

Direction des bibliothèques

AVIS

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

Un outil de conception pour les réseaux maillés sans fil

par

Nicolas St-Georges

Département d'informatique et de recherche opérationnelle

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures

en vue de l'obtention du grade de

Maîtrise ès sciences (M.Sc.)

en Informatique

Octobre, 2008

© Nicolas St-Georges, 2008



Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Un outil de conception pour les réseaux maillés sans fil

présenté par :

Nicolas St-Georges

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Stefan Monnier, président

Abdelhakim Hafid, directeur de recherche

Michel Gendreau, codirecteur de recherche

Esma Aïmeur, membre du jury

Résumé

Les réseaux sans fil maillés (WMN) sont une technologie clé pour la prochaine génération de réseaux sans fil. Ils disposent de plusieurs avantages (p.e., faible coût, mise à l'échelle, fiabilité en cas de pannes) relativement aux autres types de réseaux sans fil. Malgré le développement rapide de cette technologie, plusieurs problèmes ont encore besoin d'être résolus. De tels réseaux doivent permettre un débit élevé de données en prenant en compte les interférences dans le réseau ainsi que les congestions possibles.

Pour résoudre le problème de conception, un modèle général a été proposé par Beljadid, Hafid et Gendreau [1]. Ce modèle prend en compte tous les paramètres qui ont une influence significative sur le réseau (interférence, portée des radios, nombre de radios et de canaux par noeud), l'exigence des fournisseurs (demande des clients) et les contraintes de l'environnement physique (localisation potentielle des routeurs sans fil et des passerelles). L'objectif de ce modèle est de fournir un problème de conception qui cherche à minimiser les coûts du réseau tout en respectant les contraintes établies. Ce mémoire propose des outils pour la conception des WMNs.

À partir d'un modèle établi, une heuristique est proposée; elle permet de déterminer une solution qui produit une configuration faisable du réseau en question. Une interface utilisateur de cartographie a été créée pour saisir les entrées dont le modèle a besoin. Cette interface est responsable par la suite d'envoyer ces entrées au programme conçu. Lorsqu'une solution est déterminée, celle-ci est envoyée à l'interface utilisateur, qui affiche à l'utilisateur le réseau final trouvé avec un coût minimal. Pour tester et valider les solutions produites par l'heuristique, des simulations ont été réalisées.

Mots-clés : réseaux maillés, conception, simulation, carte google, WMN

Abstract

Wireless mesh networks (WMNs) are a key technology for next generation wireless networks. They provide multiple advantages such, as lost cost, scalability, and reliability in case of failure, when compared to other wireless networks. The development of this technology is undergoing rapid progress, but many problems still need to be resolved. Such networks need to enable a high throughput of data while taking into account the interference of the network and the possibility of congestion.

To solve the design problem, a general model has been proposed by Beljadid and al. [1]. The model takes into account all the parameters that have a significant influence on the network (interference, multi-channel, transmission power, etc.), the requirements of suppliers (client demands) and the constraints of the physical environment (potential location of routers and gateways). The objective of the model is to provide a design which seeks to minimize network costs while satisfying the constraints.

The objective of this thesis is to produce a design tool and validate the design of WMNs. A user interface, using maps, was designed to capture inputs that the model needs. The interface is responsible for sending the captured inputs to a heuristic. The heuristic produces a near optimal network design, which is displayed by the user interface on a map with the final minimal cost. To validate network designs produced by the heuristic, simulations have been performed.

Keywords: mesh networks, conception, simulation, google map, WMN

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des sigles et des abréviations.....	xi
Remerciements.....	xiii
Chapitre 1.....	1
Introduction.....	1
1.1 Réseaux sans fil maillés.....	1
1.2 Motivation.....	5
1.3 Description des problèmes de conception.....	7
1.4 Contribution.....	8
1.5 Organisation du mémoire.....	9
Chapitre 2.....	10
Les réseaux sans fil maillés.....	10
2.1 Architecture.....	11
2.2 Particularités.....	13
2.3 Affectation des canaux.....	15
2.4 Types de réseaux sans fil.....	16
Chapitre 3.....	21
Revue de littérature.....	21
3.1 Conception des WMNs.....	21
3.2 Graphe de connectivité et de conflits.....	22
3.3 Modèles d'interférences.....	23
3.4 Placement des passerelles pour optimisation du débit dans un WMN.....	26
Chapitre 4.....	28
Outil de cartographie pour les réseaux sans fil maillés.....	28

4.1 Description	29
4.2 Entrées de la carte	31
4.3 Sorties de la carte	35
4.4 Options	37
Chapitre 5	40
Modèle d'optimisation WMN.....	40
5.1 Le réseau WMN considéré.....	40
5.2 Modèle de conception	41
5.3 Contraintes du modèle.....	44
Chapitre 6	53
Heuristique de résolution du modèle.....	53
6.1 Vue d'ensemble.....	53
6.2 Structure du programme.....	53
6.3 Solution pour le problème.....	58
6.4 Utilisation d'un algorithme génétique.....	73
Chapitre 7	80
Outil de simulation et de validation du modèle	80
7.1 Modification du logiciel NS2.....	80
7.2 Résultats des simulations	83
Chapitre 8	107
Conclusion et perspectives.....	107

Liste des tableaux

Liste des symboles utilisés dans le modèle de conception	42
--	----

Liste des figures

Fig.1.1. Exemples de routeurs sans fil dans un WMN.....	2
Fig.1.2. Connectivité dans un réseau maillé sans fil.....	4
Fig.2.1. Concept d'un réseau sans fil maillé.....	10
Fig.2.2. Épine dorsale d'un WMN constitué de routeurs sans fil.....	11
Fig.2.3. Épine dorsale d'un WMN constitué de clients.....	12
Fig.2.4. Zone de communication et d'interférence d'un nœud émetteur.....	13
Fig.2.5. Les types de réseaux sans fil.....	17
Fig.2.6. Un WMN dans un domicile.....	18
Fig.2.7. Un WMN dans une entreprise.....	19
Fig.2.8. Un WMN métropolitain.....	20
Fig.3.1. Optimisation du réseau par l'ajout d'un routeur sans fil.....	23
Fig.3.2. Schéma d'interférence.....	25
Fig.3.3. Différents déploiements de routeurs sans fil.....	26
Fig.4.1. Fonctionnement de l'outil de cartographie.....	28
Fig.4.2. Des exemples de fonctions Javascript.....	29
Fig.4.3. Informations communes sur les routeurs sans fil.....	31
Fig.4.4. Informations uniques de chaque routeur sans fil.....	32
Fig.4.5. Premier exemple de la carte développée qui saisit les entrées.....	33
Fig.4.6. Deuxième exemple de la carte développée qui saisit les entrées.....	34
Fig.4.7. Propriétés finales d'un nœud.....	35
Fig.4.8. Premier exemple d'un résultat WMN.....	36
Fig.4.9. Deuxième exemple d'un résultat WMN.....	36
Fig.4.10. Troisième exemple d'un résultat WMN.....	37
Fig.4.11. Options de l'outil de cartographie.....	38
Fig.4.12. Localisations potentielles de nœuds.....	39

Fig.5.1. Les trois types de routeur de la problématique.....	46
Fig.5.2. Liens entre les nœuds.....	47
Fig.5.3. Conservation des flots.....	48
Fig.5.4. Capacité d'un lien.....	49
Fig.5.5. Sommation des flots.....	49
Fig.5.6. Principe d'interférence.....	50
Fig.5.7. Choix d'une portée d'un routeur sans fil.....	51
Fig.5.8. Nombre de sauts de chaque routeur vers la passerelle.....	52
Fig.6.1. Vue globale du programme conçu.....	56
Fig.6.2. Structure de l'heuristique.....	57
Fig.6.3. Structure d'un chromosome.....	58
Fig.6.4. Interférence d'un nœud.....	60
Fig.6.5. Détermination du nombre minimum de passerelles d'une solution.....	61
Fig.6.6. Exemple d'une solution possible non vérifiée.....	62
Fig.6.7. Vérification des portées.....	63
Fig.6.8. Structure logique du programme.....	64
Fig.6.9. Nombre de passerelles desservi par routeur sans fil.....	65
Fig.6.10. Nombre de sauts minimaux pour accéder à une passerelle.....	66
Fig.6.11. Ordre d'exécution des nœuds.....	68
Fig.6.12. Cas 1 : les chemins minimaux.....	69
Fig.6.13. Cas 2 : les chemins minimaux multiples.....	71
Fig.6.14. Cas 3 : les chemins multiples.....	72
Fig.6.15. Création de chromosomes.....	74
Fig.6.16. Génétique utilisant le point de croisement.....	75
Fig.6.17. Effet d'une mutation sur un gène.....	77
Fig.7.1. Premier exemple de l'outil de simulation WMN.....	82
Fig.7.2. Deuxième exemple de l'outil de simulation WMN.....	83
Fig.7.3. Cas 1 : Simulation de 20 nœuds.....	86

Fig.7.4. Cas 1 : Simulation du réseau.....	87
Fig.7.5. Cas 1 : Augmentation graduelle de toutes les demandes.....	88
Fig.7.6. Cas 1 : Augmentation de la demande au nœud 14.....	89
Fig.7.7. Cas 1 : Mobilité avec augmentation des demandes.....	90
Fig.7.8. Cas 1 : Panne du routeur 16.....	91
Fig.7.9. Cas 2 : Simulation de 40 nœuds.....	92
Fig.7.10. Cas 2 : Simulation du réseau.....	94
Fig.7.11. Cas 2 : Augmentation graduelle de toutes les demandes.....	95
Fig.7.12. Cas 2 : Augmentation de la demande au nœud 38.....	96
Fig.7.13. Cas 2 : Mobilité avec augmentation des demandes.....	97
Fig.7.14. Cas 2 : Panne du routeur 17.....	98
Fig.7.15. Cas 3 : Simulation de 80 nœuds.....	99
Fig.7.16. Cas 3 : Simulation du réseau.....	101
Fig.7.17. Cas 3 : Augmentation graduelle de toutes les demandes.....	102
Fig.7.18. Cas 3 : Augmentation de la demande au nœud 12.....	103
Fig.7.19. Cas 3 : Mobilité avec augmentation des demandes.....	104
Fig.7.20. Cas 3 : Panne d'une radio de la passerelle 42.....	105

Liste des sigles et des abréviations

Acronyme	Description
WMN	Wireless Mesh Network
PDA	Personal Digital Assistants
NS2	Network Simulator
AP	Access Point
PSTN	Public Switched Telephone Network
LAN	Local Area Network
DSL	Digital Subscriber Line
RTS	Ready To Send
CTS	Clear To Send
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
JSP	Java Server Page
CBR	Constant Bit Rate
UDP	User Datagram Protocol
TCL	Tool Command Language
MAC	Media Access Control
MLP	Mixed Linear Program
AJAX	Asynchronous JavaScript and XML
XHTML	Extensible HyperText Markup Language
DOM	Document Object Model

À mon père.

À ma mère.

À mon frère et ma sœur.

À toute ma famille.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements et ma gratitude à mon directeur de recherche, le professeur Abdelhakim Hafid pour sa patience, sa disponibilité, son aide et son support tout au long de ce travail.

J'aimerais remercier mes parents pour leur grand support, ainsi que mon frère et ma sœur pour leur patience et leur sagesse.

Enfin, que tous celles et ceux qui m'ont apporté leur appui trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Réseaux sans fil maillés

Le monde des télécommunications ne cesse de connaître de grands bouleversements. Les communications mobiles, plus particulièrement, ont connu lors de cette dernière décennie une utilisation sans précédent. La grande popularité de la téléphonie cellulaire et sans fil auprès des usagers a dévoilé leur volonté d'avoir une réelle liberté de déplacement tout en communiquant. Toutefois, cette liberté ne se veut pas limitée au domaine de la téléphonie, mais cherche à s'étendre sur une panoplie de services multimédia.

La technologie sans fil a permis de donner accès à l'Internet dans les lieux publics et de fournir un espoir aux zones rurales où le haut débit n'est pas envisageable pour des raisons économiques. Les réseaux sans fil maillés (WMNs) sont devenus un axe de recherche important dans l'amélioration de la technologie sans fil. Le terme "maillé" est utilisé, car chaque routeur dans ce réseau peut se connecter à plusieurs routeurs. Lorsqu'un nœud tombe en panne, il est possible d'établir d'autres chemins dans le réseau en connectant vers d'autres nœuds.

Ce type de réseau peut être installé dans une maison, une communauté, une entreprise, une ville, dans un véhicule de transport, etc. Le WMN représente une solution pour connecter les clients qui se trouvent à de grandes distances du réseau. Plusieurs villes aux États-Unis (p.e., Philadelphie, Medford, Chaska, Gilbert [4]) ont déployé un réseau sans fil maillé. Dans un WMN, les données envoyées par un utilisateur passent d'un routeur à un autre routeur jusqu'à une passerelle à l'aide d'une transmission sans fil. De nombreux problèmes ouverts doivent être résolus pour obtenir la qualité de service désirée par les utilisateurs, telle l'implémentation de nouveaux protocoles de routage, ainsi que l'allocation du spectre des fréquences dans le réseau.

Les réseaux sans fil peuvent être de deux types : avec infrastructure ou sans infrastructure (ad hoc). Dans le premier cas, il faut prendre en compte la mobilité de l'utilisateur qui se traduit par une modification de trafic entrant dans le réseau et il faut donc garantir la continuité de la communication de l'utilisateur. Dans le second cas, lorsque les nœuds sont mobiles, il faut prendre en compte la modification de la topologie du réseau. Il faut alors être capable de réagir de façon dynamique à cette situation. Dans notre problématique, les WMNs disposent de routeurs sans fil qui ont des positions fixes (avec infrastructure) dans le réseau et forment ainsi l'infrastructure du réseau qui constitue l'épine dorsale.

Les WMNs sont habituellement constitués de deux types de nœuds : les routeurs sans fil et les clients sans fil. On peut aussi utiliser des routeurs sans fil qui servent de relais, la différence étant que ce routeur ne permet pas aux usagers du service de se connecter directement vers lui. Pour améliorer la performance du réseau, un routeur sans fil est normalement équipé de plusieurs radios.

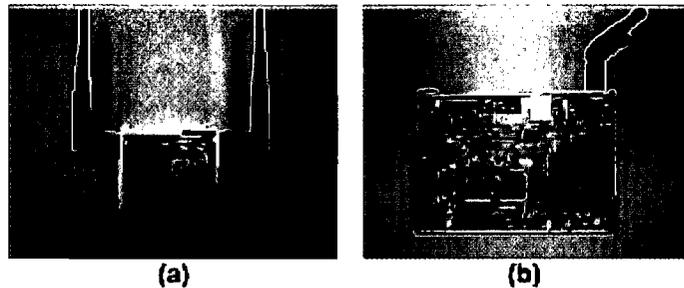


Figure 1.1. Exemples de routeurs sans fil dans un WMN
Compagnie : (a) PowerPC, (b) Advanced Risc Machines

Les WMNs permettent une performance qui peut être mise à l'échelle par rapport au nombre d'utilisateurs. Dans un tel réseau, il est possible d'ajouter des routeurs sans fil pour augmenter la connectivité du réseau. Une expansion du réseau permet aux clients de se connecter à d'autres routeurs sans fil qui disposent d'une connexion câblée vers le réseau

Internet, de tels routeurs sans fil sont appelés des passerelles. La largeur de bande point à point disponible dans le réseau dépend de la topologie et de la nature du trafic. En théorie, plus le réseau dispose de routeurs sans fil, plus la performance du réseau et sa fiabilité sont élevées. Un administrateur peut ajouter et changer des routeurs sans fil au réseau et ceux-ci vont s'auto configurer. Pour ces raisons, un WMN offre une flexibilité et une simplicité inégalée.

Les WMNs permettent une grande liberté et mobilité pour un nombre grandissant de portables et de PDA qui n'ont plus besoin d'une connexion câblée pour accéder à l'Internet. Ce câblage est coûteux à installer et à changer. Il existe de nombreuses situations où les réseaux maillés sans fil sont susceptibles de fournir une solution plus polyvalente et abordable qu'une infrastructure câblée. Ce type de réseau permet aussi de se connecter à un réseau câblé ou vers d'autres réseaux sans fil.

Les réseaux sans fil maillés sont basés sur des liaisons utilisant des ondes radioélectriques. Ces transmissions sont utilisées dans d'autres applications et sont sensibles à des interférences. Pour qu'une transmission ne provoque pas d'interférences, il est possible d'utiliser différents canaux. Un routeur sans fil peut vérifier si un canal qu'il désire utiliser est libre avant de créer une connexion avec un autre routeur sans fil. Un routeur sans fil dispose d'un nombre de radios qui peuvent fonctionner simultanément, chacune sur un canal choisi. La conception d'un réseau sans fil doit tenir compte de l'interférence et fournir une solution qui minimise cet aspect.

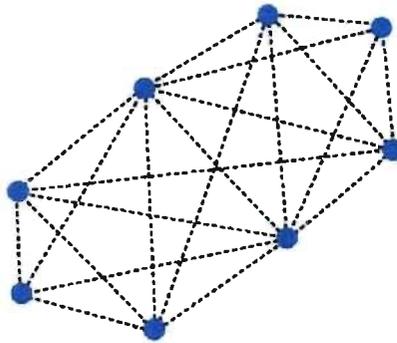


Figure 1.2. Connectivité dans un réseau maillé sans fil

En utilisant une conception multi portées, il est possible pour chaque routeur sans fil de détenir une portée différente. Une portée n'est pas assez à chaque radio pour simplifier le modèle traité. L'avantage d'utiliser plusieurs portées est de minimiser l'interférence en utilisant la portée nécessaire pour communiquer, cela permet de réduire les coûts (un coût est relié à une portée attribuée par un routeur). La conception doit aussi prendre en considération la qualité de service offerte à l'utilisateur; il a été démontré que la principale cause de délais et de dégradation de débit dans les WMNs est le nombre de sauts que doivent faire les données (nombre de routeurs sans fil traversés d'une source à une passerelle), ce qui provoque des congestions dans le réseau.

Le problème qui est traité dans ce mémoire est la conception d'un WMN à un coût le plus bas que possible en utilisant des entrées. Ce mémoire fournit une contribution aux travaux de Beljadid [1] en fournissant une heuristique et des outils pour les WMNS. La position des routeurs est établie et les connexions entre ces routeurs sont statiques. Les utilisateurs du réseau détiennent de positions dynamiques. Le problème consiste à déterminer tous les attributs d'un routeur sans fil ainsi que de déterminer des chemins vers des passerelles qui respectent les contraintes.

1.2 Motivation

Les réseaux sans fil maillés ont le potentiel d'offrir un accès Internet à haut débit en offrant la couverture et la connectivité au réseau pour les utilisateurs stationnaires ou mobiles. Cet accès comporte un coût bas tant pour les propriétaires du réseau, ainsi que leurs clients. Les avantages que cette technologie amène sont multiples, mais plusieurs problèmes surviennent lors de l'implémentation d'un WMN. La mise en place de WMNs pose plusieurs problèmes auxquels il faut apporter des solutions si l'on veut que ces réseaux permettent l'échange de données à un haut débit d'une manière fiable.

La conception d'infrastructure de réseaux sans fil maillés est un problème difficile qui n'a pas reçu beaucoup d'attention dans la littérature, car la plupart des travaux se concentrent sur un aspect particulier des WMNS (par exemple plusieurs travaux utilise en entrée un WMN où l'on connaît déjà la position des routeurs). Les WMNS ne sont pas encore très présents et plusieurs axes de recherches essayent de les améliorer, le modèle utiliser prend en compte plusieurs paramètres pour traiter le problème, il est donc difficile de trouver dans la littérature des travaux qui prennent en compte tous les paramètres qui ont une influence significative sur le réseau (interférence, portée des radios, nombre de radios et de canaux par noeud), l'exigence des fournisseurs et les contraintes de l'environnement physique.

Nous pensons que la phase de planification des WMNs est l'une des plus importantes tâches d'optimisation avant tout déploiement. La plupart des propositions qui traitent des WMNs supposent l'existence d'une topologie physique où l'emplacement et les caractéristiques des routeurs sans fil sont fixes et prédéfinis. Les efforts de recherche pour les WMNs ont porté sur le développement efficace de stratégies de routage, d'affectation de canaux et de planification des flots afin de maximiser le débit. On ne trouve dans la littérature que quelques articles qui traitent du problème de conception de WMNs. Toutefois, la majorité de ces études ne prennent pas en compte tous les paramètres pertinents dans ce contexte.

L'infrastructure sans fil maillée doit minimiser le coût total du réseau en prenant en compte le placement des passerelles. La topologie choisie doit satisfaire toutes les demandes des clients en utilisant ce nombre minimum de passerelles. Un volume élevé de trafic doit être envoyé efficacement dans la largeur de bande sans fil qui est limitée. L'envoi de flots doit supporter différentes qualités de service en temps réel pour des applications multimédias.

Il faut aussi prendre en considération l'interférence qui a un impact significatif sur la performance des réseaux. Notre motivation est donc de nous concentrer sur le problème de minimisation du coût, tout en prenant en compte tous les facteurs qui influencent le réseau; ce problème n'a pas été traité dans son intégralité dans les travaux antérieurs.

Des outils sont nécessaires pour mettre le concept du modèle en pratique. Le modèle a besoin d'une carte qui permet d'afficher en temps réel la position des routeurs sans fil, de bien visualiser le réseau en entier, ainsi que présenter les résultats obtenus d'une façon rapide et plaisante pour l'utilisateur. Un tel outil de cartographie doit permettre de garder en mémoire des simulations complexes pour comparer des résultats obtenus. Cet outil est nécessaire pour présenter des résultats en offrant un contenu visuel des paramètres.

Une heuristique est reliée à la carte qui lui permet de saisir les informations qui lui seront nécessaires. Lorsque cette heuristique détermine la solution disposant du coût le plus bas, la carte est responsable d'offrir un aperçu visuel de la solution. Lorsque aucune solution n'est trouvée, l'outil de cartographie n'affiche aucun WMN sur la carte. Le résultat final de la topologie obtenue peut être ensuite simulé à l'aide d'un simulateur du réseau. Pour permettre une telle simulation, un nouvel outil a besoin d'être utilisé. En se basant sur le logiciel NS2, l'outil de simulation doit permettre de simuler le résultat final établi en temps réel pour vérifier si la réponse obtenue peut fonctionner avec la technologie actuelle.

1.3 Description des problèmes de conception

Pour fournir une couverture aux clients, le WMN doit être déployé de façon à couvrir toute la surface d'une zone. Il est possible de faire cela en ajoutant des routeurs sans fil à certains endroits de notre zone. Certains emplacements disposent de caractéristiques permettant l'ajout de routeurs sans fil, tandis que d'autres emplacements ne sont pas propices. L'emplacement des passerelles sur la zone est un choix encore plus difficile. Les passerelles sont des routeurs sans fil reliés avec une connexion, généralement câblée, à l'Internet. Ces passerelles ne sont disponibles qu'à certains emplacements puisqu'ils ont besoin d'une localisation qui permet d'obtenir une connexion à Internet. Le coût de cette connexion (p.e. le câblage) est très dispendieux et le nombre de passerelles doit donc être minimisé.

