aussi, il s'implémente à partir de deux étapes essentielles : l'allocation de la bande passante et la distribution de la puissance. Ces deux étapes se réalisent de la même manière que l'algorithme d'optimisation avec la SBS (voir 2.3.1.2 et 2.3.1.3). Cependant, il convient de pouvoir assigner des cellules (femtocellule ou macrocellule) aux utilisateurs avant de débiter les étapes de distribution de puissance et d'allocation de la bande passante.

L'assignation de la BS aux utilisateurs, dans cet algorithme, demeure une étape pertinente. En effet, la désignation « utilisateur et BS » effectuée est utilisée dans la suite de l'algorithme afin d'exécuter les autres étapes de celui-ci.

Ainsi, afin de faire un choix de BS pour l'utilisateur, plusieurs critères peuvent être pris en compte (voir Tableau 2.1). Parmi ceux-ci se trouve la demande des utilisateurs. Dans ce cas, les femtocellules sont assignées aux utilisateurs ayant les plus fortes demandes, et ce indépendamment de leur type (abonné ou non). S'il n'y a plus de femtocellules disponibles, alors les utilisateurs restants se connectent automatiquement à la macrocellule.

Le deuxième critère est de considérer la distance des utilisateurs par rapport aux femtocellules, sans tenir compte du type de celui-ci (abonné ou non). Ainsi, l'utilisateur se

connecte à la femtocellule disponible la plus proche de lui. Dans le cas où il n'existe plus de femtocellules disponibles, l'utilisateur se connecte à la macrocellule.

Il existe également une possibilité de choisir la femtocellule en tenant compte de la position de celle-ci ainsi que de la position de la macrocellule par rapport à l'utilisateur. Aussi, deux cas sont envisageables :

- assigné à l'utilisateur la femtocellule qui lui est proche si celle-ci est disponible, sinon le connecté à la macrocellule,
- en comparant les distances des deux cellules (macrocellule et femtocellule) comme indiqué dans l'inégalité (2.1), l'utilisateur est connecté soit à la femtocellule si celle-ci est disponible, sinon à la macrocellule.

Un autre critère est enfin de combiner à la fois la demande des utilisateurs ainsi que la distance de ceux-ci par rapport aux femtocellules. Aussi, les utilisateurs ayant les plus fortes demandes se verront assigner la femtocellule la plus proche soit selon sa disponibilité, soit à la suite d'une comparaison de la distance des deux cellules, toujours selon sa disponibilité.

Tableau 2.1 Récapitulatif de l'assignation des femtocellules

	Demande	Distance		Mixte
		Comparaison	Distance	
<b>Choix de l'utilisateur</b>	Plus forte demande	Aléatoirement	Aléatoirement	Plus forte demande
<b>Critère</b>	Indépendamment du type			
<b>Conditions</b>	Femtocellule disponible	Femtocellule disponible Plus proche de l'utilisateur que la macrocellule	Femtocellule disponible	Femtocellule disponible

Pour l'exécution de l'algorithme sans SBS, le critère choisi est le critère mixte. En effet, celui-ci permettant de prioriser les utilisateurs ayant les plus fortes demandes se rapproche le plus de l'algorithme avec SBS, qui également priorise les utilisateurs avec la plus forte demande. Par ailleurs, tenir compte de la distance pour allouer les femtocellules, surtout en comparant avec la distance des macrocellules, permet de minimiser les pertes dues à l'atténuation du signal.

#### 2.4 Détermination des paramètres de l'algorithme – condition d'arrêt

L'un des paramètres importants lors de l'implémentation de la méthode « Tabu Search » dans les algorithmes d'optimisation est la détermination du critère d'arrêt. En effet, comme vu dans l'« Algorithme 2.2 » et l'« Algorithme 2.3 », la condition d'arrêt permet de mettre un terme à l'algorithme ou de l'exécuter jusqu'à l'obtention d'une solution optimale. Il existe plusieurs critères pouvant être utilisés pour la condition d'arrêt. Aussi, dans notre algorithme, le critère utilisé est déterminé en fonction de la convergence des solutions de l'algorithme.

Cela a pour but de choisir un critère permettant à la fois d'obtenir la solution optimale, tout en maximisant le temps d'exécution de l'algorithme. Dans ce contexte, une simulation a été mise en place afin d'observer le comportement des algorithmes et de ce fait de déterminer le temps de convergence à utiliser lors du déroulement des scénarios pour l'étape de l'optimisation des performances.

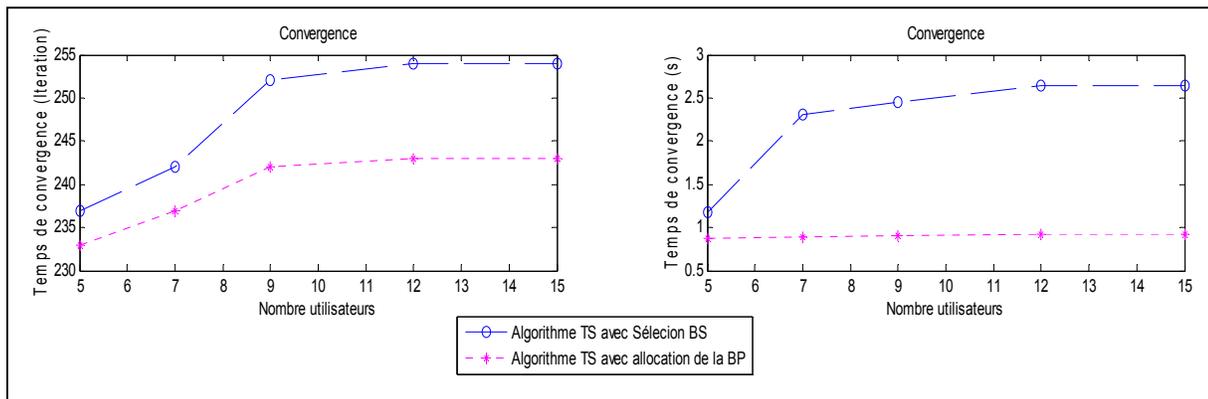


Figure 2.2 Critère d'arrêt – Itération en fonction du nombre des utilisateurs

La détermination du temps de convergence a été le résultat de l'analyse de différentes simulations effectuées par les algorithmes mis en place (algorithme avec SBS et algorithmes sans SBS). Comme présenté dans la « Figure 2.2 », les scénarios mis en place dans les différentes simulations représentent le nombre d'itérations en fonction du nombre d'utilisateurs proches des femtocellules. Ces itérations représentent le temps mis à l'algorithme afin d'obtenir une convergence dans les solutions obtenues. Ainsi, à chaque augmentation du nombre d'utilisateurs, le nombre d'itérations augmente également pour les deux algorithmes, avant de converger vers une valeur. Par ailleurs, le nombre d'itérations pour la courbe représentant le temps de convergence avec la SBS (algorithme avec la sélection optimale de la BS) est plus grand que la courbe représentant le temps de convergence sans la SBS (algorithme avec allocation de la BP). En effet, plus l'algorithme mis en place comprend des contraintes, plus le nombre d'itérations avant d'obtenir la convergence de l'algorithme est important.

