

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DU CONTRÔLE DE PUISSANCE, DE  
L'AFFECTATION DES CANAUX ET DE LA CAPACITÉ DANS LES RÉSEAUX SANS  
FIL MAILLÉS (MESH)

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

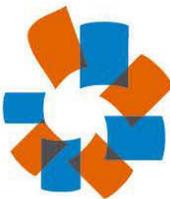
COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

BELANNAGUE TAWFIK

NOVEMBRE 2012



# BIBLIOTHÈQUE

Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue  
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

## Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

## Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue obtained the permission of the author to use a copy of this document for non-profit purposes in order to put it in the open archives Depositum, which is free and accessible to all.

The author retains ownership of the copyright on this document. Neither the whole document, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## REMERCIEMENTS

J'aimerais exprimer ma gratitude envers toutes les personnes, qui de près ou de loin, m'ont apporté leur soutien et leur aide durant ces deux années de maîtrise.

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Dr Nadir Hakem, et mon co-directeur de recherche, Dr Gilles Y. Delisle pour leur aide et la qualité de l'encadrement qui m'ont offert un bagage intellectuel et scientifique pour mener à bien ce laborieux travail de recherche, en me donnant de précieux conseils et en m'accordant leurs confiance et leur patience.

Je voulais remercier aussi Dr Nahi Kandil et M. Vincent Rousson, respectivement le directeur scientifique et le directeur administratif du laboratoire de recherche Télébec en communications souterraines (LRTCS) qui m'ont fourni un très bon cadre de travail et les conditions pour réaliser ce projet de recherche.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres de laboratoire de recherche Télébec en communications souterraines qui ont su, tous à leur manière, rendre ces deux années inoubliables. Travailler dans un tel cadre, tant au niveau scientifique que relationnel, est une chance. Merci beaucoup à tous mes collègues du Laboratoire LRTCS.

Ma gratitude la plus sincère s'adresse aussi à mon frère Mustapha et ma mère Roukaya, pour leurs sacrifices, leurs encouragements qui m'ont permis de parvenir à cette étape. Ils ont toujours été là dans les moments difficiles et que ce travail soit pour eux le témoignage de ma reconnaissance pour leur soutien inconditionnel.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Chapitre 1 : Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre 2 : Réseaux sans fil maillés</b> .....	4
2.1 Introduction.....	4
2.2 Présentation d'un réseau sans fil maillé.....	5
2.3 Domaine d'application.....	7
2.4 Les avantages d'utilisation de réseaux sans fil maillés.....	10
2.5 Architectures de réseaux sans fil maillés.....	11
2.6 Comparaison entre les réseaux sans fil maillés et les réseaux Ad Hoc.....	14
2.7 Qualité de service pour les réseaux sans fil maillés.....	15
2.7.1 La gestion de qualité de service pour les réseaux sans fil maillés.....	17
2.7.2 La difficulté de garantie de qualité de service.....	18
2.7.3 Modélisation de qualité de service pour les réseaux sans fil maillés.....	19
2.8 Conclusion.....	20
<b>Chapitre 3 : Analyse des réseaux sans fil maillés</b> .....	22
3.1 Introduction.....	22
3.2 Les interférences.....	22
3.2.1 Les types d'interférence.....	23
3.2.2 Modélisation des interférences.....	25
3.3 Affectation de canaux.....	26
3.3.1 Affectation statique de canaux.....	28
3.3.2 Affectation dynamique de canaux.....	29
3.3.3 Affectation hybride de canaux.....	29

3.4 Contrôle de puissance.....	30
3.5 La connectivité .....	33
3.6 La capacité .....	35
3.7 Conclusion .....	36
<b>Chapitre 4 : Évaluation des techniques d'optimisation appliquées aux réseaux sans fil maillés.....</b>	<b>38</b>
4.1 Introduction .....	38
4.2 L'optimisation combinatoire.....	39
4.3 Algorithmes d'optimisation combinatoire pour les réseaux sans fil maillés .....	40
4.3.1 Algorithme glouton ou Greedy .....	41
4.3.2 Algorithme génétique .....	42
4.3.3 Algorithme de Branch and Bound.....	45
4.4 Évaluation d'algorithmes d'optimisation combinatoire pour les réseaux sans fil maillés .....	50
4.4.1 Critères de choix de la méthode .....	50
4.5 Conclusion.....	53
<b>Chapitre 5 : Optimisation et analyse des résultats.....</b>	<b>54</b>
5.1 Introduction .....	54
5.2 Problématique.....	55
5.2.1 Modèle de contrôle de puissance, affectation de canaux et connectivité .....	55
5.2.1.1 Condition de transmission .....	55
5.2.1.2 Condition d'interférence .....	57
5.2.1.3 Affectation de canaux.....	58
5.2.1.4 Modélisation de trafic et connectivité .....	61

5.2.1.5 Formulation de problème .....	63
5.2.2 Modèle de capacité.....	65
5.3 Conclusion.....	67
<b>Chapitre 6 : Simulation et résultats.....</b>	<b>68</b>
6.1 Introduction.....	68
6.2 Méthodologie de simulation.....	68
6.2.1 Description de logiciel .....	68
6.2.2 Méthode et paramètres de simulation.....	69
6.3 Résultats numériques et analyse.....	69
6.4 Conclusion.....	79
<b>Conclusion.....</b>	<b>80</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>82</b>

## Liste des figures

### Chapitre 2

Figure 2.1 : Réseau sans fil maillé.....	6
Figure 2.2 : Réseau cellulaire multi-saut.....	8
Figure 2.3 : Réseau communautaire.....	8
Figure 2.4 : Application de réseau sans fil maillé dans la sécurité publique.....	10
Figure 2.5 : Architecture client.....	13
Figure 2.6 : Architecture Backbone.....	13
Figure 2.7 : Architecture Hybride d'un réseau maillé.....	14
Figure 2.8 : L'implémentation basique de qualité de service.....	17
Figure 2.9 : L'architecture Intserv.....	19
Figure 2.10 : L'architecture Intserv.....	20

### Chapitre 3

Figure 3.1 : Les types d'interférence.....	23
Figure 3.2 : Liens de réseau.....	32
Figure 3.3 : La portée de transmission.....	34
Figure 3.4 : La relation entre la capacité asymptotique et les nœuds, canal, interface.....	36

### Chapitre 4

Figure 4.1 : Organigramme d'un algorithme génétique.....	44
Figure 4.2 : Première étape d'algorithme.....	46

Figure 4.3 : Deuxième étape d'algorithme.....	47
Figure 4.4 : Troisième étape d'algorithme.....	48
Figure 4.5 : Dernière étape d'algorithme.....	48

## Chapitre 5

Figure 5.1 : Interférence entre les nœuds.....	59
Figure 5.2 : Graphes d'un réseau.....	62

## Chapitre 6

Figure 6.1 : Topologie 1.....	70
Figure 6.2 : Topologie 2.....	71
Figure 6.3 : Topologie 3.....	71
Figure 6.4 : Variation de la solution selon les différentes valeurs de niveau maximal de puissance pour les trois topologies.....	72
Figure 6.5 : La connectivité du réseau.....	74
Figure 6.6 : La variation de nombre de canaux utilisés en fonction de niveau maximal de puissance et de solution optimale obtenue.....	75
Figure 6.7 : Variation de la solution optimale en fonction de la portée de transmission.....	76
Figure 6.8 : L'évolution de nombre de liens actifs en fonction de rapport de seuil de transmission par seuil d'interférence.....	77
Figure 6.9 : L'évolution de nombre de liens actifs en fonction de nombre de canaux utilisés.....	78

## Liste des tableaux

### Chapitre 4

Tableau 4.1 : Le nombre de combinaisons possibles en fonction de cardinal de l'ensemble d'études.....	51
---	----

### Chapitre 6

Tableau 6.1 : Le temps de simulation pris pour différentes valeurs de niveau de puissance dans le cas des deux modèles.....	73
---	----

## RÉSUMÉ

Ces dernières années, les technologies sans fil ont connu un développement fulgurant. Suite à cette évolution, les systèmes de transmission sont susceptibles de supporter une vaste gamme d'applications de voix, d'images, de vidéos et de données. Ces applications nécessitent une haute qualité de service, d'où la nécessité d'avoir un système robuste capable de gérer ces trafics. Le réseau sans fil maillé (WMN) a été proposé comme une solution prometteuse qui permet d'offrir plusieurs avantages tels que la facilité de réalisation, le faible coût de déploiement et la fiabilité. Cependant, il existe des contraintes qui se mettent en face de ces attentes : l'affectation de canaux, la connectivité, l'utilisation optimale de la puissance et l'amélioration de la capacité.

Ce mémoire traite la problématique du contrôle de la puissance, de la connectivité, de l'affectation des canaux et de la capacité dans les réseaux sans fil maillés. Le but est d'optimiser ces paramètres afin d'avoir une bonne gestion de l'interférence, une économie d'énergie et avoir un maximum de liens actifs. Le traitement de cette problématique a nécessité une étude théorique et de simulations.

Pour l'étude théorique, trois modèles mathématiques vont être introduits : le premier est un modèle de programmation mathématique du contrôle de la puissance. Il est utilisé afin d'optimiser l'utilisation des canaux et de l'énergie. Ce modèle est de type «programmation mathématique non linéaire en nombre entier» et il prend en compte avec succès des contraintes de transmission sans interférence. Tout en garantissant la connectivité du réseau et en se basant sur ces contraintes, un deuxième modèle de type «programmation mathématique linéaire en nombre entier» est introduit. Il s'agit d'un modèle simplifié par rapport au premier et il permet de minimiser la puissance et avoir une bonne assignation de canaux. Le dernier modèle mathématique a pour objectif de maximiser le nombre de liens actifs dans le réseau, ce qui permet d'en augmenter la capacité. L'algorithme choisi pour résoudre ce genre de problème est celui de Branch and Bound [1], connue pour sa vitesse de convergence et sa précision.

L'étude de ces modèles est réalisée à travers un ensemble de simulations en utilisant un logiciel commercial (LINGO) de programmation mathématique. Nous procédons aux simulations avec des topologies aléatoires en fixant la portée maximale de transmission et d'interférence. La génération de ces topologies permet d'étudier l'impact du positionnement de nœuds sur notre modèle de puissance et d'affectation de canaux. Un schéma sera également présenté pour montrer

l'optimalité du choix des canaux. La dernière simulation concerne l'étude de la capacité. En effet, le nombre maximal de liens actifs simultanément va être étudié en fonction du seuil de transmission et d'interférence des nœuds du réseau.

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

De nos jours, la communication dans les régions éloignées pour les situations d'urgence représente une préoccupation majeure. Couvrir ces régions est une tâche très difficile avec l'absence de moyens de communication polyvalents et de stations de base capables d'acheminer les messages régulièrement. Dans ce contexte, notre projet Sécurinet a été proposé afin de monter qu'un système de télécommunications intelligent, sans fil permettrait de gérer les situations critiques et de crise. Ainsi, nous avons introduit les réseaux sans fil maillés comme étant une solution pour résoudre ce problème. Un réseau sans fil maillé est un réseau multi-sauts qui permet d'assurer une large couverture en aidant les équipements sans fil à se connecter de proche en proche, sans hiérarchie centrale formant ainsi une structure de forme filet sans avoir recours à une configuration manuelle.

Au cours de la dernière décennie, les réseaux sans fil maillés ont représenté le phare de la technologie sans fil. Ils sont considérés comme une classe émergente de réseaux sans fil et attirent de plus en plus l'attention des fournisseurs de service, des entreprises, des municipalités, etc. Leur principe s'inspire d'un réseau sans fil multi-sauts. En effet, les communications entre deux nœuds peuvent être gérées par plusieurs nœuds intermédiaires (Wireless Mesh Router (WMR)) dont le rôle est de transmettre l'information d'un point à un autre. Ces WMR s'organisent d'une manière autonome de façon à former un réseau maillé sans fil (Backbone Wireless Mesh) et jouent également le rôle d'une passerelle pour différentes technologies sans fil (réseaux Wi-Fi, réseaux WIMAX, réseaux cellulaires, réseaux de capteurs, réseaux IEEE 802.15, etc.). Les réseaux sans fil maillés peuvent être le support de

communication d'une grande diversité d'applications ayant des exigences différentes de qualité de service en termes de délai, débit, fiabilité, confidentialité, etc. Ces applications peuvent être déployées dans de nombreux domaines tels que la domotique, les systèmes embarqués, les systèmes de santé, etc. Ils s'organisent et se configurent de façon dynamique, avec les nœuds qui établissent et maintiennent eux-mêmes des connections maillées entre eux. Cette particularité confère aux WMNs beaucoup d'avantages telles que l'installation facile et moins coûteuse, la connectivité fiable et l'interopérabilité flexible avec d'autres réseaux existants (réseaux WiMax, réseaux Wi-fi, réseaux de capteurs...etc).

Malgré les avantages que les réseaux sans fil maillés offrent et aussi les travaux de recherche qui ont été réalisés pour ce genre de réseaux, plusieurs problèmes restent encore à résoudre. On cite, à titre exemples :

**Contrôle de puissance :** Généralement il présente un grand défi pour les réseaux sans fil maillés. La puissance de transmission influence la portée de communication et le niveau d'interférence induit dans le voisinage du transmetteur. La sélection d'un niveau optimal doit éviter l'interférence et en même temps permettre une transmission avec succès.

**Affectation de canaux :** C'est un problème qui a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs. Cela consiste à faire une répartition de canaux favorisant une réutilisation optimale de ces canaux tout en réduisant ou minimisant les interférences dues à l'utilisation d'un même canal proche dans l'espace.

**Connectivité :** Afin de garantir une fiable connectivité du réseau, des algorithmes d'auto-configuration et de contrôle de topologie sont indispensables.

L'objectif de ce travail est d'améliorer la qualité de service pour les réseaux sans fil maillés en traitant quatre volets : l'optimisation de puissance de transmission entre les nœuds, l'affectation de canaux, la connectivité et l'étude de la capacité. En

effet, Il s'agit d'étudier et présenter un modèle d'un mécanisme d'optimisation de puissance à travers ces réseaux tout en garantissant une attribution efficace des canaux et assurer la connectivité. Pour ce faire, nous avons opté pour l'approche par problématique d'optimisation avec des variables discrètes dans laquelle une fonction objective est formulée afin d'atteindre le meilleur compromis de routage de l'information et l'ensemble des contraintes sur le trafic soumis au réseau. La puissance de transmission entre les nœuds de ce réseau et la gestion de canal sont modélisées sous forme d'équations et/ou d'inéquations. Afin de résoudre cette problématique, la méthode Branch and Bound a été retenue pour son efficacité à résoudre le problème d'optimisation à variables entières. Le dernier volet qui concerne la capacité, a pour objectif de maximiser le nombre de liens qui sont actifs simultanément.

Le mémoire est organisé comme suit : Le chapitre 2 présente les réseaux maillés sans fil comme étant une solution pour notre projet Sécurinet ainsi que leurs caractéristiques, leurs applications pour mieux cerner le contexte de la recherche et définir aussi la qualité de service. Le chapitre 3 s'intéresse à l'analyse de réseaux sans fil maillés en introduisant les différents thèmes exigés afin de fournir une bonne qualité de service. Nous consacrons le chapitre 4 à l'étude et l'évaluation de différentes techniques d'optimisation pour les réseaux sans fil maillés avec un état de l'art détaillé. Dans le chapitre 5, les problématiques de contrôle de puissance, d'affectation de canaux, de connectivité et de capacité seront introduits sous forme de modèles d'optimisation mathématique. Au chapitre 6 nous précédons à l'évaluation de notre solution par des simulations en utilisant le logiciel LINDO qui est très utilisé pour la résolution de problèmes d'optimisation. Finalement la dernière section conclut notre travail et présente les perspectives pour la poursuite de ce travail de recherche.

## CHAPITRE 2

### RÉSEAUX SANS FIL MAILLÉS

#### 2-1 Introduction

Le projet Sécurinet vise le déploiement d'un système efficace et flexible, capable de gérer les communications dans les régions rurales. Ce système peut être utilisé pour surveiller les infrastructures critiques de ces régions et assurer les mesures d'urgence sur tout le territoire. Les questions auxquelles le projet tente de répondre sont les suivantes :

**Comment on peut gérer un tel système d'une manière efficace ?** Ce système doit prendre en considération tous les paramètres spatiaux et temporels afin de communiquer avec succès.

**Quel type de réseau à déployer afin d'assurer un bon fonctionnement de communication?** Il devrait être simple à réaliser, flexible et capable de supporter divers trafics audio et vidéo.

**Quels sont les critères d'optimisation à prendre en considération pour garantir une communication à moindre coût?** Ces critères peuvent représenter la puissance de transmission, d'interférence, l'utilisation de canaux, la capacité.

Pour répondre à ces questions, les réseaux sans fil maillés sont considérés comme l'une des solutions les plus prometteuses pour améliorer la couverture réseau. Dans cette section, on va présenter une description détaillée d'un réseau sans fil

maillé, les architectures utilisées, les avantages liés à leur utilisation ainsi que la qualité de service pour ce type de réseau.

## **2-2 Présentation d'un réseau sans fil maillé**

Un réseau maillé est tout simplement un réseau où chaque nœud peut communiquer avec n'importe quel autre nœud sans que la perte du lien n'ait un impact sur la connectivité. Il fournit au minimum deux chemins différents vers n'importe quel autre nœud du réseau. Les données circulent d'un nœud vers l'autre jusqu'à atteindre la destination finale. Pour le cas des réseaux sans fil maillés (WMN), les nœuds peuvent fonctionner comme des routeurs et permettent le relai via les liens sans fil.

Dans les réseaux sans fil maillés, les stations de base (appelés Mesh Router) communiquent entre eux en utilisant des liens radio contrairement aux réseaux sans fil traditionnels où les stations de base utilisent des liens filaires. Cette particularité des réseaux sans fil maillés permet de simplifier leur installation, leur modification et la maintenance et par conséquent, réduire le coût par rapport aux réseaux sans fil traditionnels. Dans un réseau sans fil maillé, on distingue deux types de nœuds : les clients Mesh et les routeurs Mesh (voir Figure 2.1). Les routeurs Mesh forment ce qu'on appelle "réseau dorsal sans fil" et maintiennent automatiquement la connectivité dans cette dorsale, ce qui permet d'augmenter la fiabilité et la robustesse du réseau. Un client Mesh peut utiliser cette dorsale pour se connecter à l'Internet ou communiquer avec d'autres nœuds. La communication entre les équipements dans les réseaux sans fil maillés est en ligne de vue obstruée (Non-Line Of Sight) [2], c'est-à-dire que ces équipements parviennent à communiquer entre eux même s'il y a des obstacles comme des immeubles, arbres, etc... sur le chemin de la ligne de vue (Line Of Sight). Une autre caractéristique des réseaux sans fil maillé est l'utilisation de la communication sans fil multi-sauts entre les routeurs Mesh. Cela améliore grandement la couverture radio du réseau. La topologie d'un réseau sans fil maillé est

une topologie dynamique et auto-configurable. En effet, quand un chemin tombe en panne, un autre chemin prend sa place. Cela rend le réseau plus fiable et robuste. Les réseaux sans fil maillés conviennent à tout type d'environnement et ils peuvent aussi bien être déployés sur de petits espaces comme des maisons ou sur de plus grands espaces tels que des campus, des entreprises, ou même des villes entières. Plusieurs technologies de communication ont été proposées pour les réseaux maillés comme IEEE 802.11 (Wi-Fi) et le 802.16 (Wimax). Les réseaux maillés basés sur IEEE 802.11 sont les plus populaires grâce à leur disponibilité et au faible coût des équipements.

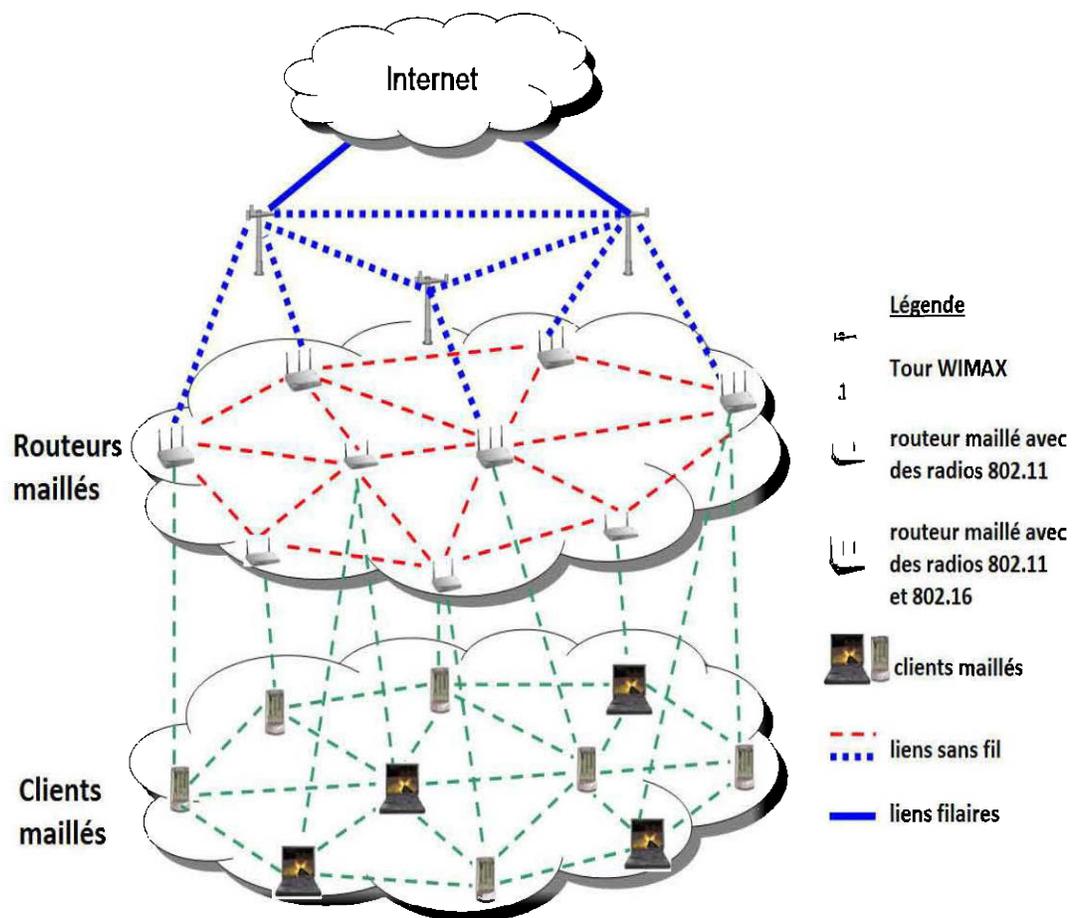


Figure 2.1 Réseau sans fil maillé [3]

## **2-3-Domaine d'application**

Historiquement, le premier domaine d'application des réseaux sans fil maillés fut le domaine militaire. Par la suite, ils ont été adoptés pour d'autres applications quotidiennes. Dans ce qui suit, nous décrivons quelques applications utiles de réseaux sans fil maillés dans le cadre de notre projet Sécurinet :

### **Réseaux cellulaires ou hotspot (point d'accès à Internet sans fil)**

À la figure 2.2, la station de base est indiquée en haut du grand bâtiment central. À droite, se trouve un autre bâtiment et à gauche un arbre. Ces deux obstructions devraient normalement créer un évanouissement (shadowing) du signal de la station de base. Afin d'améliorer la situation pour les utilisateurs à l'extrême droite et gauche de la figure, l'approche multi-sauts est activée. Chaque chemin pour les usagers à l'extrême droite et à l'extrême gauche se compose de trois sauts, ce qui donne un signal plus puissant que celle normalement disponible dans la zone d'ombrage de la station de base. Le développement de cette approche permet d'utiliser des nœuds maillés aux intersections de rues d'un quartier du centre ville. La grille des liens maillés imite donc la grille des rues. L'avantage pour chaque cas est une meilleure couverture offerte par le maillage.