La capacité d'un WMN est affectée par de nombreux facteurs tels que l'architecture du réseau, sa topologie, la nature du trafic, la densité des noeuds du réseau, le nombre de canaux utilisés pour chaque noeud de la transmission et le niveau de puissance. La question de la capacité du réseau ne peut pas être correctement abordée sans débattre de la question de l'équité entre les flots. Un routeur sans fil dans un WMN doit transmettre le trafic reçu d'autres routeurs ainsi que ses propres flots. Par conséquent, il doit faire un compromis entre ses flots et les flots qu'il reçoit. Par exemple, on peut favoriser les paquets envoyés d'un routeur vers une passerelle ou on peut favoriser l'acheminement des paquets reçus de ce routeur vers une passerelle. La capacité utilisée des liens augmente si ce lien est situé à un nombre de saut bas vers une passerelle. Ce type de problème ne se produit pas dans les réseaux locaux LAN où les utilisateurs sont les noeuds se situant toujours à un saut de distance du point d'accès. Dans ce problème de conception, on fait abstraction des clients qui se connectent à l'infrastructure en utilisant les routeurs sans fil. Notre conception prend donc en compte l'épine dorsale ("backbone") du réseau à déployer.

D'après Y. Li, L. Qiu, Y. Zhang et R. Mahajan [6], on a montré que de graves dégradations de performance peuvent se produire lorsque les sources envoient plus de trafic

que le réseau ne peut en supporter. Les protocoles de routage actuels ne parviennent pas à identifier les chemins de routage à haut débit même s'ils existent. Cela se produit parce que l'interférence dans le WMN influence la capacité des liens. À mesure que les flots approchent d'une passerelle, plus il y a d'autres flots présents qui veulent se rendre à la même passerelle. Des goulots d'étranglement se produisent aux routeurs sans fil proche des passerelles. L'interférence peut diminuer la capacité disponible, tandis que d'autres chemins sont disponibles.

1.4 Contribution

Le problème de conception se base sur les travaux de Beljadid, Hafid et Gendreau [1-3] qui définissent un modèle pour la conception d'une infrastructure WMN. En prenant en compte les problèmes de conception, la contribution de ce mémoire est divisée en trois points :

- Un outil de cartographie qui supporte le processus de conception d'un réseau sans fil maillé. Cet outil utilise plusieurs technologies Web pour permettre à l'utilisateur d'avoir un contenu visuel des positions des routeurs sans fil. L'idée est donc de superposer des cartes de certains territoires du monde avec notre configuration initiale du réseau WMN. Il devient plus facile pour l'utilisateur d'ajouter à la carte toutes les entrées dont le modèle a besoin. Une fois toutes les données saisies sur la carte, notre heuristique essaie de déterminer le meilleur WMN. Cette méthode de résolution envoie ensuite la réponse déterminée à la carte qui est responsable d'afficher l'épine dorsale du WMN choisi. Cet outil permet donc de visualiser en temps réel toutes les informations d'entrée et de sortie de la problématique.
- Une heuristique est développée qui résout le problème de conception de l'infrastructure. Le modèle défini dans la référence [1] a pour objectif de minimiser les coûts en respectant toutes les contraintes qui ont un effet sur l'infrastructure. L'heuristique se base donc sur ce modèle et elle utilise le principe des algorithmes

génétiques pour déterminer une bonne solution dans l'ensemble des solutions possibles.

Une fois le réseau maillé établi et choisi, il est très pertinent de vérifier la réponse obtenue dans un environnement qui n'est pas seulement théorique. Pour ce faire, on utilise un simulateur de réseau pour tester la configuration choisie en simulant toutes les couches d'un véritable réseau. Le simulateur NS2 est un logiciel ouvert qui permet de simuler des réseaux sans fil. Pour que cet outil soit capable de simuler notre réseau sans fil maillé, on lui a ajouté deux extensions qui supportent notre problème (l'ajout d'une interface qui supporte des radios multiples et d'un protocole de routage manuel pour les WMNs). Notre contribution consiste à l'ajout de cette extension. Les routeurs sans fil d'un WMNs disposent de plusieurs radios qui peuvent transmettre simultanément sur un canal choisi et chacun de ces routeurs sans fil a sa propre portée. Une extension pour les WMN est donc proposée et utilisée pour vérifier nos résultats déterminés par l'heuristique.

1.5 Organisation du mémoire

Le mémoire est organisé comme suit : dans le chapitre 2, un survol des WMNs permet de mieux comprendre les problématiques pertinentes pour ces réseaux, ainsi que les approches qui permettent de les résoudre. Le chapitre 3 présente un aperçu de la littérature sur les techniques et les modèles utilisés pour analyser le problème de conception dans un WMN. Dans le chapitre 4, le modèle de base sur lequel repose ce travail est expliqué. Les chapitres suivants présentent les trois éléments de la contribution. Finalement, le travail se conclut en dressant quelques perspectives de recherche.

Chapitre 2

Les réseaux sans fil maillés

Ce chapitre offre un survol des réseaux sans fil maillés pour permettre de mieux comprendre la problématique associée à la conception d'un tel réseau. L'Internet procure des connexions câblées qui utilisent sur une base coopérative des infrastructures de communication électronique pour communiquer. Les WMNs sont un maillage d'infrastructures de communication sans fil qui effectue la coopération entre un grand nombre d'émetteurs et de récepteurs sans fil. La topologie maillée de la figure 2.1 correspond à un réseau où tous les hôtes sont connectés les uns aux autres sans hiérarchie centrale formant ainsi une structure en forme de filet. Le réseau est capable de s'auto organiser, car même lorsqu'un noeud tombe en panne ou qu'une connexion échoue, un autre nœud peut prendre le relais, ce qui rend le réseau très fiable. Un WMN peut être ajouté comme extension aux réseaux sans fil et aux réseaux câblés. Le passage à l'échelle est une des principales fonctionnalités des WMNs qui devient aussi un problème lors de l'affectation des canaux.

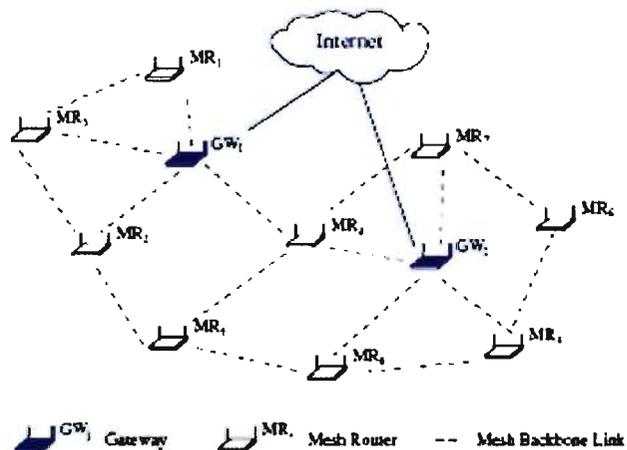


Figure 2.1. Concept d'un réseau sans fil maillé

2.1 Architecture

Les routeurs sans fil du réseau maillé permettent aux clients de se connecter et d'atteindre d'autres routeurs sans fil. Ces routeurs sans fil peuvent être équipés de radios multiples. Certains de ces routeurs sans fil sont connectés vers d'autres réseaux et servent alors de passerelles ou de ponts. En comparaison avec un client du réseau maillé, les routeurs sans fil disposent de plus de fonctionnalités, par exemple ils peuvent avoir une plus grande portée pour diffuser leurs messages ou avoir la possibilité de communiquer sur des canaux multiples. Lorsqu'un client a besoin de communiquer avec un client ou une passerelle, il envoie ses messages à un routeur sans fil assigné qui se charge de lui fournir le service. Les messages sont ensuite acheminés dans l'architecture maillée jusqu'à leurs destinations.

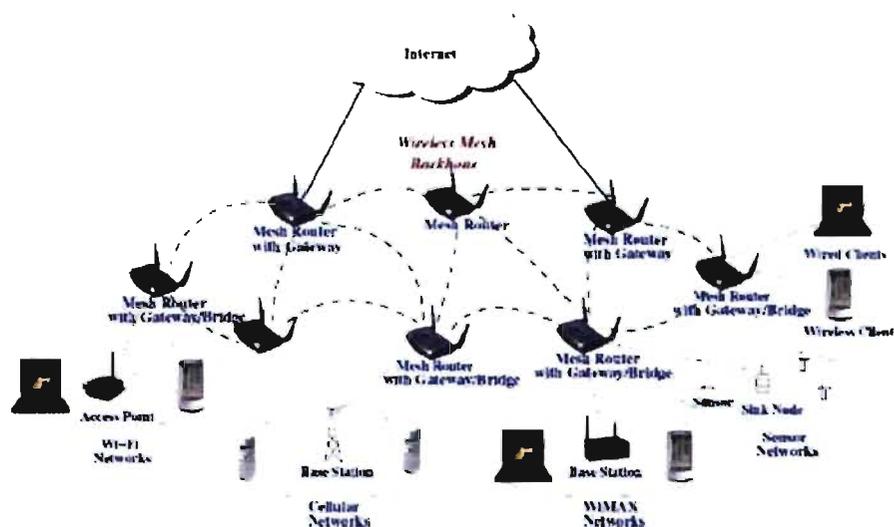


Figure 2.2. Épine dorsale d'un WMN constitué de routeurs sans fil

Le premier type d'architecture est celui où les routeurs sans fil sont les seuls à constituer l'épine dorsale du réseau. Ce type de réseau maillé est le plus fréquent et celui utilisé pour baser notre conception de réseau maillé. Dans la figure 2.2 extraite de la source

[5], les lignes pointillées représentent des liens sans fil et les lignes pleines, les liens avec fil. Tous les routeurs sans fil forment une infrastructure qui permet aux clients de se connecter à l'épine dorsale. Cette infrastructure peut être bâtie en utilisant différentes sortes de technologies radio, on peut par exemple utiliser IEEE 802.11 [29, 31, 32]. Les routeurs sans fil forment un réseau auto configurable et qui supporte les pannes. Certains de ces routeurs sans fil sont des passerelles et permettent des connexions vers l'Internet. Cette approche procure l'infrastructure de base pour les clients maillés conventionnels et permet l'intégration des WMNs avec d'autres réseaux sans fil. Les clients disposant d'une interface Ethernet peuvent se connecter aux routeurs sans fil du réseau maillé. Si d'autres techniques radios sont utilisées, les clients doivent communiquer avec les routeurs sans fil qui sont compatibles.

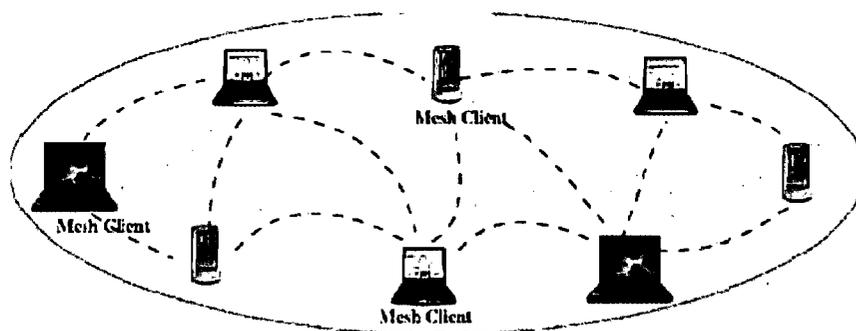


Figure 2.3. Épine dorsale d'un WMN constitué de clients

Un deuxième type d'infrastructure utilisé est celui de la figure 2.3 extraite de la source [5] qui permet la création d'un réseau entre les clients. Les clients constituent le réseau et sont responsables d'acheminer le trafic, de se configurer et d'assurer le bon fonctionnement des applications nécessaires pour les communications. Dans ce type de configuration, on n'a donc pas besoin de routeurs sans fil. Les réseaux qui utilisent l'épine dorsale constituée de clients WMN sont habituellement utilisés avec une seule radio par client maillé et toutes les fonctionnalités de routage sont laissées aux clients.

Le troisième type d'architecture est le résultat de la combinaison des deux premiers types. Les clients maillés peuvent donc accéder au réseau à l'aide des autres routeurs sans fil ou en utilisant les autres clients maillés. Les routeurs sans fil permettent d'assurer la couverture tandis que les clients maillés permettent d'améliorer la connectivité et la couverture dans un WMN. L'infrastructure hybride dispose des avantages des deux autres types d'architectures, mais amène plus de complexité dans l'affectation des canaux et du routage des paquets.

Ces trois types d'architectures possibles procurent l'infrastructure de base pour construire l'épine dorsale du réseau. Un WMN permet la connectivité à d'autres réseaux tels que l'Internet, les réseaux locaux, les réseaux métropolitains, les réseaux de cellulaires, les réseaux de capteurs, etc.

2.2 Particularités

La zone de communication d'un émetteur radio est plus petite que sa zone d'interférence. Cela implique qu'il peut ne pas être possible de communiquer avec un routeur sans fil distant, mais qu'il est possible de lui créer de l'interférence. Cette situation peut amener divers problèmes dans un WMN puisqu'il est impossible pour deux routeurs sans fil de réagir à cette interférence en échangeant de l'information comme le démontre la figure 2.4. Un routeur dans ce cas est donc obligé d'attendre s'il détecte du bruit. On parle souvent de ce problème comme le problème du terminal caché [6].

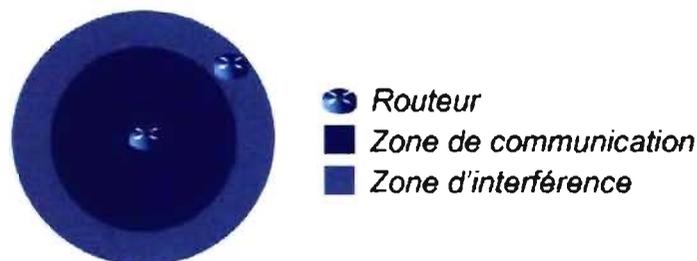


Figure 2.4. Zone de communication et d'interférence d'un nœud émetteur

La bande passante dans un WMN diminue rapidement lorsque le nombre de sauts augmente. Cette dégradation, qui peut être exponentielle, a pour cause des interférences provoquées par les nœuds voisins. L'utilisation de plusieurs canaux est une solution à ce problème; si un routeur sans fil est équipé avec des radios multiples, il dispose de la possibilité d'utiliser plusieurs canaux. L'affectation des canaux s'effectue en utilisant le spectre de fréquence autorisée. Chaque canal sera alors distinct des autres et ne provoquera pas d'interférence. Lorsque deux routeurs sans fil effectuent une transmission sur le même canal dans la même zone, le signal peut être perturbé. Il est possible de modifier le paramètre de la portée d'un routeur sans fil pour qu'il ne provoque pas d'interférence avec d'autres transmissions.

Le nombre de canaux libres peut se chevaucher tel qu'un canal partage son spectre avec d'autres canaux ou peut être totalement sans chevauchement. Lorsqu'un canal en chevauche un autre, la transmission, sur ce canal, peut provoquer de l'interférence sur d'autres canaux. Les protocoles qui utilisent des canaux qui se partagent le spectre doivent tenir compte des interférences possibles. Dans ce travail, nous utilisons des canaux orthogonaux qui ne permettent donc aucun chevauchement. Par exemple, dans la technologie IEEE 802.11a [31], 12 canaux orthogonaux sont utilisés.

La réduction du coût des interfaces a permis d'équiper les routeurs sans fil avec des radios multiples. Un routeur sans fil peut posséder plusieurs radios; chaque radio peut envoyer ou recevoir sur plusieurs canaux. Cependant, chaque radio peut opérer sur un canal à la fois. Donc, le nombre de canaux sur lesquels un routeur sans fil peut transmettre simultanément dépend de son nombre de radios. Dans le contexte des WMNs, le nombre de radios utilisé est plus petit que le nombre de canaux disponibles. Dans un contexte théorique il est possible de détenir plus de radios que de canaux, mais en pratique le nombre de radios est toujours inférieur.

2.3 Affectation des canaux

Chaque radio d'un routeur sans fil doit transmettre sur un canal. L'affectation des canaux peut être soit statique, dynamique ou hybride [5]. L'utilisation efficace de plusieurs canaux dans un réseau maillé sans fil exige de s'intéresser à de nouveaux défis. Par exemple, dans un réseau où tous les routeurs sans fil disposent d'une radio et de deux canaux, il faut faire en sorte que chaque routeur sans fil puisse communiquer avec au moins un autre routeur sans fil et obtenir un chemin vers une passerelle. Les routeurs sans fil partageant le même canal peuvent établir une connexion et entrer en communication.

Une première possibilité est l'affectation statique des canaux qui consiste à fixer les radios des routeurs sans fil sur différents canaux. Avec cette approche, un routeur sans fil ne peut pas utiliser plus de canaux qu'il ne dispose de radios. L'avantage de cette approche est de fixer les radios sur des canaux choisis ce qui simplifie le protocole d'implémentation. Cependant, si on conserve ces radios fixées sur certains canaux cela peut affecter la connectivité du réseau.

Une deuxième possibilité est de changer fréquemment le canal d'une radio d'un routeur sans fil. En utilisant cette approche, un routeur sans fil peut distribuer sa charge sur tous les canaux disponibles. Même si cette approche est plus flexible, le nœud émetteur et receveur ont besoin d'être coordonnés avant la transmission. Un changement de canal dans une radio amène un retard, un changement fréquent de canal peut affecter la performance du WMN en terme de délai.

La troisième possibilité est d'utiliser une approche hybride qui permet d'avoir certaines radios qui utilisent l'affectation statique des canaux et d'autres radios du même routeur sans fil qui peuvent changer de canaux à travers le temps de façon dynamique. Pour implémenter cette approche, les nœuds ont besoin d'avoir au moins deux radios.

Quand les radios des routeurs sans fil ont des canaux assignés statiquement, le problème de routage est simple. Lorsque les canaux assignés aux radios des routeurs sans fil peuvent changer à travers le temps de façon dynamique, le problème devient plus complexe et chaque routeur sans fil a besoin d'effectuer une coordination et négociation de ses canaux avec les autres routeurs sans fil du réseau. Il est important dans la topologie des WMNs de distribuer le trafic également sur tous les canaux pour optimiser la largeur de bande offerte par le spectre des fréquences. L'affectation des canaux doit se faire en minimisant l'interférence du WMN.

2.4 Types de réseaux sans fil

La figure 2.5 permet de positionner les WMNs par rapport à d'autres types de réseaux. Les réseaux personnels (p.e. Bluetooth et Zigbee [37,38]) sans fil sont utilisés pour la communication entre les dispositifs à proximité d'une personne. La portée d'un tel réseau est généralement de quelques mètres. Les réseaux locaux sans fil (p.e., WIFI, HyperLAN [39]) se sont avant tout développés comme réseaux internes, propres à un bâtiment, soit comme réseau d'entreprise, soit comme réseau domestique. Ce type de réseau est populaire et permet d'utiliser des longueurs d'onde sensibles à l'interférence; leur portée peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Les réseaux qui tentent maintenant d'apparaître sont des réseaux métropolitains sans fil (p.e. réseaux WIMAX [40]); ce type de réseau est habituellement utilisé dans les campus ou dans les villes. L'idée est de permettre à un utilisateur d'obtenir une connexion vers l'Internet ou un autre réseau indépendamment de son emplacement, aussi bien à l'intérieur de son domicile ainsi qu'à l'extérieur. Les derniers types de réseaux sont les réseaux étendus sans fil, ces réseaux permettent une connexion mondiale, par exemple les réseaux de cellulaires (p.e. GSM, UMTS, GPRS [41]).

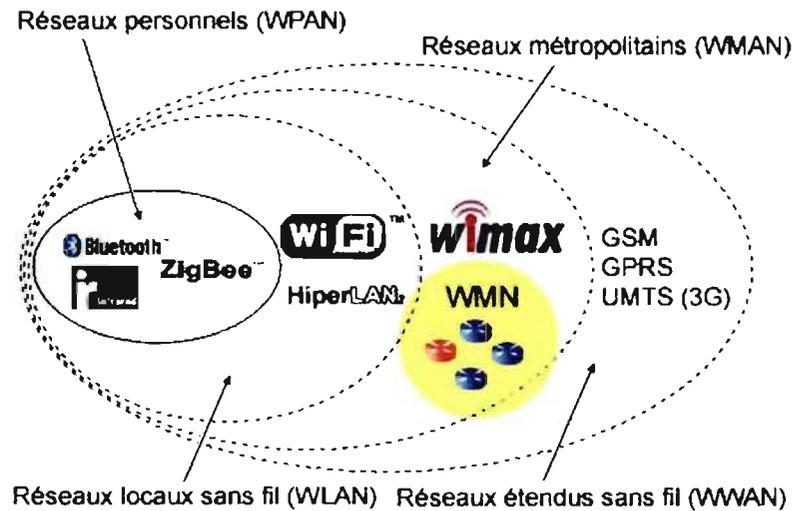


Figure 2.5. Les types de réseaux sans fil

Les réseaux locaux sans fil WiFi utilisant la norme IEEE 802.11 sont présentement utilisés dans les domiciles. Dans ce type de réseau, le routeur sans fil est relié à l'Internet et sert de point d'accès (AP) pour tous les utilisateurs qui désirent se connecter. Ce point d'accès doit être localisé à un endroit qui permet à tous les utilisateurs d'obtenir une connexion de qualité vers le réseau. Le problème qui survient est que certaines zones du domicile peuvent ne pas être couvertes. Une première solution est l'ajout d'autres AP reliés à l'Internet, mais cette solution est dispendieuse. Par contre, si on ajoute des routeurs sans fil qui serviront de passerelles, toutes les zones du domicile peuvent être couvertes à un plus bas coût. Les zones qui n'étaient pas couvertes peuvent être éliminées en leur ajoutant des routeurs sans fil, en changeant la localisation des routeurs sans fil ou en ajustant (p.e. augmentant) la portée des routeurs sans fil. Les prochaines figures de ce chapitre sont tirées de la source [5]. La figure 2.6 est un exemple où toutes les zones d'un domicile sont couvertes par un réseau sans fil maillé.

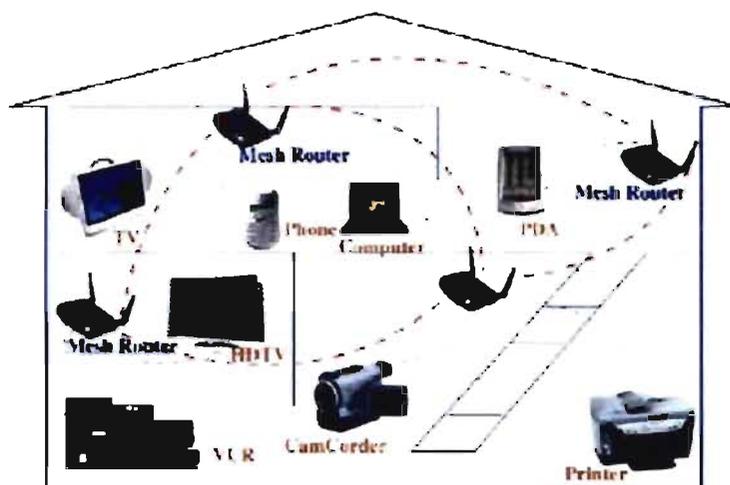


Figure 2.6. Un WMN dans un domicile

La plupart des services actuels, pour se connecter à l'Internet, sont basés sur le câble ou DSL. Dans ces cas, la technologie sans fil est utilisée comme un pont vers un point d'accès sans effectuer un partage de la connexion Internet avec d'autres membres potentiels de la communauté qui sont hors de la portée. On entend par communauté un groupe d'individus partageant la même rue dans un quartier par exemple. Le premier point négatif de cette façon d'utiliser une connexion câblée à l'Internet est que si deux utilisateurs voisins désirent communiquer entre eux, ils doivent passer par l'Internet. Il y a aussi plusieurs zones, entre les maisons de la communauté, qui ne sont pas couvertes par le service sans fil. Si cette communauté décide de s'établir un réseau et de partager des connexions vers des points d'accès, les coûts pour la même qualité de service sont réduits considérablement. La solution WMN permet de résoudre ces problèmes et offrir une architecture distribuée et fiable pour tous les besoins des utilisateurs. Dans un tel réseau, il est donc possible d'avoir plusieurs chemins possibles pour chaque client qui désire une connexion sans fil.