Le but du choix de notre condition d'arrêt étant à la fois de minimiser le temps de convergence tout en permettant d'obtenir la solution optimale, le critère choisi se porte sur le nombre d'itérations effectuées. Aussi, en observant la valeur maximale des itérations suivant le nombre d'utilisateurs (voir « Figure 2.2»), le nombre d'itérations utilisées dans chacun des algorithmes et chacune des simulations effectuées sera de **300**. Ainsi, comme décrit dans les « Algorithme 2.2 » et « Algorithme 2.3 », une fois ce nombre atteint, les différents algorithmes d'optimisation mis en place prendront fin. La solution trouvée dans ce cas sera considérée comme la solution optimale.

## **2.5 Conclusion**

L'algorithme « Tabu Search » pour l'amélioration des performances du réseau est effectué en plusieurs étapes. Ces différentes étapes permettent d'optimiser chacune des caractéristiques d'un réseau aussi bien pour sa conception que pour la qualité de service à offrir aux utilisateurs.

Cependant, il est important de pouvoir observer les résultats obtenus à l'issue de la simulation afin de pouvoir analyser son impact sur le réseau. Aussi, le prochain paragraphe présentera les résultats obtenus lors de l'exécution de l'algorithme.



## CHAPITRE 3

### SIMULATIONS ET RÉSULTATS

#### 3.1 Introduction

Le but de ce travail étant d'améliorer les performances d'un réseau contenant des femtocellules, un algorithme utilisant l'algorithme de recherche « Tabu Search » a été développé. Cet algorithme, présenté dans le chapitre précédent, est constitué de trois parties essentielles :

- la sélection des cellules à utiliser,
- la répartition de la puissance,
- l'allocation de la bande passante.

Par ailleurs, afin d'observer et d'analyser les performances du réseau via l'algorithme mis en place, plusieurs étapes doivent être prises en compte :

- étude des résultats obtenus : cette partie est essentielle, car elle permet de valider l'algorithme mis en place via l'analyse de plusieurs critères qui sont le débit du système (*throughput*), la puissance émise dans le réseau, et la bande passante utilisée dans tout le réseau;
- comparaison des résultats avec d'autres algorithmes : c'est le lieu de tester l'algorithme mis en place avec d'autres algorithmes, notamment l'algorithme WWF. Cette partie permettra de vérifier les apports de l'utilisation de l'algorithme de recherche Tabou.

Ainsi, ce chapitre présentera les résultats des simulations effectuées ainsi qu'une comparaison de l'algorithme WWF et l'algorithme « Tabu Search ».

### 3.2 Paramètres de la simulation – Architecture du réseau

Plusieurs scénarios ont été mis en place afin d'observer et d'analyser le comportement des algorithmes mis en place. Leur rôle principal sera de jouer sur les différentes caractéristiques aussi bien du réseau que des utilisateurs à savoir la distance des utilisateurs par rapport aux cellules (femtocellule et macrocellule). De plus, l'objectif de la phase de simulation est de mettre en exergue les avantages de l'algorithme mis en place. Aussi, les différents paramètres décrits seront choisis de telle sorte à valider les performances de l'algorithme à travers les scénarios établis.

Le type des utilisateurs (abonné ou non abonné à la femtocellule) sera donc un paramètre fixe durant toutes les simulations effectuées, et ce indépendamment du scénario utilisé.

Par ailleurs, le réseau simulé est un réseau composé essentiellement de cinq femtocellules incluses dans la macrocellule, leur but étant en effet de la décharger (voir Figure 3.1).

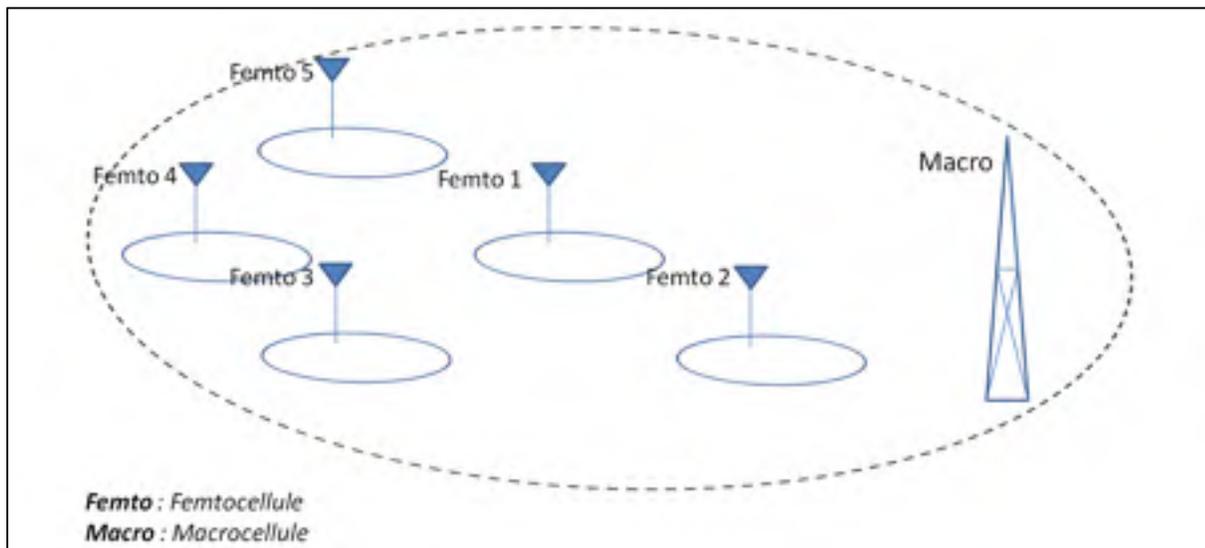


Figure 3.1 Représentation de l'architecture du réseau étudié

La distance des utilisateurs étant un paramètre variable dans les scénarios, il est important de considérer la distance des femtocellules (voir Tableau 3.1). Cette variable sera fixée dans toute la simulation, quel que soit le scénario.