### **Interconnexion de la communauté**

Sur la figure 2.3, la ville en haut à droite a un accès large bande. Toutefois, cet accès à large bande n'est pas réparti autour de la communauté rurale par le fournisseur de la ville. Si, toutefois, une maison a un accès large bande et que ce lien est partagé par un réseau maillé, cela peut inclure toutes les autres maisons. Les connexions à de nouvelles maisons dans les mailles sont ainsi tout simplement réalisées en les ajoutant comme des nœuds internes. Aucune infrastructure additionnelle n'est nécessaire.

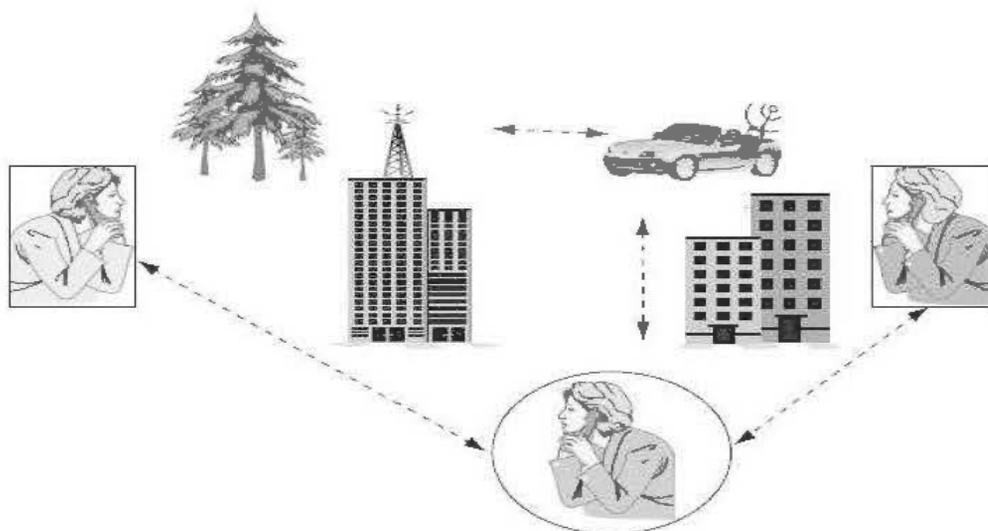


Figure 2.2 : Réseau cellulaire multi-saut [4]

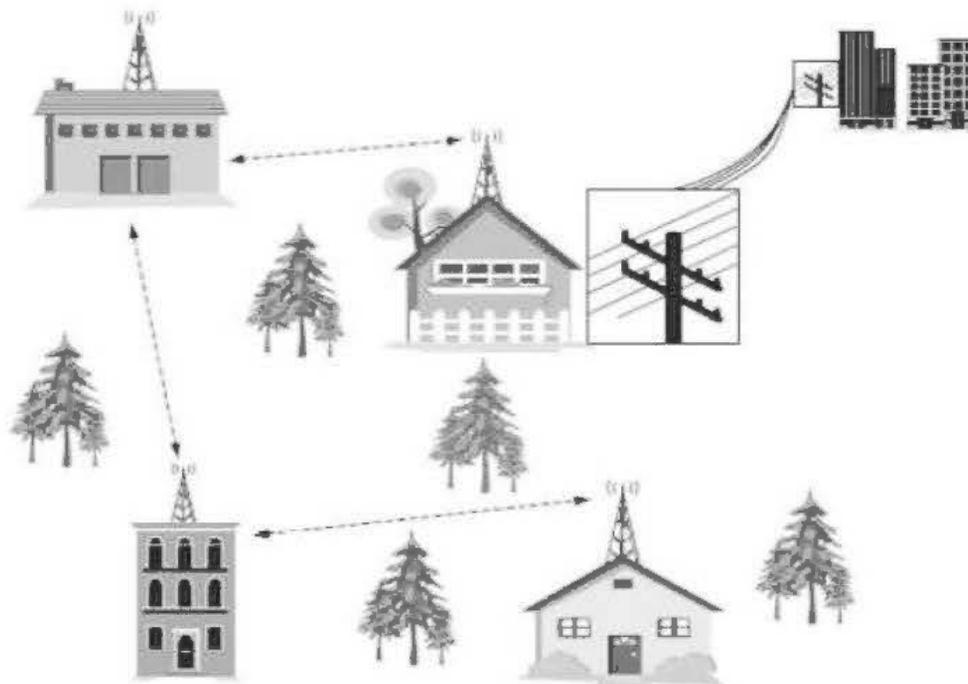


Figure 2.3 : Réseau communautaire [4]

## **La sécurité publique**

La police, la protection civile et les services d'urgences sont des services de sécurité publique dans lesquels les réseaux sans fil maillés peuvent être déployés. Leurs interventions doivent être efficaces et ponctuelles. Pour cela, ces services ont commencé à équiper leurs employés sur le terrain avec des ordinateurs portables, des PDAs (Personal Digital Assistant) et des caméras de surveillance mobiles, en se basant sur l'approche de maillage (Figure 2.4). Actuellement, plusieurs de ces services utilisent des réseaux sans fil maillés comme infrastructure de communication afin d'organiser et synchroniser les différentes étapes d'intervention dans ces situations d'urgence.

## **L'automatisation dans le bâtiment**

De nos jours, plusieurs équipements dans les bâtiments peuvent être gérés à distance. En conséquence, des paramètres comme la climatisation, la température, l'éclairage, peuvent être surveillés à distance. Traditionnellement, la solution filaire est utilisée pour assurer la liaison entre le poste de commande et les différents équipements mais elle s'avère relativement très chère en termes de coûts d'installation. Le déploiement de réseaux sans fil maillés dans ce genre d'application permet de réduire les coûts d'installation en utilisant des routeurs mesh entre le poste de commande et les équipements à contrôler. On peut ainsi économiser les frais d'installation et de maintenance. De plus, cette solution augmente le débit de transmission entre le poste de commande et les équipements.

On peut trouver d'autres applications de réseaux sans fil maillés. On cite par exemple les systèmes de transport, les systèmes de surveillance, les hôpitaux. L'avantage c'est d'avoir une forte fiabilité, assurer la robustesse du système et le maintien de ces infrastructures de communication.



Figure 2.4 : Application de réseau sans fil maillé dans la sécurité publique [5]

#### 2-4 Les avantages d'utilisation des réseaux sans fil maillés

Les réseaux sans fil maillés sont un type spécial de réseaux sans fil multi-sauts. Les réseaux maillés ont certains avantages qui sont aussi applicables dans les réseaux mobiles Ad-Hoc (MANET) et réseaux de capteurs sans fil (WSN). La force de réseaux sans fil maillés est le résultat direct de ces caractéristiques .

**Auto-configuration et Auto-organisation :** Les réseaux sans fil maillés sont auto-configurables et auto-organisés. Généralement, les nœuds peuvent être ajoutés ou supprimés du réseau, quand c'est un besoin, sans aucune intervention administrative spéciale. Les nœuds des réseaux sans fil maillés font connaissance de leur nœuds

voisins et les données sont acheminées dynamiquement entre eux. Les nœuds quittent et rejoignent le réseau, quelques connexions échouent, d'autres sont créées. Tout cela est géré par le protocole de routage maillé.

**Auto-réparation :** Les réseaux sans fil maillés sont auto-réparables. En effet, quand certains nœuds ou routes ont échoués, aucune intervention administrative n'est requise. Le terme "Mesh" signifie que ces nœuds sont maillés et qu'il existe un nombre alternatif de routes qui peuvent remplacer les routes qui ont échouées. La capacité d'auto-réparation dépend aussi du degré de maillage qui implique l'existence de routes alternatives. Ajouter plus de routeurs permet aussi d'augmenter la fiabilité du réseau et de disposer d'itinéraires alternatifs.

**Facilité de déploiement :** les réseaux sans fil maillés sont faciles à déployer comparativement aux autres réseaux sans fil. La différence essentielle provient du fait que les réseaux locaux sans fil nécessitent des connexions filaires de points d'accès au réseau filaire.

**Couverture et développement :** En utilisant la capacité de routage multi-sauts, la portée d'un réseau sans fil maillé peut être étendue. Des nœuds peuvent être ajoutés si on a besoin d'élargir la couverture. Par contre, les réseaux traditionnels comme les WLAN ont des problèmes d'évolutivité. Cela est dû aux exigences de la connexion filaire pour chaque point d'accès. Généralement, les WLANs sont utilisés juste pour les petites surfaces. Les réseaux sans fil maillés peuvent facilement évoluer pour couvrir de larges étendues géographiques.

## **2-5 Architectures de réseaux sans fil maillés**

Les réseaux sans fil maillés sont composés essentiellement de nœuds sans fil. Ces nœuds peuvent être de deux types : les routeurs maillés et les clients maillés. En plus des fonctionnalités des routeurs sans fil classiques, les routeurs maillés possèdent de multiples-interfaces sans fil pour se connecter aux différentes technologies sans fil.

L'autre type est un client maillé sans fil (MC) qui peut être soit un utilisateur final et/ou un routeur avec le minimum de fonctionnalités.

Les architectures des réseaux sans fil maillés sont classées selon trois modèles : une architecture client, une architecture dorsale (backbone) d'un réseau maillé et une architecture hybride. Il faut noter aussi que les réseaux sans fil maillés peuvent être classés selon le nombre de radios et de canaux disponibles.

**L'architecture client :** Cette architecture est formée de nœuds clients seulement et le maillage des clients crée un réseau pair à pair. Les nœuds client constituent le réseau et assurent les fonctionnalités de routage, de configuration et d'exécution des applications [6]. Un paquet envoyé par un nœud doit effectuer des sauts d'un nœud à un autre pour arriver à sa destination. En général, ce réseau est formé en utilisant un seul type d'interface radio (Figure 2.5).

**L'architecture "Backbone" :** Ce type de réseaux intègre des points d'accès formant une infrastructure à laquelle se connecte les clients. Plusieurs technologies radio peuvent être incorporées à ce type de réseaux maillés, par exemple 802.11, 802.16, etc.. La fonctionnalité de la passerelle (*Gateway*) intégrée dans certains points d'accès assure la connectivité à l'internet. Cette approche de maillage crée une dorsale (*backbone*) pour les clients et permet de faire coexister les réseaux *Mesh* sans fil avec les réseaux classiques. Les clients sont capables de communiquer directement avec les points d'accès s'ils utilisent la même technologie radio, sinon ils communiquent avec les stations de base reliées par fils au "backbone" sans fil (Figure 2.6).

**L'architecture hybride :** Cette structure est composée des deux architectures décrites précédemment. Les clients peuvent accéder au réseau soit par l'intermédiaire des points d'accès ou bien par le maillage avec d'autres nœuds client. Le *backbone* assure la connectivité à d'autres types de réseaux comme Internet, Wi-Fi, WiMAX, les réseaux cellulaires ou de capteurs, tandis que la capacité de routage des nœuds

client développe la connectivité et la couverture à l'intérieur du réseau des clients  
 Cette dernière architecture sera le modèle approprié pour la génération future (Figure 2.7).

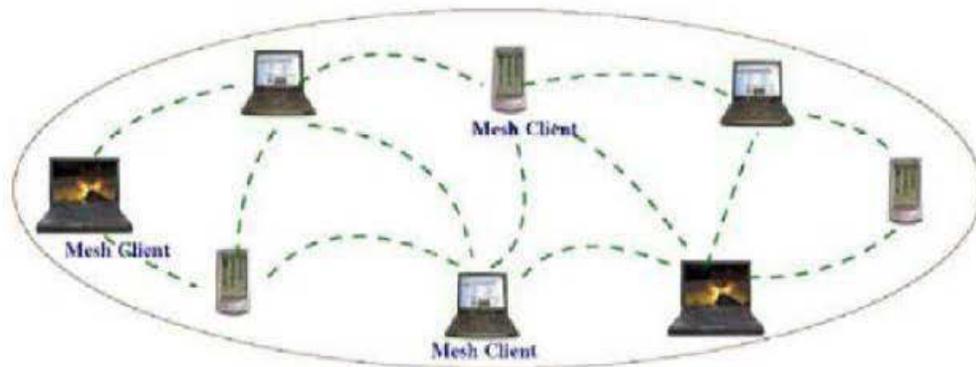


Figure 2.5 : Architecture client [6]

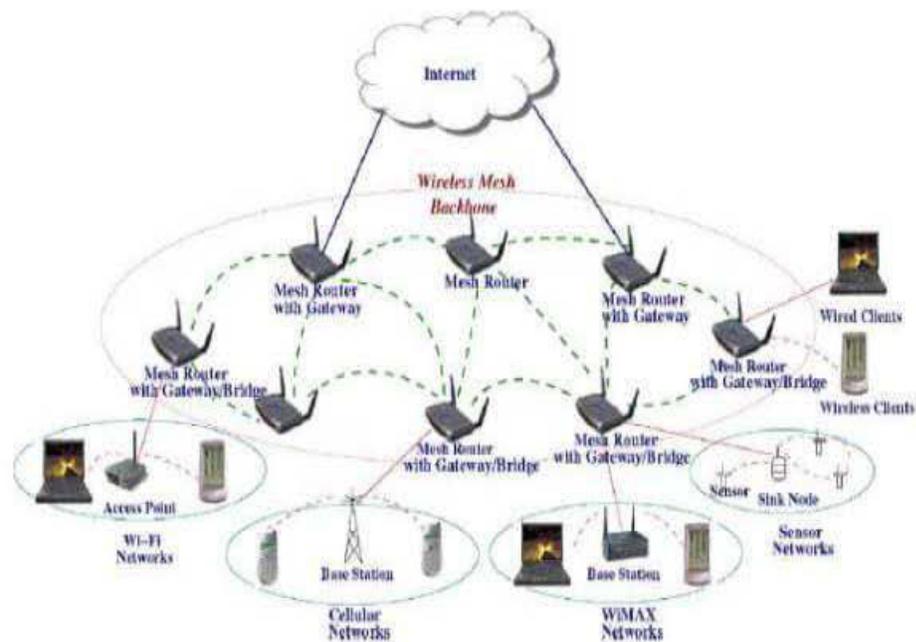


Figure 2.6 : Architecture "Backbone" [6]



Figure 2.7 : Architecture hybride d'un réseau maillé [6]

## 2-6 Comparaison entre les réseaux sans fil maillés et les réseaux Ad-hoc

Il y a certaine similarité entre les réseaux sans fil maillés et les réseaux Ad-hoc. En effet, les réseaux sans fil maillés utilisent un relai multi-sauts de proche en proche comme dans le cas des réseaux Ad-hoc. Toutefois, il existe certaines différences entre ces deux technologies, notamment :

**Nature de la topologie :** Les réseaux Ad-hoc ont des nœuds qui sont fréquemment mobiles et la topologie est dynamique. Dans le cas des réseaux sans fil maillés, les routeurs maillés sont fixes et la topologie ne change pas souvent.

**Le trafic :** Les réseaux Ad-hoc ont de trafic point à point entre deux nœuds. Par contre, le trafic dans les réseaux sans fil maillés est relié par les routeurs Mesh et les passerelles.

**La capacité :** Les nœuds de réseau Ad Hoc sont généralement équipés d'un seul radio. Par contre, les nœuds de réseau sans fil maillés sont parfois équipés de multiples radios afin de répondre aux exigences de la bande passante et supporter un grand nombre d'utilisateurs. Ainsi, les réseaux sans fil maillés ont plus de capacité que les réseaux Ad Hoc.

**L'accès aux différentes technologies radio :** Les réseaux sans fil maillés ont la possibilité de coexister avec d'autres réseaux extérieurs grâce aux passerelles, contrairement aux réseaux Ad-hoc qui n'ont pas l'accès aux autres réseaux qui utilisent une technologie radio différente.

**Domaine d'applications :** Les réseaux Ad-hoc sont utilisés principalement dans les applications militaires. Pour les réseaux sans fil maillés, à part les applications tactiques, on peut trouver des scénarios d'applications dans le domaine civil.

## **2-7 Qualité de service pour les réseaux sans fil maillés**

L'objectif de la qualité de service est d'atteindre le meilleur compromis en termes de délai de bout en bout, de la variance du délai, de la bande passante et des pertes de paquets, ceci afin d'assurer correctement l'acheminement de données. La qualité de service est définie [7] comme la capacité de fournir un certain niveau de qualité de service lors de la transmission des données. Dans les applications en temps-réel, comme la voix et la vidéo, le délai de bout en bout doit être limité. Généralement, il est difficile de garantir la qualité de service pour ce genre d'applications dans le cas des réseaux sans fil maillés. En effet, différents facteurs doivent être pris en considération, spécialement le changement de la topologie et la

bande passante limitée. Pour les applications qui ne sont pas en temps-réel, comme la messagerie, ils nécessitent une communication plus fiable.

Les caractéristiques de qualité de service sont considérées comme des paramètres pour lesquels la qualité de service est contrôlée et gérée afin de fournir un meilleur service. Ces paramètres sont décrits comme suit :

**La latence :** C'est le temps de transmission qu'un paquet peut prendre pour passer de la couche application au niveau de transmetteur jusqu'au même niveau au récepteur. Ce temps est appelé aussi le délai de bout en bout. Il peut être exprimé comme la somme des délais de processus au niveau de transmetteur, soient les délais de propagation, délai de mémoire tampon et le délai de processus au niveau de récepteur.

**La gigue de transmission :** Elle est définie comme la différence temporelle de paquets qui arrivent au récepteur en différentes séquences. Autrement dit, c'est la différence de délai de bout en bout entre deux séquences. Par exemple, si deux paquets ont des délais de bout en bout : l'un est de 60ms et l'autre de 70ms, le délai de gigue est 10ms. Généralement, la gigue doit être inférieure à 100ms pour une qualité acceptable.

**Perte de paquets :** Le phénomène de congestion détruit une certaine proportion de paquets entrants en fonction de seuils prédéfinis. Une erreur sur l'en-tête d'un paquet causé par le bruit d'interférence, de la dégradation de signal entraîne la perte de paquet ou l'envoi vers une mauvaise destination. En effet, quand le récepteur reçoit le paquet, il effectue le contrôle de redondance cyclique (CRC) pour le paquet et trouve qu'il est corrompu. Ainsi, le récepteur néglige l'envoi d'un accusé au récepteur. Le transmetteur considère que le paquet est perdu une fois le temps d'accusé de réception est dépassé.

**La bande passante :** C'est une ressource allouée au réseau et représente le taux de bits envoyés. Cette quantité est variable et dépend de différents facteurs comme la technologie (Ethernet, Wifi), le support de communication, les protocoles de routage...etc.

### 2-7-1 La gestion de qualité de service pour les réseaux sans fil maillés

La gestion de qualité de service est un aspect important qui aide à évaluer les politiques de qualité de service et leurs objectifs. L'implémentation minimale de la qualité de service dans un réseau peut être illustrée en trois composants essentiels comme le montre la figure 2.8.

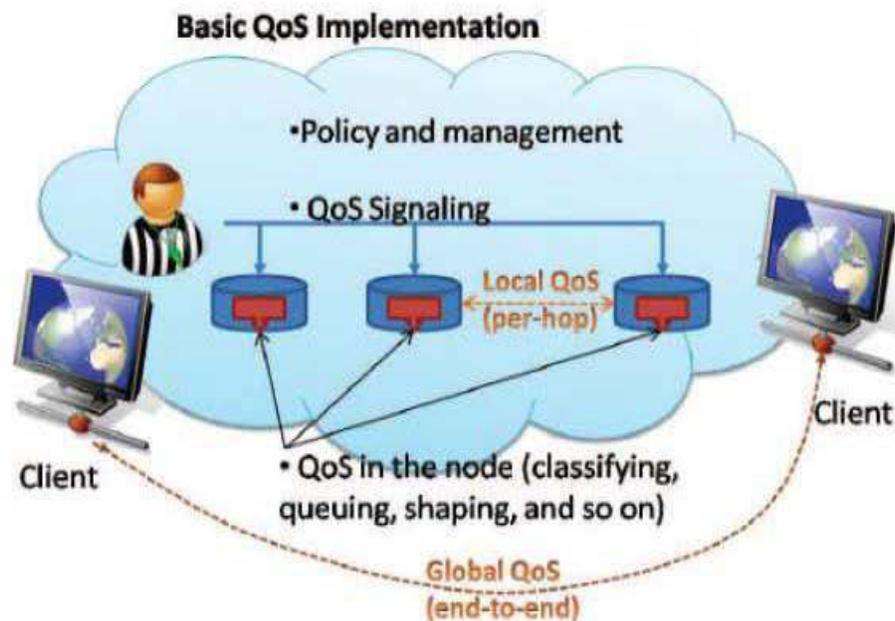


Figure 2.8 : L'implémentation basique de qualité de service [8]

Ainsi, supporter la qualité de service nécessite la collaboration de différentes techniques et composants. Dans ce qui suit, on présente une description détaillée de ces techniques.