Le réseau WMN en entreprise peut être un petit réseau situé sur le même étage d'un édifice ou un réseau de taille moyenne pour les étages de l'édifice, ou encore un large réseau entre plusieurs bâtiments. Présentement le standard 802.11 pour les connexions sans fil est utilisé dans plusieurs entreprises, mais ces réseaux sont isolés les uns des autres. Pour connecter ces différents réseaux, des connexions câblées Ethernet sont généralement utilisées, ce qui provoque une augmentation du coût global de tels réseaux. L'ajout de points d'accès augmente la capacité locale du réseau, mais n'améliore pas la robustesse du réseau en cas de panne et les problèmes possibles de congestion. En remplaçant les points d'accès par des routeurs sans fil, plusieurs connexions câblées peuvent être éliminées. Le réseau maillé sans fil de l'entreprise peut alors grandir graduellement en suivant l'expansion de l'entreprise comme le démontre la figure 2.7.

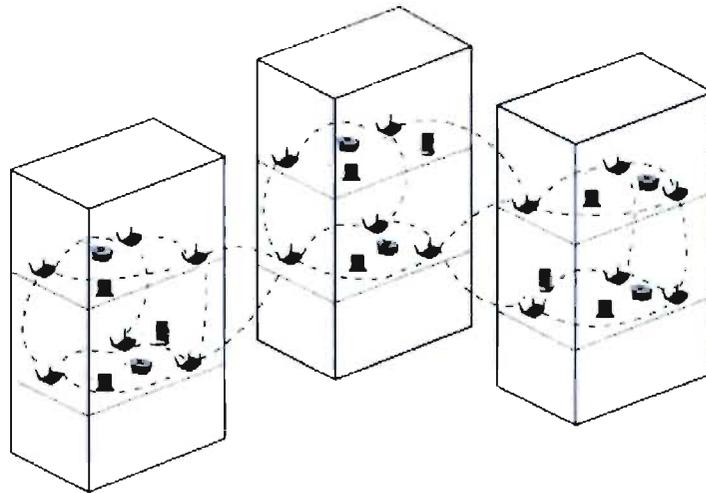


Figure 2.7. Un WMN dans une entreprise

Le réseau WMN métropolitain dans la figure 2.8 comporte plusieurs avantages. Il permet de couvrir de grandes zones et de fournir une mise à l'échelle de la demande. Il suffit par exemple d'ajouter des routeurs sans fil dans une ville pour connecter de nouveaux clients. Il devient aussi possible de connecter des clients qui sont éloignés du réseau en créant un chemin de routeurs sans fil vers leur destination. Par exemple, les routeurs sans fil

peuvent être localisés sur les lampadaires d'une ville. Certains WMNs métropolitains existent déjà; cependant, ils souffrent de certains problèmes en l'occurrence la diminution de la capacité des liens avec l'augmentation du nombre de sauts et l'interférence qui provoque des pertes de données.

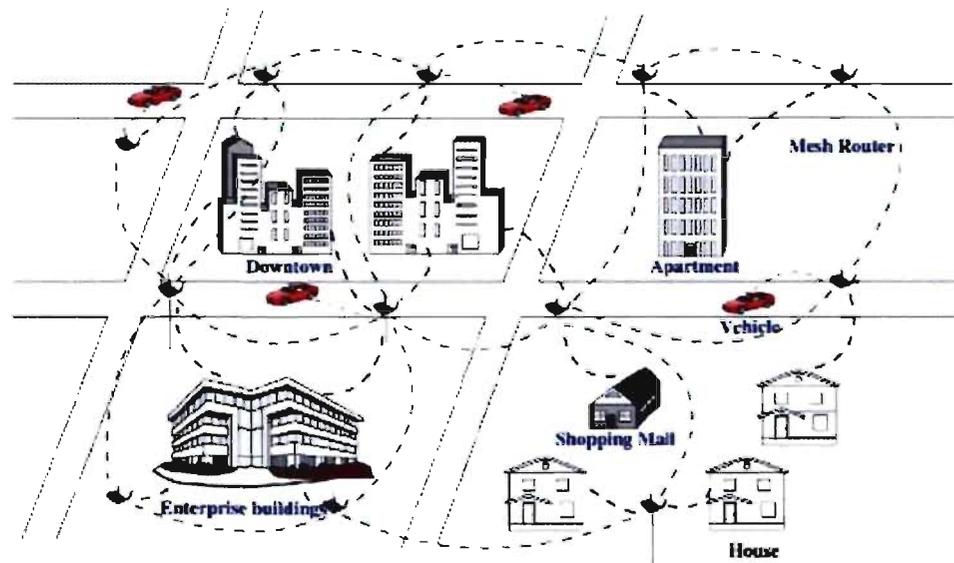


Figure 2.8. Un WMN métropolitain

Les WMNs peuvent être aussi installés sur des véhicules de transport, soit sur des autobus, des bateaux, des trains et autres transports. Pour mettre en place ce réseau, deux techniques clés sont nécessaires : les véhicules mobiles doivent être capables de se connecter à un point d'accès à l'extérieur du véhicule en tout temps et les routeurs sans fil doivent permettre d'atteindre toutes les zones dans le véhicule

Chapitre 3

Revue de littérature

La conception d'infrastructure maillée est un point capital avant le déploiement de tous les routeurs sans fil qui constituent le réseau. Beaucoup de propositions dans la littérature supposent l'existence des emplacements des nœuds du réseau et elles essaient ensuite de déterminer les meilleures caractéristiques à attribuer aux nœuds. Plusieurs autres recherches désirent trouver des stratégies pour le routage ou se concentrent sur l'affectation des canaux et la planification des flots pour augmenter la capacité d'un WMN. Ces recherches n'abordent qu'une partie de la problématique. Le modèle établi en [1] tente de prendre en compte tous ces facteurs et de résumer ces problèmes multiples en un seul modèle général.

3.1 Conception des WMNs

Le problème principal de conception des WMNs est de déterminer l'emplacement des passerelles, la force de signal à assigner aux routeurs sans fil et l'affectation des canaux aux radios. Lorsque l'emplacement des routeurs sans fil et l'emplacement des passerelles sont fixes, le problème consiste à effectuer une allocation des canaux et à déterminer les chemins de routage. L'affectation des canaux est un problème qui se situe dans l'ensemble des problèmes NP-difficiles [20], car il est impossible de vérifier toutes les affectations possibles dans un temps polynomial. La plupart des approches de conception proposent des modèles mathématiques qui sont résolus à l'aide de la programmation linéaire et d'heuristiques [16-20]. D'autres travaux se concentrent sur le problème de localisation des nœuds dans une zone [13, 14, 21].

À ce jour et à notre connaissance, aucune solution n'est proposée pour une topologie qui n'est pas fixe et où les caractéristiques et l'emplacement des nœuds ne sont

pas prédéfinis. Les approches existantes proposent des solutions qui traitent d'une seule partie du problème de conception. Les auteurs dans [22] calculent le débit par noeud pour une topologie prédéfinie, ainsi que l'emplacement des passerelles. Les auteurs dans [13,14, 21] proposent des techniques pour minimiser le nombre de passerelles, tout en supportant la demande des flots du trafic de la source et en provenance de l'Internet en fixant les caractéristiques des nœuds. Les auteurs de [16-20] proposent des algorithmes d'attribution de canaux pour optimiser le débit et pour satisfaire les besoins des utilisateurs en utilisant une topologie fixe.

3.2 Graphe de connectivité et de conflits

Il est intéressant de noter que la plupart des modèles existants sont basés sur le concept du graphe de connectivité et du graphe de conflits. Le graphe de connectivité détermine quels paires de nœuds ont une connexion sans fil en utilisant certains types de mesures, alors que le graphe de conflits indique quels groupes de liens se provoquent de l'interférence mutuellement et donc ne peuvent pas être actifs en même temps. Le problème avec ces modèles est que l'utilisation du graphe de conflits est très complexe : même pour un réseau d'une taille modérée, le nombre de contraintes d'interférences peut être des centaines de milliers.

Le déploiement et la planification des coûts des passerelles dans un WMNs sont des points importants. En optimisant le nombre de passerelles, on obtient une réduction des coûts; cependant, cela ne minimise pas nécessairement le coût total du réseau puisqu'une affectation optimale des canaux, la modification des caractéristiques d'un ou de plusieurs nœuds (par exemple, l'ajout d'une radio, en utilisant des radios avec un nombre optimal de canaux [15]) ou l'ajout d'un ou plusieurs noeuds peuvent être bien plus rentables. Par exemple, dans la figure 3.1, l'ajout d'un routeur sans fil supplémentaire permet d'optimiser le coût relié au réseau. Dans cet exemple, le routeur sans fil R1 doit satisfaire la demande des utilisateurs en envoyant ses données à une passerelle. Dans la figure de gauche, sa portée ne permet pas d'envoyer ses flots au routeur sans fil R3, donc il doit utiliser le point

d'accès G1. Lorsque le routeur sans fil R2 est ajouté au réseau dans la figure de droite, il devient possible pour le routeur sans fil R1 de se connecter à la passerelle G3. L'ajout d'un routeur sans fil peut permettre de minimiser le coût du réseau, le coût des passerelles étant significatif.

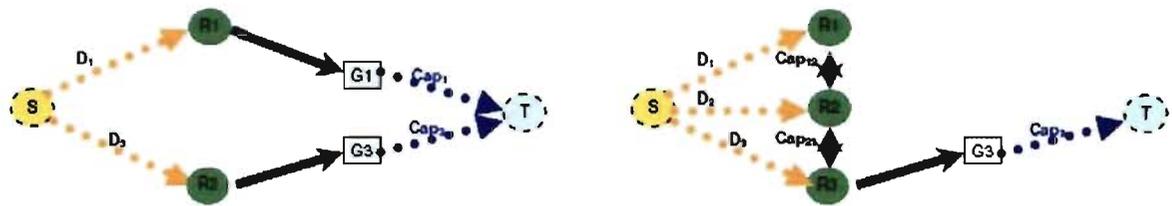


Figure 3.1. Optimisation du réseau par l'ajout d'un routeur sans fil

3.3 Modèles d'interférences

Deux différentes sources d'interférences ont été étudiées dans la littérature, soit l'interférence primaire et l'interférence secondaire. L'interférence primaire se produit lorsqu'un nœud transmet et reçoit des paquets en même temps. L'interférence secondaire se produit lorsqu'un nœud reçoit deux ou plusieurs communications; toutes les transmissions pourraient être destinées à ce nœud, ou seulement l'une de ces transmissions. Il existe plusieurs modèles qui tentent de contrôler ces interférences entre les nœuds d'un réseau :

- Le modèle d'interférence par protocole a été proposé pour la première fois dans [7]. Dans ce modèle, une transmission par un nœud est réussie si aucune autre transmission utilisant le même canal de transmission n'interfère avec ce nœud. Des simulations dans la source [11] indiquent que ce modèle ne fournit pas

nécessairement une vue globale de l'interférence en raison de la composition de l'interférence dans les réseaux sans fil. Toutefois, il fournit quelques bonnes estimations de l'interférence et surtout, il permet une analyse des performances théoriques d'un certain nombre des protocoles conçus dans la littérature.

Le modèle d'interférence par protocole fixe [8] est utilisé dans ce travail, il se base sur le modèle d'interférence par protocole, mais ne permet pas à un nœud du réseau de changer dynamiquement son énergie de transmission pour modifier sa portée. Chaque nœud détient une portée fixe dans le réseau. La figure 3.2 présente les trois cas possibles d'interférences : le nœud peut être dans la portée de l'émetteur, se trouver dans la zone d'interférence ou être en dehors des deux zones. Un routeur sans fil R_i peut communiquer avec un routeur sans fil R_j lorsque la distance les séparant D est plus petite que la portée du routeur sans fil P_i soit : $D < P_i$ (cas 1, Data link). Lorsque le routeur sans fil R_j se situe à une distance plus grande que la portée de R_i , mais une distance plus petite que le rayon d'interférence I_i du routeur sans fil R_i , la communication est impossible entre les deux nœuds, mais on doit tenir compte de l'interférence possible entre la région de P_i et de I_i . Dans ce cas $I_i > D > P_i$ (cas 2, Interférence link). Un autre cas possible est lorsque que la distance séparant les deux routeurs sans fil est plus grande que la portée et l'interférence du routeur R_i soit : $D > P_i$ et $D > I_i$ (cas 3, no link). Dans ce dernier cas, aucune interférence n'est possible entre les nœuds.

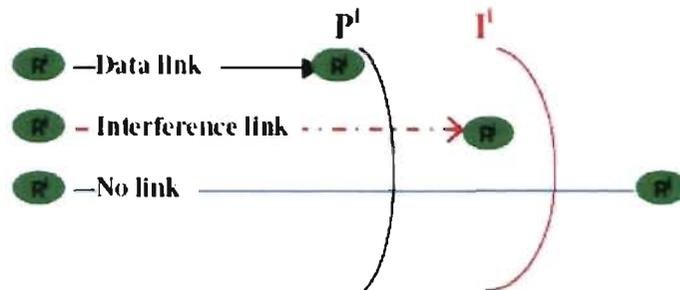


Figure 3.2. Schéma d'interférence

- Le modèle physique d'interférence [7] utilise le bruit d'interférence du signal (SINR) pour mesurer l'ensemble des interférences dans le réseau. La transmission d'un nœud v_i est bien reçue au nœud v_j si et seulement si le SINR atteint le seuil minimal du SINR exigé par le nœud v_j . Cette approche vérifie donc le bruit sur un canal et détermine si ce canal est libre.
- Le modèle RTS/CTS [9] utilise la communication entre nœuds pour l'allocation d'une communication. Une demande de transmission (RTS) est envoyée par le nœud source et ce nœud attend une réponse du nœud de destination. Le nœud de destination peut alors envoyer une autorisation (CTS) au nœud source pour ouvrir une connexion, si le canal demandé est libre.
- Le modèle d'interférence par transmetteur [10] est utilisé dans les antennes directionnelles et permet de tenir compte de l'interférence particulière que l'on retrouve dans ces réseaux. Une antenne directionnelle est une antenne qui rayonne davantage de pouvoir dans une ou plusieurs directions permettant d'améliorer la performance lors de l'envoi et de la réception de paquets en réduisant l'interférence. Dans notre conception, nous utilisons des antennes omnidirectionnelles. Ce modèle d'interférence par transmetteur est intéressant pour des travaux futurs.

3.4 Placement des passerelles pour optimisation du débit dans un WMN

Les auteurs dans [4] proposent une approche similaire à la nôtre. Dans la problématique établie, les fournisseurs du service doivent décider où placer les passerelles pour relier les routeurs sans fil du réseau à l'Internet. Différents déploiements de passerelles produisent différentes topologies du réseau et affectent le débit. Ce travail de recherche désire déterminer l'emplacement optimal des passerelles avant le déploiement pour maximiser le débit. La position de ces routeurs sans fil est déjà donnée, il suffit d'ajouter un certain nombre de passerelles k de telle façon que le débit du réseau soit maximisé. Chaque routeur sans fil dispose d'une demande qu'il doit envoyer à une passerelle. Il faut alors placer un nombre fixe de passerelles k en respectant le modèle d'interférence établie. La solution proposée est de diviser la topologie en une grille et de vérifier les meilleurs emplacements.

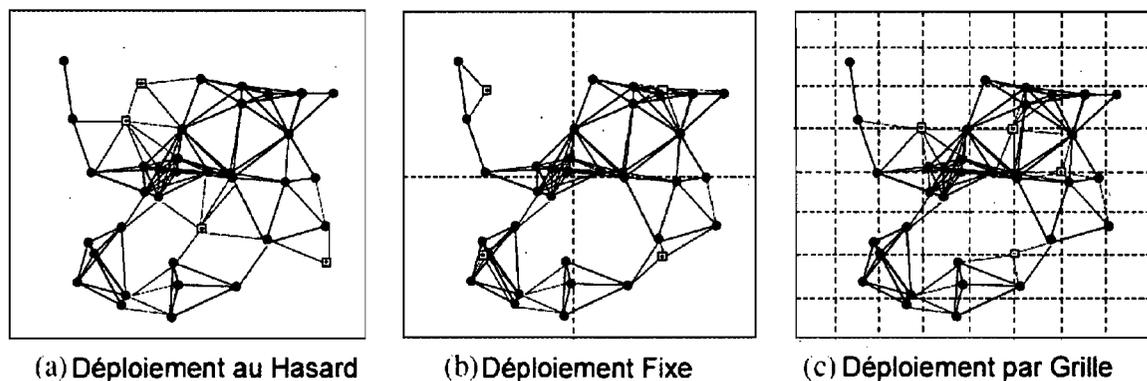


Figure 3.3. Différents déploiements de routeurs sans fil

Graphe disposant de 33 routeurs maillés et de 4 passerelles, de la source [4]

La figure 3.3 montre trois sortes de déploiement de passerelles utilisées dans la recherche. La première méthode de déploiement est effectuée au hasard. Le déploiement au hasard ne peut pas fournir de bon débit ou même ne pas garantir la connectivité du réseau

maillé. La seconde méthode consiste à déployer les passerelles dans des positions fixes, qui sont situées au centre des cellules. Dans la figure 3.3 (b), l'ensemble de la zone est divisé en 4 cellules et les passerelles sont placées au centre. La troisième méthode proposée dans [4] divise la zone en un grillage de dimension $a \times b$. On peut alors placer les passerelles dans les points de croisement du grillage. Le choix des valeurs de a , b et k dépendent de l'utilisateur.

La zone peut être divisée en plusieurs grilles; chaque grille détient une dimension de $a \times b$. L'ensemble des combinaisons est $C^k_{a \times b}$; ceci provient de la sélection de k éléments dans $a \times b$ éléments. Il est possible ensuite à l'aide d'un algorithme de vérifier tous les choix possibles et de déterminer les positions des passerelles. Les simulations effectuées et décrites dans [4] ont montré que la capacité du réseau augmente considérablement lorsqu'on utilise le déploiement par grille.

Notre approche permet de prendre en compte plus de particularités du réseau. Le nombre de passerelles n'est pas fixe et chaque emplacement d'un routeur sans fil ou d'une passerelle n'est pas déterminé d'avance. Certains des emplacements sont propices pour une passerelle. Notre modèle cherche à minimiser les coûts en prenant en compte un vaste ensemble de contraintes. Notre infrastructure se base sur des routeurs sans fil multi portées, multi radio et avec portées variables et tient compte des délais pour chaque routeur sans fil en calculant son nombre de sauts vers une passerelle.

Chapitre 4

Outil de cartographie pour les réseaux sans fil maillés

Ce chapitre présente un outil conçu pour fournir un aperçu visuel de la mise en place des WMNs. Cet outil permet de saisir et d'afficher des informations pour ses utilisateurs. Une interface est fournie à l'utilisateur qui peut ensuite ajouter des propriétés sur la topologie du réseau WMN à déployer. Une fois les données saisies, une heuristique est responsable de déterminer une bonne configuration possible du réseau. Cette heuristique fournit ensuite son résultat à l'interface qui affiche à l'utilisateur la meilleure configuration trouvée.

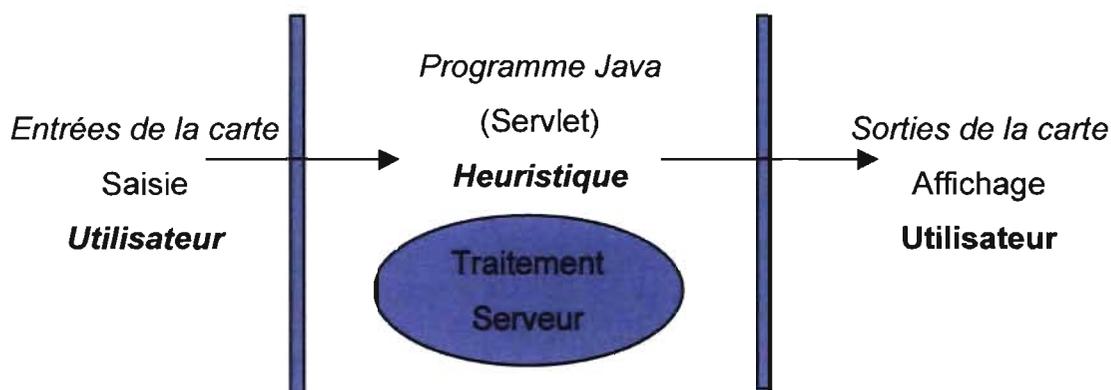


Figure 4.1. Fonctionnement de l'outil de cartographie

L'objectif est donc de saisir les entrées de l'utilisateur et de traiter ces données pour ensuite fournir une carte de sortie présentant la meilleure configuration trouvée. Plusieurs langages et technologies informatiques sont mis ensemble pour créer un outil de cartographie. Le fonctionnement de cet outil peut être divisé en deux étapes, la première étape est de saisir des informations du client et la deuxième étape est l'affichage du résultat au client.

4.1 Description

Le programme développé utilise les cartes disponibles de Google Map Api qui est un service gratuit de cartes géographiques et de plans en ligne. Ces cartes peuvent être utilisées pour construire une interface programmable pour un WMN en ajoutant à ces cartes de nouvelles fonctionnalités (ajout d'images, de fonctions Javascript, d'événements relié à la souris, paramètres de la carte, etc). Google Map Api est une forme de géoportail; ce service permet, à partir de l'échelle d'un pays, de zoomer jusqu'à l'échelle d'une rue. En effectuant la programmation d'une telle carte, il devient possible de s'en servir pour juxtaposer la configuration de notre réseau. Ces cartes se servent des positions de latitude et de longitude pour s'orienter; il est possible d'y ajouter des icônes, d'utiliser des classes déjà fournies, de dessiner des polygones et d'ajouter nos propres fonctions Javascript pour répondre aux événements produits par l'utilisateur.

La programmation de cartes Google Map Api est un sujet relativement nouveau. Les meilleures sources de documentation pour coder de telles cartes se retrouvent sur le Web. Le site officiel des développeurs des cartes Google [42] permet de bien assimiler les bases de cette technologie. Une multitude de sites Web sont disponibles [43] et offrent diverses fonctions Javascript qu'il est possible de modifier au besoin pour les incorporer dans un outil de cartographie développé comme le démontre la figure 4.2. La source [44] propose des fonctions plus complexes et spécifiques sous forme de tutoriel.