Tableau 3.1 Récapitulatif des paramètres des femtocellules du réseau

<b>Femtocellules</b>	1	2	3	4	5
<b>Modulation</b>	6	6	6	4	4
<b>Position x</b>	-276.384	-251.383	-301.382	-326.384	-301.39
<b>Position y</b>	-48.8868	-5.58629	-5.58397	-48.8822	-92.185
<b>Macrocellule</b>					
2					

Le nombre d'utilisateurs présents dans le réseau est également un paramètre important à prendre en compte dans le réseau. Il permet en effet de gérer la bande passante disponible afin de servir les utilisateurs en fonction de leur demande. Ainsi, le nombre total des utilisateurs dans le réseau simulé sera de 30.

Il est également important de noter que le nombre maximal d'utilisateurs pouvant se connecter à une femtocellule est de 5, soit 25 utilisateurs sur les 30 dans le réseau. Ainsi, quelque soit le scénario utilisé ainsi que les connexions possibles avec une des femtocellules du réseau, seulement 25 utilisateurs maximum pourront se connecter à ces dernières.

Tout au long de la simulation, la demande de l'utilisateur est un paramètre fixe dans le réseau. Les valeurs des demandes des utilisateurs sont présentées dans le « Tableau-A I-1 » de l' « Annexe I ». Seules les valeurs de la position des utilisateurs (position « x » et position « y ») varient durant le déroulement de l'algorithme. À partir d'elles (voir ANNEXE I, p 63) ressortent les différents scénarios pour l'optimisation des performances du réseau. Aussi, les différents scénarios exécutés sont réalisés en faisant varier les positions des utilisateurs

aléatoirement. Ainsi, les utilisateurs, indépendamment de la position qui leur est affectée, peuvent être proches d'une ou plusieurs femtocellules du réseau.

Le choix de connexion à la femtocellule dépendra de l'algorithme en place.

Les paramètres utilisés pour le déroulement des scénarios sont présentés dans le Tableau 3.2 suivant :

Tableau 3.2 Paramètres de simulation

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Bande passante totale disponible – Cas de non-saturation	50 MHz
Bande passante totale disponible – Cas de saturation	10 MHz
Puissance totale disponible	400 W
Facteur d'atténuation environnement « outdoor »	3.7
Facteur d'atténuation environnement « indoor »	3
Bruit dans le système (Noise)	$3,11.10^{-14}$
Nombre d'utilisateurs total	30
<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Nombre de femtocellules	5
Capacité maximale d'utilisateurs dans une femtocellule	5
Nombre de bits par symbole possible dans une femtocellule	(6, 4, 2, 1)
Nombre de bits par symbole possible dans une macrocellule en fonction de la zone de rayonnement	(6, 4, 2, 1)

Comme décrit dans le Tableau 3.2, deux simulations sont effectuées pour analyser le comportement de l'algorithme lors des différentes situations d'un réseau :

- la non-saturation : la bande passante totale disponible est de 50 MHz,
- la saturation : la bande passante totale disponible est de 10 MHz.

Les critères de saturation et de non-saturation sont déterminés par rapport à la demande totale des utilisateurs (voir Tableau-A I-1 page 63).

### **3.3 Étude des résultats de la simulation –optimisation et comparaisons**

#### **3.3.1 Description**

Les résultats de la simulation effectuée ont été étudiés et analysés à partir de trois paramètres essentiels : le débit, la puissance et la bande passante totale utilisée. Ces paramètres ont été mis en exergue à travers les différents scénarios réalisés en faisant varier la position des utilisateurs par rapport aux femtocellules du réseau (voir « Tableau 3.1 »).

Par ailleurs, une autre étape a été insérée dans le processus d'analyse afin de mieux observer le comportement du réseau. Elle consistait en effet à réaliser l'algorithme sans préalablement effectuer l'optimisation dans le choix de la BS (voir 2.3.2). L'algorithme de cette partie ne comprend que la répartition de la puissance entre chacun des utilisateurs et l'allocation de la bande passante. La cellule à laquelle les utilisateurs ont été connectés a été choisie selon le type de ces derniers (abonné ou non abonné), la disponibilité des femtocellules et la distance des utilisateurs.

Une comparaison a été effectuée entre ces deux algorithmes, à savoir l'algorithme sans la sélection de la BS et l'algorithme avec l'allocation de la BS. Elle a permis d'observer le comportement du réseau en fonction du nombre des utilisateurs connectés aux femtocellules et également de mieux apprécier les avantages des techniques d'optimisation mises en place dans le réseau.

En outre la comparaison effectuée entre les deux algorithmes (algorithme sans la sélection de la BS et algorithme avec l'allocation de la BS), afin de vérifier les avantages de l'algorithme

« Tabu Search » par rapport à l'algorithme WWF, une autre comparaison a été réalisée à partir des résultats d'études utilisant l'algorithme WWF (Marshoud et al., 2012).

Trois critères sont utilisés pour la comparaison des résultats : le débit, la puissance, la bande passante totale utilisée et le temps de convergence.

### 3.3.2 Débit

Le but de tout l'algorithme a été de maximiser le débit total du système (exprimé en Mbps), prenant en compte la sélection de la station de base adéquate (femtocellule ou macrocellule), la puissance émise par les utilisateurs ainsi que la bande passante assignée à chacun des utilisateurs.