### 2-7-2 La difficulté de garantie de qualité de service

Le réseau sans fil maillé est un cas particulier des réseaux sans fil multi-sauts. Dans notre contexte de projet Sécurinet, garantir la qualité de service pour ce genre de réseau présente un défi majeur. Malgré les solutions existantes pour les réseaux traditionnels comme les WLANs, les réseaux sans fil multi-sauts ont certaines exigences et limitations. On cite ci-dessous quelques raisons qui causent cette difficulté :

**Support sans fil imprévisible :** Le support de communication est imprévisible et la qualité du lien varie tout le temps, surtout dans les situations d'urgence et de crise. Il y a certain nombre de facteurs qui affectent la qualité de la liaison, y compris la propagation par trajets multiples, l'interférence et le bruit. Ces facteurs causent des variations aléatoires dans la qualité du lien et entraînent ainsi des pertes de paquets. Il peut donc être difficile de prédire avec précision la bande passante d'une liaison sans fil.

**Support partagé :** IEEE 802.11 fonctionne sur le principe de "Carrier Sense Multiple Access" dans lequel les nœuds luttent pour l'accès au canal. Ce protocole au niveau de la couche MAC souffre de problèmes des stations classiques cachées et des stations exposées. Ces problèmes dégénèrent pour les réseaux sans fil maillés dans le quel un grand nombre de nœuds peuvent être distribués dans la région. Ainsi, il peut y avoir des collisions imprévisibles et les retards de transmission.

**La difficulté d'estimation de la bande passante:** Une grande majorité des solutions de qualité de service pour les réseaux sans fil multi-sauts nécessitent l'estimation de la bande passante sur le chemin de bout en bout. Un problème fondamental pour les réseaux sans fil multi-sauts est la difficulté d'estimer avec précision la bande passante d'un lien sans fil, ce qui est requis une économie d'énergie pour les communications dans les régions éloignés. Cela est dû à certains facteurs comme les conditions de

charge variables, les stations cachées et les stations exposées et les collisions imprévisibles.

### 2-7-3 Modélisation de qualité de service pour les réseaux sans fil maillés

Un modèle de qualité de service est un mécanisme de réserve de ressources afin d'obtenir le niveau de qualité de service requis. L'organisation IETF (Internet Engineering Task Force) a développé deux principaux modèles de provisionnement de la qualité de service pour l'internet : (i) Les services intégrés (Intserv) et (ii) les services différenciés (Diffserv). La technique des services intégrés (Figure 2.9) s'inspire de principe de service téléphonique. Les ressources nécessaires sont explicitement réservées afin de garantir une qualité de service. Par contre, la deuxième technique (Figure 2.10) ne fait aucune réserve de ressource et introduit plusieurs classes de service offrant chacune une qualité de service particulière. Chaque flux est affecté à la classe de service qu'il lui convient [9].

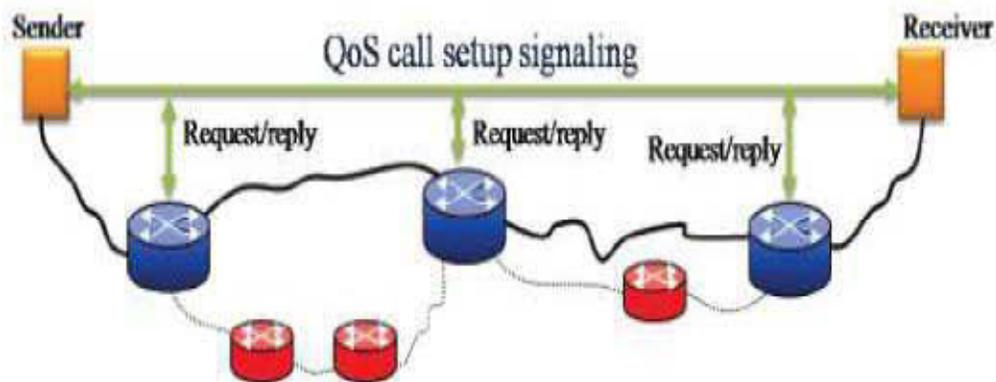


Figure 2.9 : L'architecture Intserv [8]

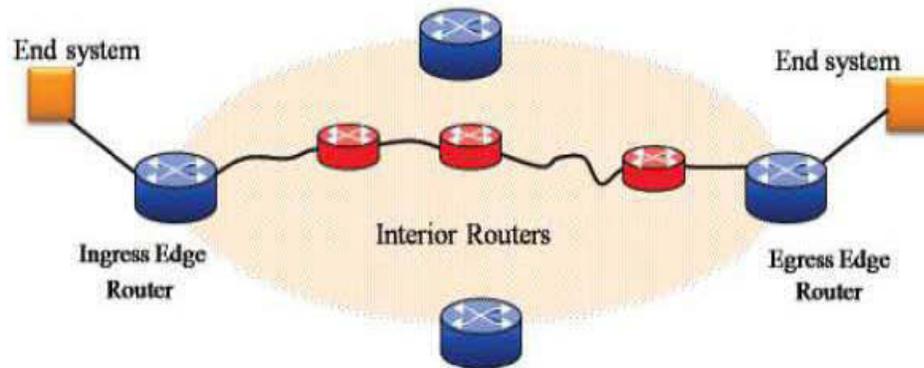


Figure 2.10 : L'architecture DiffServ [8]

## 2-8 Conclusion

Fournir la qualité de service pour les réseaux sans fil maillés est une tâche difficile. En effet, les réseaux sans fil maillés, avec leurs limites et leurs exigences uniques, ont des caractéristiques tout à fait différentes des réseaux filaires classiques. Le support sans fil est imprévisible et la qualité du lien varie au fil du temps. La propagation multi-trajet, les interférences, le bruit et l'évanouissement du signal (Fading) sont des facteurs qui influencent la qualité du lien sans fil, ce qui peut causer des changements aléatoires de la qualité du lien et entraîner des pertes de paquets. De plus, la bande passante est limitée. Certains travaux ont été réalisés afin d'améliorer les performances de ce genre de réseau. L'approche Quality Of service RoUting (QUORUM) a été introduite [10] et, avec ce protocole, le contrôle d'admission est exécuté durant la phase de découverte de la route. Chaque nœud intermédiaire sur le chemin vérifie si les flux rentrant peuvent être acceptés ou non. Ce protocole estime également la robustesse des liens en échangeant des messages "HELLO". Une architecture a été réalisée [11], dans le but de fournir une configuration automatique, optimale et efficace pour un réseau sans fil maillé et fournir un maximum de qualité de service pour les utilisateurs connectés. Cette procédure est formée avec des mécanismes clés qui agissent d'une manière autonome

et peuvent atteindre une performance maximale. Les résultats de nos simulations ont montré que l'algorithme de qualité de service proposé utilise pleinement les ressources du réseau par rapport au standard OLSR. Les travaux de [12], [13] ont montré l'existence d'une relation entre la qualité de service et le positionnement des nœuds dans le contexte de réseaux sans fil maillés. Les interférences, le contrôle de puissance, la connectivité et l'affectation de canaux sont des thématiques importantes à étudier pour améliorer la qualité de service dans les réseaux sans fil maillés.

## CHAPITRE 3

### ANALYSE DES RÉSEAUX SANS FIL MAILLÉS

#### 3-1 Introduction

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, les réseaux sans fil maillés représentent une solution prometteuse pour supporter plusieurs applications et pour assurer la connectivité dans les zones rurales. Elle permet d'interconnecter les zones où le câblage à haut débit serait difficile à réaliser. Ce type de réseau intéresse particulièrement les fournisseurs d'accès à l'internet afin de fournir une connexion à large bande et à moindre coût.

Dans ce chapitre, nous allons effectuer une analyse des réseaux sans fil maillés en prospectant quelques axes de recherche qui permettent d'améliorer le fonctionnement de réseaux sans fil maillés. Parmi ces axes, on peut citer la problématique d'interférence, l'affectation des canaux, le contrôle de la puissance, la connectivité, la capacité.

#### 3-2 Les interférences

Le phénomène d'interférence se produit lorsque plusieurs communications ont lieu sur le même canal et se partagent la même bande passante. Ainsi, ces communications peuvent interagir les unes sur les autres et dégradent la qualité de la transmission. Donc il est très important de les prendre en considération pour améliorer les réseaux sans fil maillés. Une étude [14] a montré l'influence des interférences sur les réseaux sans fil à multiple-sauts. En effet, l'interférence entre les canaux peut causer la perte des trames. Actuellement, la recherche se concentre sur

cette problématique afin de trouver un mécanisme capable de minimiser ce phénomène. C'est un phénomène qui représente une limitation majeure pour les communications sans fil, particulièrement dans les réseaux sans fil maillés. L'interférence reste un problème complexe à modéliser ou à spécifier explicitement surtout dans un contexte où la coordination entre les communications est difficile à établir. Dans cette section, on va décrire les types d'interférences ainsi que les paramètres qu'il faut prendre en considération pour modéliser ce phénomène.

### 3-2-1 Les types d'interférence :

Il existe différents types d'interférences qui peuvent affecter un système radio. La figure 3.1 montre une classification de catégories d'interférences qui ont un effet sur un système maillé.

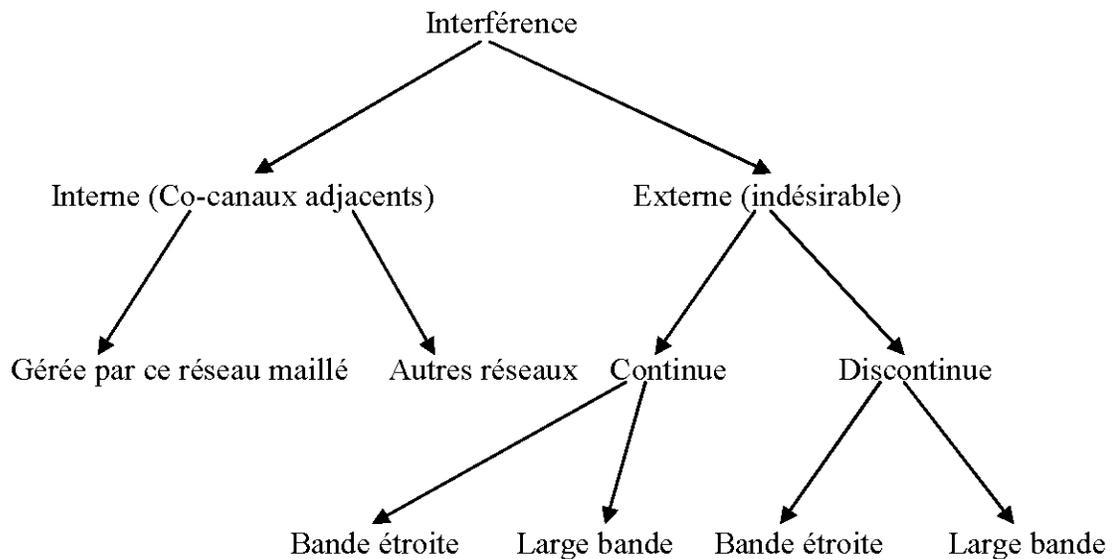


Figure 3.1 : Les types d'interférences

Examinons maintenant la différence entre les deux types d'interférence : interne et externe. Dans le premier cas, la modulation et les caractéristiques temporelles et fréquentielles du signal soumis à l'interférence sont les mêmes que

celles du signal désiré. Cette interférence se traduit, dans les cas pratiques, comme l'interférence co-canal et des canaux adjacents. Dans le deuxième cas, les interférences externes réfèrent à toutes les autres formes d'interférences qui ont généralement des caractéristiques de modulation, de temps et de fréquence différentes de celles du signal désiré. Ce genre d'interférence peut être sous forme de fausses et indésirables transmissions.

L'interférence interne peut se produire de la part de nœuds du même réseau maillé ou bien de nœuds appartenant à d'autres réseaux maillés qui utilisent la même architecture et les mêmes protocoles. Dans le cas d'un seul maillage, les nœuds peuvent au moins échanger l'information qui permet d'atténuer les interférences. Par exemple, en réduisant la puissance de la source. Toutefois, aucun autre type d'interférence peut être contrôlable de cette manière. Ainsi, il faut traiter et étudier la conception d'un système radio approprié, ses protocoles et ses architectures.

Les caractéristiques temporelles et fréquentielles pour les interférences externes ont des significations importantes. La caractéristique temporelle clé est la durée de l'interférence, spécialement quand elle apparaît continue ou discontinue dans la nature. Les interférences discontinues peuvent prendre deux formes : aléatoires comme dans les réseaux micro ondes et les interférences régulières, par exemple le DECT cordless phone. Une caractéristique clé de la fréquence est celle de la largeur de bande occupée, en particulier, si la bande passante de l'interférence est faible (bande étroite) ou grande (large bande) comparée à celle du signal désiré.

Il faut aussi distinguer l'interférence réelle et l'interférence virtuelle. On parle d'interférence réelle quand il s'agit d'une énergie radio indésirable qui apparaît dans la bande de fréquence du signal désiré. L'interférence virtuelle concerne l'énergie qui vient de d'autres fréquences mais qui est convertie en un effet de bande par les imperfections de récepteur.

### 3-2-2 Modélisation des interférences

Afin de modéliser les interférences, il est devenu indispensable de représenter les phénomènes qui les causent, en particulier, les modèles de propagation, la répartition des nœuds dans le réseau ou la topologie, et le modèle de liens de communication.

Les modèles de propagation permettent de caractériser les atténuations subies par un signal entre deux points de l'espace. Un paramètre important à considérer est la distance. Plus la source est loin, plus le signal se dégrade. Ce phénomène est appelé : interférence à petite échelle. Quand il y a une présence d'obstacles ou de phénomènes de réflexion, de réfraction des ondes électromagnétiques, la puissance du signal peut être diminuée et des copies multiples du signal original sont engendrées avec des phases et des amplitudes différentes. Ce dernier phénomène est appelé : interférence à grande échelle.

Il est évident que plus le nombre de nœuds augmente, plus la probabilité d'avoir des interférences augmente. La répartition des nœuds ou les structures topologiques représentent un facteur déterminant pour les interférences. On distingue deux types de structures topologiques : la structure régulière, dans laquelle le placement des nœuds est prédéfini et régulière, la structure aléatoire qui est la plus utilisée en pratique.

Les modèles de liens de communication définissent les conditions de la disponibilité des liens. Deux types de modèles ont été cités dans la littérature, à savoir les modèles Booléen et physique. Dans le premier modèle, la communication entre deux nœuds A et B est possible si et seulement si la distance qui les sépare est inférieure à un seuil donné et les nœuds qui communiquent avec le nœud A simultanément doivent pas être dans la portée de transmission du nœud B. Le modèle physique consiste à utiliser le rapport signal à interférence plus bruit SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) comme condition pour avoir une transmission avec

succès. Dans ce cas, deux nœuds peuvent communiquer entre eux si et seulement si le SINR est inférieur à un seuil donné.

Dans le cadre de réseaux sans fil maillées, les routeurs maillés peuvent être munis de plusieurs interfaces radios et de canaux différents pour les liens qui se trouvent dans le même rayon d'interférence, ceci, afin de réduire les interférences. En se basant sur la connaissance de la topologie de réseau et des flux en cours, on aura la possibilité de répartir ces canaux d'une manière diversifiée.

### **3-3 Affectation de canaux**

L'affectation des canaux consiste à attribuer des canaux aux différentes interfaces radio des nœuds du réseau. Cela revient à répartir entre les nœuds les canaux disponibles de manière optimale de façon à maximiser la capacité du réseau, minimiser les interférences et maintenir la connectivité de réseau. L'affectation des canaux reste un problème compliqué dans la recherche sur les réseaux sans fil maillés car même avec une connaissance totale de la topologie, elle reste un problème NP-complet [15] quand le nombre de canaux est supérieur à 2. La classe de problèmes NP-complet contient les problèmes les plus difficiles de NP (Non-deterministic Polynomial time), il s'agit de l'ensemble des problèmes décisionnels pouvant être résolus en temps polynomial avec une machine de Turing non-déterministe. Ils peuvent également être validés avec un algorithme polynomial. Par conséquent, l'affectation des canaux utilise des techniques basées sur des schémas heuristiques.

La problématique de l'attribution des canaux a été largement étudiée dans la littérature. Des auteurs [16] ont proposé deux modèles d'optimisation, pour les réseaux homogènes et hétérogènes, qui permettent l'affectation statique des canaux pour chaque lien de réseau sans fil maillé dans le but de maximiser, simultanément, le nombre de liens actifs. Ce travail ne prend pas en considération le trafic de réseau et dépend juste de la topologie de réseau. Pour [17], la question était d'optimiser

l'affectation de canaux en minimisant la moyenne de l'interférence dans le réseau selon la topologie de réseau et le débit de transfert pour chaque lien. Cette étude confirme qu'en équipant chaque nœud avec un nombre petit de radio peut être suffisant et permet de réduire les interférences. Par contre, le modèle est difficile à réaliser et le temps d'exécution d'algorithme devient très long quand le nombre de nœud augmente. L'étude de [18] s'intéresse à l'affectation de canaux en adaptant l'utilisation de spectre. Le problème est modélisé sous forme d'un ensemble discret de canaux contrairement aux autres travaux dans lequel le spectre est défini comme un bloc continu. L'avantage de l'adaptation du spectre est qu'on peut distribuer le spectre dans le canal de manière à ce que la charge dans le canal soit équilibrée. On a présenté [19] un algorithme nommé "Joint Resource and Channel Assignment (JRCA)". Cet algorithme détermine le nombre de radios nécessaires pour chaque nœud selon le trafic demandé et il permet d'attribuer les canaux pour les liens utilisant même canal de sorte que les interférences sont minimisées. On trouve aussi dans la littérature [20] la méthode "Merge Based Channel Assignment for Interference Reduction" qui consiste à affecter les canaux selon le degré de graphes de conflits sans prendre en considération les contraintes radios ou de canaux disponibles. Les auteurs supposent que deux liens sont en interférence si l'un de ces deux liens est à deux sauts de l'autre. L'algorithme d'affectation de canaux "Maxflow-based Channel Assignment and Routing introduit dans [21], se déroule en deux étapes : la première consiste à classer les liens en groupes en se basant sur le flux qu'ils transportent. Ensuite, un canal est assigné à tous les liens de ce groupe.

Il existe trois types d'approches pour l'affectation de canaux : La première approche est statique, il consiste à attribuer les canaux une seule fois et l'affectation ne change pas au fil du temps [21], [22]. Quant au deuxième, elle est dynamique et met continuellement à jour l'affectation de canaux afin d'améliorer les performances. La dernière approche est hybride, où quelques interfaces radio sont affectées statiquement aux canaux et le reste des interfaces peuvent changer dynamiquement

leurs fréquences de canal [23]. Dans ce qui suit, une description détaillée pour ces trois approches sera présentée.

### **3-3-1 Affectation statique de canaux (AFC)**

Cette solution permet d'affecter des canaux aux interfaces radio pour une période relativement longue ou d'une manière permanente en respectant le temps de commutation entre les interfaces. Elle ne nécessite pas de modification du protocole 802.11. L'avantage de cette approche réside dans sa simplicité et la bonne performance qu'elle donne dans le cas d'un trafic uniforme; leurs inconvénients résident dans la possibilité d'utiliser d'autres canaux uniquement à la suite d'une replanification. Ainsi, la réutilisation de canaux ne s'adapte pas avec le changement de topologie. Les approches basées sur AFC peuvent être classés en deux catégories :

#### **Une affectation commune de canaux (Common Channel assignment- CCA) :**

Les interfaces radio de chaque nœud sont tous assignés au même ensemble de canaux. C'est une approche qui est très simple et permet d'augmenter la capacité du réseau. Par contre, le gain peut être limité dans les scénarios où le nombre de canaux sans chevauchement est supérieur au nombre d'interfaces de carte réseaux utilisés pour chaque nœud de réseau.

#### **Une modification d'allocation de canaux (Varying Channel Assignment-VCA) :**

Les interfaces radio de différents nœuds peuvent être affectées aux différents ensembles de canaux [24], [25]. Toutefois, l'affectation de canaux peut conduire à des partitions de réseau et le changement de routes peuvent augmenter la longueur de routes entre les nœuds de réseau sans fil maillé.

### 3-3-2 Affectation dynamique de canaux (ADC)

La stratégie d'affectation dynamique de canaux consiste à allouer n'importe quelle interface radio à n'importe quel canal et les interfaces peuvent fréquemment changer d'un canal à l'autre. Quand les nœuds veulent communiquer l'un avec l'autre, un mécanisme de coordination doit assurer qu'il y a un canal en commun. Par exemple, les mécanismes qui nécessitent que les nœuds négocient les canaux pour la prochaine phase de transmissions [26]. Cela permet d'allouer des canaux selon la demande. Par contre, cette approche produit de mauvaise performance lorsque la charge de trafic est élevée.

### 3-3-3 Affectation hybride de canaux (AHC)

Cette approche est une combinaison des approches AFC et ADC en appliquant l'approche d'affectation fixe à certaines interfaces et l'affectation dynamique à d'autres interfaces [28], [27]. Elle utilise de simples algorithmes de coordination comme dans le cas d'AFC tout en gardant la souplesse offerte par l'approche ADC. Le travail de [28] introduit un nouveau protocole, le "Link Layer Protocol-LLP" qui classe les interfaces disponibles en interfaces fixes et commutables (les interfaces peuvent être commutées dynamiquement entre les canaux). Les interfaces fixes sont attribuées à tous les nœuds de manière à ce que tous les canaux soient utilisés. Mais cette approche ne prend pas en considération la charge de trafic lors de l'attribution de canaux fixe. L'algorithme proposé dans [27] nommé "Interference-Aware Channel Assignment- IACA" est une approche basée sur le graphe de conflits multiples-radios. Le but est de maximiser la capacité de réseau sans fil maillé et minimiser les interférences. Néanmoins, IACA ne considère pas la charge du trafic lors de l'attribution de canaux.