Figure 4.2. Des exemples de fonctions Javascript

Ces cartes utilisent la technologie AJAX, il est donc important de bien comprendre son fonctionnement pour être en mesure de modifier l'envoi des données. AJAX englobe plusieurs aspects de la programmation, XHTML est utilisé pour la structure sémantique des informations, CSS pour la présentation des informations, DOM et JavaScript pour afficher et interagir dynamiquement avec l'information présentée et l'objet XMLHttpRequest pour échanger et manipuler les données de manière asynchrone avec le serveur Web. La source [45] présente les fonctions requises pour être en mesure d'ajouter des fonctionnalités à AJAX. L'ajout de nouvelles fonctions AJAX est nécessaire à notre application, car il doit être possible de saisir les entrées des utilisateurs qui ne sont pas présents sur le serveur.

L'objet XMLHttpRequest est le point le plus important de AJAX, car c'est lui qui permet l'échange d'information. Pour construire l'outil WMN de cartographie, il est important que l'interface utilisateur soit compatible avec les navigateurs Mozilla et Internet Explorer. On doit configurer l'objet XMLHttpRequest d'après les spécifications de chaque navigateur. L'objet XMLHttpRequest permet donc d'envoyer des requêtes au serveur pour une demande précise d'information. L'outil a besoin de ce concept pour pouvoir envoyer les entrées de l'utilisateur au serveur.

Le programme conçu est une JSP (java server page) qui est connectée à un servlet. Le servlet est responsable d'exécuter une heuristique pour fournir le résultat au programme. Les données ajoutées à la carte sont obtenues à l'aide de Javascript. La saisie d'information de la carte n'est pas simple, car Javascript est un langage qui s'exécute sur l'ordinateur de l'utilisateur. L'heuristique est présente sur le serveur et a besoin de saisir ces entrées qui se trouvent du côté client. Il est donc nécessaire de changer les entrées Javascript saisies pour qu'elles soient traitées par un langage présent sur le serveur, dans ce cas en entrées Java. Ce changement d'entrées représente une difficulté considérable, la seule façon possible d'effectuer ce changement est d'utiliser l'objet XMLHttpRequest présent dans AJAX pour effectuer l'envoi de requêtes au serveur. Chaque nœud de la carte envoie une requête au serveur, toutes ces requêtes sont ensuite enregistrées dans une session Java. L'objet Session saisit ensuite l'information et manipule les données pour qu'elles soient accessibles par le

programme. Lorsque toutes les requêtes sont envoyées, le programme utilise l'objet Session pour commencer la simulation. Le programme dispose maintenant de l'information client (les entrées en Javascript) qu'il peut traiter pour fournir un résultat à l'utilisateur.

4.2 Entrées de la carte

Dans cette partie, nous allons explorer toutes les entrées dont la carte a besoin et donner des exemples de l'outil développé. L'idée est de fournir à l'utilisateur une interface utilisateur pour qu'il puisse communiquer avec la carte et choisir toutes les entrées qu'il désire envoyer au modèle. Ces entrées peuvent être divisées en deux catégories : des informations qui sont uniques à chaque nœud et des informations qui sont identiques pour tous les nœuds.

Information communes sur les routeurs

Coût d'une passerelle : (S)

Portées possibles : (m)

Coûts des portées : (S)

Capacité des radios : (kb/s)

Nombre de canaux :

Nombre de radios :

Nombre de sauts :

Figure 4.3. Informations communes sur les routeurs sans fil

La figure 4.3 est utilisée dans le programme pour saisir les informations communes sur les routeurs sans fil. Un nœud qui est une passerelle potentielle peut se transformer en passerelle dans le résultat produit par l'heuristique; un coût est relié à ce choix. Il faut aussi choisir la portée de chaque nœud; la portée choisie détermine le rayon. Un coût est aussi relié à ce choix. La capacité permet de connaître la quantité de flot maximum d'un lien. Le

programme prend aussi en entrée le nombre maximum de canaux disponibles dans le WMN, ainsi que le nombre de radios qu'un nœud peut posséder. Enfin, le nombre de sauts permet d'indiquer le nombre de sauts maximum entre les nœuds et une passerelle.

Information sur le routeur

Routeur simple 

 Routeur ou Gateway 

(Gateway potentiel)

 Routeur de Relais 

 Supprimer

Demande du routeur
 (kb/s)

Figure 4.4. Informations uniques de chaque routeur sans fil

La figure 4.4 est utilisée dans le programme pour saisir les informations uniques à chaque routeur sans fil. L'utilisateur a la possibilité de placer trois types de routeurs sans fil sur la carte des entrées : le routeur sans fil simple doit devenir un routeur sans fil, la passerelle potentielle peut se changer en passerelle ou en routeur sans fil et le routeur sans fil de relais est utilisé lorsque la demande de trafic correspondante est de 0; si le routeur de relais n'est pas utilisé dans la configuration finale, il est supprimé. L'interface utilisateur saisit la position de chaque routeur sans fil en latitude et longitude lorsque l'utilisateur "clique" sur la carte pour ajouter un nœud. Cette position ne change pas et sera la même dans la carte de sortie. La demande d'un routeur sans fil est une approximation de toutes les demandes des clients. Le modèle ne se préoccupe pas du problème des clients qui se connectent à l'infrastructure; il détermine plutôt l'infrastructure de l'épine dorsale du réseau.

Voici deux aperçus graphiques de l'outil développé qui est responsable de saisir les entrées des utilisateurs.

Régions du Québec: Montréal

Configuration Initiale

lat: 45.533890115717796, lon: -73.70161056518353

Informations communes sur les routeurs

Coût d'un gateway: 100 (\$)

Portées possibles: 50 100 150 200 250 (m)

Coûts des portées: 5 15 30 40 50 (\$)

Capacité des radios: 10 (kb/s)

Nombre de canaux: 12

Nombre de radios: 3

Hop maximal: 3

Options

Enregistrer Garder une copie de cette configuration

Ouvrir un fichier de configuration: Parcourir... Envoyer

Ouvrir un fichier de position potentielle: Parcourir... Envoyer

Information sur le routeur

Routeur simple

Routeur ou Gateway (Gateway potentiel)

Routeur de Relais

Supprimer

Demande du routeur: 1 (kb/s)

Lancer la simulation: Simulation

Figure 4.5. Premier exemple de la carte développée qui saisit les entrées

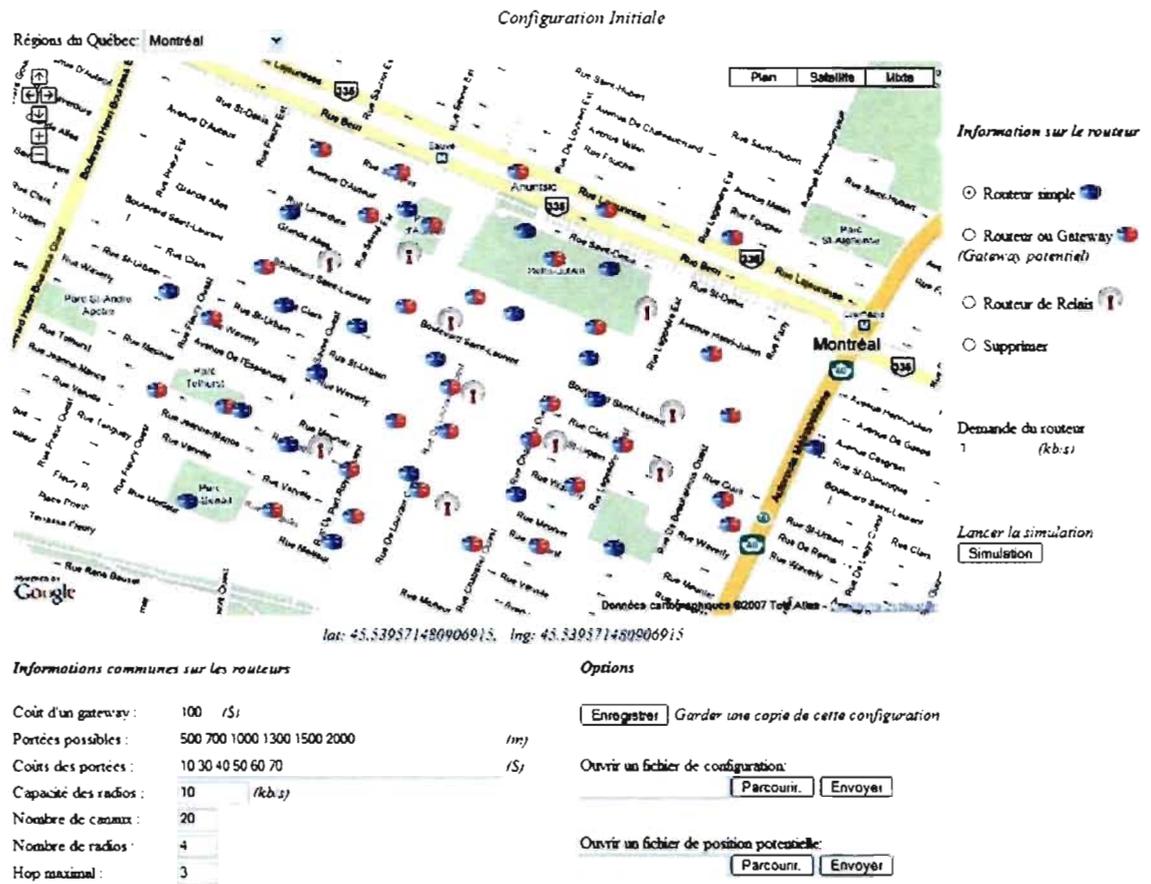


Figure 4.6. Deuxième exemple de la carte développée qui saisit les entrées

4.3 Sorties de la carte

L'heuristique détermine une bonne configuration et l'envoie au servlet. Le servlet utilise cette information pour créer un fichier XHTML qui contient les informations sur la topologie finale du WMN. Le navigateur charge ensuite ce fichier XHTML et l'information sur la configuration finale du réseau est présentée visuellement à l'utilisateur. Chaque nœud de la configuration finale dispose de caractéristiques déterminées lors du traitement de la solution. Dans le résultat proposé par notre méthode de résolution, chaque nœud possède : un nombre unique qui identifie le routeur sans fil, une position de localisation, un type (routeur simple, passerelle ou relais), sa portée et le nombre d'interfaces disponibles. La figure 4.7 illustre les informations affichées d'un nœud lorsqu'un utilisateur "clique" sur celui-ci. Sur la carte de sortie d'autres informations sont disponibles telles que le nombre de nœuds du réseau et le coût total de la configuration. Le coût total de l'infrastructure est le plus bas trouvé par l'heuristique.

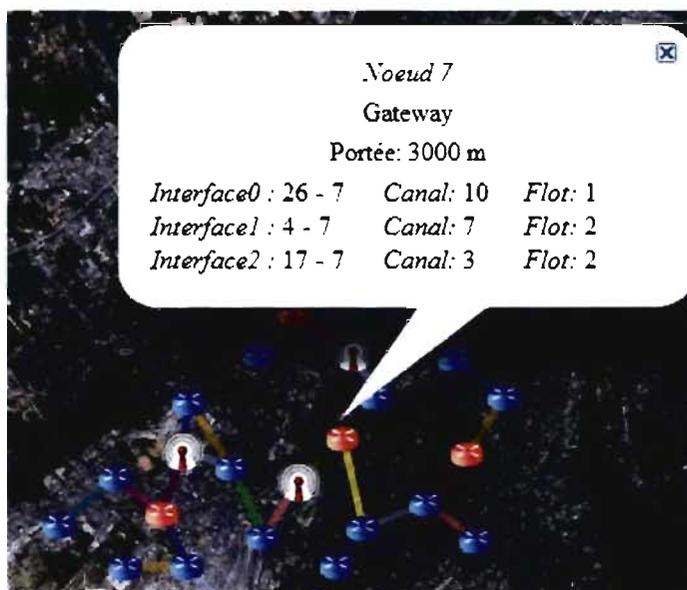


Figure 4.7. Propriétés finales d'un nœud

Voici trois aperçus graphiques de l’outil développé qui est responsable d’afficher le résultat final de l’infrastructure WMN.



Figure 4.8. Premier exemple d’un résultat WMN

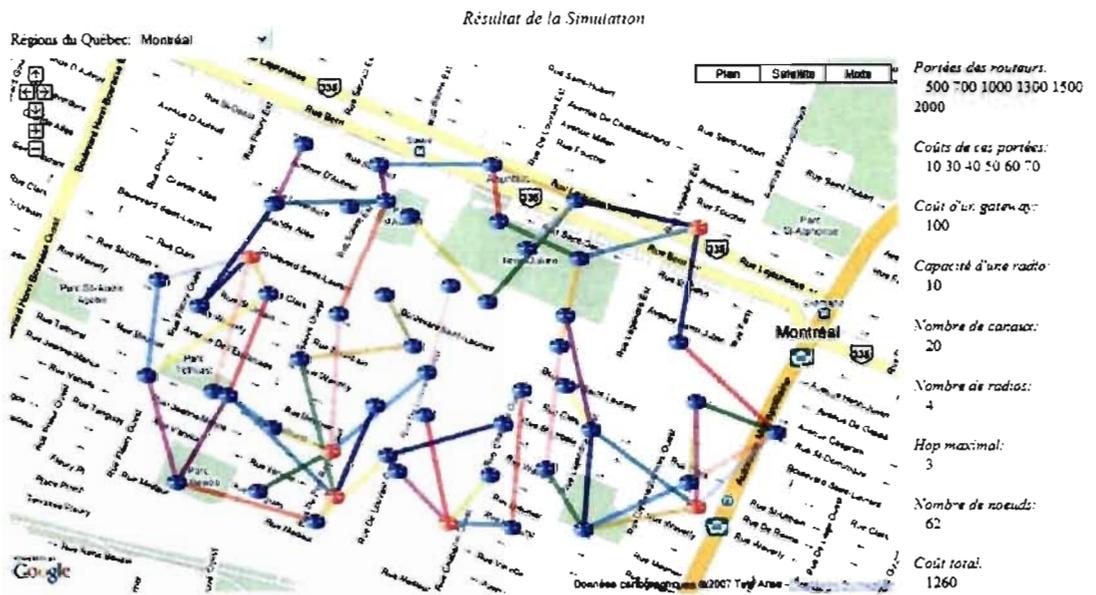


Figure 4.9. Deuxième exemple d’un résultat WMN



Figure 4.10. Troisième exemple d'un résultat WMN

4.4 Options

L'outil de cartographie permet de saisir les données de l'utilisateur lorsque celui-ci ajoute un routeur sans fil potentiel sur la carte. L'ajout manuel de chaque routeur est une étape qui peut être fastidieuse. La carte doit permettre de charger et de sauvegarder des configurations WMNs. Une première option permet de charger une configuration enregistrée du client. Un fichier est ouvert par le programme qui contient toutes les entrées du programme en format texte et le programme affiche ensuite toutes les données du WMN sur la carte conçue. Une deuxième option permet d'enregistrer des configurations du client en utilisant le même format des données. Une troisième option permet à l'utilisateur d'ajouter des positions potentielles où il est possible d'ajouter des nœuds.

Options

<input type="button" value="Enregistrer"/> <i>Garder une copie de cette configuration</i>	→	# Données sur la carte
Ouvrir un fichier de configuration:	→	Lat: 45.54179577439938
<input type="text"/> <input type="button" value="Parcourir..."/> <input type="button" value="Envoyer"/>		Lon: -73.68208408355713
		Zoom: 15
		CoutG: 100
		Portee: 100 150 200 250 300 400 500
Ouvrir un fichier de position potentielle:		CoutsP: 1 2 3 4 5 6 7
<input type="text"/> <input type="button" value="Parcourir..."/> <input type="button" value="Envoyer"/>		CapaciteR: 10
→		NombreC: 5
		NombreR: 3
		HopMax: 3
		# Informations sur les noeuds
		45.53737715921508 -73.68500232696533 true 1
		45.538098589494005 -73.68371486663818 true 1
		45.538248886303755 -73.67959499359131 true 1
		45.537587577335906 -73.68264198303223 true 1
		45.53791823279202 -73.67388725280762 true 1
		45.53803847065761 -73.67581844329834 true 1
		45.538820010517036 -73.67478847503662 true 1

Figure 4.11. Options de l'outil de cartographie

L'utilisateur peut choisir d'ouvrir un fichier d'emplacements potentiels. Un emplacement potentiel est une zone où il est possible d'ajouter un nœud. Cet emplacement ne change rien au problème, mais donne un aperçu graphique à l'utilisateur sur des positions potentielles. Par exemple, une ville peut connaître les emplacements potentiels pour l'ajout de routeur sans fil qui correspondent à la présence de lampadaires. Cette option permet de charger des positions potentielles et de les afficher sur la carte des entrées comme le montre la figure 4.12.

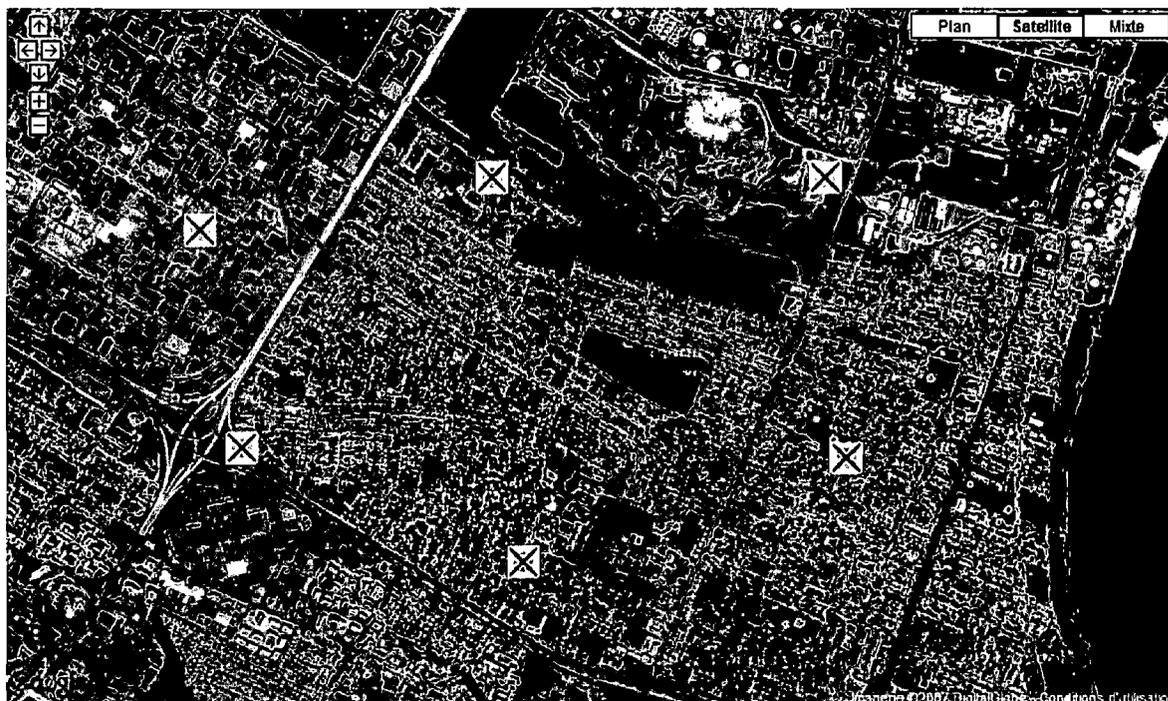


Figure 4.12. Localisations potentielles de nœuds

Chapitre 5

Modèle d'optimisation WMN

La littérature ne fournit pas de modèle qui traite la planification des WMNs sur tous ses aspects : plusieurs efforts au niveau des WMNs sont axés sur les stratégies de routage et sur l'affectation des canaux et rares sont les travaux au niveau de la conception des réseaux WMNs (ils supposent que les WMNs sont déjà conçus). Cependant, divers produits commerciaux dans ce domaine [25-28] ont vu le jour.

Ce chapitre présente le modèle [1] sur lequel nous nous sommes basés pour la résolution du problème de conception de réseaux WMNs. Dans la première partie, on définit les principales caractéristiques considérées dans le modèle. La deuxième partie explique le modèle général plus en détail ainsi que les contraintes établies. Le modèle est la base de l'heuristique développée dans le chapitre 6.

5.1 Le réseau WMN considéré

Dans notre architecture WMN, l'épine dorsale est constituée de routeurs sans fil. Dans cette infrastructure, les routeurs sans fil sont responsables d'acheminer le trafic et les clients n'ont pas à effectuer d'opérations de routage. Les routeurs sans fil vont donc former l'épine dorsale du réseau où les clients vont se connecter. Les routeurs sans fil servent de points d'accès aux clients. Ces routeurs sont stationnaires et connectés entre eux par des connexions sans fil. Un certain pourcentage (le pourcentage de passerelle dépend du problème traité) de ces routeurs sans fil sont des passerelles (routeurs sans fil disposant d'une connexion à l'Internet), ils sont responsables d'envoyer et de recevoir des messages vers l'Internet.

Les principales caractéristiques du réseau sans fil maillé considérées dans cette étude peuvent être résumées comme suit :

- Il y a de multiples possibilités pour la localisation des routeurs sans fil et des passerelles et il n'y a pas d'obstacles entre les routeurs sans fil.
- Les routeurs sans fil ne sont pas mobiles et peuvent posséder plusieurs radios qui leur permettent de communiquer simultanément avec plus qu'un voisin simultanément en utilisant différents canaux.
- Il y a de multiples canaux sans fil, ces canaux sont orthogonaux les uns par rapport aux autres (exemple : 12 canaux pour IEEE 802.11a [31] et 3 canaux pour IEEE 802.11b/IEEE 802.11g [32]). Le nombre de canaux est une donnée du problème.
- La puissance de transmission (c'est-à-dire la portée) des routeurs sans fil peut être sélectionnée à partir d'un ensemble discret de portées possibles. On connaît aussi les coûts rattachés à l'utilisation de chaque portée.
- La demande finale des utilisateurs (par exemple, les clients) est regroupée par nœud (routeur sans fil), ces utilisateurs sont dans la portée de transmission du nœud qui fournit la couverture.
- Il y a aucune interférences entre les transmissions provenant des clients/utilisateurs et les transmissions en provenance des routeurs sans fil; par exemple, on peut supposer que le protocole IEEE802.16 [29] est utilisé pour la communication entre les routeurs sans fil et que le protocole IEEE802.11a/b/g est utilisé pour la communication entre les clients et les routeurs sans fil.

5.2 Modèle de conception

Dans les travaux de A. Beljadid et al. [1-3], un modèle généralisé est défini pour la conception d'un WMN. Ce modèle de conception a pour objectif de prendre en compte tous les paramètres qui ont une influence significative sur le réseau. Dans [2], on prend en considération l'interférence, le choix des canaux, la portée des routeurs sans fil, les

exigences des clients (leurs demandes de trafic et qualité de service) et les contraintes de l'environnement physique (localisations potentielles des routeurs sans fil et des passerelles).