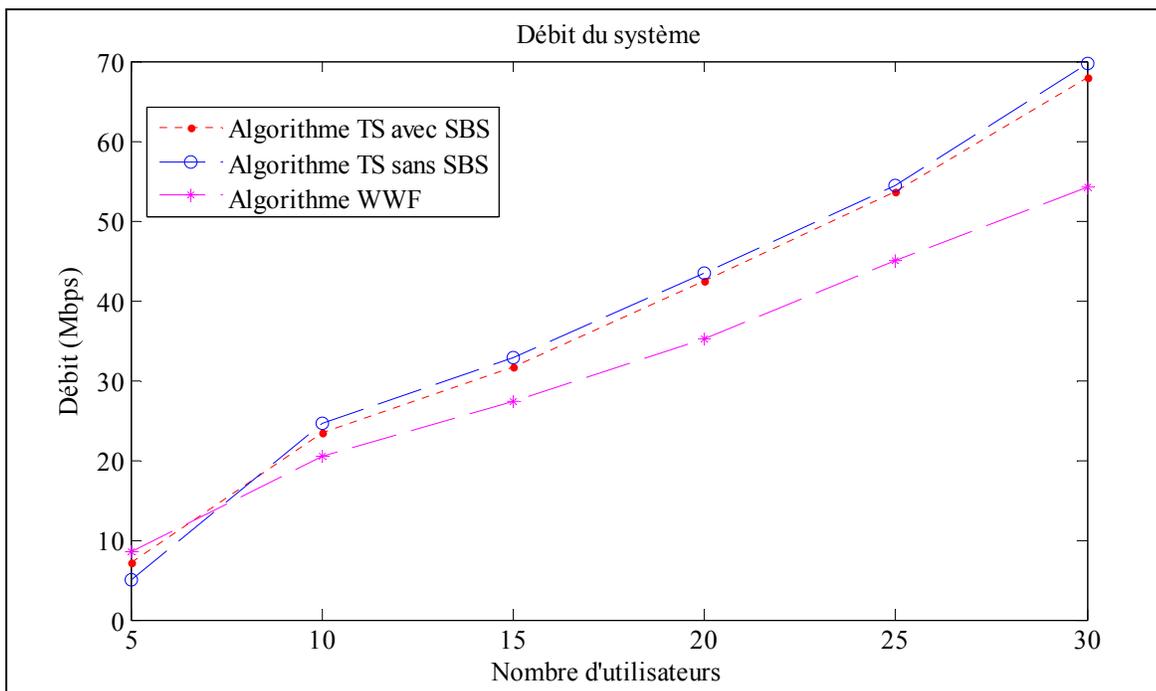


Figure 3.2 Débit du système en fonction du nombre d'utilisateurs – Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS – Cas de 50 MHz

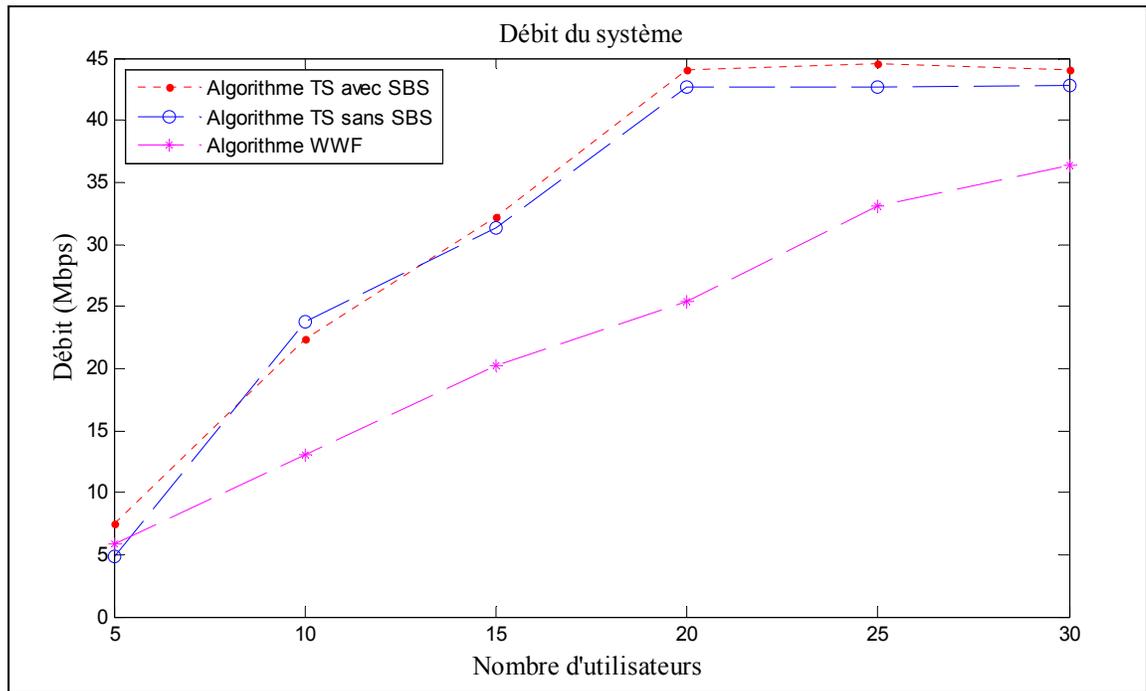


Figure 3.3 Débit du système en fonction du nombre d'utilisateurs – Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS – Cas de 10 MHz

Les figures « Figure 3.2 » et « Figure 3.3 » représentent le débit atteint dans tout le système en utilisant l'algorithme « Tabu Search » avec SBS, l'algorithme sans SBS et l'algorithme WWF. On observe une augmentation du débit en fonction du nombre des utilisateurs, quelque soit le type d'algorithme utilisé. Cela se justifie par le fait que les différents algorithmes ont pour but de maximiser le débit du système.

Cependant, l'algorithme avec la recherche Tabou présente de meilleurs débits que l'algorithme WWF. Cette augmentation s'explique par le fait que l'algorithme TS avec SBS offre une meilleure répartition des utilisateurs entre les différentes cellules du réseau (femtocellule et macrocellule). Il permet de ce fait une meilleure utilisation des femtocellules dans le réseau et offre ainsi de meilleurs débits.

Par ailleurs, lors de la saturation du réseau (cas avec la bande passante disponible de 10 MHz), on observe une stabilisation du débit avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs.

Cela s'explique par le manque de ressources disponibles lors de l'augmentation des demandes.

### 3.3.3 Puissance

La puissance décrite dans cette section est la puissance totale utilisée par tous les utilisateurs du réseau. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$P_{utilise} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{1mW} \right) \quad (3.1)$$

Avec :

- $P_{utilise}$ , la puissance totale utilisée par tous les utilisateurs. Elle est représentée en dBm,
- $P_t$ , la puissance totale utilisée par tous les utilisateurs en mW.

Cependant, la puissance d'une cellule étant proportionnelle à la taille de celle-ci (Goldsmith, 2005), la puissance disponible dans la femtocellule sera très inférieure à celle disponible dans la macrocellule. Aussi, la puissance totale  $P_t$  utilisée par tous les utilisateurs sera :

$$P_t = \sum_{i=1}^N x_i^k P_i \quad (3.2)$$

Avec :

- $P_i$  la puissance utilisée par l'utilisateur  $i$ ,
- $N$ , le nombre d'utilisateurs,
- $x_i^k$  le coefficient désignant si l'utilisateur est connecté à la macrocellule ou à la femtocellule.