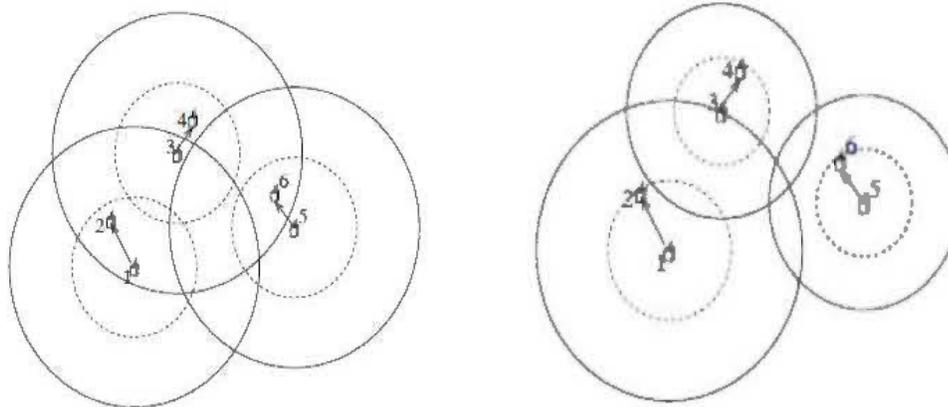
### 3-4 Contrôle de puissance

Le contrôle de la puissance est un problème fondamental dans les réseaux sans fil. C'est un thème de recherche qui a suscité beaucoup d'intérêt à différents niveaux. Il est utilisé pour économiser l'énergie et améliorer la capacité du réseau. En variant le niveau de puissance de transmission, la qualité de signal est affectée. Par conséquent, on peut déterminer les nœuds voisins qui peuvent recevoir les paquets d'information. La puissance de transmission influence la portée des communications et a un impact sur les communications simultanées dans une région de l'espace. La sélection du niveau optimal de puissance dépend des objectifs envisagés. Les stratégies de contrôle de puissance peuvent être classées en trois catégories : orientées vers l'économie d'énergie, vers la minimisation d'interférence ou vers la connectivité.

Le contrôle de la puissance orienté vers la minimisation d'interférence vise à réduire les interférences en sacrifiant quelques aspects essentiels du réseau comme le débit, le délai et la réutilisation spatiale. Dans ce cas, on peut distinguer deux approches : la première utilise le contrôle de topologie en association avec la réduction des interférences tout en gardant la connectivité de réseau. Dans la littérature, la réduction de l'interférence est souvent liée à la réduction de nombre de voisins. En d'autres termes, moins il y a de liens dans le réseau moins l'interférence est sévère. La deuxième approche associe la réduction de l'interférence au contrôle d'accès en introduisant des informations particulières dans les messages de contrôle et de réservation de canal de type CAI (Collision Avoidance Information). Ces messages informent sur le degré d'interférence tolérable durant la transmission.

Un exemple de contrôle de la puissance est illustré à la Figure 3.2. Dans la Figure 3.2-(a), on a trois liens 1---»2 et 3---»4 et 5---»6. Pour chaque nœud de transmission (1,2,3), le cercle intérieur (pointillé) représente la portée de la transmission et le cercle extérieur (en gras) représente la portée d'interférence. On

voit bien que les nœuds 2 et 6 sont à la portée d'interférence du nœud 3. Donc, si le lien 3---»4 utilise une bande de fréquence  $m$ , les deux liens 1---»2 et 5---»6 ne doivent pas utiliser même bande. Si le lien 3---»4 n'utilise pas la bande de fréquence  $m$ , les deux liens 1---»2 et 5---»6 peuvent utiliser cette bande car les nœuds 2 et 6 ne sont pas respectivement à la portée d'interférence des nœuds 5 et 1. À la figure 3.2(b), chaque nœud ajuste sa puissance de transmission et on voit que les deux nœuds 2 et 6 ne sont pas dans la zone d'interférence du nœud 3. Par conséquent, les nœuds 1 et 5 peuvent utiliser la même bande de fréquence simultanément.



3.2(a) : Absence de contrôle de puissance

3.2(b) : Contrôle de puissance pour les nœuds

Figure 3.2 : Liens de réseau [29]

Généralement, l'adaptation de la puissance de transmission dans les réseaux sans-fil multi-sauts est très compliquée. En effet, le changement de puissance de transmission a un impact sur la topologie et donc sur le routage et les liens en interférences seront aussi différents. Transmettre les données avec une puissance maximale ne représente pas une solution optimale car la puissance de transmission entre deux nœuds augmente avec la distance qui les sépare  $\beta \geq 2$  (qui dépend de l'environnement de travail). Pour économiser l'énergie globale du réseau, on peut augmenter le nombre de nœuds intermédiaires.

Le contrôle de la topologie est une approche qui permet d'affecter un certain niveau de puissance de transmission pour assurer la connectivité du réseau et que la consommation d'énergie des nœuds soit optimale. Dans cette approche, on distingue deux types : les méthodes centralisées et les méthodes distribuées.

Dans la première méthode, les placements des nœuds sont au préalable connus grâce à une entité qui calcule leur puissance de transmission. Par contre, cette méthode est difficile à réaliser quand le nombre de nœuds du réseau est grand. Les algorithmes distribués s'adaptent à la mobilité des nœuds et se basent sur les informations locales des nœuds pour calculer la puissance convenable.

Durant la dernière décennie, de nombreux travaux ont été conduits pour étudier les mécanismes de contrôle de puissance dans les réseaux sans fil maillés. Ces travaux ont permis d'aboutir à l'amélioration de débits et à la réduction de la consommation énergétique des nœuds. Des auteurs [30] ont proposé un mécanisme adaptatif de contrôle de puissance basé sur IEEE 802.11 MAC. Il utilise différents niveaux de puissance de transmission pour les paquets RTS/CTS et pour les paquets DATA/ACK. Cette méthode permet une amélioration de 30% de la capacité du réseau et aussi de latence comparé au 802.11 MAC. La nécessité de contrôler la consommation d'énergie [31] dans le contexte de réseau sans fil maillé a fait l'objet de considérations très poussées. Un algorithme, le "Local Minimum Shortest-Path Tree (LM-SPT)" a été proposé pour contrôler la topologie de réseau sans fil maillé. L'algorithme est distribué à chaque nœud en utilisant uniquement les informations recueillies localement afin de déterminer sa propre puissance d'émission. Les auteurs [29] ont développé un modèle de programmation mathématique non linéaire mixte en nombre entier pour optimiser la puissance, le routage et l'ordonnement fréquentiel. L'objectif est de minimiser la somme d'une métrique "Bandwidth-footprint-product (BFP). La solution de cette optimisation est trouvée en utilisant l'algorithme de Branch and Bound et la relaxation convexe. Des résultats obtenus par

simulation ont montré l'efficacité de cette solution en termes de contrôle de puissance.

### 3-5 La connectivité

Un réseau est dit connecté si et seulement il existe au moins un chemin entre chaque paires de nœuds. La connectivité dépend essentiellement de l'existence de chemins. Différents facteurs peuvent influencer la connectivité de réseau : pertes de liens, mise à jour des routes, reroutage...etc. On peut définir aussi la connectivité d'un réseau comme étant la probabilité que les nœuds puissent communiquer entre eux durant un certain temps [32]. Pour évaluer la connectivité d'un réseau, on calcule le nombre de nœuds accessibles, en moyenne, par un seul nœud de transmission. Cela peut se traduire comme le nombre de nœuds placés à une certaine distance  $r$  d'un transmetteur. Par exemple, sur la figure 3.3, on voit bien un nœud de transmission entouré de nœuds (en gras) avec sa portée de transmission de rayon  $r$ . Le nombre de nœuds accessibles pour communiquer est représenté par le nombre de nœuds à l'intérieur de ce cercle. Cette valeur peut être exprimée encore comme le nombre de nœuds existants dans une surface  $\pi r^2$  :  $m = \rho \pi r^2$

où  $\rho$  est la densité des nœuds dans le réseau.

Deux facteurs clés permettent d'assurer la connectivité dans les réseaux sans fil maillés :

- 1- il faut une stratégie pour placer les nœuds d'une manière optimale.
- 2- le nombre de nœuds placés par unité de surface ou la densité nodale doit être suffisamment élevée pour assurer la connectivité du réseau à tout moment.

de garantir une plus grande probabilité de connectivité, il est suggéré de prendre en considération ces facteurs, en particulier le nombre de canaux disponibles. Dans [37], l'auteur a proposé un protocole de distribution de canaux afin de maximiser le nombre de liens actifs qui n'interfèrent pas entre eux et qui garantit aussi la connectivité de réseau. Le problème est modélisé sous la forme d'un problème de couleurs où chaque couleur correspond à un canal donné. L'idée est de déterminer le "minimum degree spanning tree- MDST" du réseau afin de fournir plus de transmissions parallèles et assurer la connectivité du réseau.

### **3-6 La capacité**

La capacité d'un réseau sans fil maillé fait partie de critères les plus importants dans la qualité de service. Ainsi, augmenter la capacité est une exigence importante à satisfaire pour améliorer les performances de réseau sans fil maillé. Elle peut être exprimée comme la quantité totale de trafic que peut écouler le réseau pendant une période de temps. La capacité [38], [39] est définie comme étant le maximum de bande passante allouée pour chaque utilisateur. L'étude de la capacité a différents objectifs. Pour l'opérateur, l'objectif est fournir les solutions les plus efficaces et assurer la meilleure qualité de service possible et offrir des services à un très grand nombre d'utilisateurs. Pour l'utilisateur, améliorer la capacité permet d'obtenir plus de bande passante afin d'augmenter son flux de bout en bout. Différents facteurs peuvent influencer la capacité comme la topologie du réseau, le modèle de trafic, le partage des ressources et les interférences.

La capacité d'un réseau sans fil maillé est un sujet qui a intéressé beaucoup de chercheurs. Pour l'optimisation de la capacité et l'estimation de réseau sans fil, Gupta et Kumar [40] ont traité l'approche asymptotique d'approximation de la capacité pour les réseaux sans fil multi-sauts. Pour analyser cette approche, on peut étudier la corrélation entre la capacité et les nœuds de réseau, le nombre d'interfaces et le nombre de canaux. Un résultat déduit de ce travail est présenté sur la figure 2.7 Dans

[41], les auteurs ont montré que la capacité de réseau sans fil maillé de chaque nœud est de  $1/n$  avec  $n$  est le nombre de nœuds du réseau. La capacité du réseau sans fil maillé peut être augmentée en équipant les routeurs Mesh avec multiples radios opérant sur des canaux non orthogonaux [42].

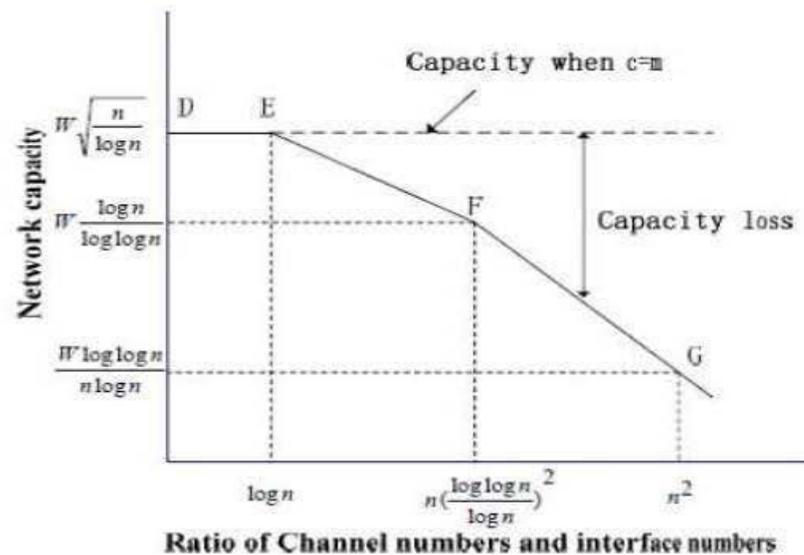


Figure 3.4 : La relation entre la capacité asymptotique et les nœuds, canal, interface [40]

Un modèle mathématique [43] d'affectation d'interfaces radio nommé "Channel-On Demand" (COD) a été développé et il permet d'obtenir le maximum de capacité en temps-réel de trafic. Une analyse de la capacité maximale atteinte par un seul nœud dans le cas de trafic unidirectionnel et bidirectionnel a été réalisée. Les auteurs ont proposé également une règle de décomposition de graphe et sous-graphes pour donner la priorité aux sous-graphes qui ont le maximum de capacité.

### 3-7 Conclusion

Bien qu'il existe nombreuses études qui ont tenté de garantir la qualité de service pour les réseaux sans fil maillé, leurs approches demeurent insuffisantes. En effet, ces études ne présentent pas des modèles d'optimisations multi-objectifs.

Optimiser la gestion de canaux tout en minimisant l'énergie et garantir la connectivité avec affectation de canaux dans les réseaux sans fil peut apparaître compliqué mais ils sont devenus incontournables dans la réalité. En effet, affecter un même canal à des routeurs voisins minimise le surcoût de re-routage, cependant, cela peut causer des interférences importantes et dégrader les performances de réseau en termes de débit. Dans les prochains chapitres, on va proposer nos modèles d'optimisation qui offre la possibilité d'optimiser la capacité, la gestion, l'énergie, et la connectivité des réseaux.

## CHAPITRE 4

### ÉVALUATION DES TECHNIQUES D'OPTIMISATION APPLIQUÉES AUX RÉSEAUX MAILLÉS

#### 4-1 Introduction

Le grand enjeu scientifique et technique actuel des réseaux sans fil maillés est de réussir leur déploiement tout en gardant une bonne qualité de service. Cette dernière représente le critère le plus difficile à maîtriser. Elle nécessite donc une connaissance de tous les paramètres du réseau et une modélisation physique du système. Ainsi, il est essentiel de penser à utiliser des approches basées sur les méthodes d'optimisation afin de résoudre cette problématique.

Généralement, les problèmes d'optimisation continue et linéaire peuvent être résolus d'une manière efficace. On peut les résoudre facilement même avec des dizaines, voire des centaines, de milliers de variables et de contraintes. Cependant, la modélisation de certains problèmes d'optimisation appliqués aux réseaux sans fil maillés impose que toutes ou une partie des variables soient entières. On parle là de problème d'optimisation combinatoire. Les problèmes qui en résultent sont plus compliqués à résoudre.

Dans ce chapitre, on va rappeler quelques notions d'optimisation combinatoire ainsi qu'une présentation de différentes techniques de résolution de problèmes d'optimisation combinatoire pour les réseaux sans fil maillés. Ces techniques vont être évaluées afin de choisir celle qui peut être considérée comme la meilleure pour obtenir une solution au problème à l'étude.

## 4-2 L'optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire est une branche de l'optimisation en mathématiques appliquées et en informatique. Son importance se justifie d'une part par la grande difficulté des problèmes d'optimisation et d'autre part par de nombreuses applications pratiques pouvant être formulées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire. Généralement, ce type de problèmes est difficile à résoudre et il est de classe NP- complet.

On distingue deux types de problèmes d'optimisation combinatoire : les problèmes d'optimisation en nombre entier et les problèmes d'optimisation binaire. Dans sa forme générale, un problème d'optimisation en nombre entier vise la recherche du minimum (ou du maximum) d'une fonction réelle qu'on appelle "fonction objective" à  $n$  variables dans un ensemble discret. Sa forme canonique s'exprime comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min ou Max } f(x) \\ \text{sous les contraintes :} \\ \forall i \in \{1, \dots, m\}, g_i(x) \leq 0 \\ x \in M \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Où  $f(x)$  est la fonction objective ou la fonction économique à optimiser et  $x$  la solution.

Les équations :  $\forall i \in \{1, \dots, m\}, g_i(x) \leq 0$  (4.2) représentent les conditions ou les contraintes à satisfaire et  $M$  est l'ensemble discret contenant la solution. Quand l'ensemble  $M = \{0,1\}$ , on dit que le problème (4.1) est de type optimisation binaire.

La résolution de tout problème d'optimisation combinatoire nécessite une analyse du problème, une modélisation et le choix d'une méthode qui permet d'obtenir la solution à partir de la représentation du problème dans un espace de recherche.

### **4-3 Algorithmes d'optimisation combinatoire pour les réseaux sans fil maillés**

L'objectif de l'optimisation dans les réseaux sans fil maillés est de permettre l'échange et la diffusion d'informations entre les nœuds du réseau avec succès et à moindre coût. Ces échanges dépendent de certains facteurs comme la puissance de transmission, les interférences et l'emplacement des nœuds qu'il faut les optimiser. Dans ce contexte, l'optimisation combinatoire reste un outil très important pour modéliser et optimiser les réseaux sans fil maillés.

Étant donné l'importance de ces problèmes dans les réseaux sans fil maillés, de nombreuses méthodes de résolution ont été proposées dans la littérature. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories : les méthodes exactes qui assurent une résolution complète en explorant exhaustivement l'ensemble des solutions possibles et les méthodes heuristiques qui cherchent juste à trouver des solutions réalisables en sacrifiant l'optimalité.

Le principe d'une méthode exacte consiste à énumérer implicitement l'ensemble des solutions de l'espace de recherche. Elle permet de chercher une solution optimale d'un problème donné dans un intervalle de temps bien précis. Parmi les méthodes exactes, on trouve les méthodes traditionnelles développées depuis une trentaine d'années comme Branch and Bound qui est la plus utilisée. Le temps d'exécution de la méthode dépend de la taille du problème.

Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes heuristiques ne trouvent pas la solution optimale (meilleure solution) et se contentent de trouver une solution réalisable au problème. Par contre, elles constituent une alternative très intéressante pour résoudre les problèmes d'optimisation de grande taille si l'optimalité n'est pas primordiale. On peut citer par exemple l'algorithme glouton ou Greedy et l'algorithme génétique.

### 4-3-1 Algorithme glouton ou Greedy

C'est une méthode simple et d'usage général. Son principe est qu'à chaque étape durant le processus de recherche, on cherche à construire une solution réalisable pas à pas en se ramenant à une suite de décisions en fonction d'un critère local. Les choix faits durant le processus de recherche ne sont jamais remis en cause (pas de retour arrière). Dans les cas où l'algorithme ne fournit pas systématiquement une solution, on parle d'heuristique gloutonne.

Soit un ensemble fini d'éléments finis  $E$ , une solution à notre problème est construite à partir des éléments de  $E$  qui peuvent être soit une partie de  $E$  ou un multi-ensemble de  $E$  ou une suite finie d'éléments de  $E$ . Pour implémenter cette méthode, on doit :

- Sélectionner le meilleur élément restant selon le critère glouton.
- Tester si une solution partielle est une solution complète.
- Tester si un élément peut être ajouté à une solution partielle, c'est-à-dire si la solution partielle reste un début de solution possible après l'ajout de l'élément.
- Ajouter un élément à une solution si c'est possible.

Pour assurer le bon fonctionnement de la méthode gloutonne, il faut que le choix local aboutisse à un problème similaire plus petit. La méthode gloutonne ressemble ainsi à la programmation dynamique. Mais la différence essentielle est que l'on fait d'abord un choix local et on résout ensuite un problème plus petit (progression descendante). En programmation dynamique, au contraire, on commence par résoudre des sous-problèmes, dont on combine ensuite les résultats (progression ascendante).

Généralement, il est très difficile de justifier que la solution fournie par l'algorithme de glouton est optimale. Les preuves de correction d'algorithmes

gloutons sont souvent basées sur une propriété appelée “propriété de type échange”. Son principe consiste à transformer une solution quelconque différente de la solution gloutonne en une autre solution au moins aussi bonne et plus proche de la solution gloutonne.

#### 4-3-2 Algorithme génétique

Les algorithmes génétiques sont une forme de recherche locale qui fournit des solutions aux problèmes n'ayant pas de solutions calculables dans un temps raisonnable. Le principe de la méthode est inspiré des aspects biologiques. En effet, on considère un ensemble de solutions comme une population d'individus capable d'évoluer et de se croiser. Au départ, on commence par générer une population initiale d'individus (solutions) de façon aléatoire. Des milliers de solutions plus ou moins bonnes sont ainsi créées par hasard puis sont soumises à un procédé d'évaluation de pertinence afin de trouver la solution la plus adaptée au problème. Cette procédure est effectuée à partir d'une fonction d'adaptation ou de sélection. Ensuite, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. La mutation est un opérateur qui permet l'inversion d'un bit dans un chromosome. Cela s'applique avec une probabilité dite taux de mutation, généralement compris entre 0.01 et 0.10. L'opérateur croisement est appliqué avec une certaine probabilité appelée taux de croisement, généralement proche de l'unité. Il permet de créer de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes. Le procédé de croisement et de mutation se relance un certain nombre de fois jusqu'à un critère d'arrêt, ceci afin d'essayer de tendre vers la solution optimale. Le critère d'arrêt peut prendre plusieurs formes :

Par exemple, deux solutions sous forme de codage binaire ( $x_i, y_i \in \{0,1\}$ ) :

$$x = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n), y = (y_1, y_2, y_3 \dots y_n)$$

La procédure de croisement consiste à choisir au hasard un indice  $k$ , ainsi on engendre deux nouvelles solutions :

$$u = (x_1, x_2, x_3 \dots x_{k-1}, y_k, \dots y_n) \text{ et } v = (y_1, y_2, y_3 \dots y_{k-1}, x_k, \dots x_n)$$

La mutation consiste à changer un ou plusieurs bits au hasard dans  $u$  et  $v$ .

La fonction d'adaptation permet de focaliser la recherche sur les zones intéressantes et permet d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Le choix de la fonction d'adaptation dépend de la nature du problème. Généralement, on donne la plus grande valeur d'aptitude à l'individu qui tend à résoudre le problème. La fonction d'adaptation est alors choisie de manière à avoir un sens de variation à l'opposé de celui de la fonction objective. Ainsi, la fonction d'adaptation est choisie croissante lorsque la fonction objective décroît.

La mutation et le croisement permettent de diversifier la recherche, il existe de nombreuses méthodes pour la sélection, le croisement et la mutation. Dans les algorithmes génétiques, la mutation est considérée comme un opérateur secondaire par rapport au croisement. Un cycle d'évolution complet d'un algorithme génétique est formé par l'application des opérateurs de sélection, croisement et mutation sur une population d'individus. La Figure 4.1 illustre le principe général de la méthode.

D'autres opérateurs peuvent être utilisés. Par exemple, celui qui permet d'améliorer séparément les individus de la population à l'aide d'une méthode d'amélioration itérative. Le codage utilisé par les algorithmes génétiques est très important et permet de représenter tous les points dans l'espace de recherche et de créer les opérateurs de croisement et de mutation.