Tableau 5.1. Liste des symboles utilisés dans le modèle de conception

Les symboles suivants sont utilisés dans le modèle :

$G = (V, A)$	Graphe où V représente les noeuds et A les arcs (liens)
n	Nombre de noeuds (passerelles et routeurs sans fil potentiels)
g	Nombre de passerelles
C	Nombre maximum de canaux orthogonaux
R	Nombre maximum de radios (carte NIC)
P	Nombre maximum de portées possibles
R^i	Routeur sans fil
G^i	Passerelle si R^i est câblé
$R_1^i - R_R^i$	Radios de R^i
P^i	Portée de communication choisie de R^i
P_p^i	Élément de position p dans l'ensemble des portées possibles
P_{\min}^i, P_{\max}^i	Portée minimum et maximum de R^i $\min(P_p^i) \max(P_p^i) \quad 1 \leq p \leq P$
q_1^i, q_2^i	Index de P_{\min}^i, P_{\max}^i dans la liste des portées possibles

D	Ensemble des demandes
D^i	Demande de trafic à R^i . $D^i=0$ si R^i est un routeur de relais
$\langle R^i, R^j \rangle$	Lien entre R^i et R^j
Θ_{ij}^k	Capacité du lien $\langle R^i, R^j \rangle$ sur le canal k
Θ_i	Capacité de la passerelle G^i
$d(R^i, R^j)$	Distance entre R^i et R^j
B_p^i	Coût de R^i s'il utilise la portée p
C^i	Coût pour devenir une passerelle R^i
Z	Valeur booléenne qui indique si le noeud est une passerelle ($Z=1$)
Y	Valeur booléenne qui indique la portée choisie dans l'ensemble des portées possibles
H	Nombre de sauts maximum
N	Ensemble de nombres entiers

La planification du réseau prend en compte un environnement multi portées, multi radios et multi canaux dans lequel les caractéristiques de chaque nœud ne sont pas prédéfinies. Dans cette problématique, on doit trouver pour chaque nœud du réseau ses caractéristiques.

Le programme doit choisir pour chaque routeur sans fil de la problématique ses caractéristiques finales en prenant en compte les données d'entrées obtenues.

- Le routeur sans fil peut-il devenir une passerelle ? À quel coût ?
- Quelles portées sont disponibles pour ce routeur sans fil ? Quel en est le coût ?
- Quelle est la quantité de flots qui doit être envoyée aux passerelles ?
- Combien de radios sont disponibles ?
- Quelle est la capacité des radios ?
- Combien de canaux au total ce routeur sans fil peut utiliser ?
- En combien de sauts les flots doivent atteindre leurs destinations ?
- Quelle distance sépare le routeur sans fil de ses voisins ?

Le modèle prend en entrée les demandes, les localisations potentielles des routeurs sans fil, les routeurs sans fil qui peuvent se connecter vers l'Internet (passerelle potentielle), les portées possibles, les coûts et d'autres facteurs. Ce modèle vise à minimiser les coûts totaux du réseau sans fil maillé : ceux-ci proviennent de deux facteurs : un changement en passerelle pour un routeur sans fil dispose d'un coût et l'assignation d'une portée à un routeur sans fil entraîne aussi un coût. Le but est donc de minimiser ces coûts en trouvant un équilibre entre ces deux facteurs tout en respectant les contraintes.

5.3 Contraintes du modèle

Le modèle de conception a pour but de minimiser le coût global du WMN. Le coût se compose du coût des passerelles utilisées et le coût des routeurs. Le coût d'un routeur sans fil dépend de la portée utilisée B_p^i . Le coût d'une passerelle est une valeur définie C^i .

Le modèle est défini comme étant un programme linéaire mixte (MLP) formulé :

La fonction objective est : $\min \sum_{i=1}^g C^i Z^i + \sum_{i=1}^n \sum_{p=g_i}^{q_i} B_p^i Q_p^i$ définit dans la source [1].

Contraintes :

$$Z^i + Y^i \leq 1; \forall 1 \leq i \leq n \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^C X_{ij}^k \leq CY^i; \forall 1 \leq i \leq n \quad (2)$$

$$\omega_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^C \omega_{ij}^k = D^i + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^C \omega_{li}^k; \forall 1 \leq i \leq n \quad (3)$$

$$\omega_{ij}^k \leq \Theta_{ij}^k X_{ij}^k; \forall 1 \leq k \leq C; \forall 1 \leq i, j \leq n \quad (4)$$

$$\omega_i \leq \Theta_i Z^i; \forall 1 \leq i \leq n \quad (5)$$

$$\omega_{ij}^k = \sum_{d \in D} \omega_{ij}^{kd}; 1 \leq i, j \leq n; 1 \leq k \leq C \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij}^k \leq 1; \forall 1 \leq k \leq C; \forall 1 \leq j \leq n \quad (7a)$$

$$\sum_{i=1}^n (X_{ij}^k + X_{ij}^l) \leq 2 + \lambda_j - \sum_{p=q_i}^{q_j} I_p^i Q_p^i; \forall 1 \leq k \leq C; \forall 1 \leq i, j \leq n \quad (7b)$$

$$\sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij}^k \leq \sum_{p=q_i}^{q_j} P_p^i Q_p^i; \forall 1 \leq k \leq C; \forall 1 \leq i \leq n \quad (8)$$

$$h_i^d + 1 - h_j^d \leq M \times (1 - \Omega_{ij}^{kd}); \forall i, j, k \forall d \in D \quad (9)$$

$$\Omega_{ij}^{kd} \leq M \omega_{ij}^{kd}; \forall i, j, k \forall d \in D \quad (10)$$

$$h_i^d \leq H; \forall 1 \leq i \leq n; \forall d \in D \quad (11)$$

$$X_{ij}^k, Y^i, Z^i, Q_k^i \in \{0,1\}; \forall 1 \leq i, j \leq n; \forall 1 \leq k \leq C \quad (12)$$

$$\Omega_{ij}^{kd} \in \{0,1\}, \omega_{ij}^{kd} \in \mathbb{N}, h_i^d \geq 0; \forall i, j, k \forall d \in D \quad (13)$$

Dans cette partie, les contraintes principales du modèle sont expliquées rapidement pour mieux comprendre la problématique choisie. Le modèle utilise les données entrées et fournit ensuite la topologie trouvée au coût le plus bas en respectant les neuf contraintes générales énumérées ci-dessous.

$$\text{Contrainte 1 : } Z^i + Y^i \leq 1; \forall 1 \leq i \leq n$$

La première contrainte indique qu'un nœud i peut être ou bien une passerelle ($Z^i=1$) ou bien un routeur sans fil ($Y^i=1$), ou non sélectionné dans la topologie ($Z^i=0$ et $Y^i=0$). Il est possible qu'un routeur sans fil ne soit pas sélectionné lorsqu'il ne détient pas de flots à envoyer à une passerelle (routeur de relais).

Un routeur sans fil maillé en entrée devient obligatoirement un routeur sans fil en sortie. Les routeurs sans fil de relais sont différents des routeurs sans fil normaux, car ils n'ont aucune demande et donc il n'est pas nécessaire de les conserver dans la conception. Les routeurs sans fil de relais sont optionnels, ils sont seulement utilisés s'ils permettent de trouver une meilleure topologie du réseau. Un routeur de relais ne dispose pas d'une demande client, il est employé comme relais entre deux routeurs sans fil. Lorsque l'utilisation d'un routeur de relais produit une réduction du coût du réseau (permet à d'autres routeurs de choisir des portées plus petites), le routeur de relais est conservé. La figure 5.1 explique les concepts de la première contrainte.

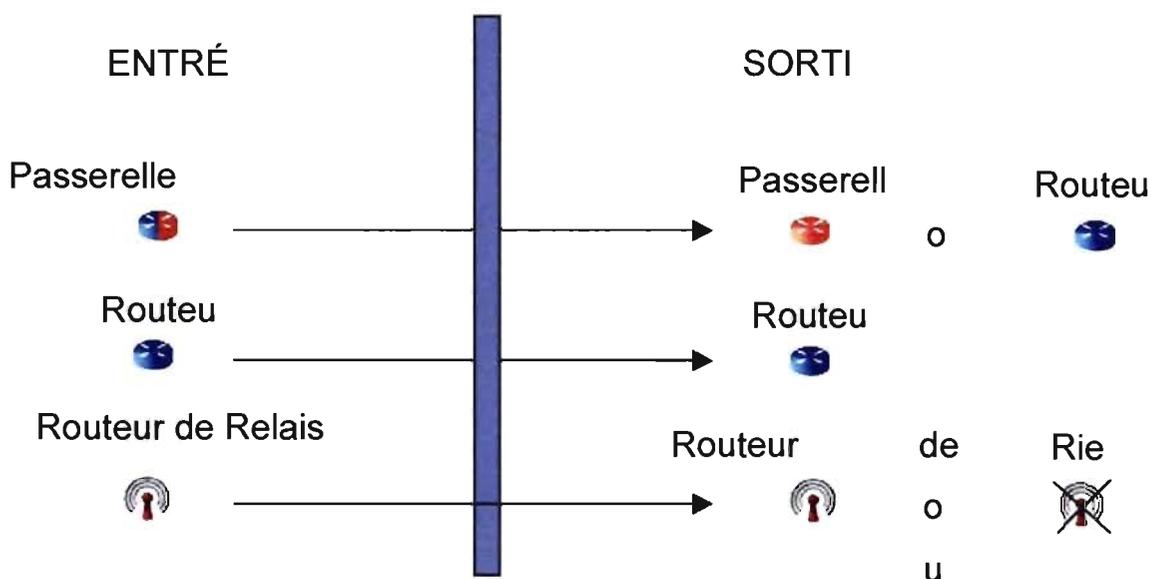


Figure 5.1. Les trois types de routeur de la problématique

$$\text{Contrainte 2 : } \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^C X_{ij}^k \leq CY^i ; \forall 1 \leq i \leq n$$

La deuxième contrainte indique que la communication entre deux nœuds est possible que s'il y a une connexion (lien sans fil) entre ces deux nœuds. Le nombre total de liens d'un nœud ne peut pas dépasser son nombre de radios. Dans la figure 5.2, le nombre maximal de radios qu'un routeur peut avoir est de 3 radios. Chaque routeur sans fil doit donc utiliser un nombre de radios inférieur à trois. Il doit y avoir un chemin pour chaque routeur vers une passerelle.

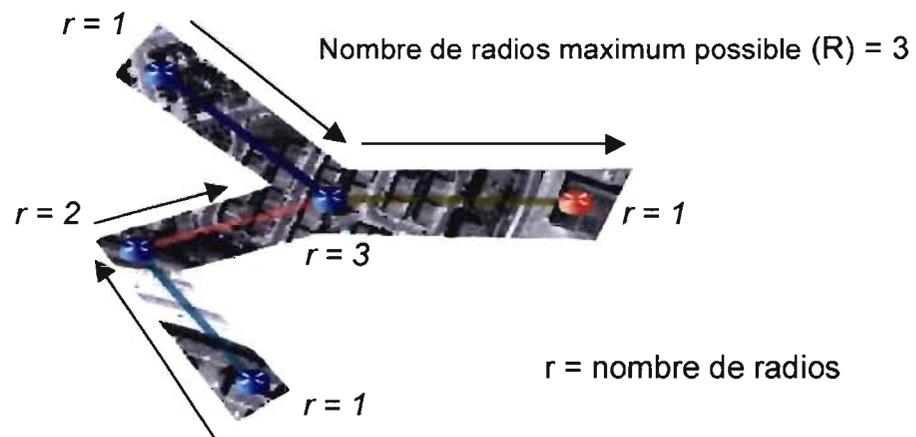


Figure 5.2. Liens entre les nœuds

$$\text{Contrainte 3 : } \omega_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^C \omega_{ij}^k = D^i + \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^C \omega_{li}^k ; \forall 1 \leq i \leq n$$

La troisième contrainte stipule qu'il y a conservation du flot. Le principe de la conservation des flots veut que la somme de flot reçu de clients et de ceux venant d'autres nœuds soit égale au flot sortant. Dans la figure 5.3, le routeur sans fil nommé A reçoit 10 unités de flot (1+4+5). La demande que ce routeur sans fil reçoit de ses clients est de 1 unité de flot. Il envoie donc vers la passerelle un flot de 11, (10+1).

Les flots entrants + demande du nœud = flots sortants

Tous les flots entrants sont dirigés vers

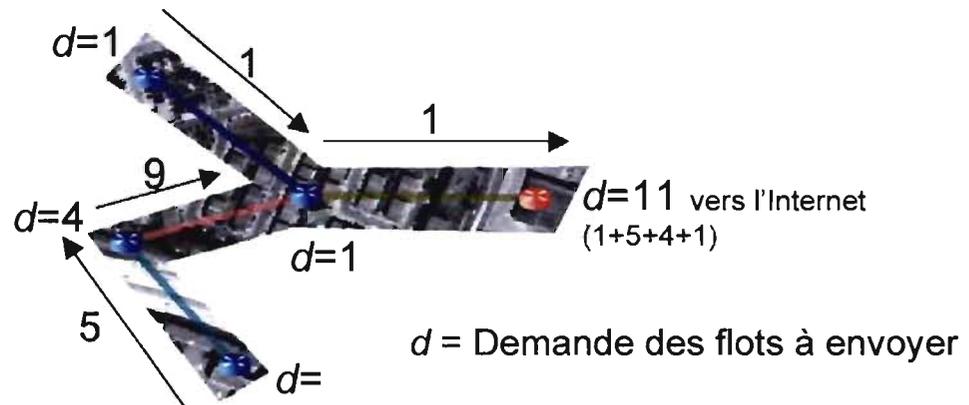


Figure 5.3. Conservation des flots

$$\text{Contrainte 4 : } \omega_{ij}^k \leq \Theta_{ij}^k X_{ij}^k ; \forall 1 \leq k \leq C ; \forall 1 \leq i, j \leq n$$

$$\text{Contrainte 5 : } \omega_i \leq \Theta_i Z^i ; \forall 1 \leq i \leq g$$

La quatrième et la cinquième contraintes indiquent que pour chaque lien (connexion des radios sur un canal) du graphe, le flot d'un lien doit être plus petit que la capacité de cet arc. Le débit d'un flot qui passe dans un routeur sans fil est plus petit ou égal à la capacité de lien. Le modèle fait la supposition que la capacité de la passerelle vers l'Internet est infinie. Dans la figure 5.4, la capacité disponible d'un lien est calculée en soustrayant de la capacité (le nombre maximal de flots que peut supporter le lien) du flot déjà présent dans ce lien.

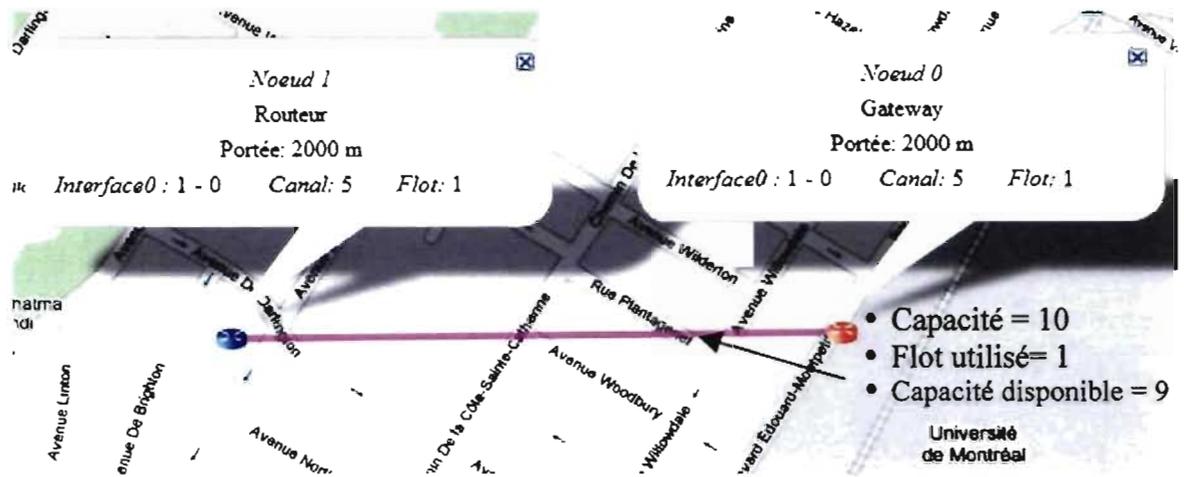


Figure 5.4. Capacité d'un lien

$$\text{Contrainte 6 : } \omega_{ij}^k = \sum_{d \in D} \omega_{ij}^{kd}; 1 \leq i, j \leq n; 1 \leq k \leq C$$

La sixième contrainte stipule que la sommation de toutes les demandes pour un nœud sur ses liens est la demande totale qu'il doit satisfaire. La capacité utilisée d'une radio est la sommation de toutes les demandes sur ce lien.

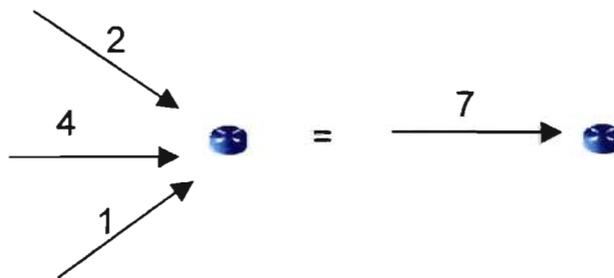


Figure 5.5. Sommation des flots

$$\text{Contrainte 7 : } \sum_{i=1}^n X_{ij}^k \leq 1; \forall 1 \leq k \leq C; \forall 1 \leq j \leq n$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^n (X_{il}^k + X_{lj}^k) \leq 2 + \lambda_{ij} - \sum_{p=q_i}^{q_j} I_p^i Q_p^i; \forall 1 \leq k \leq C; \forall 1 \leq i, j \leq n \right.$$

La septième contrainte est une contrainte d'interférence. Le modèle de base ne permet aucune interférence et se base sur le modèle d'interférence à protocole fixe. Dans ce modèle, une transmission sur un canal k est une réussite quand tous les voisins de l'émetteur et du receveur sont silencieux sur ce canal pour la durée de la transmission. Un nœud ne peut pas utiliser deux fois le même canal. Il ne peut pas utiliser un canal si cela cause de l'interférence dans le WMN. Tous les autres nœuds de la figure 5.6 ne peuvent pas utiliser le canal 3 puisqu'il est déjà utilisé.

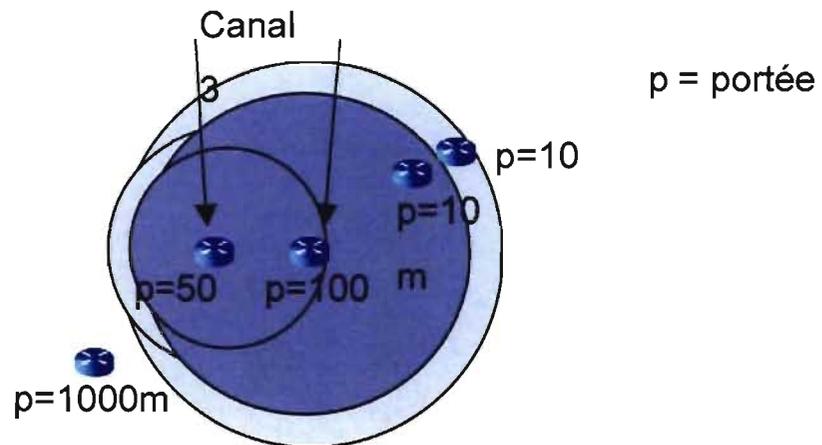


Figure 5.6. Principe d'interférence

$$\text{Contrainte 8 : } \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij}^k \leq \sum_{p=d_i}^{d_j} P_p Q_p^i ; \forall 1 \leq k \leq C, \forall 1 \leq i \leq n$$

La huitième contrainte indique qu'il est possible de créer un lien entre deux nœuds seulement si la distance les séparant est plus petite que leur portée. Dans la figure 5.7, le cas 1 est le seul cas où il est possible de créer une connexion entre les deux nœuds, car pour chaque pair de nœuds la distance qui les sépare est plus petite que la portée des routeurs sans fil.

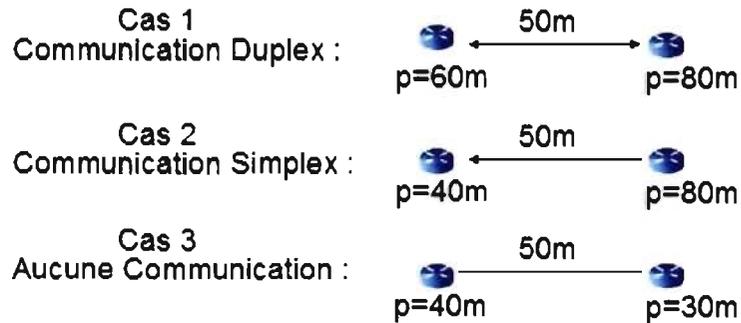


Figure 5.7. Choix d'une portée d'un routeur sans fil

$$\text{Contrainte 9 : } h_i^d + 1 - h_j^d \leq M \times (1 - \Omega_{ij}^{kd}) ; \forall i, j, k \forall d \in D$$

$$h_i^d \leq H ; \forall 1 \leq i \leq n ; \forall d \in D$$

La neuvième contrainte prend en charge le nombre de sauts d'un nœud par rapport à une passerelle; ceci est utilisé pour représenter les délais entre une source et une passerelle. Un des problèmes majeurs dans les WMNs est lorsque le nombre de sauts augmente, le délai augmente aussi. Dans la figure 5.8, chaque nœud connaît le nombre de sauts qu'il doit effectuer pour accéder à une passerelle. Cette contrainte s'occupe de réglementer le nombre de sauts vers une passerelle. La valeur du nombre de sauts est augmentée de 1 à chaque saut et le nombre de sauts ne doit pas dépasser une valeur donnée nommée H .

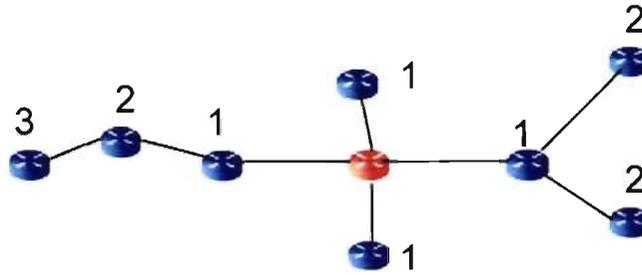


Figure 5.8. Nombre de sauts de chaque routeur vers la passerelle

Ces neuf contraintes générales du modèle vont être utilisées pour déterminer la topologie à coût le plus faible du réseau. Elles représentent les contraintes de base pour définir les solutions possibles.

Chapitre 6

Heuristique de résolution du modèle

Le modèle défini dans le chapitre 5 introduit un problème de minimisation du coût du réseau. Le problème est NP-difficile. CPLEX peut résoudre ce problème pour des réseaux de petite taille et de taille moyenne. Pour des réseaux de taille plus importants, une heuristique est nécessaire. Cet algorithme d'optimisation doit satisfaire toutes les contraintes établies et converger vers une configuration possible disposant du coût le plus bas en explorant l'ensemble des solutions.

La première partie fournit une vue d'ensemble du problème. La deuxième partie de ce chapitre explique la structure du programme établie. La troisième partie se concentre sur le problème de trouver une solution possible pour le problème, ainsi que la validation de cette solution. La dernière partie explique les caractéristiques de l'algorithme génétique utilisé pour manipuler les solutions considérées.