La puissance  $P_t$  est traduite par la « Figure 3.4 » :

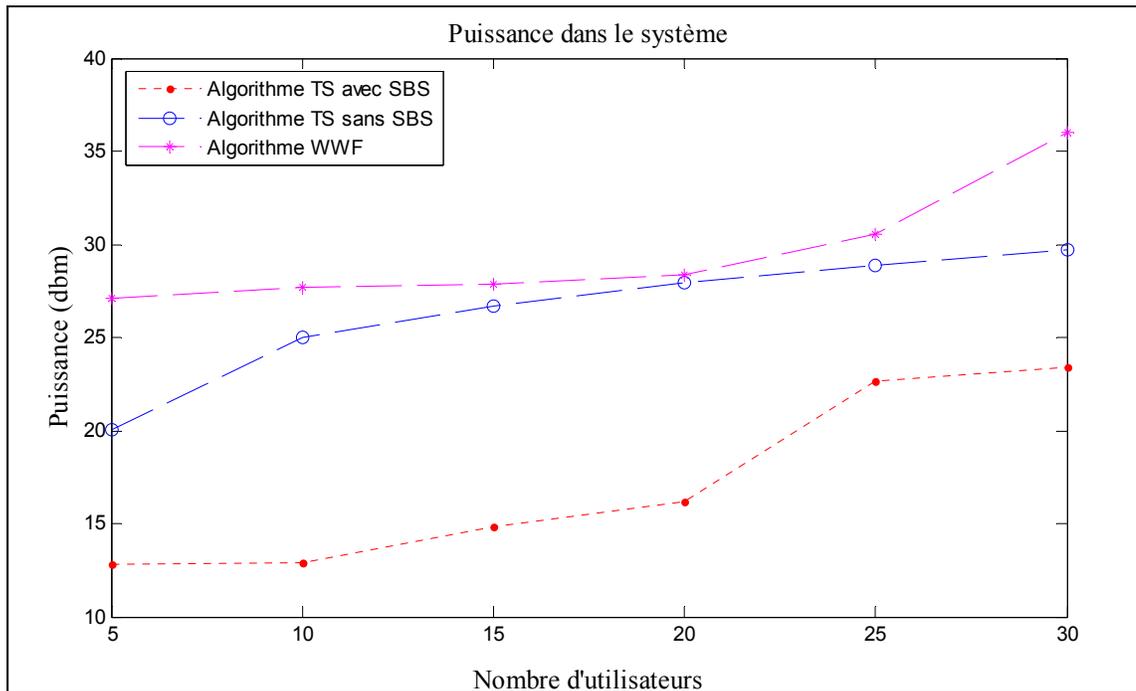


Figure 3.4 Puissance en fonction du nombre d'utilisateurs – Cas de 50 MHz et de 10 MHz confondus

La Figure 3.4 montre une augmentation de la puissance par rapport au nombre d'utilisateurs dans le système. Par ailleurs, la puissance consommée en utilisant l'algorithme TS, quelle que soit la méthode (avec ou sans SBS), est moindre que celle utilisant l'algorithme WWF. Cela traduit ainsi une meilleure consommation de la puissance avec l'algorithme utilisant l'optimisation de la BS. En effet, l'algorithme, tout comme le débit, l'optimisation de la sélection de la BS mise en exergue dans l'algorithme TS offre une meilleure utilisation des femtocellules dans le réseau et ainsi une consommation de la puissance plus faible.

### 3.3.4 Bande passante

La bande passante exprimée dans la Figure 3.5 est la bande passante utilisée par les utilisateurs dans tout le système. Elle est traduite par la formule suivante :

$$BP_{utilise} = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{T_{BW}} \quad (3.3)$$

Avec :

- $b_i$ , la bande passante assignée à un utilisateur  $i$ ,
- $T_{BW}$ , la bande passante totale disponible dans tout le système.

On obtient ainsi les résultats présentés aux figures « Figure 3.5 » et « Figure 3.6 » :

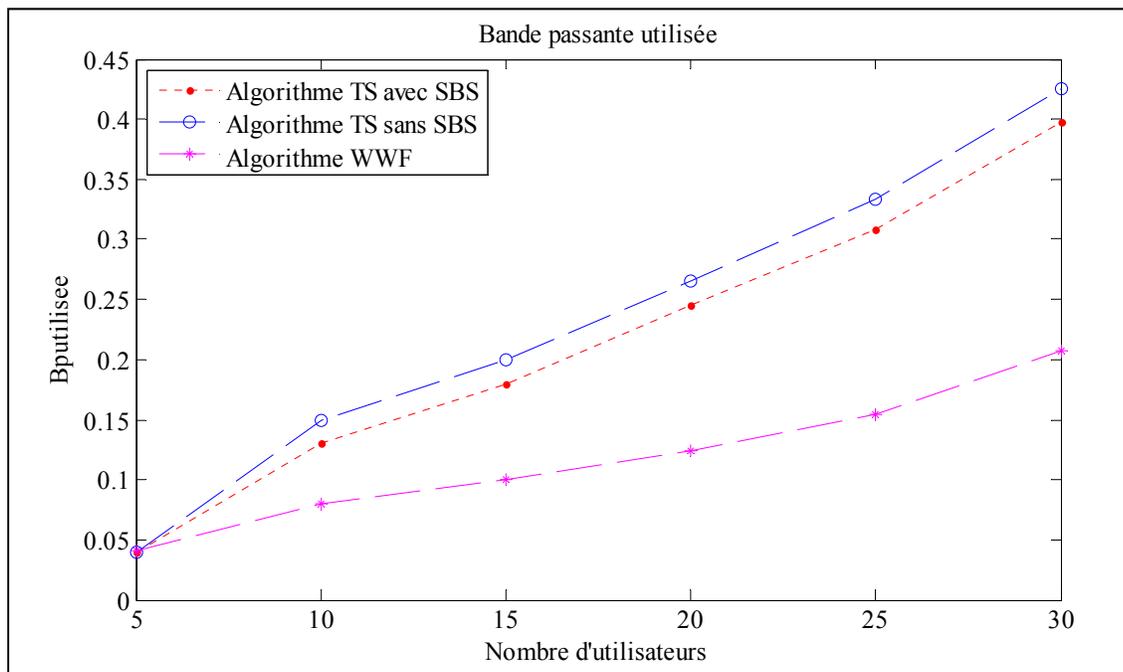


Figure 3.5 Bande passante utilisée en fonction du nombre d'utilisateurs – Comparaison algorithme WWF vs algorithme TS – Cas 50 MHz