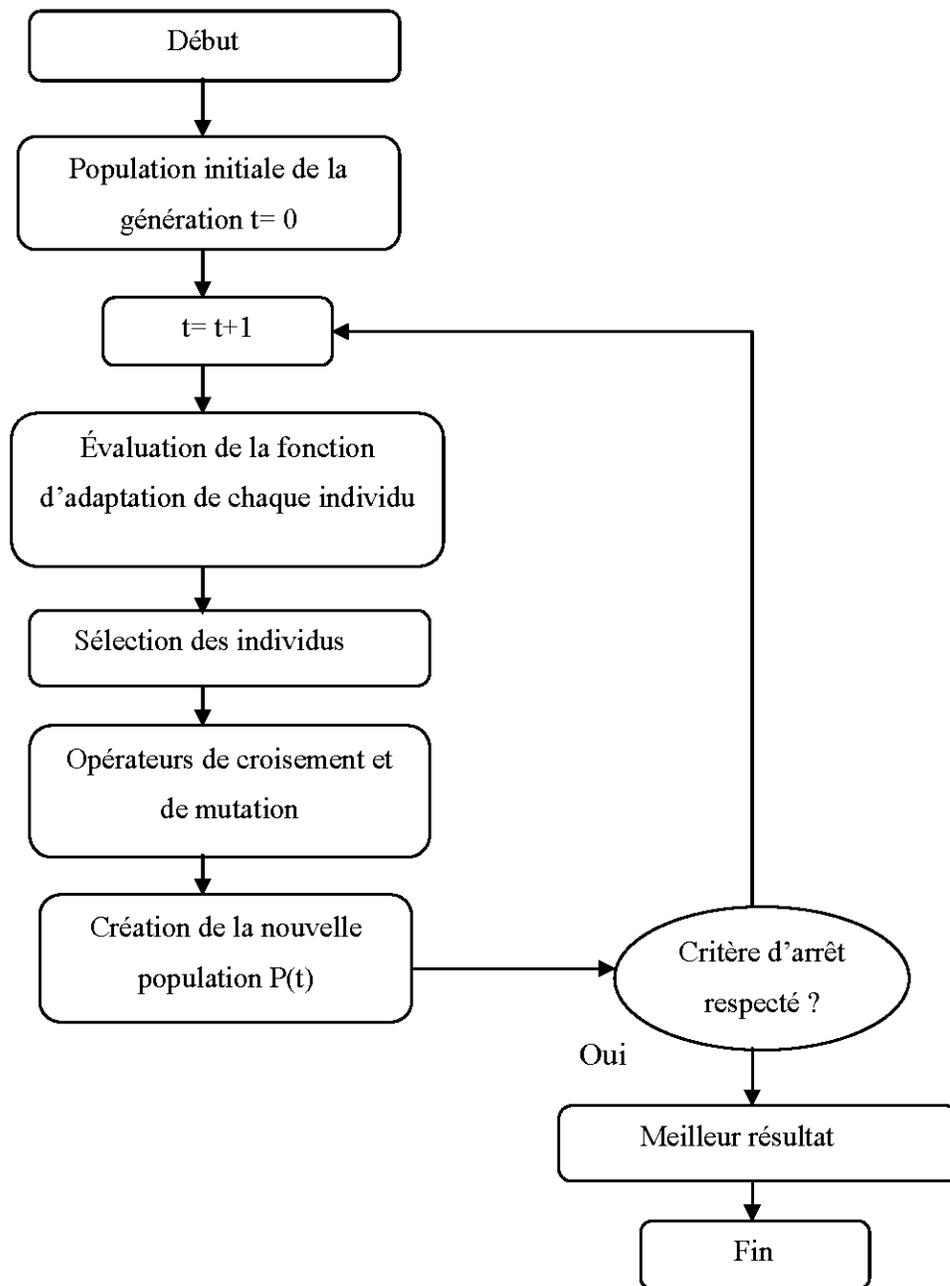


Figure 4.1 : Organigramme d'un algorithme génétique

### 4-3-3 Algorithme de Branch and Bound

L'algorithme de Branch and Bound, peut être exprimé comme "Procédure de séparation et d'évaluation progressive", est très connu pour résoudre des problèmes d'optimisation discrets et les problèmes combinatoires. Il permet de construire une arborescence en évaluant les chances de trouver une solution dans une branche particulière. Les nœuds qui n'ont pas de solution ne seront pas explorés et la recherche sera plus optimale. Les algorithmes de Branch and Bound ont prouvé qu'ils sont raisonnablement efficaces et ils ont l'avantage de proposer une solution intéressante pour la programmation linéaire continue. On applique Branch and Bound à la résolution de problèmes complexes, NP-complets le plus souvent, que l'on essaye de résoudre en :

- découpant le domaine des solutions en partitions de plus en plus fines (principe de séparation),
- estimant pour chaque sous-domaine  $d_i \subset D$  de la partition une borne inférieure de  $F$  sur  $d_i$  (principe d'évaluation).

À titre d'exemple si on cherche à résoudre le problème suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max y_1 + 2y_2 \\ y_1 + 8y_2 \leq 26 \\ -y_1 + 0.8y_2 \leq 0.2 \\ y_1 + 0.8y_2 \leq 5.8 \\ y_1 \leq 5 \\ -y_1 \leq -1 \\ y_1, y_2 \in \mathbb{R}_+ \end{array} \right. \quad (4.3)$$

La technique de relaxation est une méthode d'optimisation qui consiste à remplacer une contrainte stricte par une contrainte moins stricte. C'est une formulation qui contient un ensemble de solutions réalisables plus grand que celui du problème

original. Généralement, la relaxation doit être plus facile à résoudre que le problème et doit avoir une structure qui ressemble au problème original. Cette technique est utilisée aussi dans l'algorithme de Branch and Bound. La relaxation du problème (4.3) donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max y_1 + 2y_2 \\ y_1 + 8y_2 \leq 26 \\ -y_1 + 0.8y_2 \leq 0.2 \\ y_1 + 0.8y_2 \leq 5.8 \\ y_1 \leq 5 \\ -y_1 \leq -1 \\ y_1, y_2 \geq 0 \end{array} \right. \quad (4.4)$$

La solution optimale de la relaxation (4.4) est :  $(\text{---}, \text{---})$  avec la valeur objective  $\text{---} = 9,1666$ . Donc on commence par un nœud qui est la solution du problème de relaxation pour construire l'arbre d'algorithme.



Figure 4.2 : Première étape d'algorithme

On divise ce nœud en faisant un branchement sur une variable fractionnaire. Généralement, si la solution  $x$  a une valeur fractionnaire  $x'$  le problème peut être divisé en deux sous-problèmes en imposant :

$$x \leq \quad \text{et} \quad x \geq \quad + 1$$

où  $\lfloor x^* \rfloor$  est le plus grand entier inférieur à  $x^*$ . Dans notre exemple, le branchement crée deux nouveaux nœuds (Figure 4.3).

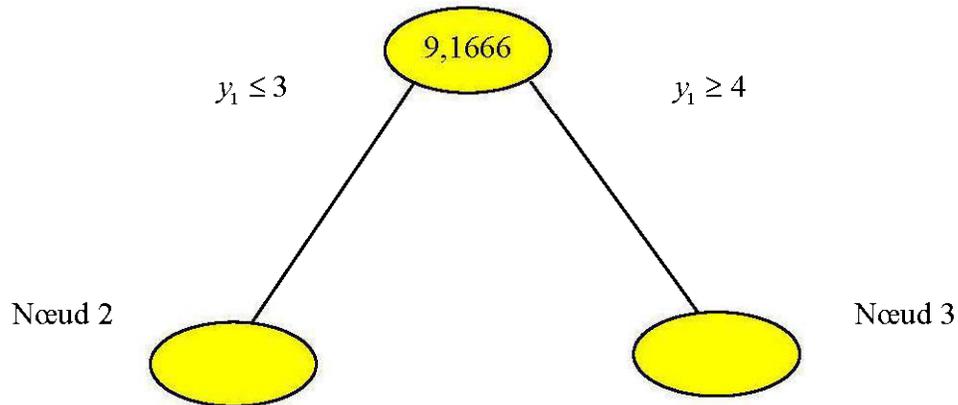


Figure 4.3 : Deuxième étape d'algorithme

À la prochaine étape, on résout le programme linéaire associé au nœud 3. La formulation associée à ce nœud est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max y_1 + 2y_2 \\ y_1 + 8y_2 \leq 26 \\ -y_1 + 0.8y_2 \leq 0.2 \\ y_1 + 0.8y_2 \leq 5.8 \\ y_1 \leq 5 \\ -y_1 \leq -1 \\ y_1, y_2 \geq 0 \\ y_1 \geq 4 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

La solution optimale de (3) est  $(4, -)$  avec valeur objective 8,5. Donc, on divise le nœud 3 en deux nouveaux nœuds 4 et 5. On continue jusqu'à ce que toutes les possibilités soient énumérées ou coupées.

Après avoir exploré tous les nœuds de l'arbre, la solution de ce problème est de valeur objective égale à 8.

L'algorithme général de la méthode est donc donné ainsi :

À chaque instant, on maintient :

- une liste de sous-problèmes actifs  $P_i$
- Le coût  $Z$  de la meilleure solution obtenue jusqu'à maintenant (Initialisé à  $+\infty$  ou à celui d'une solution initiale connue).

À une étape typique :

- Sélectionner un sous problème actif  $P_i$
- Si  $P_i$  n'est pas réalisable, le supprimer (stop branch) sinon calculer sa borne inférieure  $Z_{\text{inf}}(P_i)$ .
- Si  $Z_{\text{inf}}(P_i) \geq Z$  supprimer  $P_i$  (stop branch).
- Si  $Z_{\text{inf}}(P_i) < Z$  soit résoudre  $P_i$  directement, soit créer de nouveaux sous-problèmes et les ajouter à la liste des sous problèmes actifs.

L'algorithme de Branch and Bound permet d'explorer l'ensemble des solutions possibles et éliminant des sous-ensembles de mauvaises solutions en utilisant les techniques d'élagage. L'avantage de l'approche est que les solutions éliminées ne sont pas évaluées à la main « à la main », mais de façon globale.

#### **4-4 Évaluation d'algorithmes d'optimisation combinatoire pour les réseaux sans fil maillés**

Dans cette section, nous donnons un aperçu sur l'efficacité des méthodes et des techniques qui ont été mentionnées dans la section précédente, ainsi qu'une évaluation de ces efficacités. L'objectif est de choisir la meilleure méthode qu'on peut utiliser pour la résolution de notre problématique.

##### **4-4-1 Critères de choix de la méthode :**

Le premier obstacle pratique qui se pose à un utilisateur confronté à la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire est d'effectuer le choix entre les méthodes déjà mentionnées à savoir l'algorithme de Branch and Bound, l'algorithme glouton ou Greedy et l'algorithme génétique. Ce choix paraît très difficile en absence d'une comparaison générale et fiable de ces méthodes. Par contre, on peut caractériser ces algorithmes selon certains critères, ce qui peut nous faciliter le choix. Les critères les plus représentatifs qui permettent d'évaluer les performances de ces algorithmes sont :

- La rapidité ou la complexité de la méthode.
- La qualité de la solution et l'optimalité.
- L'adaptation au problème.

##### **La complexité de l'algorithme**

Pour de nombreux problèmes d'optimisation de réseaux sans fil maillés, le nombre de solutions potentielles croît exponentiellement avec la taille du problème. Certains d'entre eux sont trop complexes pour être modélisés avec une formulation analytique et nécessitent des simulations pour les évaluer. La complexité algorithmique est un aspect fondamental pour tout informaticien et elle permet de

déterminer si un tel algorithme est plus rapide ou long. Généralement, le temps d'exécution d'un algorithme dépend du nombre de données, de la taille du code, du type d'ordinateur utilisé (processeur, mémoire).

En raison du nombre élevé de combinaisons possibles, la complexité de l'algorithme génétique croît exponentiellement quand le nombre d'éléments dans l'espace de recherche augmente [44] (Tableau 4.1). Le temps de calcul devient alors très important et l'équation (4.6) précise le nombre de cas à traiter selon le nombre d'éléments de l'espace de recherche.

$$C = \sum_{V=1}^{V=M} \frac{M!}{V!(M-V)!} \quad (4.6)$$

où M représente la taille totale de l'univers formé de points qui peuvent donner la solution.

V représente la taille du vecteur solution qu'on désire trouver.

Cardinal de nœuds formant l'univers	5	10	20	40	60	80
Nombre de combinaisons	31	1023	1 <sup>E</sup> 06	1 <sup>E</sup> 12	1 <sup>E</sup> 18	1 <sup>E</sup> 30

Tableau 4.1 : Le nombre de combinaisons possibles en fonction de cardinal de l'ensemble d'études

La méthode de Branch and Bound est en théorie de complexité exponentielle. En pratique, et en moyenne, la complexité devient meilleure, souvent  $O(1,5^n)$ . On peut dire que cette méthode est faiblement exponentielle [45].

La complexité de l'algorithme glouton est de l'ordre  $n \cdot \log(n) + n \cdot f(n)$  où  $f(n)$  est le coût de la vérification de la contrainte et de l'ajout d'un élément. Donc, en général l'algorithme est efficace et rapide.

### **La qualité de solution et l'optimalité**

L'optimalité reste un critère très important pour évaluer un algorithme. Il permet de voir si une méthode est capable de fournir une meilleure solution.

L'algorithme de Branch and Bound est une méthode exacte et permet de trouver la solution optimale. Dans [29], cette méthode a été utilisée avec la relaxation convexe pour résoudre le problème d'optimisation d'énergie, d'ordonnement fréquentiel et de routage. Il s'avère que c'est une méthode efficace qui donne de très bonnes solutions. Par contre, l'algorithme génétique est moins performant en terme d'optimalité et rencontre beaucoup de difficultés pour fournir de très bonne solution. Ces difficultés se manifestent au niveau du codage, des configurations en binaire et à la recombinaison de solutions pour garder quelque chose qui s'approche de l'optimum. L'algorithme génétique a été utilisé par exemple pour résoudre le problème de coloration [46] et les résultats sont assez faibles. Quant à la méthode de glouton, il est très difficile de prouver que la solution trouvée est optimale malgré quelques propriétés de correction comme celle de type "échange" qui est souvent difficile à vérifier. Les auteurs dans [47] et [48] ont utilisé cette technique rapide, mais les résultats qu'elle fournit sont médiocres.

### **L'adaptation au problème**

Pour l'algorithme génétique, il est très important de faire le choix d'un codage afin de coder n'importe quelle solution. Ce codage doit être choisi de façon à ce que toute chaîne de caractères représente bien une solution réalisable et facilite ensuite la conception du croisement pour que les « enfants » obtenus à partir de la recombinaison de leurs « parents » puissent être associés à des solutions réalisables. Généralement, il est difficile de construire un codage essayant de tenir compte de tous ces critères.

Les algorithmes de glouton et Branch and Bound sont faciles à implémenter et s'adaptent bien aux différents problèmes d'optimisation combinatoire.

#### **4-5 Conclusion**

Tout d'abord, il faut rappeler que les méthodes heuristiques comme l'algorithme glouton et l'algorithme génétique n'ont pas les mêmes objectifs que celui des méthodes exactes comme Branch and Bound. Les méthodes heuristiques ne garantissent pas de trouver une solution optimale ni de prouver l'optimalité des solutions. La méthode de Branch and Bound, comme on l'a déjà vu précédemment, fournit une solution optimale et faiblement exponentielle. Elle semble être efficace dans la résolution des problèmes d'optimisation dans les réseaux sans fil maillés. Dans notre contexte de projet Sécurinet, il est intéressant de trouver une solution optimale pour l'économie d'énergie et assurer une bonne assignation des canaux, contrairement aux méthodes heuristiques, dans lesquelles la solution peut être plus ou moins bonne.

## CHAPITRE 5

### OPTIMISATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

#### 5-1 Introduction :

Le contexte de la recherche qui nous motive soulève des problématiques d'optimisation. Il est nécessaire de trouver un certain compromis pour notre système afin que la puissance de transmission ne cause pas d'interférence et que la connectivité soit assurée afin de garantir une certaine flexibilité qui permet une bonne gestion des pannes et une adaptation au changement de trafic. Le médium radio est partagé, ce qui signifie que lorsqu'un nœud émet un signal, tous les nœuds dans un même périmètre ne peuvent pas transmettre des données simultanément sans provoquer une interférence à la réception. Il faut donc ajuster la puissance de chaque nœud de manière à ce qu'il n'interfère pas avec les nœuds voisins. Généralement, les interférences présentent un défi majeur pour les réseaux sans fil maillés. Elles causent nécessairement une chute de la capacité. Dans ce contexte, la capacité est devenue un facteur clé à optimiser pour la qualité de service dans les réseaux sans fil maillés. Une répartition optimale des canaux permet de maximiser la capacité du réseau et minimiser les interférences.

Dans ce chapitre, nous développons deux modèles d'optimisation pour les réseaux sans fil maillés. Le premier traite de l'affectation des canaux, du contrôle de la puissance et de la connectivité et prend en considération les conditions d'interférences et de transmission avec succès. Le deuxième permet de maximiser le nombre de liens actifs simultanément et prend en considération la répartition spatiale des nœuds et les contraintes de puissance de transmission. Notre objectif est de trouver de solutions optimales afin d'assurer une bonne qualité de service. Les deux

modèles sont de types “Programmation linéaire en nombre entier” et la méthode de Branch and Bound, comme on l’a déjà vu au chapitre précédent, permet de résoudre ce type de problème.

## **5-2 Problématique**

### **5-2-1 Modèle de contrôle de la puissance, affectation des canaux et connectivité**

Notre objectif est d’optimiser le contrôle de la puissance et l’affectation de canaux simultanément, tout en garantissant la connectivité du réseau. Pour cela, un modèle d’optimisation en nombre entier est formulé en minimisant une fonction objective qui représente la somme d’une métrique dite “Bandwidth- footprint product”. Pour réduire l’interférence et avoir une bonne assignation des canaux, la puissance de transmission est ajustée à la puissance minimale requise pour assurer la connectivité du réseau. Dans notre contexte, la connectivité du réseau consiste à relier les nœuds du réseau qui sont adjacents. Pour atteindre cet objectif, un arbre de connectivité est construit.

#### **5-2-1-1 Conditions de transmission**

Avant d’installer les stations de base pour un réseau sans fil maillé, nous avons besoin de prédire la portée des ondes radio. La portée radio permet d’estimer le nombre d’équipements à installer. En effet, plus on a une grande portée radio, moins on a besoin d’antennes pour atteindre des zones éloignées.

En parcourant le trajet entre l’émetteur et le récepteur, le signal transmis peut subir certains phénomènes qui peuvent dégrader la qualité du signal. Ainsi, cette dégradation entraîne des pertes d’informations pour l’usager et perturbe le système. L’étude de la propagation a pour but la prédiction de la puissance reçue à une distance donnée en fonction de tous les paramètres de système et de la nature de l’environnement. On peut modéliser les pertes de propagation dues à la distance

parcourue par l'onde radio entre deux nœuds  $i$  et  $j$  ou ce qu'on appelle l'affaiblissement du parcours par cette équation :

$$g_{ij} = d_{ij}^{-n} \quad (5.1)$$

où :  $d_{ij}$  est la distance physique entre les nœuds  $i$  et  $j$  et  $n$  est l'index d'affaiblissement de parcours.

La diffusion (broadcast) représente une caractéristique importante du médium radio. Lorsqu'un nœud envoie un message, un ensemble de nœuds qui sont dans sa portée de transmission le reçoit. Par contre, un nœud donné ne peut communiquer qu'avec les nœuds dont il est dans la portée de transmission. Cette portée est considérée circulaire et centrée sur le nœud émetteur. Généralement, plus la portée des nœuds est grande, plus la puissance nécessaire est grande. Augmenter la portée implique aussi augmenter la probabilité d'interférence et le taux de collision. Notre objectif consiste à adapter les portées et les puissances de transmission des nœuds afin d'assurer une consommation d'énergie minimale tout en gardant la connectivité du réseau.

D'une manière générale, pour qu'un nœud  $i$  puisse communiquer avec un nœud  $j$  donné, il faut que la distance qui les sépare soit inférieure à la portée de transmission. Cette condition a été développée dans le travail de [29]. En effet, pour un nœud qui transmet avec une puissance  $p$  inférieure à une puissance maximale  $P$ , la portée de transmission  $R_T(p)$  est donnée par cette relation :

$$R_T(p) = \left(\frac{p}{P}\right)^{\frac{1}{n}} R_T^{max} \quad (5.2)$$

où  $R_T^{max}$  est la portée de transmission de nœud quand il transmet à la puissance maximale  $P$ .

Si on note  $p_{ij}^k$  la puissance de transmission du nœud  $i$  vers le nœud  $j$  en utilisant un canal  $k$  qui doit être inférieure à la puissance maximale  $P$ , la condition de transmission est :

$$d_{ij} \leq R_T(p_{ij}^k) = \left(\frac{p_{ij}^k}{P}\right)^{\frac{1}{n}} R_T^{max} \quad (5.3)$$

L'équation (5.3) permet de déduire la condition de transmission avec succès entre deux nœuds :

$$p_{ij}^k \in \left[ \left(\frac{d_{ij}}{R_T^{max}}\right)^n P, P \right] \quad (5.4)$$

### 5-2-1-2 Conditions d'interférence

Comme nous l'avons déjà présenté dans la section précédente, définir la portée de transmission d'un nœud donné permet de déterminer la puissance requise qui lui permet de communiquer avec d'autres nœuds avec succès. Si un nœud émet à une puissance très élevée, il pourrait empêcher d'autres nœuds de communiquer puisqu'ils émettent dans la même bande de fréquence. Donc, chaque utilisateur peut être considéré comme une source d'interférence pour les autres, ce qui dégrade fortement la qualité de canal de transmission. Notre objectif dans cette section est de lutter contre ce phénomène en mettant en œuvre un mécanisme qui permette aux nœuds d'ajuster leur puissance de transmission pour limiter les interférences.

Nous pourrions utiliser de la même manière que pour la condition de transmission la modélisation pour déterminer la condition d'interférence [29]. On suppose que la puissance de l'interférence n'est pas négligeable si elle dépasse un certain seuil. La portée de l'interférence notée  $R_I(p)$  pour un nœud qui transmet avec une puissance  $p$  inférieure à une puissance maximale  $P$  est donnée par la relation suivante :

$$R_I(p) = \left(\frac{p}{P}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot R_I^{max} \quad (5.5)$$

où :  $R_I^{max}$  est la portée maximale de l'interférence pour une transmission à une puissance maximale P.