6.1 Vue d'ensemble

Puisqu'on ne connaît pas de méthodes classiques plus efficaces, une métaheuristique est nécessaire pour la résolution du problème. Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de maximiser (ou minimiser) une fonction donnée. Dans la plupart des cas, un problème d'optimisation se divise en deux phases : la recherche des solutions admissibles puis la recherche de la solution à coût minimal. Pour résoudre ce problème, il existe plusieurs heuristiques qui se basent sur des stratégies d'évolution [47] (algorithmes génétiques, algorithmes à évolution différentielle, algorithmes à estimation de distribution). L'usage d'un algorithme génétique [23] est adapté à une exploration rapide et

globale d'un espace de recherche de taille importante et est capable de fournir plusieurs solutions. Les solutions qui ne sont pas admissibles peuvent être combinées aux solutions admissibles. Une autre heuristique possible est la recherche tabou [24] qui permet de garder en mémoire des opérations illégales pour mieux visiter l'espace des solutions.

Les algorithmes génétiques tentent de simuler le processus d'évolution naturelle suivant le modèle de Darwin. Ils utilisent un vocabulaire similaire à celui de la génétique naturelle. Dans une population il y a des individus. L'individu est composé d'un chromosome lui-même constitué de gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. On utilise les principes de sélection, de croisement et de mutation. La sélection a pour but de favoriser les meilleurs éléments de la population, le croisement et la mutation assurent une exploration efficace de l'espace de recherche.

Notre algorithme génétique doit fournir pour des réseaux de grande taille (plus de 200 nœuds) une réponse de qualité. Le problème majeur est de tenir compte de la demande que chaque nœud doit satisfaire. L'objectif est de trouver certaines solutions (population de base) dans un ensemble de solutions possibles et ensuite d'utiliser le principe des algorithmes génétiques (sélection, croisement, mutation) pour déterminer une solution à coût aussi bas que possible. L'une des difficultés d'utilisation d'un algorithme génétique réside dans le choix des nombreux paramètres qui le contrôlent : nombre d'individus dans la population, nombre de génération et/ou critère d'arrêt, probabilités de croisement et mutation. Pour effectuer la sélection d'un chromosome dans la population de base, une formule quadratique est utilisée ce qui fournit les meilleurs résultats d'après la source [23], les paramètres de l'heuristique sont discutés dans la section 6.4.

Plusieurs critères d'arrêt de l'algorithme sont possibles : le nombre de générations peut être fixé a priori (temps constant) ou l'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus suffisamment rapidement. Pour utiliser un algorithme génétique sur un problème d'optimisation on doit donc disposer d'un principe de codage des individus (chaque routeur correspond à un gène dans un chromosome), d'un mécanisme de

génération de la population initiale (détermination d'une solution possible) et d'opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations.

L'heuristique conçue n'est pas comparée à d'autres. Le modèle propose un problème spécifique ce qui entraîne qu'il est difficile de trouver d'autres travaux qui offrent des méthodes de résolution pour le même contexte. L'heuristique développée tente de résoudre le problème de la façon la plus efficace, mais elle sert surtout comme point de base de comparaisons avec d'autres méthodes de résolution pour ce problème. Les outils développés pour les WMNs ont besoin d'être connectés à un programme qui résout le problème énoncé.

6.2 Structure du programme

Cette section explique la structure du programme conçu et donne un aperçu de la construction de celui-ci. La structure du programme et sa division en objets permettent de mieux comprendre le fonctionnement de l'heuristique, ainsi que la dépendance de celui-ci envers de l'outil de cartographie et de simulation.

Toutes les entrées qui sont nécessaires à la formule développée sont saisies à l'aide de l'interface utilisateur. Ces données sont ensuite envoyées avec la technologie AJAX à une heuristique écrite en Java sur le serveur. Cette méthode de résolution de problèmes fournit une solution avec les entrées reçues et envoie la solution trouvée au navigateur web. Le navigateur web affiche alors à l'utilisateur la réponse fournie. La figure 6.1 illustre ce concept.

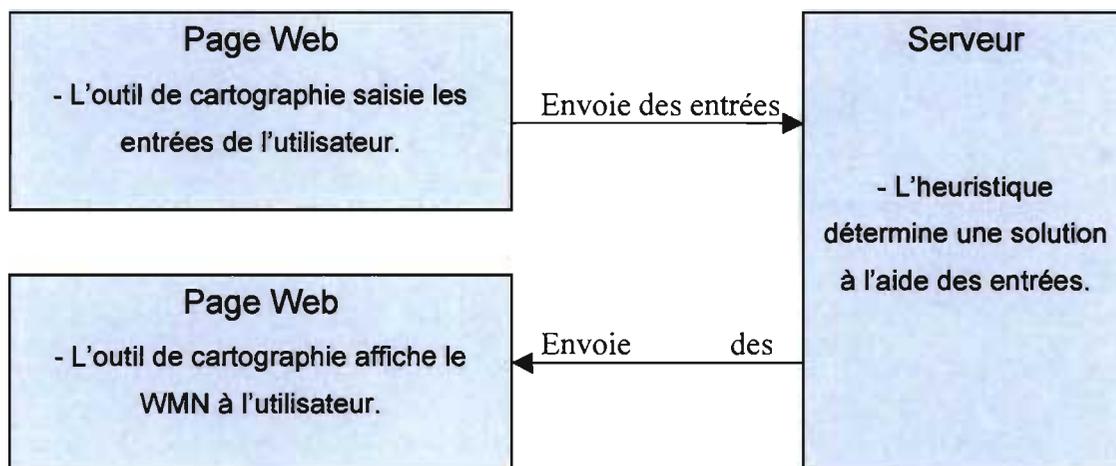


Figure 6.1. Vue globale du programme conçu

Dans le programme un objet «session» est responsable de communiquer avec le serveur et de saisir les entrées. Une fois les entrées saisies, l'objet «résolution» se met alors en marche. Une classe du programme appelée «template» est responsable de garder les entrées saisies pour chaque nœud. Les routeurs sans fil sont créés à partir de la classe «template» qui contient toutes les possibilités des choix sur les caractéristiques d'un nœud (passerelle potentielle, choix des portées possibles, demande à satisfaire, etc.). En utilisant la classe «template» pour le choix des routeurs sans fil, plusieurs objets appelés «chromosome» sont créés qui représentent des solutions potentielles. L'heuristique utilise aussi plusieurs fonctions de tris (l'objet «tris»). Lorsqu'une solution est déterminée, l'objet «écriture» du programme peut alors fournir la réponse finale à l'utilisateur en lui créant un document XHTML. La figure 6.2 illustre ces concepts.

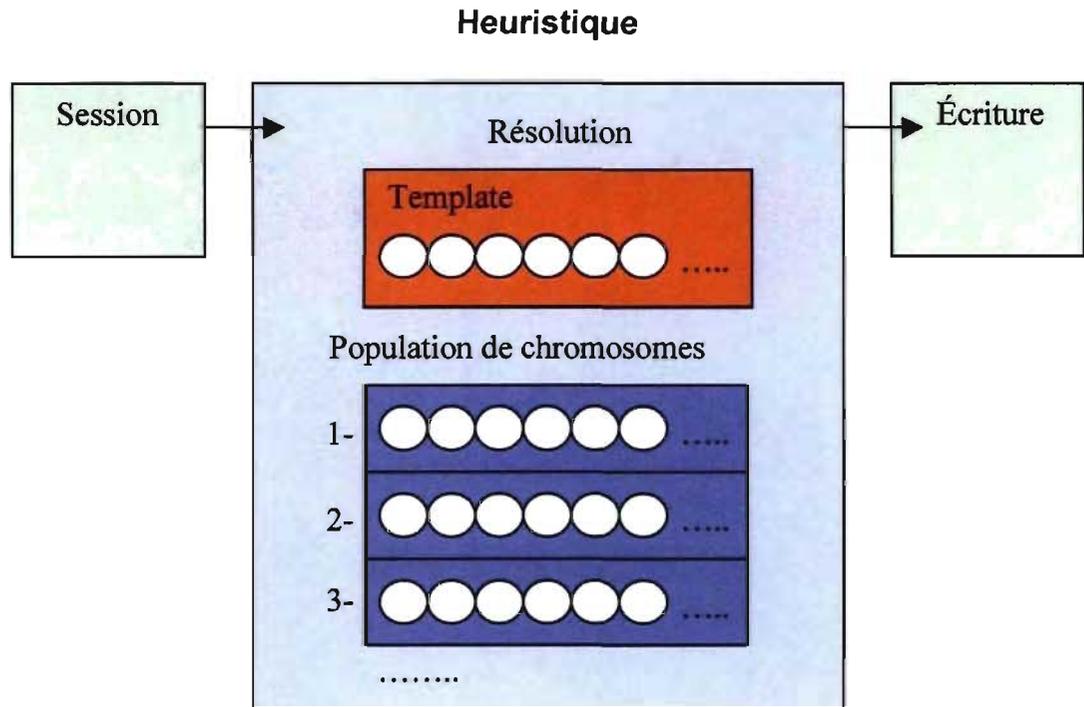


Figure 6.2. Structure de l'heuristique

Un objet «chromosome» contient des objets «gène», un gène correspond à une instance possible d'un nœud. Un objet «gène» contient des objets «radio». L'objet «radio» représente des liens (connexions entre les nœuds). L'ajout de ces radios s'effectue lors de l'affectation statique des canaux. L'objet «chemin» contient des fonctions pour déterminer les chemins entre un routeur sans fil et une passerelle. La figure 6.3 explique ce concept.

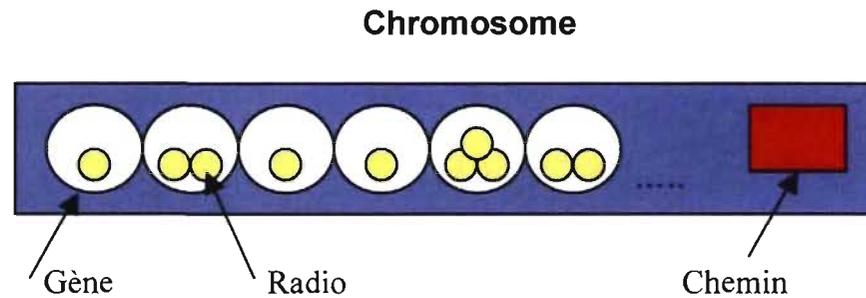


Figure 6.3. Structure d'un chromosome

6.3 Solution pour le problème

Cette section explique la manière dont le programme détermine une solution qui respecte toutes les contraintes établies. Une population de ces solutions sera ensuite manipulée dans la prochaine section. Lorsqu'un chromosome (solution potentielle disposant d'un coût) est créé, on doit vérifier que les caractéristiques choisies des nœuds fournissent un résultat du WMN possible. Chaque routeur sans fil (gènes dans le problème) dispose d'attributs uniques. Il est important de comprendre les attributs possibles pour un routeur sans fil avant de continuer dans l'explication de l'heuristique.

- ✓ Chaque routeur sans fil possède une portée choisie dans un ensemble. Un coût est associé à la portée choisie.
- ✓ Chaque routeur sans fil possède un type. Lorsque le routeur est une passerelle, un coût est relié à ce changement. Le routeur sans fil est un routeur de relais (ou passerelle), si la demande à ce routeur est nulle.
- ✓ On connaît pour un routeur sans fil tous les autres routeurs dans son rayon de portée.
- ✓ On connaît pour un routeur sans fil tous les autres routeurs dans son rayon d'interférence.
- ✓ On doit satisfaire la demande de chaque routeur. Cette demande doit être envoyée vers une passerelle.

- ✓ On dispose d'un nombre limité de canaux et de radios pour chaque routeur. Une capacité est reliée à chaque radio.
- ✓ On calcule pour le routeur le nombre de sauts par rapport aux passerelles.
- ✓ On calcule pour le routeur le nombre de passerelles auxquelles ce routeur est capable de se connecter en respectant le nombre de sauts maximum dont on a le droit d'utiliser.
- ✓ On garde en mémoire dans une liste rouge les canaux qu'on ne doit pas utiliser pour l'assignation des radios d'un routeur.

La première étape dans l'heuristique est de déterminer les distances qui séparent chaque paire de nœuds. Le programme a saisi toutes les entrées dont on a besoin à l'aide de l'outil de cartographie. On détient les positions de chaque nœud en latitude et longitude en entrée, il est alors possible de calculer les distances séparant chaque paire de nœuds en mètres. La formule d'Haversine permet de déterminer la distance entre deux points sur la terre (dis) : point1 (lat1, lon1) et point2 (lat2, lon2). Ce calcul n'est effectué qu'une seule fois dans l'heuristique pour chaque paire de nœuds. Ces distances sont utilisées pour déterminer les paires de nœuds qui peuvent ouvrir une connexion (affectation d'un canal à une radio). Une connexion est possible entre deux nœuds lorsque la distance les séparant est plus petite que les portées choisies.

$$dlon = lon2 - lon1$$

$$dlat = lat2 - lat1$$

$$a = (\sin(dlat/2))^2 + \cos(lat1) \times \cos(lat2) \times (\sin(dlon/2))^2$$

$$c = 2 \times \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a})$$

$$dis = R \times c \text{ (R est le rayon de la terre)}$$

1- Formule d'Haversine

On assigne à chaque nœud de la problématique une portée au hasard et on vérifie les connexions possibles pour chaque nœud. On doit déterminer pour chaque nœud, les autres nœuds qui se situent dans la zone d'interférence et la zone de portée. Les nœuds dans le rayon de la portée d'un routeur sans fil sont tous les routeurs sans fil à une distance plus petite que la portée choisie du routeur. Les nœuds dans le rayon d'interférence sont tous les nœuds à une distance moindre que le rayon d'interférence. Le modèle d'interférence protocole est employé. Voici la formule utilisée pour calculer le rayon d'interférence.

$$\text{Rayon d'interférence} = \text{Portée} \times \text{Facteur d'interférence}$$

Exemple : Facteur d'interférence = 1.3

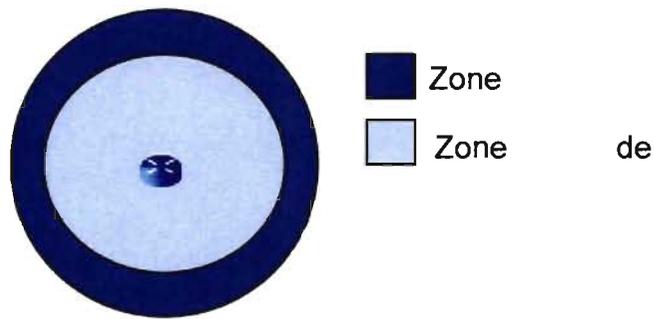


Figure 6.4. Interférence d'un nœud

L'heuristique utilise ensuite des règles de base pour trouver le nombre minimum de passerelles d'une solution réalisable. Une solution qui ne possède pas ce nombre minimum de passerelles ne peut être réalisable. Il est possible de tirer certaines conclusions avant de commencer la recherche de solutions. Le nombre minimum de passerelles est donné par le maximum entre les deux valeurs suivantes.

Valeur 1 = Demande des routeurs simples sans fil / (Nombre de radios × Capacité de la radio)

Valeur 2 : Nombre de nœuds / Nombre de routeurs maximum desservi par une passerelle

La première valeur correspond au nombre minimal de passerelles requis pour acheminer la demande en prenant en compte les demandes de tous les nœuds. La deuxième valeur correspond au nombre minimal de passerelles requis pour acheminer la demande en prenant en compte le nombre de sauts autorisé. Dans la figure 6.5, on observe que 25 unités de flot proviennent des routeurs sans fil simples ($10+5+5+5$). Une passerelle dispose d'un maximum de 2 radios et la capacité de ces radios est de 10 unités de flot. Le maximum de flot qu'une passerelle peut donc recevoir est de $10 \times 2 = 20$ unités de flot. Pour une demande totale de 25, il est impossible qu'une réponse existe avec 1 seule passerelle. Il doit donc y avoir au minimum 2 passerelles.

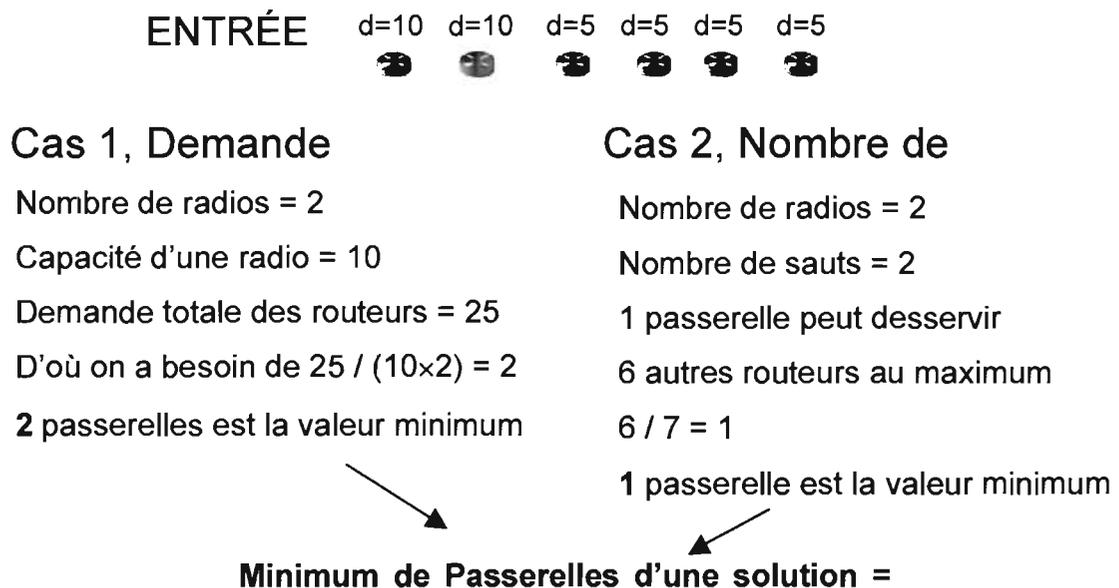


Figure 6.5. Détermination du nombre minimum de passerelles d'une solution

Un raisonnement similaire peut être utilisé pour déterminer le nombre minimum de passerelles en prenant en compte le nombre minimum de sauts. Dans le cas 2 de la figure 6.5, une passerelle peut desservir les routeurs à une profondeur de 2 sauts et dispose d'un nombre de radios de 2. Une passerelle peut donc desservir un maximum de 6 autres routeurs sans fil et elle-même, soit un total de 7 routeurs. Une passerelle peut se connecter à

2 autres routeurs sans fil, ces routeurs peuvent chacun se connecter à 2 autres routeurs sans fil (1+2+4). Il est donc possible d'utiliser qu'une seule passerelle pour le cas 2, puisqu'il y a 6 noeuds. Le maximum des deux cas est ensuite choisi comme étant la valeur minimum de passerelles qui peut fournir une solution.

Maintenant que certaines règles de base ont été établies et que l'on connaît la distance entre chaque nœud, l'heuristique peut commencer à chercher des solutions réalisables. On assigne pour chaque nœud une portée dans l'ensemble des portées possibles. Un nombre aléatoire pour chaque nœud permet l'affectation des portées. Les nœuds qui sont des passerelles potentielles disposent de 50% de chance de se changer en passerelle. Une population de base est donc créée en se basant sur la classe «template» qui contient les attributs possibles pour un nœud. On choisit pour chaque nœud une portée qui est plus grande que la distance minimum qui le sépare de son nœud le plus proche (si ce nœud dispose d'une demande à satisfaire).

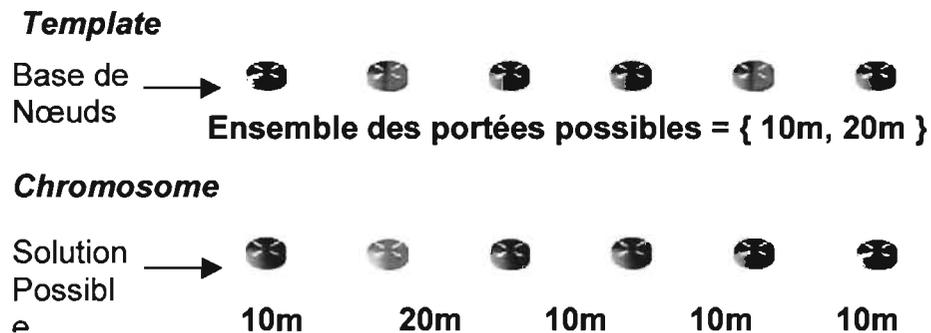


Figure 6.6. Exemple d'une solution possible non vérifiée

On doit vérifier si le réseau établi à ce stade respecte certaines des contraintes établies; la première étape permet de déterminer si la solution possible respecte le nombre minimum de passerelles trouvé. Lorsque notre solution dispose d'un nombre inférieur de passerelle, certaines passerelles potentielles qui étaient des routeurs sans fil sont changées

en passerelles. Ensuite, l'heuristique fait en sorte qu'une connexion duplex est possible pour chaque nœud avec au moins un autre nœud. Par exemple, si un nœud peut se connecter qu'à un seul routeur sans fil, l'heuristique fait en sorte que ces deux routeurs sans fil puissent ouvrir une connexion entre eux. Si la portée du récepteur n'est pas suffisante, la portée de ce routeur sans fil est changée de façon aléatoire en respectant une valeur minimale. La figure 6.7 explique ce concept, chaque nœud doit avoir un minimum d'une connexion avec un autre nœud. Le nœud émetteur détient une portée de 40m et le nœud récepteur une portée de 20m. On change la portée du nœud récepteur de 20m à 50m pour communiquer avec le nœud émetteur, puisque le nœud émetteur ne dispose pas d'autres nœuds avec lesquels il peut ouvrir une connexion. Cette étape assure que chaque nœud peut effectuer une connexion duplex avec un autre nœud; cependant, cela n'assure pas qu'un chemin est possible vers une passerelle. Un routeur sans fil ne disposant pas d'une connexion duplex avec un autre nœud ne peut pas envoyer son flot de données, ce qui entraîne que la solution sera impossible à réaliser.

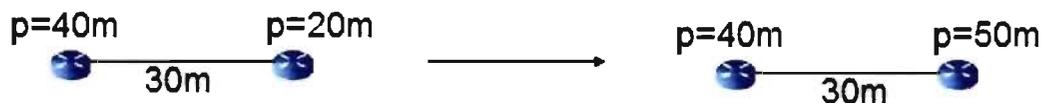


Figure 6.7. Vérification des portées

Maintenant qu'une solution possible a été créée au hasard et une vérification de base a été exécutée pour optimiser la réponse dès le départ, on peut vérifier notre solution. La prochaine étape dans l'heuristique est d'effectuer des calculs pour trouver des informations sur le réseau que la solution possible permet de créer. Les informations saisies sur chaque nœud du réseau vont être utilisées pour vérifier si la solution fournit une solution réalisable. L'heuristique désire saisir deux informations importantes : le nombre de passerelles qui est desservi par chaque routeur sans fil et le nombre de passerelles accessibles par chaque routeur sans fil en tenant compte du nombre de sauts autorisés.