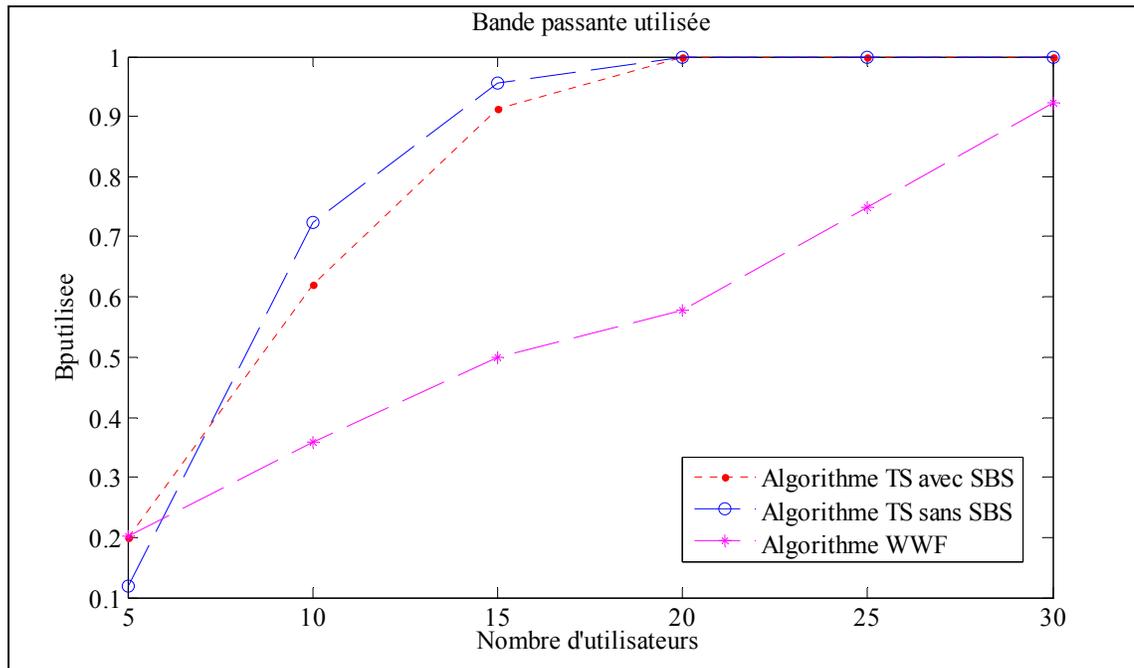


Figure 3.6 Bande passante utilisée en fonction du nombre d'utilisateurs – Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS – Cas 10 MHz

Les figures « Figure 3.5 » et « Figure 3.6 » présentent la bande passante consommée dans tout le système (macrocellule et femtocellules). On observe que l'utilisation de la bande passante est plus optimale avec l'algorithme TS, en particulier avec la méthode utilisant la sélection optimale de la BS, que l'algorithme WWF. Cela peut se traduire par une augmentation de la bande passante présente en fonction du nombre d'utilisateurs dans les femtocellules, contrairement à la bande passante utilisée dans la macrocellule, quelque soit l'algorithme utilisé.

Tout comme le débit, on observe une stabilisation de la bande passante en fonction du nombre d'utilisateurs lorsque le système est saturé. Par ailleurs, la bande passante utilisée est meilleure dans le cas de la saturation du réseau que dans le cas avec 50 MHz de bande passante disponible, et ce quel que soit le type d'algorithme choisi (TS et WWF).

### 3.3.5 Temps de convergence

Le temps de convergence est le temps mis par les différents algorithmes afin d'obtenir les solutions optimales. Il est exprimé en secondes (s) et est représenté aux figures « Figure 3.7 » et « Figure 3.8 » :

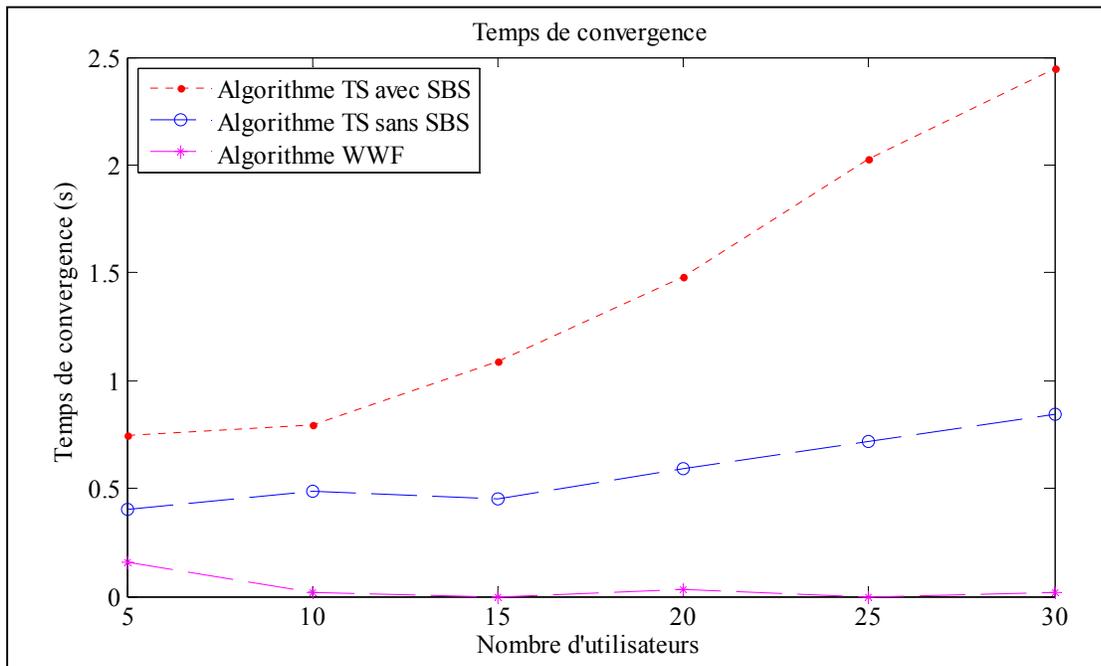


Figure 3.7 Répartition du temps de convergence – Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS – Cas 50 MHz