Supposons maintenant qu'un nœud a interfère avec le nœud j en utilisant un canal k. Pour que le lien  $i \rightarrow j$  n'interfère pas avec le lien  $a \rightarrow b$ , il faut que la distance qui sépare les nœuds a et j soit supérieure à la portée de transmission de nœud a quand il communique avec un certain nœud b en utilisant le canal k. On peut traduire ça en utilisant l'équation (5.5). Donc, la contrainte d'interférence peut être exprimée de cette manière :

$$d_{ja} \geq R_I(p_{ab}^k) = \left(\frac{p_{ab}^k}{P}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot R_I^{max} \quad (a \in I_j^k, a \neq i, b \in T_a^k) \quad (5.6)$$

où  $I_j^k$  est l'ensemble des nœuds qui peuvent interférer avec le nœud j en utilisant canal k et  $T_j^k$  l'ensemble des nœuds qui peuvent communiquer avec le nœud j en utilisant canal k.

L'équation (5.6) nous permet de reformuler la condition d'interférence sous cette forme :

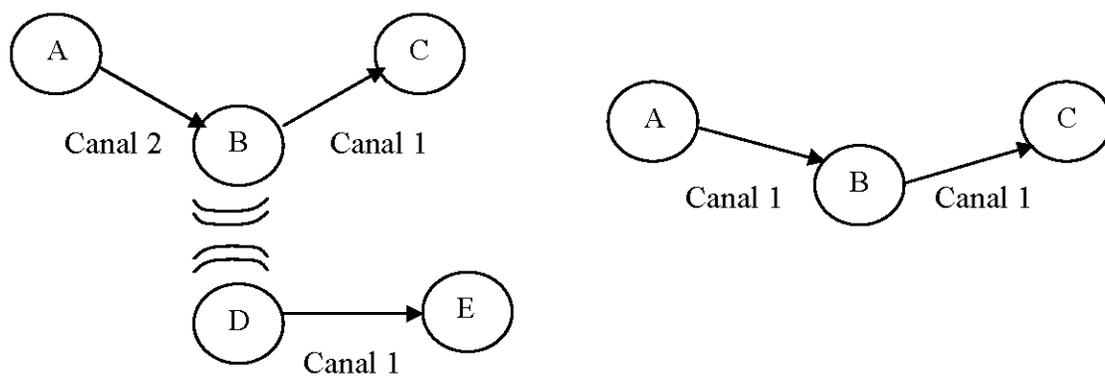
$$p_{ab}^k \leq \left(\frac{d_{aj}}{R_I^{max}}\right)^n P \quad (a \in I_j^k, a \neq i, b \in T_a^k) \quad (5.7)$$

### 5-2-1-3 Affectation de canaux

Un autre objectif qu'on a fixé pour notre modèle est d'assurer la bonne affectation de canaux. Le problème d'affectation des canaux pour les réseaux sans fil maillés peut être défini de la manière suivante : étant donné un ensemble de n nœuds et un nombre fini de canaux, on veut affecter à chaque nœud une quantité précise de

canaux, en minimisant les interférences et en augmentant la capacité du réseau. Les interférences, comme on l'a vu dans la section précédente, peuvent être résultat d'une puissance de transmission élevée entre nœuds. Ils peuvent être aussi causés par la mauvaise gestion de canaux. L'exemple de la figure 5.1 explique la problématique de mauvaise gestion de canaux. À la figure 5.1 (a), les nœuds B et D utilisent même canal de communication et se trouvent dans le même rayon d'interférence ce qui peut causer ce qu'on appelle l'interférence inter-flux. À la figure 5.1 (b), les liens A--->B et B--->C opèrent sur même canal dans un même rayon d'interférence et seul un de ces liens peut être actif à la fois. Les nœuds A et B ne peuvent pas émettre en même temps. Ce phénomène appelé intra-flux réduit la moitié de la bande passante disponible sur le chemin A---B---C [49]. Une solution pour régler ce problème est d'utiliser différents canaux sur un même chemin. Donc la solution multi-canaux est envisagée. Afin de modéliser notre problématique d'affectation de canaux, on introduit la variable binaire  $y_{ij}^k$  :

$$y_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si le canal } k \text{ est affecté au lien } i \rightarrow j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$



(a) Interférence inter-flux

(b) Interférence intra-flux

Figure 5.1 : Interférence entre les nœuds

Pour résoudre la problématique illustrée sur la figure 5.1(b), on va définir la première contrainte d'affectation de canaux qui permet généralement d'affecter un canal  $k$  au plus à un seul lien en nœud  $m$ . Cela, on peut l'exprimer comme :

$$\sum_{j \in T_m^k} y_{mj}^k + \sum_{m \in T_i^k} y_{im}^k \leq 1 \quad (5.8)$$

En ce qui concerne la figure 5.1(a), on cherche à définir une contrainte qui permet l'attribution optimale de canaux en prenant compte le paramètre de puissance d'interférence. En pratique, la puissance de transmission peut être ajustée en un nombre fini de niveaux de puissance de 0 jusqu'à une puissance maximale  $P$ . On introduit donc la variable  $Q$  qui présente le nombre de niveaux de puissance que le transmetteur peut ajuster :  $0, \frac{1}{Q}P, \frac{2}{Q}P \dots, P$ . On note  $q_{ij}^k$  l'entier qui présente le niveau de puissance pour  $p_{ij}^k$  :

$$p_{ij}^k = \frac{q_{ij}^k}{Q} P \quad (5.9)$$

Donc les conditions (5.4) et (5.7) de transmission et d'interférence s'écrivent :

$$q_{ij}^k \in \left[ \left( \frac{d_{ij}}{R_T^{\max}} \right)^n Q, Q \right] \quad (5.10)$$

$$q_{ab}^k \leq \left( \frac{d_{aj}}{R_I^{\max}} \right)^n Q \quad (a \in I_j^k, a \neq i, b \in T_a^k) \quad (5.11)$$

En utilisant (5.10), la puissance minimale requise pour transmission avec succès est donnée par:

$$q_{ij}^k(T) = \left( \frac{d_{ij}}{R_T^{\max}} \right)^n Q \quad (5.12)$$

De la même manière, la puissance maximale pour ne pas avoir l'interférence est donnée par:

$$q_{ij}^k(I) = \left(\frac{d_{ij}}{R_I^{max}}\right)^n Q \quad (5.13)$$

À l'aide des relations (5.12) et (5.13), on peut définir la deuxième contrainte d'affectation de canaux qui modélise la problématique de la figure 5.1 (a). Cela consiste à attribuer un canal pour relier deux nœuds donnés  $i$  et  $j$  de manière à ce que ce canal ne soit pas partagé par un autre lien qui peut interférer le lien  $i$ - $j$ . On peut exprimer cette contrainte par l'inégalité suivante :

$$y_{ij}^k + \sum_{k \in K_e \cap K_f} y_{ef}^k \leq 1 \quad (5.14)$$

Où :  $q_{ef}^k(T) \geq \min(q_{ei}^k(I), q_{ej}^k(I), q_{fi}^k(I), q_{fj}^k(I))$

#### 5-2-1-4 Modélisation de trafic et connectivité

On a vu dans les sections précédentes que le contrôle de puissance et la bonne assignation de canaux permettent de réduire les interférences et d'économiser l'énergie. Cependant, il est indispensable que chaque nœud puisse joindre n'importe quel autre nœud de réseau et assurer la connectivité globale de réseau. Ce qui n'est pas nécessairement réalisable en se basant seulement sur les contraintes déjà définies de notre modèle. En effet, on peut avoir dans certains cas un graphe de connectivité non connexe (Figure 5.2 (b)).

La modélisation classique du problème de la connectivité dans les réseaux de télécommunication utilise la notion de flot. Généralement, un flot correspond à la circulation et l'acheminement d'un flux physique sur un réseau depuis une source  $s$  vers une destination  $t$ .

Dans cette section, une approche sera proposée afin d'assurer la connectivité dans le réseau sans fil maillé de manière à ce que notre graphe de connectivité soit connexe (Figure 5.2(a)). L'idée est de construire un arbre dit "arbre de connectivité" en se basant sur les contraintes de flot de connexion. Ainsi, ces contraintes vont être ajoutés aux celles d'affectation de canaux et d'interférences et de transmission avec succès pour former notre modèle général d'optimisation.

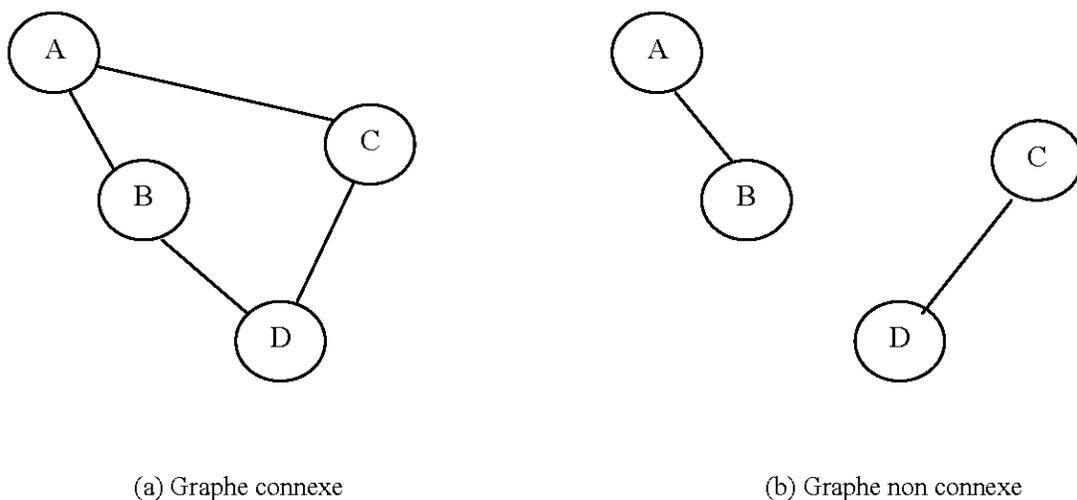


Figure 5.2 : Graphes d'un réseau

Notons  $x(i,j)$  le flux de connexion qui passe de nœud  $i$  vers le nœud  $j$ , et les ensembles  $E^-(i)$  et  $E^+(i)$  qui représentent les arcs entrants de  $i$  et sortant de  $i$  respectivement. Si on a un réseau de  $n$  nœuds, le premier nœud 1 aura au plus  $n-1$  demandes de connexion. Donc pour tous les nœuds  $j$  voisins de nœud 1 on a :

$$\sum_j x(1,j) \leq n - 1 \quad (5.15)$$

Pour un nœud  $k \neq 1$  qui demande une connexion au nœud 1, la loi de conservation de flux s'écrit :

$$\sum_{i \in E^-(k)} x(i, k) = 1 + \sum_{j \in E^+(k)} x(k, j) \quad (5.16)$$

La prochaine contrainte permet d'établir une certaine correspondance entre les nœuds qui sont connectés et les liens radio. Autrement dit, si un lien radio (i,j) est utilisé ( $\sum_{j \in T_i^k} y_{ij}^k > 0$ ) alors le flux doit y passer ( $x(i,j) + x(j,i) \geq 0$ ). On peut exprimer cette contrainte par cette égalité :

$$\sum_{j \in T_i^k} y_{ij}^k \leq x(i, j) + x(j, i) \quad (5.17)$$

De la même manière, si le flux passe par un lien (i, j) alors ce lien doit être utilisé comme lien radio. Logiquement si  $x(i,j) + x(j,i) > 0$  alors  $\sum_{j \in T_i^k} y_{ij}^k > 0$ . Comme  $x(i,j) + x(j,i)$  pourrait être aussi grand que n-1 et  $y_{ij}^k$  peut être égale au plus 1, on doit multiplier par n-1 donc :

$$x(i, j) + x(j, i) \leq (n - 1) \times \sum_{j \in T_i^k} y_{ij}^k \quad (5.18)$$

#### 5-2-1-5 Formulation de problème

Lorsqu'un nœud utilise une certaine bande pour transmettre les données, il doit occuper un certain spectre et espace. Un spectre et un espace représentent un coût à payer pour la communication. Pour cela, une métrique a été proposée qui représente ce coût nommé "Bandwidth-footprint product (BFP)". Quand un nœud utilise une certaine bande pour la transmission, le BFP est égal au produit de la bande passante à la zone d'interférence correspondant à sa puissance de transmission. Cette métrique caractérise le spectre et l'occupation spatiale pour un réseau sans fil. Si un nœud i transmet les données à un nœud j avec une puissance  $p_{ij}^k$  avec k une bande de fréquence, alors le BFP est :

$$W \cdot \pi \cdot R_i (p_{ij}^k)^2$$

avec  $W$  la bande passante et  $R_I$  la portée maximale d'interférence.

La fonction objective [29], basée sur la métrique BFP, s'exprime comme

$$\text{Min } \sum_i \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in T_i^k} W \left( \frac{q_{ij}^k}{Q} \right)^{\frac{2}{n}} \quad (5.18)$$

et elle a été utilisée pour un problème d'optimisation de puissance et d'ordonnement de fréquence. Par contre, elle rend le modèle d'optimisation non linéaire. Généralement, les modèles non linéaires sont difficiles à résoudre et nécessitent des techniques de relaxation afin de trouver la bonne solution. Notre approche consiste à modifier cette fonction objective afin de la rendre linéaire. Pour cela, on choisit  $q_{ij}^k$  comme le niveau minimum pour une transmission avec succès, i.e.  $q_{ij}^k(T)$ . Pour caractériser l'utilisation de canal, on multiplie par  $y_{ij}^k$ , donc notre nouvelle fonction objective à minimiser est :

$$\text{Min } \sum_i \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in T_i^k} W \left( \frac{q_{ij}^k(T)}{Q} \right)^{\frac{2}{n}} \cdot y_{ij}^k \quad (5.19)$$

En se basant sur les contraintes de contrôle de puissance, d'affectation de canaux et de connectivité. Notre modèle d'optimisation proposé s'écrit ainsi :

$$\text{Min } \sum_i \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in T_i^k} W \left( \frac{q_{ij}^k(T)}{Q} \right)^{\frac{2}{n}} \cdot y_{ij}^k \text{ Avec : } q_{ij}^k(T) = \left( \frac{d_{ij}}{R_T^{\max}} \right)^n Q$$

$$\sum_{j \in T_m^k} y_{mj}^k + \sum_{m \in T_i^k} y_{im}^k \leq 1$$

$$y_{ij}^k + \sum_{k \in K_e \cap K_f} y_{ef}^k \leq 1 \quad q_{ef}^k(T) \geq \min(q_{ei}^k(I), q_{ej}^k(I), q_{fi}^k(I), q_{fj}^k(I))$$

$$q_{ij}^k(I) = \left( \frac{d_{ij}}{R_I^{\max}} \right)^n Q$$

$$\sum_j x(1, j) \leq n - 1$$

$$\sum_{i \in E^-(k)} x(i, k) = 1 + \sum_{j \in E^+(k)} x(k, j)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in T_i^k} y_{ij}^k &\leq x(i,j) + x(j,i) \\ x(i,j) + x(j,i) &\leq (n-1) \times \sum_{j \in T_i^k} y_{ij}^k \\ y_{ij}^k &\in \{0,1\} \end{aligned}$$

### 5-2-2 Modèle de capacité

Le routage et la capacité sont deux paramètres reliés. En effet, les performances d'un protocole de routage peuvent être améliorées si la capacité qui en résulte peut être déterminée. La topologie du réseau, le partage des ressources et les interférences radio sont des grands facteurs qui influencent la capacité de réseaux sans fil maillés. Dans cette section, un modèle d'optimisation de capacité pour les réseaux sans fil maillés sera présenté en prenant en compte tous ces facteurs. Notre objectif est de maximiser le nombre de liens qui sont actifs simultanément.

D'après [29], si un nœud  $i$  veut communiquer avec un autre nœud  $j$  en utilisant le canal  $k$  avec un seuil de transmission  $\alpha$  alors la condition de transmission peut être écrite de cette manière :

$$p_{ij}^k \geq (d(i,j))^n \cdot \alpha \quad (5.20)$$

De la même manière, une transmission d'un nœud  $i$  en utilisant un canal  $k$  peut causer une interférence au nœud  $c$  qui communique avec un certain nœud  $t$  en utilisant même canal  $k$  avec si :

$$p_{ij}^k \geq (d(i,c))^n \cdot \beta \quad (5.21)$$

À partir de relations (5.20) et (5.21), on peut déduire que la communication entre les deux nœuds  $i$  et  $j$  peut causer d'interférence au nœud  $c$  si cette condition est vérifiée :

$$(d(i,j))^n \cdot \alpha > (d(i,c))^n \cdot \beta \quad (5.22)$$

Comme on l'a déjà vu au chapitre dernier, le problème majeur des réseaux sans fil maillés est la présence d'interférences spatiales entre les communications. Une conséquence directe de ces interférences est la réduction de la capacité. Afin de maximiser la capacité d'un réseau sans fil maillé dont nous connaissons le placement de ses nœuds, nous allons chercher à allouer les canaux d'une manière optimale. Cette affectation subit aux contraintes d'interférences produites autour de nœud émetteur. En effet, deux transmissions simultanées doivent être suffisamment éloignées. Cette contrainte on peut l'exprimer en se basant sur (5.22) : si un nœud  $i$  transmet les données au nœud  $j$  en utilisant le canal  $k$ , aucun nœud  $m \neq i$  qui est proche de nœud  $i$  ne peut utiliser ce même canal  $k$ , cela on peut le traduire par cette équation :

$$y_{ij}^k + \sum_{k,m,h} y_{mh}^k \leq 1 \text{ et } \forall m \neq i : d(m,j) < d(i,j) \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.23)$$

En rajoutant la contrainte (5.8), notre modèle de capacité qui permet de maximiser le nombre de liens actifs simultanément est donné par :

$$\text{Max} \sum_{i,j,k} y_{ij}^k$$

$$\sum_k y_{ij}^k \leq 1$$

$$y_{ij}^k + \sum_{k,m,h} y_{mh}^k \leq 1 \text{ et } \forall m \neq i : d(m,j) < d(i,j) \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$y_{ij}^k \in \{0,1\}$$

### 5-3 Conclusion

En résumé, ce chapitre présente deux modèles d'optimisation pour améliorer les performances de réseaux sans fil maillés. Le premier modèle permet le contrôle de puissance et l'affectation de canaux et d'assurer la connectivité. La fonction objective à maximiser représente la somme de métrique BFP qui caractérise à la fois l'utilisation de spectre et la puissance de transmission pour un canal donné. Les contraintes sont définies de manière à garantir la transmission sans interférence et assurer la connectivité. Le deuxième modèle s'intéresse à l'optimisation de la capacité en maximisant le nombre de liens actifs simultanément. Dans ce modèle, l'allocation de canaux est faite d'une manière optimale afin de réduire les interférences. Les deux modèles sont de type "programmation linéaire en nombre entier" qui peut être résolu en utilisant l'algorithme de Branch and Bound. Le chapitre qui suit représente des simulations pour analyser les performances de ces modèles d'optimisation.

## CHAPITRE 6

### SIMULATION ET RÉSULTATS

#### 6-1 Introduction

Dans ce chapitre nous testons, par simulation, les performances des modèles d'optimisation cités au chapitre précédent et retenus pour notre étude. Nous vérifions aussi qu'ils répondent à nos objectifs, soit l'économie d'énergie, la réduction des interférences, l'amélioration de la capacité et une assignation optimale des canaux. Les simulations sont réalisées avec le logiciel commercial [50] utilisé pour résoudre les problèmes de programmation en nombre entier. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la méthodologie de simulation et, par la suite, nous montrons les résultats de nos simulations. Ces dernières prouvent que nos modèles sont efficaces en termes de contrôle de puissance, d'affectation des canaux, de connectivité et de capacité.

#### 6-2 Méthodologie de simulation

##### 6-2-1 Description de logiciel

La simulation est réalisée avec le logiciel LINGO version 13. Sa syntaxe est très structurée en utilisant des arrobas @ qui signalent les opérateurs et les fonctions mathématiques du langage. Il permet aussi de manipuler les programmes non linéaires. Pour marquer le début et la fin d'un algorithme sur LINGO, on utilise respectivement DATA et ENDDATA. Toute ligne sur un programme LINGO doit se terminer par un point virgule.

### 6-2-2 Méthode et paramètres de simulation

On suppose qu'on a 10 canaux disponibles, générés aléatoirement avec une bande  $BW = 20$  Hz pour chacun de ces canaux. L'index d'affaiblissement de parcours est fixé à la valeur  $n=4$ . La portée de transmission maximale et la portée maximale d'interférence sont données respectivement par :  $R_T^{\max} = 15$  m,  $R_I^{\max} = 20$  m.

Dans un premier temps, on va générer un code Matlab pour trois topologies aléatoires composées de 10 nœuds dans une surface de  $30 \times 30$  m<sup>2</sup>. Nous nous intéressons à l'étude de la variation de différentes solutions données par notre modèle pour ces topologies. Ensuite, nous comparons ces solutions avec celles de [29]. Un schéma illustrant la répartition des canaux selon le positionnement des nœuds sera également présenté. On va étudier aussi la variation du nombre de canaux utilisés en fonction de différentes solutions de notre modèle ainsi que l'effet de la portée de transmission maximale sur ces solutions selon différentes valeurs de niveaux de puissance maximale. Finalement, nous évaluons notre deuxième modèle qui permet de maximiser le nombre de liens actifs simultanément en se basant sur les contraintes de puissance de transmission et d'interférence.

### 6-3 Résultats numériques et analyse

La première étape de la simulation consiste à étudier l'impact du positionnement de nœuds sur la solution du problème. Les trois topologies générées sur Matlab sont illustrées aux figures 6.1, 6.2 et 6.3. À la figure 6.4, nous traçons la variation de solution obtenue en fonction de niveau maximal de puissance  $Q$  pour ces trois topologies. La valeur de  $Q=1$  correspond à l'absence de contrôle de puissance.

Nous remarquons que pour les trois courbes, la fonction représentative de la solution est décroissante. Cela montre que notre modèle permet de réduire l'énergie. On constate aussi que la topologie 2 est celle qui a plus d'économie d'énergie suivie

de la topologie 1 et la topologie 3. En effet, la topologie 2 permet de réaliser une réduction de 32% par rapport à la topologie 3 et 21% par rapport à la topologie 1. Cela est dû à la densité forte de la topologie 2 par rapport aux autres topologies. La forte densité pour la topologie 2 signifie aussi l'augmentation de nœuds voisins. Cette augmentation permet d'améliorer les performances du réseau et d'avoir une grande probabilité de trouver des routes non congestionnées pour la transmission de données.