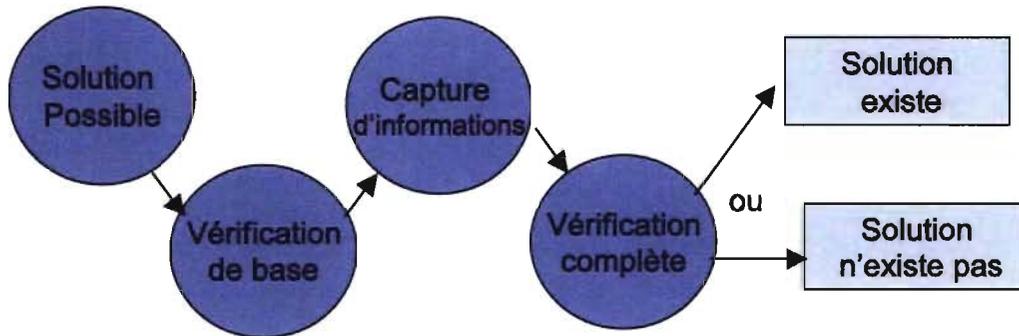


Figure 6.8. Structure logique du programme

La première information qui doit être déterminée est le nombre de passerelles qu'il est possible pour chaque routeur sans fil d'atteindre. L'idée est d'utiliser cette information pour favoriser l'ordre de l'acheminement de la demande. Chaque nœud dispose d'une demande qu'on doit envoyer vers une passerelle ou vers plusieurs passerelles (si la demande est supérieure à la capacité d'un seul chemin). On doit déterminer pour un nœud un/des chemin(s) vers une passerelle pour envoyer les flots du routeur sans fil à travers un chemin établi. Une solution existe lorsque tous les nœuds ont leurs demandes satisfaites. Il suffit qu'un seul nœud ne trouve pas un chemin vers une passerelle pour faire en sorte que la solution n'existe pas.

L'idée principale est de commencer par déterminer des chemins pour les routeurs qui n'ont pas le choix de se connecter à certaines passerelles. En commençant par ces nœuds, l'heuristique dispose d'une condition qui favorise la qualité de la réponse obtenue. On doit déterminer un chemin pour tous les nœuds qui peuvent être connectés qu'à une seule passerelle, par la suite ceux qui peuvent être connectés vers deux passerelles, trois passerelles, etc. On doit donc trouver pour chaque routeur sans fil le nombre de passerelles auxquelles il existe un chemin en respectant le nombre de sauts autorisés dans les entrées obtenues. Dans la figure 6.9, chaque nœud connaît le nombre de passerelles qu'il peut accéder en moins de 3 sauts. Une valeur -1 est attribuée à ce nombre dans le cas où le nœud en question est une passerelle. Un routeur sans fil disposant d'un nombre de passerelles

desservi de 2, peut envoyer son flot de données vers deux passerelles en utilisant un nombre de sauts de 3. Ces données sont utilisées par l'heuristique pour déterminer l'ordre des routeurs qui trouvent leurs chemins. On peut remarquer que si un routeur disposant de la valeur 1 ne trouve pas de chemin (p.e. un autre routeur utilise toute la capacité d'un lien) vers sa passerelle, la réponse n'existe pas.



Figure 6.9. Nombre de passerelles desservi par routeur sans fil
Nombre de sauts de 3

L'heuristique vérifie ensuite à l'aide d'une fonction récursive le nombre de sauts minimum que chaque routeur sans fil peut faire pour accéder à une passerelle. Ce nombre de sauts minimum peut être utilisé pour déterminer le chemin minimal d'un routeur sans fil vers une passerelle. L'heuristique utilise chaque passerelle comme point de départ et elle vérifie le nombre de sauts minimum que peut faire chaque routeur sans fil pour se connecter à cette passerelle. Une valeur trouvée plus petite que celle trouvée avant est remplacée. Cette étape permet aussi la vérification suivante : si pour un routeur sans fil du réseau, le nombre de sauts vers la passerelle la plus proche est plus grand que le nombre de

sauts autorisé, alors aucune réponse n'existe avec cette configuration. On doit envoyer pour chaque routeur sans fil la demande en un nombre de sauts plus petit que la valeur déterminée H . La figure 6.10 donne un aperçu de ce concept. On connaît pour chaque routeur sans fil le nombre de sauts au minimum qu'il doit faire pour parvenir à une passerelle, dans le cas d'une passerelle la valeur -1 est utilisée. Par exemple, pour un routeur sans fil disposant d'une valeur de 4, on doit envoyer ses données à 3 routeurs pour acheminer son flot, le dernier saut correspond au routeur sans fil qu'y envoie les données à une passerelle (routeur \rightarrow routeur \rightarrow routeur \rightarrow routeur \rightarrow passerelle). Le nombre de sauts minimaux vers une passerelle dépend des portées attribuées aux nœuds.



Figure 6.10. Nombre de sauts minimaux pour accéder à une passerelle

La dernière étape permet de vérifier si la solution existe et est donc réalisable. Chaque réponse trouvée par l'heuristique dispose d'un coût; l'heuristique essaie de déterminer la réponse au coût le plus faible. On doit vérifier si la réponse trouvée fournit un

WMN réalisable. À ce stade, pour chaque nœud on ouvre des connexions vers d'autres nœuds. Nœud par nœud les demandes sont acheminées à une passerelle en effectuant des affectations statiques des radios (ajout d'arcs entre les nœuds) pour l'envoi des flots. Un chemin est donc déterminé pour chaque nœud qui a besoin d'envoyer des données; le chemin trouvé provoque une affectation des canaux des nœuds de ce chemin. Les passerelles n'ont pas besoin d'envoyer leur demande dans le réseau, car ils envoient leurs flots à eux-mêmes. On considère que la capacité d'une passerelle envers l'Internet est infinie. Si on parvient pour tous les routeurs sans fil à satisfaire leurs demandes en envoyant leurs flots un/des chemin(s), la solution est réalisable.

Les causes possibles pour qu'un routeur sans fil ne puisse pas accéder à une passerelle en un nombre de sauts H sont :

- Il est impossible de se connecter à un nœud, car toutes les radios de ce nœud sont déjà utilisées.
- Toute la capacité de la radio avec les nœuds voisins est utilisée.
- Aucun canal n'est disponible pour une connexion.

Tous les routeurs sans fil sont triés par ordre croissant du nombre de passerelles auxquelles ils peuvent envoyer leurs flots. Ce tri s'effectue d'une façon aléatoire lorsqu'un nœud dispose du même nombre de passerelles desservi qu'un autre nœud. Il est important d'utiliser le hasard dans le choix des nœuds qui envoient leurs flots dans un chemin vers une passerelle lorsqu'ils disposent du même nombre de passerelles desservi; cela permet de visiter plus de solutions pour la même configuration. L'heuristique doit satisfaire les demandes de chaque nœud pour qu'une solution existe et décide donc de l'ordre de choix des nœuds par rapport aux chemins possibles. Chaque nœud est choisi un par un dans le choix trié jusqu'à ce que toutes les demandes des nœuds soient satisfaites.

Dans la figure 6.11, cinq nœuds désirent envoyer leurs flots à la passerelle. Puisqu'ils peuvent tous se connecter à une seule passerelle (nombre de passerelles

desservies), l'ordre d'envoi de leurs flots est choisi au hasard. Le routeur sans fil *B* est choisi en premier d'une manière aléatoirement parmi les routeurs sans fil et on envoie son flot à la passerelle. Le routeur sans fil *D* est ensuite choisi aléatoirement, on peut envoyer son flot aux routeurs sans fil *A*, *B* ou *C*. Le programme choisit alors d'ouvrir une connexion vers *B*, car une radio existe déjà entre la passerelle et le routeur sans fil *B*. Cette règle permet de vérifier en premier les chemins déjà existants du réseau pour ne pas créer des chemins qui vont occuper des radios des routeurs sans fil sans raison valable. Le routeur sans fil *A* est choisi ensuite aléatoirement et on détermine le chemin le plus court vers la passerelle. Tous les routeurs sans fil choisissent ainsi leurs chemins respectifs vers une passerelle. Le programme effectue l'affectation des chemins en prenant en compte quatre cas possibles qui sont discutés dans les prochaines sections.

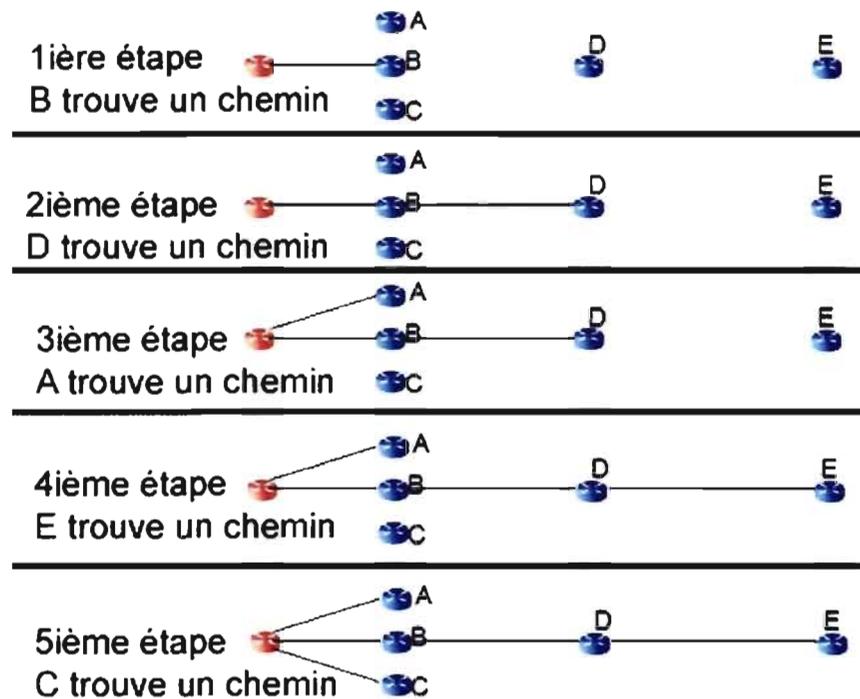


Figure 6.11. Ordre d'exécution des nœuds

Le programme détermine un chemin en prenant en compte quatre cas possibles. Chaque routeur sans fil est choisi un par un et on essaie d'envoyer sa demande (le choix d'exécution dépend du nombre de passerelles desservi). Dans le premier cas, le flot du routeur sans fil est envoyé en utilisant le chemin minimal vers une passerelle. En utilisant le nombre de sauts minimum de chaque routeur sans fil, il est possible de suivre la trace vers une passerelle. Si le premier cas qui est le chemin minimal n'est pas accessible, on essaie le deuxième cas, ensuite au troisième cas et enfin le quatrième cas est utilisé.

La figure 6.12 démontre le premier cas où on utilise le chemin minimal pour tous les routeurs. Lorsqu'on choisit un routeur pour envoyer sa demande (son flot de données), on doit trouver un chemin vers une passerelle. Le chemin minimal est le chemin le plus court vers une passerelle. On connaît pour chaque routeur la passerelle la plus proche et le nombre de sauts qu'il doit effectuer pour envoyer son flot à celle-ci. Les routeurs sans fil nommés *E, F, G, H, I, J*, dispose d'un nombre de sauts de 2 vers une passerelle. Ces routeurs envoient leurs flots à un routeur sans fil dans leurs portées disposant d'un nombre de sauts de 1 (*B, C, D*). Les routeurs disposant d'un nombre de sauts de 1 envoient ensuite les flots à une passerelle dans leurs portées.

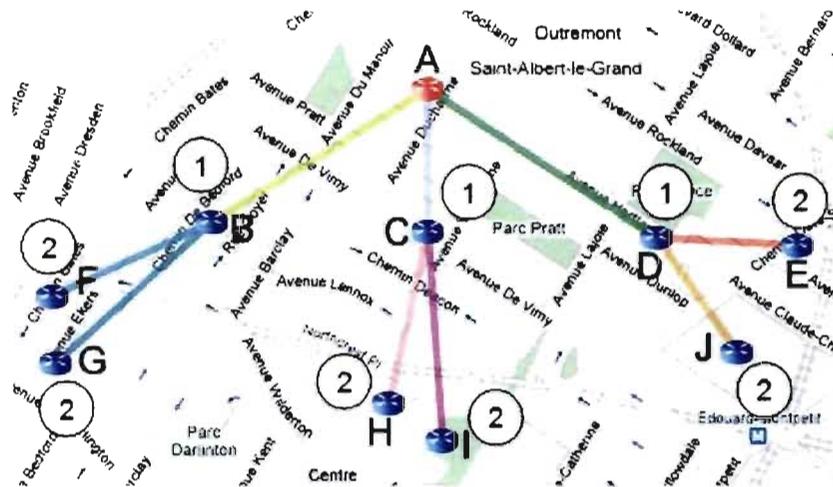


Figure 6.12. Cas 1 : les chemins minimaux

Dans les cas où plusieurs destinataires sont possibles, on ouvre une connexion avec un noeud qui détient déjà un chemin vers une passerelle. Tous les chemins minimaux sont vérifiés jusqu'au moment où une réponse soit trouvée. Lorsqu'il n'y a pas de chemin déjà établi pour les destinataires, un choix au hasard est effectué dans l'ordre de vérification des chemins possibles. Les chemins vers une passerelle sont recherchés jusqu'à ce que toute la demande du noeud soit satisfaite. Lorsque les chemins minimaux ne permettent plus d'acheminer la demande d'un noeud, un autre cas prend la relève pour le noeud.

Lorsque le premier cas n'arrive pas à établir un chemin minimal, l'heuristique vérifie le deuxième cas : le chemin minimal multiple. Ce deuxième cas se produit lorsqu'on ne peut pas envoyer toute la demande sur une radio entre deux noeuds. Dans la figure 6.13, deux radios sont ouvertes entre le même couple de noeuds. Le noeud de gauche désire envoyer un flot de 30 unités, mais la capacité de ses radios est de 10 unités. Il essaie donc en premier d'envoyer toute sa demande en utilisant ses chemins minimaux, il envoie 20 unités de flot en utilisant le cas 1 (10 vers un chemin, 10 vers un autre chemin). Le cas 1 ne trouvant pas une autre solution, le cas 2 est utilisé pour permettre aux deux noeuds d'ouvrir plus qu'une connexion entre eux. Dans la figure, deux liens sont utilisés entre le noeud 1 et 4.

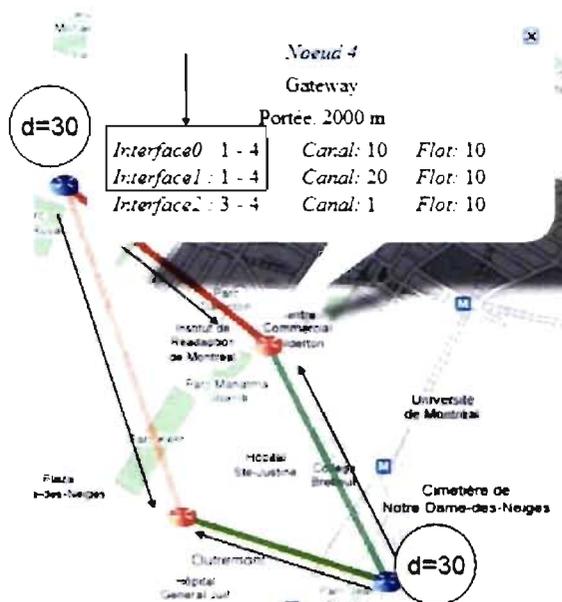


Figure 6.13. Cas 2 : les chemins minimaux multiples

Lorsque le chemin minimal n'est pas possible (toutes les radios d'un nœud sont déjà utilisées, la capacité d'un lien est saturée ou aucun canal n'est disponible), on doit utiliser le chemin multiple (vérification de tous les chemins possibles vers toutes passerelles). Les chemins examinés doivent avoir un nombre de sauts plus petit que H (nombre de sauts maximum vers une passerelle). Les chemins multiples sont vérifiés en favorisant les liens déjà existants entre les nœuds en premier. De nouvelles connexions entre les nœuds sont ouvertes que lorsque cela est indispensable (le nombre de radios et de canaux disponibles étant des contraintes du problème). Lorsqu'un chemin est trouvé vers une passerelle, tous les autres chemins ne sont pas vérifiés. Le chemin multiple utilise un parcours en profondeur en favorisant les nœuds qui disposent de radios déjà assignées.

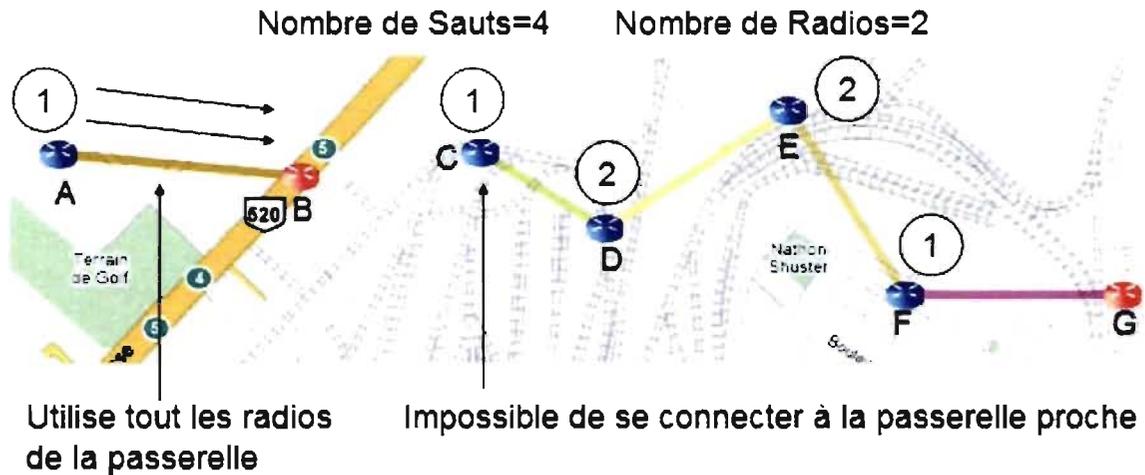


Figure 6.14. Cas 3 : les chemins multiples

La figure 6.14 démontre le besoin des chemins multiples. Dans cette figure, le routeur sans fil *C* ne peut pas se connecter à la passerelle *B* qui est la plus proche, car les radios de cette passerelle sont déjà toutes utilisées (2 connexions avec le routeur sans fil *A*). On doit donc déterminer pour le routeur sans fil *C* un autre chemin pour envoyer son flot. Le chemin $C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ est le chemin multiple choisit par *C*. Le quatrième cas permet les liens multiples dans les chemins multiples (même fonctionnement que le chemin minimal multiple).

Une particularité plus compliquée sur l'affectation des radios des noeuds est que l'on vérifie des chemins sans avoir le droit d'appliquer les modifications sur le réseau. Ces modifications peuvent être appliquées lorsque l'heuristique est certaine d'avoir trouvé un chemin vers une passerelle. Le programme a donc besoin de garder des traces sur les modifications que la recherche d'un chemin apporte sans appliquer ses modifications au réseau (affectation de canaux aux radios). La raison pour laquelle ce chemin ne peut pas être appliqué au réseau est qu'il n'est pas certain d'être un chemin valide (pour ce chemin soit valide on doit être capable d'accéder à une passerelle). On garde en mémoire dans l'objet «chemin» les changements à effectuer au réseau pour l'affectation des radios. Lors

de la recherche du chemin, le programme vérifie dans le réseau établi ainsi que dans l'objet «chemin» les radios et les canaux utilisés. Lorsque le chemin parvient à une passerelle en respectant les contraintes, les effets de l'ajout de chemins (affectation des radios de certains noeuds) sont appliqués au réseau.

Le programme doit tenir compte de plusieurs aspects pour effectuer une recherche complète telle que : le nombre de radios, les canaux déjà utilisés dans la zone, la capacité de ces liens tout en effectuant une recherche récursive sur ces chemins. Le changement produit par le nouveau chemin n'est appliqué qu'à la fin de l'élaboration de chaque chemin. Pour effectuer l'affectation des canaux, l'utilisation d'un canal entre deux noeuds est permise si ce canal n'est pas utilisé. Lorsque deux noeuds désirent utiliser un canal, ils doivent vérifier que ce canal ne se trouve pas dans leurs listes rouges de canaux (canaux déjà utilisés par d'autres noeuds).

On vérifie ensuite pour ces deux noeuds tous les autres noeuds qui se trouvent dans leurs rayons d'interférence pour vérifier les canaux qu'ils ont le droit d'utiliser. Lorsque deux noeuds forment un lien et utilisent un canal, on doit informer tous les autres noeuds dans leurs rayons d'interférences; on ajoute à ces noeuds ce canal dans leur liste rouge (liste des canaux qu'on ne peut pas utiliser pour un noeud). Cette affectation ne fournit aucune interférence. Le fonctionnement général pour déterminer une solution possible dans l'heuristique est résumé ci-dessous.

6.4 Utilisation d'un algorithme génétique

La section précédente a présenté les concepts généraux utilisés pour trouver une solution. Un algorithme génétique est utilisé pour chercher une meilleure solution en utilisant une population de base de ces solutions. L'heuristique à ce stade doit manipuler des solutions de bases (chromosomes) pour déterminer une meilleure configuration du réseau, celle qui dispose du coût le plus bas. La figure 6.15 propose un exemple simple pour comprendre la notion de chromosome utilisée. Dans cet exemple, 4 chromosomes ont

été formés disposant de coûts différents. Le coût du premier chromosome a été calculé de la façon suivante : coût des passerelles (2 passerelles \times 12\$) + coût des portées (5\$+7\$+5\$+5\$+7\$+5\$), le total de cette solution (chromosome) est de 58\$. Le WMN disposant du coût le plus bas dans la figure est le chromosome 2.

		ENTRÉE						
								
		Ensemble Portée Possible = { 10m, 20m }						
								Coût pour 10m = 5\$
								Coût pour 20m = 7\$
								Coût d'une passerelle
		1	2	3	4	5	6	Coût
Chromosome 1	10m  20m  10m  10m  20m  10m 	58\$						
Chromosome 2	10m  10m  20m  10m  10m  20m 	46\$						
Chromosome 3	10m  20m  10m  20m  20m  10m 	48\$						
Chromosome 4	20m  10m  20m  10m  20m  20m 	50\$						

Figure 6.15. Création de chromosomes

Une solution est réalisable lorsque toutes les demandes des nœuds peuvent être satisfaites en les envoyant aux passerelles. Lorsqu'une solution n'existe pas, le coût est pénalisé (un nombre très grand est ajouté au coût). Les chromosomes fournissant des solutions impossibles sont conservés, car le croisement de ces chromosomes avec d'autres chromosomes peut fournir des solutions possibles.

Une fois la population de base trouvée et vérifiée, l'algorithme génétique effectue des modifications sur cette population de base pour créer une nouvelle génération. Les

modifications possibles proposées par l'heuristique sont la sélection, le croisement et la mutation. Plusieurs sortes d'algorithmes génétiques ont été testées pour résoudre différents problèmes et les paramètres choisis sont ceux qui semblaient fournir le plus souvent les meilleures réponses. La population de base des chromosomes est triée en premier lieu par ordre croissant de coûts.

Pour effectuer la sélection d'un chromosome dans la population de base, une formule quadratique est utilisée. Un chiffre entre 0 et la racine de la population est choisi aléatoirement; ce chiffre est ensuite mis au carré. La valeur obtenue permet d'effectuer la sélection d'un chromosome dans la population de base. Par exemple, pour une population de base de 100 individus, un chiffre entre 0 et 10 est choisi au hasard soit 4.2. Ce chiffre est ensuite mis au carré et arrondi pour donner le nombre 18. Dans 30% des cas, un individu de la population précédente est choisi alors que dans 70% des cas un nouveau chromosome est formé en utilisant le croisement de 2 individus dans la population de base. Cette façon de procéder permet de favoriser les solutions qui disposent de bas coûts (les chromosomes sont triés en ordre croissant de coût), en permettant de choisir tous les chromosomes de la population précédente (aussi les solutions impossibles). Le croisement utilisé est le "one point crossover"; un nombre aléatoire est choisi dans le chromosome pour désigner le point de croisement. Ce nombre se situe entre 0 et le nombre de gènes total d'un chromosome.