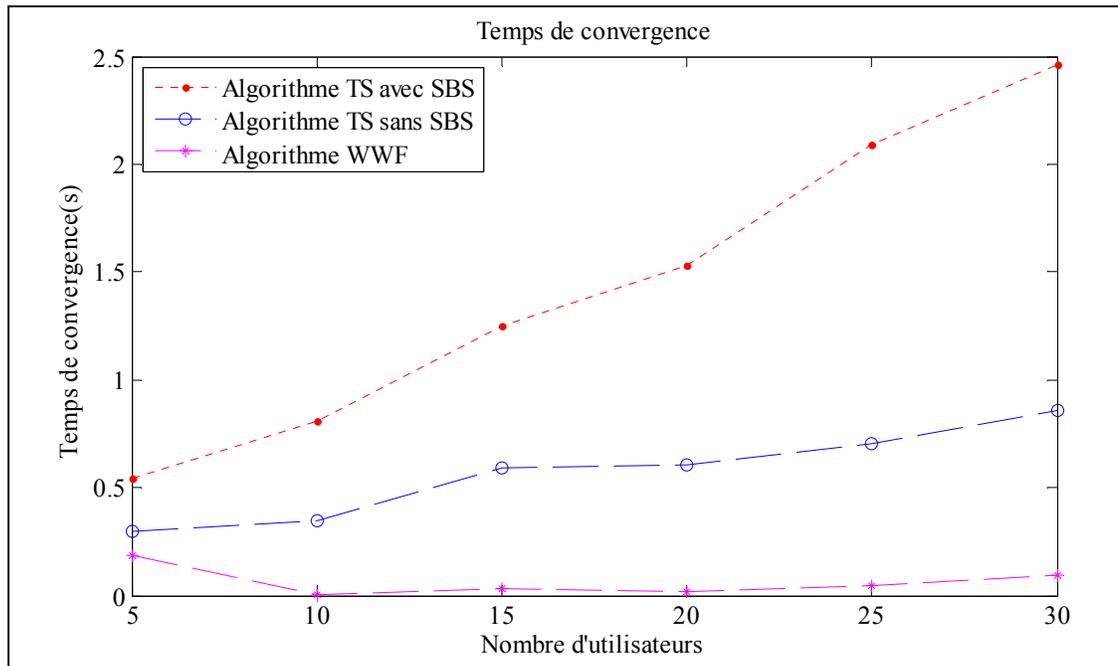


Figure 3.8 Répartition du temps de convergence - Comparaison avec l'algorithme WWF vs l'algorithme TS - Cas 10 MHz

Bien qu'ayant des débits supérieurs à l'algorithme WWF, l'algorithme « Tabu Search » a un temps de convergence supérieur. En effet, à partir des Figure 3.7 et Figure 3.8, plusieurs observations peuvent être faites :

- l'algorithme WWF possède un temps de convergence plus faible que l'algorithme TS, et ce quelque soit la méthode utilisée par l'algorithme TS, à savoir la méthode avec SBS et la méthode sans SBS;
- avec un nombre d'utilisateurs peu élevé, l'algorithme TS utilisant la méthode sans SBS converge plus rapidement que les différents algorithmes utilisés;
- l'algorithme TS utilisant la méthode de sélection optimale de la BS possède un temps de convergence que les algorithmes utilisés.

Toutes ces observations peuvent s'expliquer par le nombre de paramètres utilisés dans l'algorithme Tabou. En effet, étant défini par plusieurs paramètres, plus le nombre de paramètres est important, plus le temps de convergence est élevé. Ainsi, l'algorithme TS

utilisant la méthode avec SBS a un temps de convergence plus important que l'algorithme TS sans la méthode SBS et l'algorithme WWF. Par ailleurs, le nombre d'utilisateurs étant un paramètre définissant également le réseau, plus celui-ci est important, plus l'algorithme sera plus lent.

### **3.4 Conclusion**

Les résultats observés à travers les différentes étapes de la simulation ont été l'occasion d'analyser le comportement de l'algorithme d'amélioration des performances dans les réseaux avec des femtocellules. Ils ont également permis d'analyser les caractéristiques de l'algorithme « Tabu Search » comparativement à l'algorithme WWF.

Aussi, en analysant les différents résultats des simulations, l'algorithme de recherche Tabou offre de meilleurs avantages au niveau de l'amélioration et de l'optimisation des paramètres du réseau tels que le débit, la consommation de la puissance et de la bande passante. En effet, l'algorithme « Tabu Search », comparativement à l'algorithme WWF, offre une meilleure optimisation du réseau.

De plus, la comparaison effectuée entre l'algorithme avec SBS et l'algorithme sans SBS, a permis de démontrer les avantages dans le réseau de la sélection optimale de la station de base.

En outre, il convient de faire un compromis entre les différents critères observés et la convergence du système afin de fournir de meilleurs résultats.

## CONCLUSION

Ce mémoire a été l'occasion d'étudier les performances d'un réseau, principalement un réseau comportant des femtocellules. En effet, tout d'abord à travers le premier chapitre, l'étude effectuée sur les réseaux femtocellules a donné un meilleur aperçu sur l'impact de ces types de cellules ainsi que le principal problème rencontré à savoir : l'interférence entre les cellules (macrocellule et femtocellules) du réseau. Une fois la base du problème cernée, la deuxième partie et troisième partie, mettant plus l'accent sur les différents algorithmes utilisés pour l'optimisation des ressources d'un réseau a permis de connaître les principes des algorithmes mis en place pour trouver les solutions les plus optimales d'un problème ainsi que les avantages de chacune de ces techniques. Ainsi, suite à cette étude, une méthode en est ressortie pour l'optimisation d'un réseau utilisant les femtocellules : l'algorithme « Tabu Search ». Aussi, cette méthode basée sur la gestion des ressources du réseau (bande passante, puissance utilisée et répartition des utilisateurs entre les cellules) et utilisant l'algorithme « Tabu Search » a permis d'améliorer les performances du réseau.

La troisième partie a donc été le lieu de la mise en place de l'algorithme « Tabu Search » pour l'optimisation des performances du réseau. Ainsi, après avoir configuré ledit réseau avec des femtocellules, l'algorithme y a été intégré avec ses différents paramètres : l'optimisation de la sélection de la station de base, la répartition de la puissance et l'optimisation de l'allocation de la bande passante. Une simulation a ensuite été effectuée via l'outil MATLAB. Celle-ci, à travers les différents résultats trouvés, a pu démontrer l'amélioration des performances du réseau. Cela s'est en effet traduit par l'ensemble des caractéristiques du réseau, à savoir l'augmentation du débit, la puissance et la bande passante, qui ont été meilleures qu'un réseau sans sélection d'une femtocellule.

Ce mémoire a donc été l'occasion de démontrer l'importance des techniques d'optimisation dans un réseau, mais principalement l'avantage de l'algorithme « Tabu Search » dans leur optimisation. En effet, il a permis de mettre en place une technique d'optimisation d'un

réseau contenant des femtocellules. Celle-ci a été basée en utilisant l'algorithme de recherche Tabou.

De plus, l'algorithme mis en place a permis d'assurer une meilleure gestion des ressources, traduite par une bonne répartition des utilisateurs entre les différentes cellules du réseau (macrocellule et femtocellules) mais également par une bonne consommation de la bande passante à travers l'optimisation de la bande passante allouée.