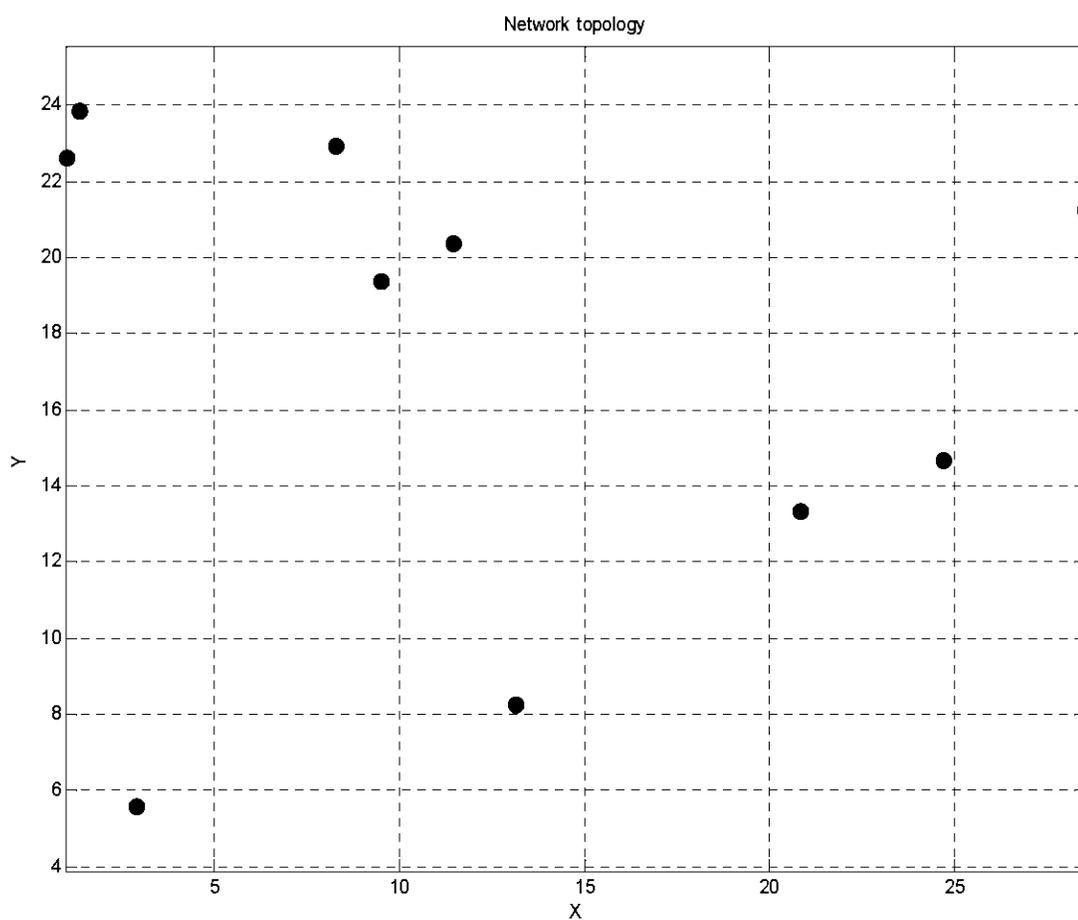


Figure 6.1 : Topologie 1

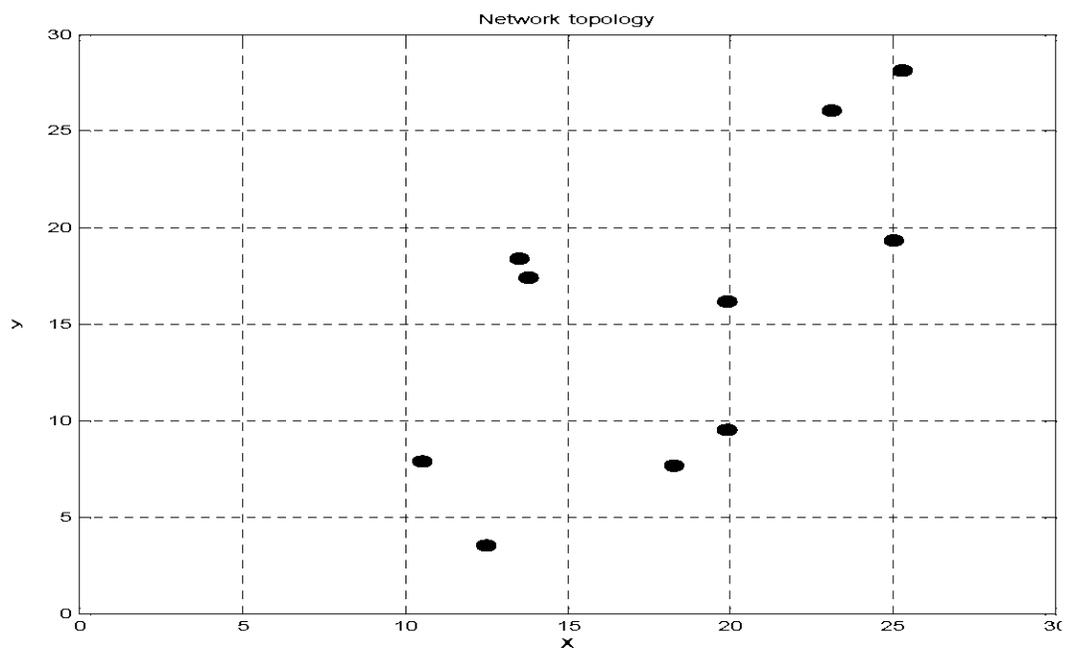


Figure 6.2 : Topologie 2

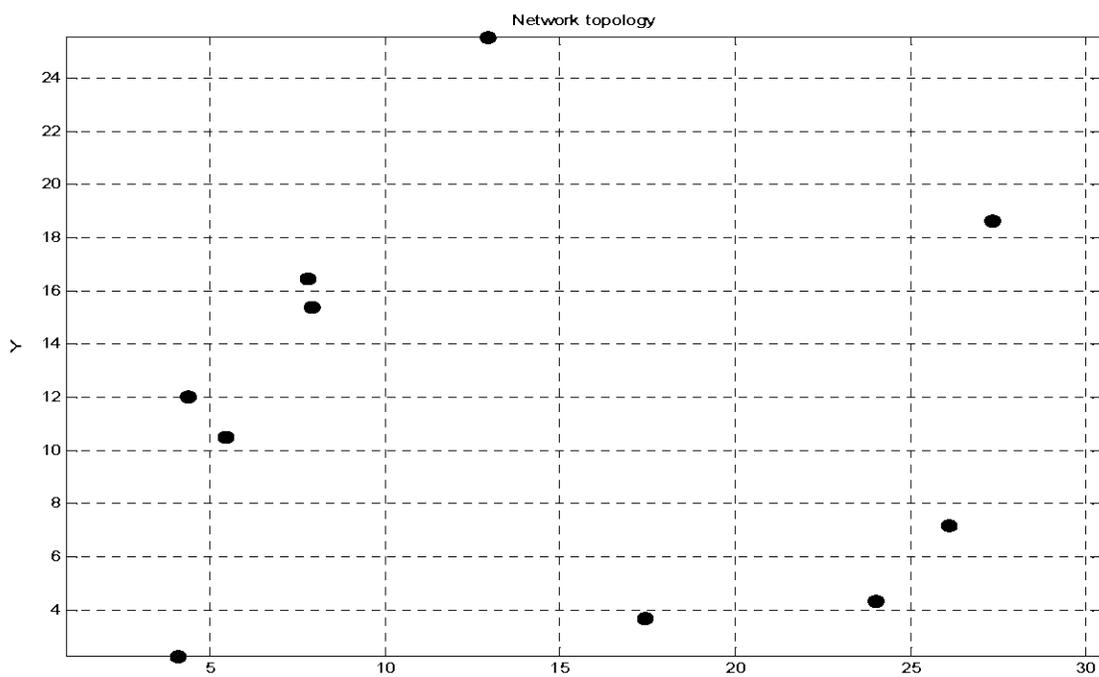


Figure 6.3 : Topologie 3

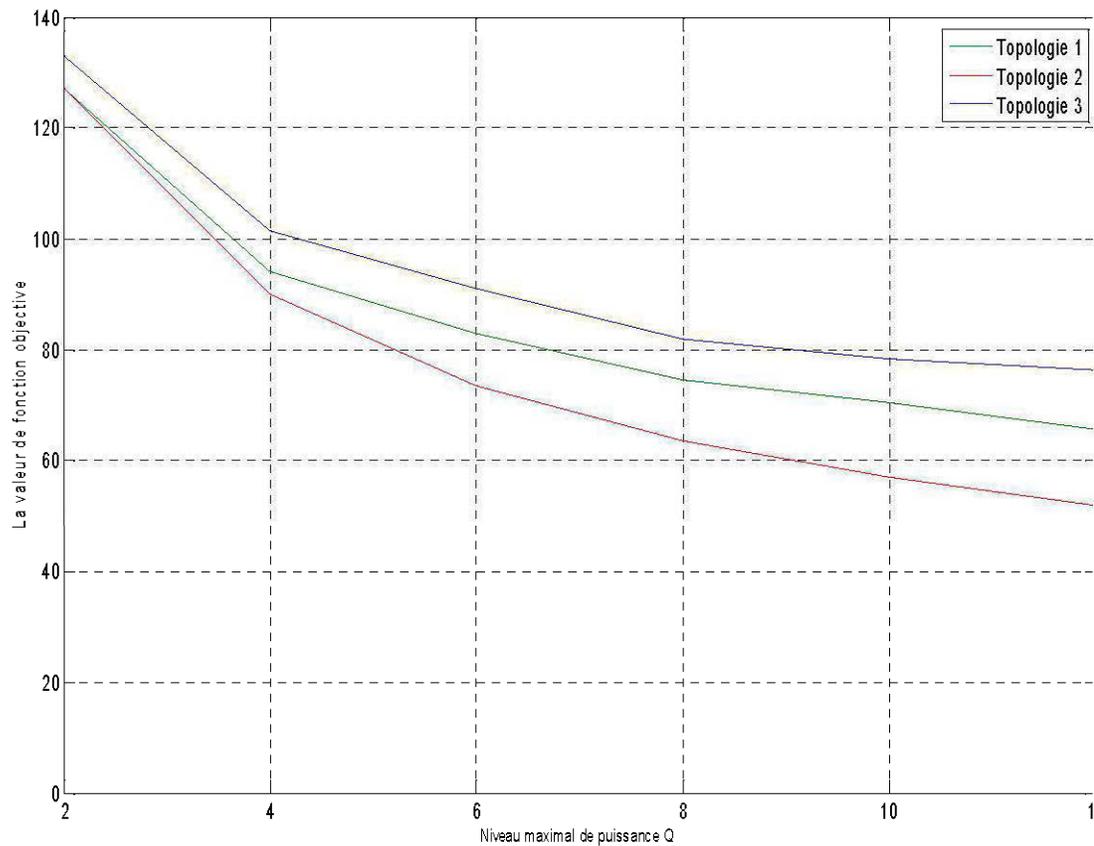


Figure 6.4 : Variation de la solution selon les différentes valeurs de niveau maximal de puissance pour les trois topologies

Le tableau 6.1 compare la solution de notre modèle avec celle de [29] selon différentes valeurs de  $Q$  pour la topologie 2. On constate que les deux modèles donnent des mêmes solutions selon les différentes valeurs de niveau maximal de puissance. Par contre, le temps de simulation est différent d'un modèle à l'autre. Cela est dû à la nature de ces modèles. Le premier est de type non linéaire avec deux variables, le deuxième est linéaire avec une seule variable. Ainsi, le temps d'exécution pour le premier est plus grand que celui du deuxième.

Modèle de [29]		Notre Modèle		Niveau maximal de puissance Q
Temps de simulation en secondes	Solution optimale	Temps de simulation en seconde	Solution optimale	
5200 s	127,27	1022s	127,27	2
265 s	94,14	218s	94,14	4
161 s	83,63	15s	83,63	6
215 s	80,53	12s	80,53	8
26 s	74,03	6 s	74,03	10

Tableau 6.1 : Le temps de simulation pris pour différentes valeurs de niveau de puissance dans le cas des deux modèles

La figure 6.5 montre le résultat de contrôle de puissance et d'affectation de canaux pour la topologie 2 avec la valeur de  $Q=10$ . Ainsi on a :  $y_{13}^1=1, y_{910}^1=1, y_{67}^2=1, y_{47}^3=1, y_{12}^4=1, y_{78}^4=1, y_{34}^5=1, y_{89}^7=1, y_{57}^9=1. q_{13}^1(T)=1, q_{910}^1(T)=1, q_{67}^2(T)=1, q_{47}^3(T)=1, q_{12}^4(T)=3, q_{78}^4(T)=1, q_{34}^5(T)=1, q_{89}^7(T)=1, q_{57}^9(T)=1.$

On voit bien que le réseau est connecté de manière à ce que chaque nœud soit relié à un nœud voisin pour former un graphe connexe tout en respectant les contraintes d'interférence pour l'affectation de canaux. Par exemple, le nœud 1 est connecté aux deux nœuds voisins 2,3. De plus, les liens (1,2) et (1,3) ne partagent pas même canal et ils utilisent respectivement les canaux 4 et 1, donc la contrainte d'interférence pour l'affectation de canaux (5.8) de notre modèle est respectée. Le nœud 7 permet de relier ses nœuds voisins 5, 6, 4,8. D'autre part, on a :

$$q_{13}^1(T)=1, q_{19}^1(I)=14,90, q_{110}^1(I)=24,60, q_{39}^1(I)=7,77, q_{310}^1(I)=13,13.$$

$$\text{Donc : } q_{13}^1(T) \leq \min(q_{19}^1(I), q_{110}^1(I), q_{39}^1(I), q_{310}^1(I))$$

D'après la contrainte (5.14), on déduit qu'il est possible de partager le canal 1 entre les deux liens (1,3) et (9,10). De la même manière, on peut prouver aussi que les deux liens (7,8) et (1,2) peuvent partager le canal 4. Ainsi, notre modèle assure la connectivité avec une bonne assignation de canaux sans interférence.

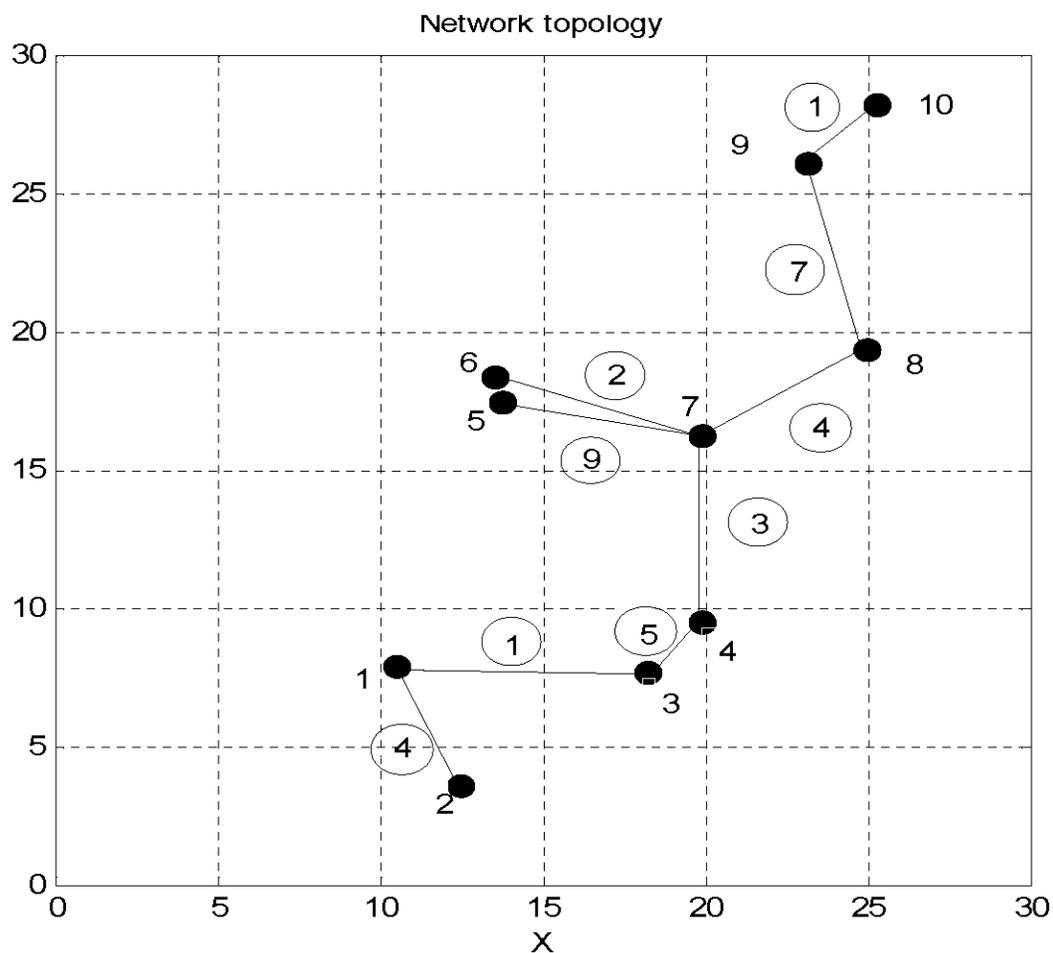


Figure.6.5 : La connectivité du réseau

La figure 6.6 est un graphe 3D qui montre la variation de nombre de canaux utilisés en fonction de niveau maximal de puissance  $Q$  et de solution optimale obtenue par notre modèle. Nous constatons qu'à partir de valeur  $Q=2$  jusqu'à  $Q = 4$ , le nombre de canaux utilisés passe de 9 à 8. Ces huit canaux sont utilisés de niveau  $Q = 4$  jusqu'à la valeur de  $Q=9$ . Ensuite, le nombre de canaux utilisés passe à 7 à partir de valeur  $Q=10$ . En parallèle, la fonction objective diminue de valeur 127,27 pour  $Q=2$  vers la valeur 51,96 qui correspond à  $Q=12$ . Cette tendance est simplement expliquée par le fait que plus on augmente la valeur de  $Q$ , plus il y a de liens dont les nœuds sont assez éloignés et ils peuvent partager le même canal sans causer d'interférence, ce qui permet de diminuer le nombre de canaux utilisés.

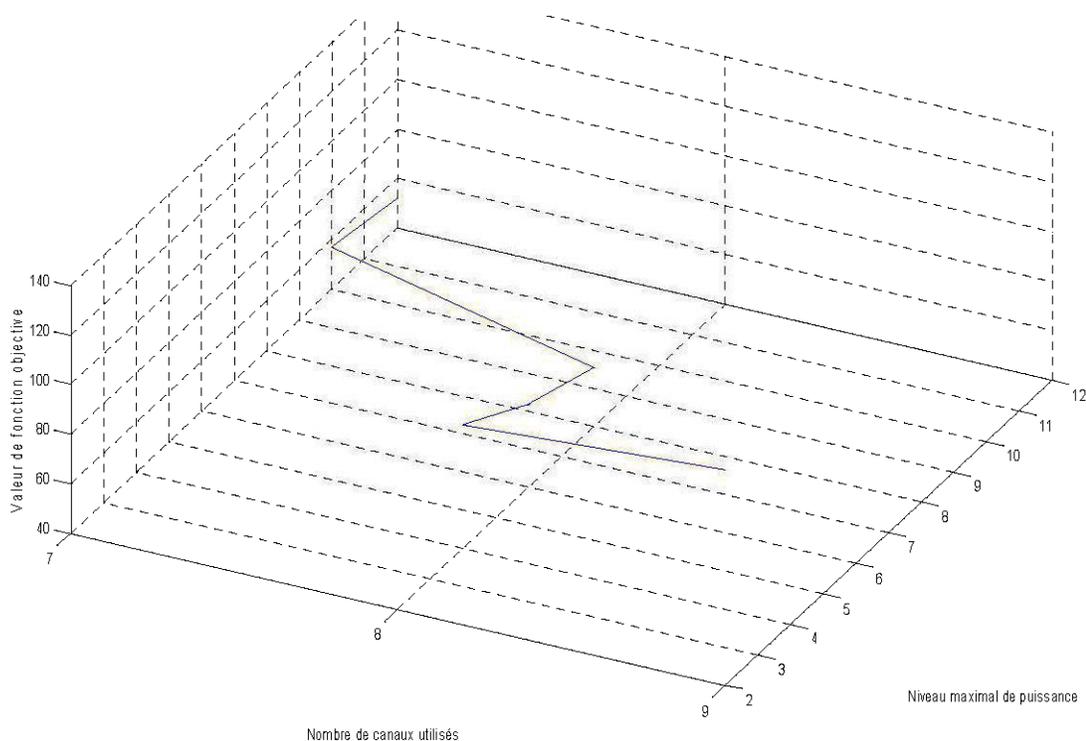


Figure.6.6 : La variation de nombre de canaux utilisés en fonction de niveau maximal de puissance et de solution optimale obtenue.

La simulation suivante permet d'étudier l'impact de la portée de transmission sur la solution optimale de notre modèle. On fixe le niveau maximal de puissance à la valeur de  $Q=10$  et on fait varier la portée de transmission. La figure 5.6 présente cette variation en fonction de notre solution optimale. On remarque qu'entre la valeur de  $R_T^{\max}=10$  m et  $R_T^{\max}=13$  m, la fonction de solution optimale décroît; ensuite, elle devient stable à partir de valeur de  $R_T^{\max}=14$  m. On peut traduire cette décroissance par le nombre important de nœuds voisins qui permettent d'avoir une forte densité. Cette densité, qui est définie en fonction de nombre de nœuds voisins directs au sein de la portée de transmission du nœud, a l'avantage d'acheminer les données rapidement avec une économie d'énergie, ce qui aboutit à la diminution de la valeur de solution optimale de notre modèle.

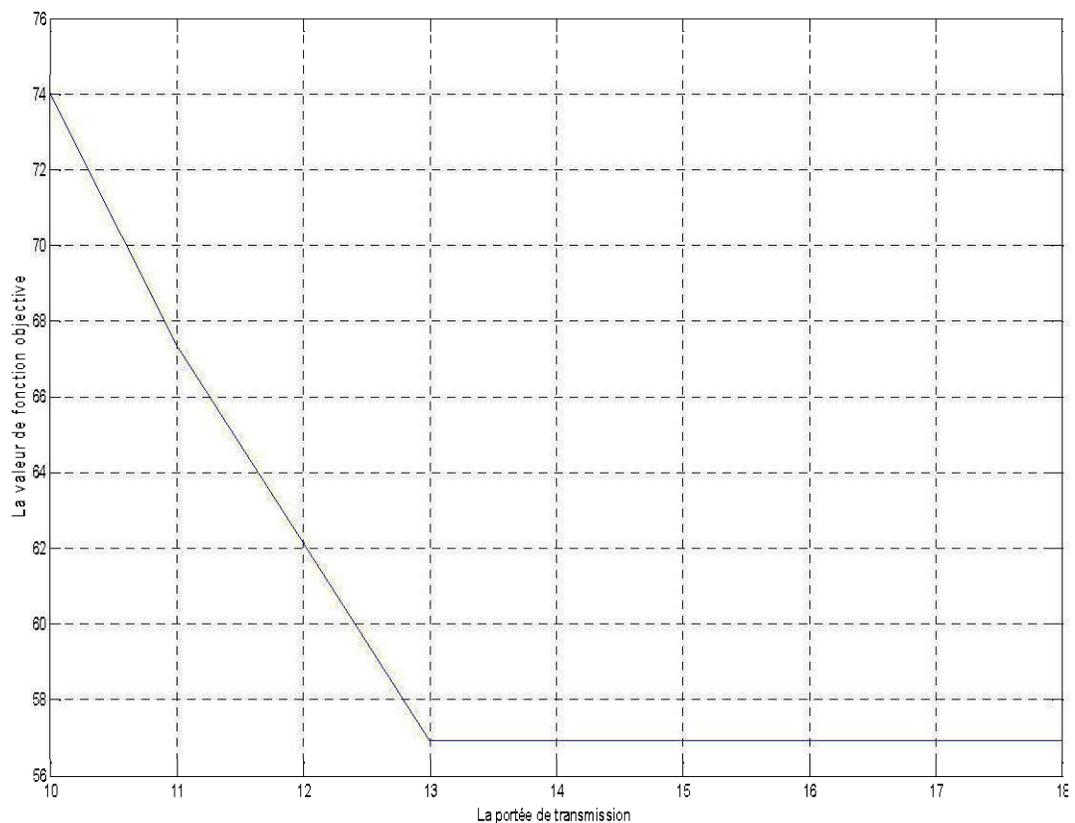


Figure.6.7 : Variation de la solution optimale en fonction de la portée de transmission.

La prochaine phase de notre simulation s'intéresse à l'évaluation du deuxième modèle qui permet d'étudier la capacité des réseaux sans fil maillés. La relation entre le seuil d'interférence  $\beta$  et le seuil de transmission  $\alpha$  [29] est définie ainsi :

$$\beta = \left(\frac{R_T^{max}}{R_I^{max}}\right)^n \times \alpha \quad (6.1)$$

On fixe la valeur de la portée d'interférence maximale  $R_I^{max}=20$  m et on fait varier la valeur de la portée de transmission maximale  $R_T^{max}$ . La figure 6.8 montre l'évolution du nombre maximal de liens qu'on peut activer simultanément en fonction de rapport de seuil de transmission  $\alpha$  par le seuil d'interférence  $\beta$  pour les trois topologies qu'on a générées précédemment.

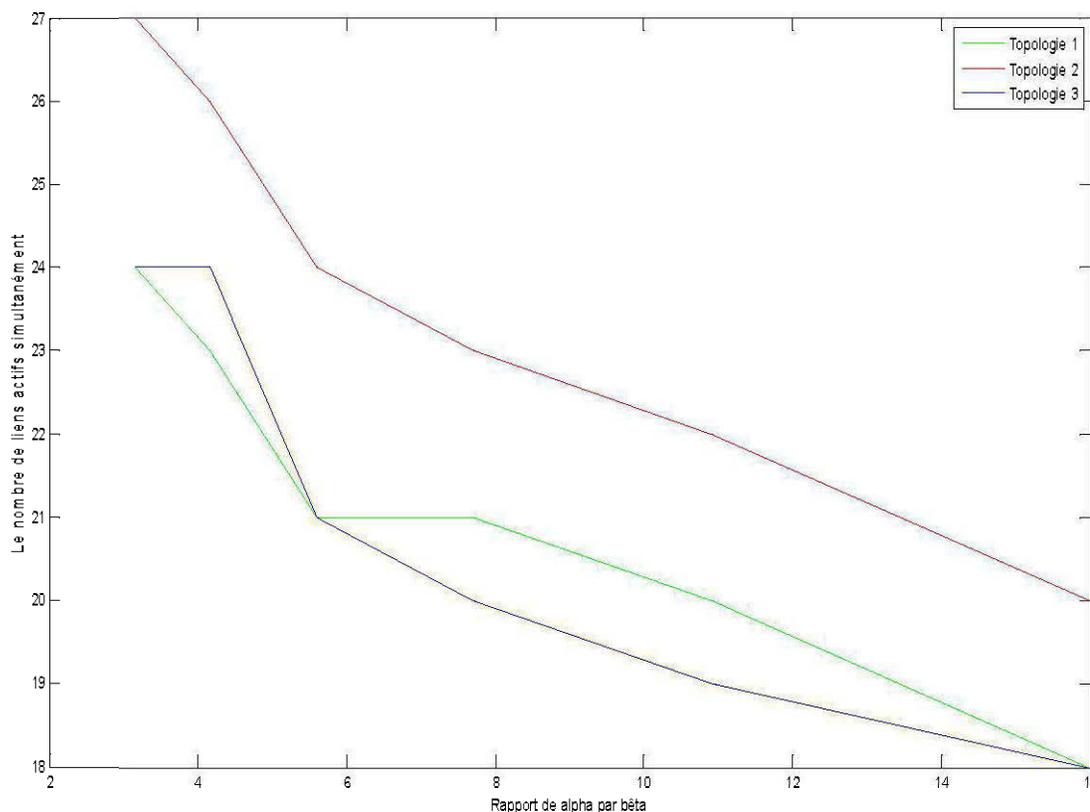


Figure.6.8 : L'évolution de nombre de liens actifs en fonction de rapport de seuil de transmission par le seuil d'interférence

Nous constatons que la courbe représentative du nombre de liens actifs simultanément est décroissante et que la topologie 2 est celle qui a le plus grand nombre de liens actifs. Cette diminution, on peut la justifier ainsi : en se basant sur la contrainte (5.23), quand le rapport d'alpha par bêta est grand, le nombre de liens actifs qui peuvent partager un même canal sans interférence diminue. De plus, la portée de transmission maximale devient plus petite. Ainsi, on a moins de liens actifs. La densité et le positionnement des nœuds ont un impact sur la capacité de réseau. En effet, plus on a une forte densité de nœuds plus le nombre de liens actifs augmente. On peut déduire qu'il existe une forte corrélation entre la capacité du réseau et le rapport de seuil de transmission par le seuil d'interférence.

Dans la dernière étape de simulation, on va tester notre modèle de capacité pour différent nombre de canaux. La figure 6.9 montre la variation de nombre maximal de liens actifs en fonction de nombre de canaux utilisés dans la topologie 2.

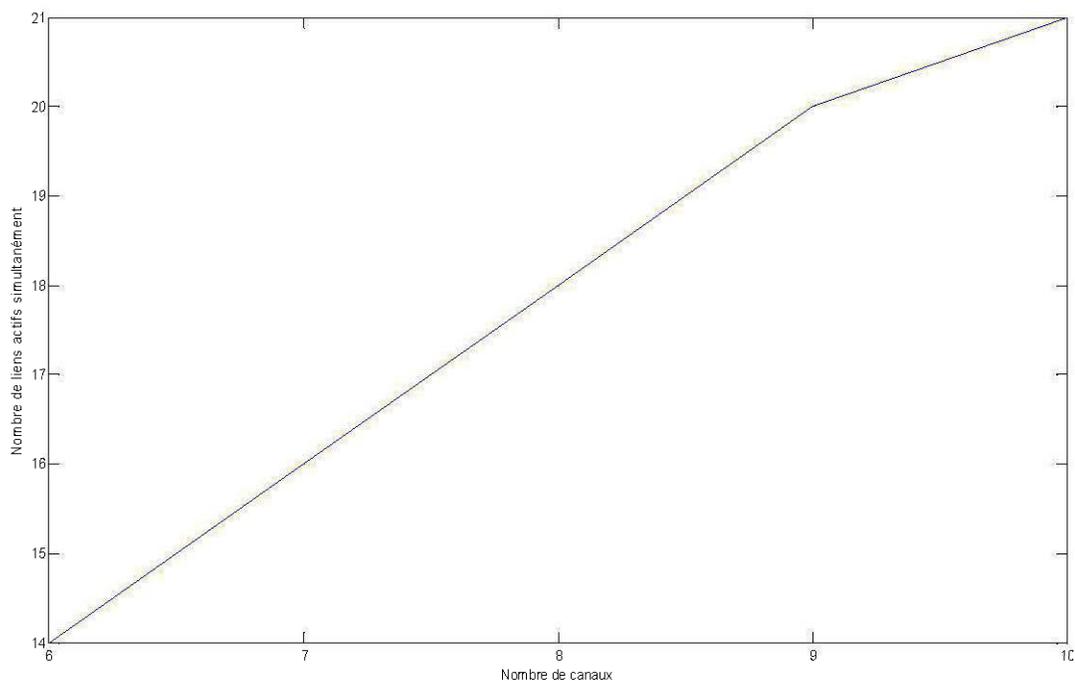


Figure.6.9 : L'évolution de nombre de liens actifs en fonction de nombre de canaux utilisés

Nous constatons que le nombre de liens actifs augmente quand le nombre de canaux est grand. La présence d'un nombre important de canaux permet de connecter le plus de liens possibles sans causer des interférences. Ainsi, le nombre de canaux utilisés reste un paramètre clé et déterminant pour la capacité de réseau sans fil maillé.

#### **6-4 Conclusion**

Le présent chapitre a fourni une évaluation de performances de nos deux modèles d'optimisation pour les réseaux sans fil maillés à savoir le modèle pour le contrôle de puissance, d'affectation de canaux et de connectivité et le modèle de capacité. Cette évaluation a été réalisée à l'aide d'un ensemble de simulation.

Les résultats de simulation ont montré que notre premier modèle est efficace en termes d'économie d'énergie et d'affectation de canaux et de garantie de connectivité globale de réseau. Plus précisément, ce modèle est plus performant pour une topologie plus dense. Le deuxième modèle de capacité nous permet d'activer le maximum de liens simultanément. L'efficacité de ce modèle dépend essentiellement du seuil de transmission et du seuil d'interférence. Le nombre de canaux utilisés a une grande influence sur la capacité de réseau sans fil maillé. En effet, plus on dispose de grand nombre de canaux, plus le nombre de liens actifs grandit et, par la suite, plus la capacité de réseau augmente.

## CONCLUSION

Suite au développement des technologies sans fil et le nombre croissant d'utilisateurs avec des applications qui demandent plus de ressources et de qualité de service. Il est devenu nécessaire, voire même indispensable, de recourir à une solution sans contrainte filaire et facile à déployer pour répondre à ces besoins. C'est dans ce cadre que les réseaux sans fil maillés ont été proposés pour répondre à ces attentes. La caractéristique qui distingue la technologie de réseaux sans fil maillés est sa topologie dynamique, qui lui permet d'être automatiquement auto-configurable. Cependant, quelques problèmes restent à résoudre comme la connectivité et l'affectation de canaux et contrôle de puissance et la capacité.

Ce rapport a abordé ces quatre problèmes dans les réseaux sans fil maillés. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux réseaux sans fil maillés en mettant l'accent sur leurs caractéristiques ainsi que les différentes architectures utilisées. Ensuite, nous avons introduit la qualité de service pour les réseaux sans fil maillés et les différentes techniques d'optimisation utilisées pour ce type de réseau. Notre problématique a été présentée dans le chapitre 5 en développant deux modèles d'optimisation en nombre entier. Le premier modèle se base sur un métrique appelé "Bandwidth-footprint product-BFP". En effet, nous avons développé des équations pour les conditions de transmission avec succès et d'interférence. Ces équations ont été introduites pour exprimer les contraintes d'assignation de canaux. Pour assurer la connectivité du réseau, des contraintes de flux de connexion ont été définies de manière à ce que chaque nœud soit connecté au nœud voisin le plus proche. La fonction objective à minimiser est inspirée de métrique BFP et elle est choisie pour exprimer à la fois la puissance minimale

utilisée pour la transmission et le canal utilisé. L'autre modèle a été également proposé pour maximiser le nombre de liens actifs dans le réseau, ceci afin d'optimiser la capacité de réseau sans fil maillé. Nous avons donné une description détaillée d'algorithme de Branch and Bound qui permet de donner une solution exacte de notre problème. Finalement, la simulation a été présentée pour montrer l'efficacité de nos modèles proposés en termes de consommation d'énergie, d'affectation de canaux et de connectivité et aussi la capacité.

Dans la continuité du travail présenté, nous pourrions approfondir notre étude en traitant l'aspect hétérogène où chaque technologie peut être affectée à un canal donné. Il sera pertinent d'étudier aussi l'effet de rapport signal à bruit SINR sur l'affectation de canaux et contrôle de puissance

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. L.Nemhauser and L. A. Wolsey, *Integer and Combinatorial Optimization*. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [2] L. Chen, *Wireless Mesh Networks (WMNs)* , Technical Report UIUCDCS-R-2006-2874, Dept. of Computer Science, UIUC, 2006.
- [3] <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/substation/>
- [4] S. Methley, *Essentials of Wireless Mesh Networking*. Cambridge University Press 2009.
- [5] BelAir Networks. *Wireless Mesh Interoperability for public safety*. White paper 2007.
- [6] Akyildiz, I.F, Wang, X. and Wang, W. *Wireless mesh networks: a survey*. Computer Networks, vol 47, no.4, pp 445-487, Mar.2005.
- [7] QoS Forum. *QoS protocols and architectures*. White paper of QoS Forum, <http://www.qosforum.com>, 1999.
- [8] Hanal Abu Zanat., *Modèles d'équité pour l'amélioration de la qualité de service dans les réseaux sans fil en mode Ad Hoc*. Thèse école centrale de Lille 2009.
- [9] S. Marwaha, J. Indulska, M. Portmann, *Challenges and Recent Advances in QoS Provisioning in Wireless Mesh Networks*. Computer and information technology, 2008. 8th IEEE conference .Sydney.NSW.
- [10] V. Kone, S. Das, B. Y. Zhao and H. Zheng, *Quality Of service Routing in wireless Mesh networks*, Proc. of IEEE Intl Conf on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QShine), 2007.
- [11] E.Z.Tragos, R.Bruno, E.Ancillotti, K.Grochla, *Automatically configured, optimised and QoS aware wireless mesh networks*. Personal Indoor and Mobile Radio Communications ,2010 IEEE 21<sup>st</sup> International Symposium, pp 2081-2086

- [12] O. Souihli, M. Frikha, M.B. Hamouda. *Load-balancing in MANET shortest-path routing protocols*. Ad Hoc Networks 2009; 7(2): 431-442.
- [13] P. Mudali, T.C. Nyandeni, N. Ntlatlapa, and M.O. Adigun. *Design and Implementation of a Topology Control Scheme for Wireless Mesh Networks*, AFRICON 2009, p 1-6.
- [14] K. Jain, J. Padhye, V. N. Padmanabhan, and L. Qiu, *Impact of interference on multi-hop wireless network performance*, in Proc. Of ACM Mobicom, pp.66-80, 2003.
- [15] Cook, S.A. (1971) *The complexity of theorem-proving procedures*. Proceedings of the third annual ACM symposium on Theory of computing. ACM, Shaker Heights, Ohio, United States, pp 151-158.
- [16] Li Ma,Guang-Xi Zhu,Bo-Yun Yin, *optimization models of multi-channel assignement in multi-radio wireless mesh networks*. Conference publication WICOM 2008, pp 1-5.
- [17] Bin Zhou, Zhifeng Zhao ,Aiping Huang, Qinpin Chen, *optimization models for static channel in multi-radio multi-channel wireless mesh networks*. Wireless Communications and Signal Processing. International conference 2009, pp 1-5.
- [18] Li Li, Chunyuan Zhang, *joint Channel width adaptation, topology control, and routing for multi-radio multi-channel wireless mesh networks*. Consumer Communications and Networking Conference, 2009, pp 1-5.
- [19] R. Koshy and R. Lu, *A Joint Radio and Channel Assignment (JRCA) Scheme for 802.11-Based Wireless Mesh Networks*, in Proceedings of IEEE GLOBECOM Workshops, 2009.pp 1-6.
- [20] H. M. Ali, A. Busso, and V. Veque,, *Channel assignment algorithms: a comparison of graph based heuristics*, in Proceedings of ACM PM2HW2N 2009, pp. 120–127, Oct. 2009.
- [21] A. Raniwala, K. Gopalan and T. Chiueh., *Centralized Channel Assignment and Routing Algorithms for Multichannel Wireless Mesh Networks*, in ACM of Mobile Computing and Communications Review, Vol.8, pp.50-65, 2004.
- [22] M. Marina and S. R. Das, *A Topology Control Approach for Utilizing Multiple Channels in Multi-Radio Wireless Mesh Networks*, in Proc. Of Broadnets, pp.381-390, 2005.

- [23] A. Rad and V. Wong, *Joint channel allocation, interface assignment and MAC design for multi-channel wireless mesh networks*, in Proc. Of IEEE Infocom, pp.1469-1477, 2007.
- [24] A. Raniwala, K. Gopalan, and T. Chiueh, *Centralized Channel Assignment and Routing Algorithms for Multichannel Wireless Mesh Networks*, ACM Mobile Comp. and Commun. Rev., Apr. 2004, pp. 50–65.
- [25] M. Marina and S. R. Das, *A Topology Control Approach for Utilizing Multiple Channels in Multi-Radio Wireless Mesh Networks*, Proc. Broadnets, Oct 2005, pp. 381–90.
- [26] J. So and N. Vaidya, *Multi-Channel MAC for Ad Hoc Networks: Handling Multi-Channel Hidden Terminals using a Single Transceiver*, Proc. ACM Mobihoc, 2004, pp. 222–33.
- [27] K. Ramachandran *et al.*, *Interference Aware Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks*, Proc. IEEE INFOCOM, Apr. 2006, pp 1-12.
- [28] P. Kyasanur and N. Vaidya, *Routing and Link-layer Protocols for Multi-Channel Multi-Interface Ad Hoc Wireless Networks*, in Mobile Computing and Communications Review, Vol.10, No.1, pp.31–43, 2006.
- [29] Yi Shi, *Member, IEEE*, Y. Thomas Hou, Huabei Zhou, *Per-Node Based Optimal Power Control for Multi-Hop Cognitive Radio Networks*. Wireless Communications, IEEE Trans, vol 8 no 10, pp 5290-5299, Oct 2009.
- [30] N.Botezatu ,R.Dhaou, *Adaptive Power Control in 802.11 Wireless Mesh Network* , WCE 2011, Vol II.
- [31] F. O. Aron, T. O. Olwal, A. Kurien and M. O. Odhiambo, *Energy Efficient Topology Control Algorithm for Wireless Mesh Networks*, Publication Year: 2008 , Page(s): 135 – 140
- [32] Mohamed Abou El Saoud, Hussein Al-Zubaidy, Samy Mahmoud ,*Connectivity Model for Wireless Mesh Networks*. IEEE conference, ICC 2008, pp 2889-2894.
- [33] M. Franceschetti and R. Meester, *Navigation in small world networks,a scale-free continuum model*, Preprint, Dept. of ECE, University of California, San Diego, 2004.
- [34] Gianluigi Ferrari, Ozan K. Tonguz,,*Minimum Number of Neighbors for Fully Connected Uniform Ad-hoc Wireless Networks*, IEEE Global Telecommunications

Conference (GLOBECOM'03), San Francisco, CA, December 2003, vol. 5, pp. 2824-2829.

[35] P. Gupta and P.R. Kumar, *Critical Power for Asymptotic Connectivity in Wireless Networks*, Stochastic Analysis, Control, Optimization and Applications, Boston: Birkhauser, pp. 547-566, 1998.

[36] Huang Chuan; Zheng Baoyu, *Connectivity in Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks*. Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2008. MSN 2008. The 4th International Conference on , Publication Year: 2008 ,Page(s):1 - 8 .

[37] Uludag, S.; Akkaya, K. *Distributed channel assignment in Wireless Mesh Networks with guaranteed connectivity*. Local Computer Networks, 2008. LCN 2008. 33rd IEEE Conference on , Publication Year: 2008 , Page(s): 562 - 563 IEEE Conferences .

[38] J. Jun and M. L. Sichitiu. *The nominal capacity of wireless mesh networks*. IEEE Wireless Communications, vol. 10, no 5:p. 8–14, October 2003.

[39] B. Liu, P. Thiran, and D. Towsley. *Capacity of a wireless ad hoc network with infrastructure*. MobiHoc, pages 239–246, Montreal, September 2007.

[40] Gupta P, Kumar P. *The capacity of wireless networks*. IEEE Transactions on Information Theory, 46(2):388–404, May 2000.

[41] J. Jun and M. L. Sichitiu. *The nominal capacity of wireless mesh networks*. IEEE Wireless Communications, vol. 10, no 5 :p. 8–14, October 2003.

[42] P.kyasanur and N.Vaidya .*Capacity of multi-channel wireless :impact of number of channels and interface*. ACM MOBICOM Conference, pp 43-57, 2005.

[43] Xiaoguang Li and Jie Wu. *Channel On Demand: Optimal Capacity for Cooperative Multi-channel Multi-interface Wireless Mesh Network*. MASS, 7<sup>th</sup> international conference IEEE, 2010, pp 412-421.

[44] Melanie Mitchell. *An introduction to Genetic Algorithms*”. First MIT Press paperback edition, 1998.

[45] Jean-Philippe Préaux, cours d’optimisation combinatoire *Méthodes exactes pour la résolution de problèmes NP*. École d’officiers de l’armée de l’air, 2003.

[46] L.Davis, *Handbook of genetic algorithms* ,Van Nostrand Reinhold, New York,1991.

[47] D. Brelaz , *New methods to color vertices of a graph*. Communications of ACM 22 : 251-256 1979.

[48] F.T.Leighton *A graph coloring algorithm for large scheduling problems*. Journal of Resarch of the National Bureau Standard : 489-505, 1979.

[49] Couto, D.S.J.D., et al. (2005) . *A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing*, Wireless Networks, 11, 419-434.

[50] [www.lindo.com](http://www.lindo.com)