Enfin, ce mémoire a offert une meilleur gestion des utilisateurs en tenant compte à la fois du type des utilisateurs (abonnés ou non abonnés), de leur position par rapport aux cellules du réseau ainsi que de leur demande lors de l'implémentation de l'algorithme d'optimisation.

## RECOMMANDATIONS

En tenant compte des objectifs fixés dès le début, le mémoire présenté a été effectué en ne tenant pas compte de certains paramètres. Ainsi, pour les recherches futures, ces derniers peuvent y être insérés. Parmi ceux-ci se trouvent :

- la considération géographique : ayant pour but d'étudier que les performances du réseau, les zones géographiques n'ont pas été prises en compte. Aussi, dans des recherches futures, celles-ci peuvent être considérées. Cela pourra être possible à travers les différents types de terrain (présence d'immeubles ou non, zone rurale, zone urbaine, etc. ...) ainsi que la densité de construction. Ce type de considération pourra permettre d'observer le comportement de la puissance dans un réseau et ainsi d'offrir une meilleure gestion de celle-ci;
- l'optimisation de la puissance : tout comme la sélection optimale de la BS, l'optimisation de la puissance en fonction du débit fourni dans le réseau serait l'occasion d'offrir de meilleures performances au réseau;
- la mobilité des utilisateurs : la mobilité des utilisateurs n'a pas été considérée dans le travail. Ainsi, tenir compte de ce paramètre pourra être un facteur permettant d'étudier le comportement des cellules lors du déplacement des utilisateurs, en particulier lors d'un « roaming » et de ce fait déployer les méthodes pour optimiser les performances des réseaux dans ce genre de communication;



## ANNEXE I

### DESCRIPTIF DES UTILISATEURS – ÉTAPE DE L’OPTIMISATION

Dans la première étape de la simulation (étape de l’optimisation), les utilisateurs ont été déployés de telle sorte à avoir cinq utilisateurs abonnés aux différentes femtocellules présentes dans le réseau.

Tableau-A I-1 Représentation simplifiée des utilisateurs – demande et type

<b>Utilisateurs</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Demande</b>	0.33	0.5	1.33	0.666	3	4	2	0.5	0.5
<b>Type</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Utilisateurs</b>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>Demande</b>	2	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	1.5	0.5
<b>Type</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Utilisateurs</b>	19	20	21	22	23	24	25	26	27
<b>Demande</b>	2	0.166	4	1	2	0.166	0.5	0.5	2.5
<b>Type</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Utilisateurs</b>				28	29	30			
<b>Demande</b>				1	1	0.666			
<b>Type</b>				1	1	1			

La section « Type » indique si l’utilisateur a souscrit à une femtocellule ou non. Les valeurs « 1 » et « 2 » représentent respectivement les utilisateurs non abonnés et les utilisateurs abonnés.

Par ailleurs, la demande des utilisateurs, présentée dans la section « Demande », est une valeur qui reste inchangée tout au long de la simulation.

En variant la position des utilisateurs en fonction des cellules (femtocellule et macrocellule), à savoir la position « x » et la position « y », les différents scénarios pour optimiser le réseau sont formés. La possibilité de connexion d'un utilisateur à une femtocellule varie également. Ces connexions peuvent ainsi avoir un effet sur les performances du réseau et la qualité du signal.

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Claussen, H., L. T. W. Ho et L. G. Samuel. 2008. « Self-optimization of coverage for femtocell deployments ». In *Wireless Telecommunications Symposium, 2008. WTS 2008*. (24-26 April 2008), p. 278-285.
- Goldsmith, Andrea. 2005. *Wireless Communications*. Standford University.
- Guvenc, Guvenc, Moo-Ryong Jeong, Fujio Watanabe et Hiroshi Inamura. 2008. « A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation ». *IEEE Communications Letters*, vol. 12, n° 12, p. 880-882.
- Han, Kwanghun, Seunghyun Choi, Du Ho Kang et Sunghyun Choi. 2012. « Game based self-organizing scheme for femtocell networks ». In *2nd International ICST Conference on Game Theory in Networks, GAMENETS 2011, April 16, 2011 - April 18, 2011*. (Shanghai, China) Vol. 75 LNICST, p. 57-75. Coll. « Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering »: Springer Verlag. < [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30373-9\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30373-9_5) >.
- He, Peter, Lian Zhao, Sheng Zhou et Zhisheng Niu. 2014. *Radio Resource Management Using Geometric Water-Filling*.
- JW, Joubert. 2006. « an integrated and intelligent metaheuristic for constrained vehicle routing ». university of pretoria.
- Kokash, Natalia. 2005. « An introduction to heuristic algorithms ». *Department of Informatics and Telecommunications*.
- Kulkarni, Parag, Woon Hau Chin et Tim Farnham. 2010. « Radio resource management considerations for LTE Femto cells ». *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 40, n° 1, p. 26-30.
- Li, Y. Z., Z. Y. Feng, S. Chen, Y. M. Chen, D. Xu, P. Zhang et Q. X. Zhang. 2011. « Radio resource management for public femtocell networks ». *EURASIP JOURNAL ON WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING*.
- Lopez-Perez, D., A. Valcarce, G. de la Roche et Zhang Jie. 2009. « OFDMA femtocells: A roadmap on interference avoidance ». *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, n° 9, p. 41-48.

- Lopez-Perez, D., Chu Xiaoli, A. V. Vasilakos et H. Claussen. 2014. « Power Minimization Based Resource Allocation for Interference Mitigation in OFDMA Femtocell Networks ». *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 32, n° 2, p. 333-344.
- Marshoud, H., H. Otok, H. Barada, R. Estrada, A. Jarray et Z. Dziong. 2012. « Resource allocation in macrocell-femtocell network using genetic algorithm ». In *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2012 IEEE 8th International Conference on*. (8-10 Oct. 2012), p. 474-479.
- Mingyi, Hong, et Garcia Alfredo. 2011. « Averaged Iterative Water-Filling Algorithm : Robustness and Convergence ». *IEEE Transactions on signal processing*, vol. 59.
- Pham, D.T, et D. Karaboga. 2000. *Intelligent Optimisation Techniques*. Springer.
- Yong, Bai, Zhou Juejia et Chen Lan. 2009. « Hybrid Spectrum Usage for Overlaying LTE Macrocell and Femtocell ». In *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference, 30 Nov.-4 Dec. 2009*. (Piscataway, NJ, USA), p. 6 pp. Coll. « GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference »: IEEE. < <http://dx.doi.org/10.1109/GLOCOM.2009.5425668> >.
- Zhang, J., et Guillaume De la Roche. 2010. *Femtocells : Technologies and deployment*. John Wiley and Sons, Ltd, 329 p.