One-point crossover

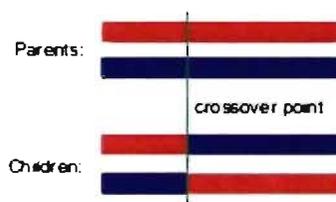


Figure 6.16. Génétique utilisant le point de croisement

La figure 6.16 explique le fonctionnement de ce type de sélection : deux parents sont choisis, un nouveau chromosome est créé en utilisant la première partie d'un des

parents et la deuxième partie de l'autre parent. Ce principe est appliqué à notre nouvelle population de chromosomes qui sera fabriquée de routeurs sans fil et de passerelles provenant en premier lieu d'un parent jusqu'au "crossover point" et ensuite de l'autre parent. Il est aussi possible pour un chromosome de subir une mutation, le facteur de mutation est choisi en utilisant cette formule :

$$\text{facteurMutation} = 1.0 / \text{nombreGènes} \times 100.0 / 2$$

Par exemple pour un chromosome formé de 200 gènes, le facteur de mutation est de : $1.0 / 200 \times 100.0 / 2 = 0.25\%$. Donc chaque gène du chromosome dispose de 0.25% de chance de muter. La figure 6.17 illustre l'effet d'une mutation sur un gène. Les données saisies en entrée permettent de créer la première population d'individus. Lors des prochaines populations de chromosomes, de nouveaux chromosomes sont créés à partir du croisement de la population précédente. Pour tous les nœuds (gènes) de tous les chromosomes une mutation est possible. Dans le cas 1, le nœud en entrée est une passerelle potentielle qui est devenue un routeur sans fil avec une portée de 10m (gène). Lorsque ce routeur sans fil subit une mutation, sa portée change à 20m et il devient une passerelle. Les cas 2 et 3 illustre le même principe avec différentes entrées.

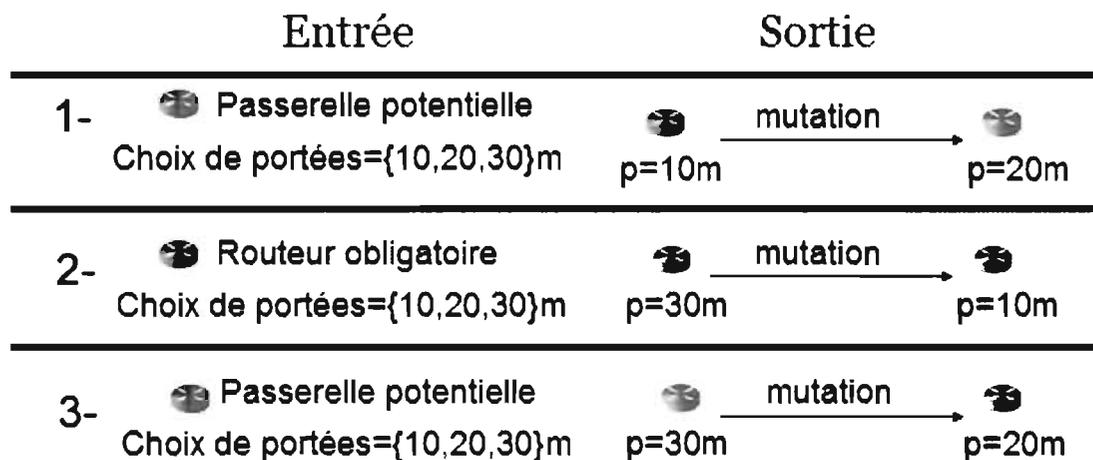


Figure 6.17. Effet d'une mutation sur un gène

Une nouvelle population est donc formée en utilisant les principes des algorithmes génériques. À chaque nouvelle génération, l'algorithme converge vers une meilleure solution en gardant en mémoire la solution optimale trouvée. Le programme choisit donc plusieurs générations de chromosomes en favorisant les chromosomes disposant des coûts les plus bas jusqu'à tant que le critère d'arrêt soit activé.

Une première option permet d'arrêter l'heuristique après un nombre donné de nouvelles générations. Une deuxième option permet d'arrêter le traitement lorsque la réponse trouvée est identique pour un nombre x de générations. Lorsqu'une réponse satisfaisante est déterminée, les entrées du problème sont transmises à l'outil de cartographie qui s'occupe alors d'afficher le WMN visuellement à l'utilisateur.

La complexité de l'algorithme est de $O(n^2)$. La source de cette complexité provient de l'assignation des chemins de chaque routeur sans fil. On doit déterminer pour chaque routeur sans fil de la problématique un chemin vers une passerelle. Pour déterminer ce chemin on doit dans le pire des cas, vérifier tous les autres routeurs. La première étape est de déterminer notre population (Po) dans l'algorithme génétique. Cette population est le nombre de chromosomes. On doit ensuite déterminer, pour chaque chromosome les attributs de ses gènes. Le nombre de gènes d'un chromosome correspond au nombre de nœud du problème (n). On assigne des attributs à chacun de ces gènes et on vérifie si on peut trouver un/des chemin(s) vers un/des passerelle(s). Dans le pire des cas on doit utiliser un parcours en profondeur en vérifiant tous les chemins vers une passerelle (lorsqu'un chemin est trouvé on ne vérifie pas tous les autres chemins). Une fois la population établie, on utilise les particularités des algorithmes génétiques pour créer de nouvelles générations d'individus ($NomG$). D'où la complexité de l'heuristique est de : $NomG \times Po \times n \times n = O(n^2)$.



Heuristique, Déterminer une solution

Entrée : Tous les attributs des routeurs sans fil

Sortie : Caractéristiques de chaque routeur sans fil, coût de la solution

Variables :

- *Chromosome* : Solution possible (à vérifier)

Pour chaque routeur sans fil dans le chromosome :

- *Demande* : Quantité de flots qu'un routeur sans fil désire envoyer à une passerelle

- *Portée* : Rayon de communication choisi par le routeur sans fil

- *Type* : Routeur simple, passerelle ou un routeur de relais

Fonctions :

- *trouverSolutionPossible(Chromosome)* : Détermine une solution possible (affectation de la *portée* et du *type* dans tout le *chromosome*) en se basant sur un modèle de base ainsi que la vérification de la connectivité et la vérification des demandes.

- *verificationRouteur(Chromosome)* : Détermine combien de passerelles sont assignées par routeur, utilisé pour déterminer l'ordre d'exécution de chaque routeur lors de l'envoi de demande et permet aussi la vérification du nombre de sauts.

- *triNombreGconnect(Chromosome)* : Tri les routeurs en ordre croissant par rapport au nombre de passerelles connectées.

- *trouverChemin(Chromosome)* : Vérifie si un chemin existe vers une passerelle pour un routeur en respectant toutes les contraintes.

- *calculCout(Chromosome)* : Coût d'une solution, si aucune solution n'est possible le coût est pénalisé.

----- **Algorithme** -----

```
1 Pour toute la population génétique de base {
2   trouverSolutionPossible();
3   Pour ( $i \in n$ ) {
4     verificationRouteur();
5   }
6   triNombreGconnect();
7   Pour ( $i \in n$ ) {
8     Si trouverChemin() et demande > 0 {
9       continuer le traitement ;
10    }
11    Sinon {
12      aucune solution ;
13    }
14  }
15  calculCout();
16 }
```

Chapitre 7

Outil de simulation et de validation du modèle

Ce chapitre présente un outil de simulation qui permet de vérifier le modèle établi en temps réel en utilisant un simulateur de réseau. L'heuristique fournit une réponse théorique sur le meilleur réseau trouvé. Un simulateur permet d'utiliser les données trouvées pour les faire fonctionner dans un réseau réel qui dispose de toutes les couches de communication. Ce logiciel de simulation peut ensuite indiquer la façon dont le WMN théorique se comporterait une fois implémenté. L'outil de simulation permet de valider les résultats obtenus avant l'implémentation réelle. Ce chapitre est divisé en deux parties, la première partie présente la façon dont le logiciel NS2 [46] a été modifié pour être en mesure d'accepter une configuration WMN. La deuxième partie effectue des tests sur les configurations trouvées et permet d'évaluer le modèle de conception et l'heuristique utilisés.

7.1 Modification du logiciel NS2

Le simulateur NS2 est un logiciel libre de simulation par événements discrets très largement utilisé dans la recherche académique. Il est considéré par beaucoup de spécialistes des télécommunications comme le meilleur logiciel de simulation par événements discrets, en raison de son modèle libre, permettant l'ajout très rapide de modèles correspondant à des technologies émergentes. Il est basé sur l'utilisation de langages de scripts pour la commande des simulations (TCL/TK) alors que le cœur des simulations est implémenté avec le langage C++.

Ce simulateur simule des réseaux sans fil simples, mais ne permet pas toutefois de simuler une topologie WMN. Des nouvelles fonctionnalités doivent être ajoutées au simulateur pour permettre la simulation de tels réseaux. Un WMN dispose de certaines

caractéristiques uniques par rapport aux autres réseaux sans fil. Dans un WMN, les données sont envoyées en sautant de nœud en nœud dans un mode multi sauts vers une passerelle. Chaque routeur sans fil maillé dispose de plusieurs radios qui peuvent utiliser plusieurs canaux simultanément. Le simulateur doit permettre aux nœuds de posséder des radios multiples et de nouvelles fonctionnalités de routage doivent être implémentées. Le logiciel NS2 est très complexe, le code source de ce logiciel doit être modifié pour qu'il se comporte de la façon désirée.

Les sources qui se préoccupent de la simulation d'un WMN en utilisant le logiciel NS2 ne sont pas nombreuses. En se basant sur des travaux effectués dans [33-35], notre simulateur a été modifié pour permettre les simulations WMNs. La source [33] propose de modifier des fichiers sources du simulateur pour qu'il puisse accepter de nombreuses radios par nœud, d'autres fichiers ont besoin d'être changés pour fournir à l'utilisateur un nouveau protocole de routage. Ce nouveau protocole de routage est appelé "*Manual*" et permet d'établir des chemins statiques dans le réseau. Dans le routage statique, chaque routeur sans fil détient une table de routage qui lui indique à quel endroit il doit envoyer ses données (choisies par l'utilisateur). Dans ce type de routage, l'utilisateur doit entrer tous les chemins possibles dans le programme, car le réseau ne se configure pas automatiquement. Le simulateur NS2 doit être aussi en mesure de conserver des traces sur le réseau. On doit être capable de calculer les débits, les délais et les paquets perdus par rapport au temps écoulé. Des traces de la simulation WMN sont écrites en suivant l'exemple dans la source [36].

Le simulateur NS2 utilise en entrée un fichier en format TCL. Ce fichier contient toutes les informations sur le réseau simulé. Des changements dans ce fichier sont aussi nécessaires pour simuler un WMN. Dans notre problème de conception, chaque routeur sans fil peut détenir une portée différente. L'ajout de cette fonctionnalité est possible lorsqu'on change la valeur de la portée après l'initialisation de chaque nœud dans le fichier TCL. Les entrées nécessaires au simulateur sont saisies à l'aide de l'heuristique développée, un autre programme s'occupe de changer les positions des nœuds. Les

positions géographiques des nœuds sont changées en coordonnées sur un plan en deux dimensions.

Les figures 7.1 et 7.2 fournissent un aperçu visuel d'une simulation WMN. Les données sur les paquets envoyés de chaque nœud sont gardées dans des fichiers de traces. En utilisant ces fichiers de traces, il est alors possible de calculer le nombre de paquets perdus, la largeur de bande disponible à un certain moment et les délais.

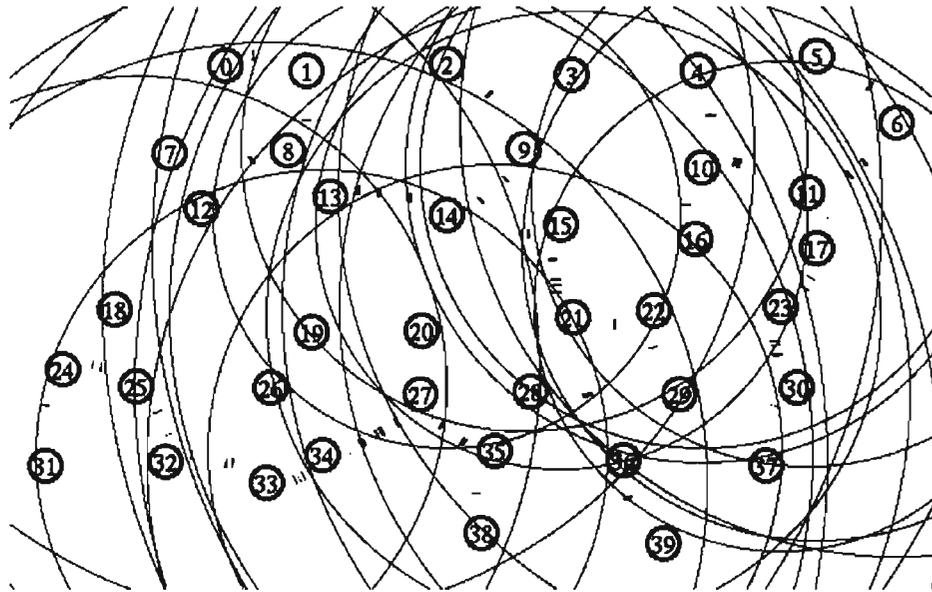


Figure 7.1. Premier exemple de l'outil de simulation WMN

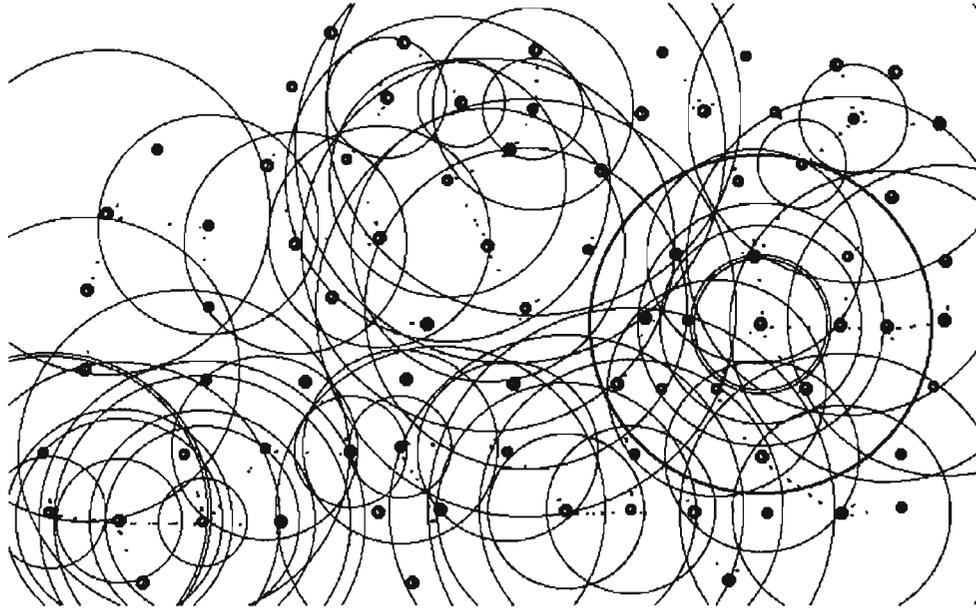


Figure 7.2. Deuxième exemple de l'outil de simulation WMN

Le travail effectué sur le simulateur NS2 est la base nécessaire pour le faire fonctionner sur une topologie WMN, des travaux supplémentaires ont besoin d'être effectués pour permettre le routage dynamique. L'utilisation d'un routage dynamique est plus efficace et demande l'entrée de moins de données. Ce type de routage est capable de réagir en cas de panne ou à une augmentation des demandes, en changeant dynamiquement les chemins vers les passerelles.

7.2 Résultats des simulations

Cette section présente les résultats de trois topologies WMN qui ont été obtenus à l'aide de l'heuristique développée. Voici, en premier lieu les points communs entre les simulations effectuées dans NS2. Les simulations utilisent la norme 802.11 dans la couche MAC. Le type de propagation employée est le "*TwoRayGround*"; ce type de propagation prend en compte l'effet des réflexions des ondes et permet de fournir des prédictions plus précises que le modèle "*FreeSpaceModel*". La taille des paquets envoyés dans nos

simulations est de 512 octets. Les antennes des radios sont omnidirectionnelles et le nombre de canaux disponibles est de 12. Chaque simulation à une durée de 50 secondes. Les autres paramètres de la simulation sont uniques à chaque simulation et seront discutés avant chaque simulation.

Lors d'une simulation WMN, 3 informations sur le réseau vont être saisies par rapport au temps écoulé; les débits disponibles, les paquets perdus et les délais des paquets sont saisis. Pour chaque noeud on calcule le flot que ce noeud désire envoyer et non les autres flots qui passent par lui. Voici la manière dont ces trois informations sont calculées.

- **Débit** : Vitesse de transfert de données, mesurée en Kilooctets par seconde. Le débit d'un nœud diminue lorsque la largeur de bande disponible ne permet pas d'envoyer les paquets. Le débit augmente lorsque la demande d'un nœud augmente (plus d'utilisateurs).
- **Paquets Perdus** : Le nombre de paquets perdus en provenance d'un nœud. Lorsque le débit est trop élevé, la queue d'un routeur conservant les paquets reçus devient saturée et des paquets sont détruits.
- **Délais** : Le délai est calculé en utilisant la différence de temps entre 2 paquets envoyés avec succès. Le délai diminue lorsque le débit augmente, car le temps entre 2 paquets devient plus rapproché. Le délai augmente lorsque la largeur de bande n'est pas suffisante, ce qui provoque que le temps d'envoi entre 2 paquets est plus grand.

Chaque simulation a été testée avec 5 variantes :

- 1) *Simulation de réseau sans modification* : Vérification si le réseau est réalisable.
- 2) *Augmentation graduelle de toutes les demandes* : Effet sur le réseau lorsque toutes les demandes des routeurs sans fil augmentent. Les flots de chaque routeur augmentent d'une valeur X à un instant de temps déterminé.
- 3) *Augmentation de la demande d'un nœud* : Effet sur le réseau lorsqu'une demande d'un routeur sans fil augmente.

- 4) *Mobilité avec augmentation des demandes* : Dans ce cas, la demande de chaque routeur oscille entre 0 et une valeur X . Les demandes des routeurs sans fil ne sont pas constantes à chaque instant. Ce cas simule des utilisateurs mobiles qui se connectent à différents routeurs à différents moments dans le temps.
- 5) *Panne d'un routeur ou d'une radio* : Effet sur le réseau lorsqu'un nœud ou une radio du WMN tombe en panne.

CAS 1

La figure 7.3 présente un WMN formé de 19 nœuds qui provient d'une simulation de 20 nœuds en entrée (1 routeur de relais n'est pas utilisé dans la solution, car son utilisation n'est pas nécessaire et fournit un coût plus élevé). Les nœuds 2 et 11 sont des passerelles, aucune information n'est conservée lors de la simulation sur les passerelles puisqu'une passerelle ne dispose pas d'un flot à envoyer. En observant cette figure, on peut s'apercevoir que le réseau établi offre une basse connectivité. Voici les entrées utilisées pour cette simulation.

- *Demande des noeuds* : Chaque nœud désire envoyer 150 Kilooctets par seconde.
- *Capacité d'un lien (arc)* : La capacité d'un arc est de 1 Mégaoctet.
- *Nombre de radios* : Chaque nœud dispose d'un nombre de radios maximal de 3.
- *Coût d'une passerelle* : Le coût d'une passerelle est de 100\$.
- *Les portées possibles* : 50m → 5\$, 100m → 15\$, 150m → 30\$, 200m → 40\$, 250m → 50\$. (Les portées choisies par les routeurs se situent entre 100m et 200m)
- *Nombre de sauts* : Les nœuds doivent envoyer leurs flots en moins de 3 sauts.
- *Coût de la solution* : Le coût total du WMN est de 940\$.

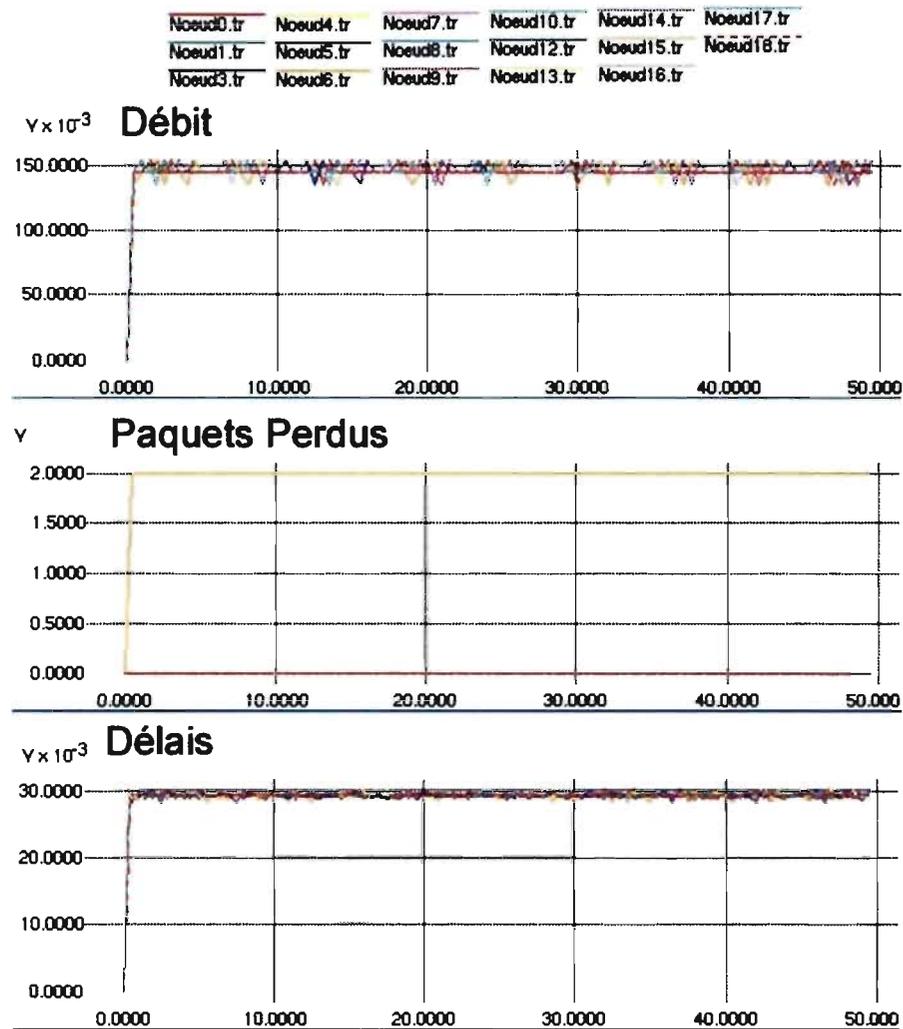


Figure 7.4. Cas 1 : Simulation du réseau

La figure 7.4 démontre les résultats obtenus lorsque ce WMN est simulé. Chaque nœud envoie sa demande de 150Ko/s vers une passerelle sans problème. La largeur de bande est suffisante ce qui fournit un faible délai ainsi qu'aucune perte de paquets.

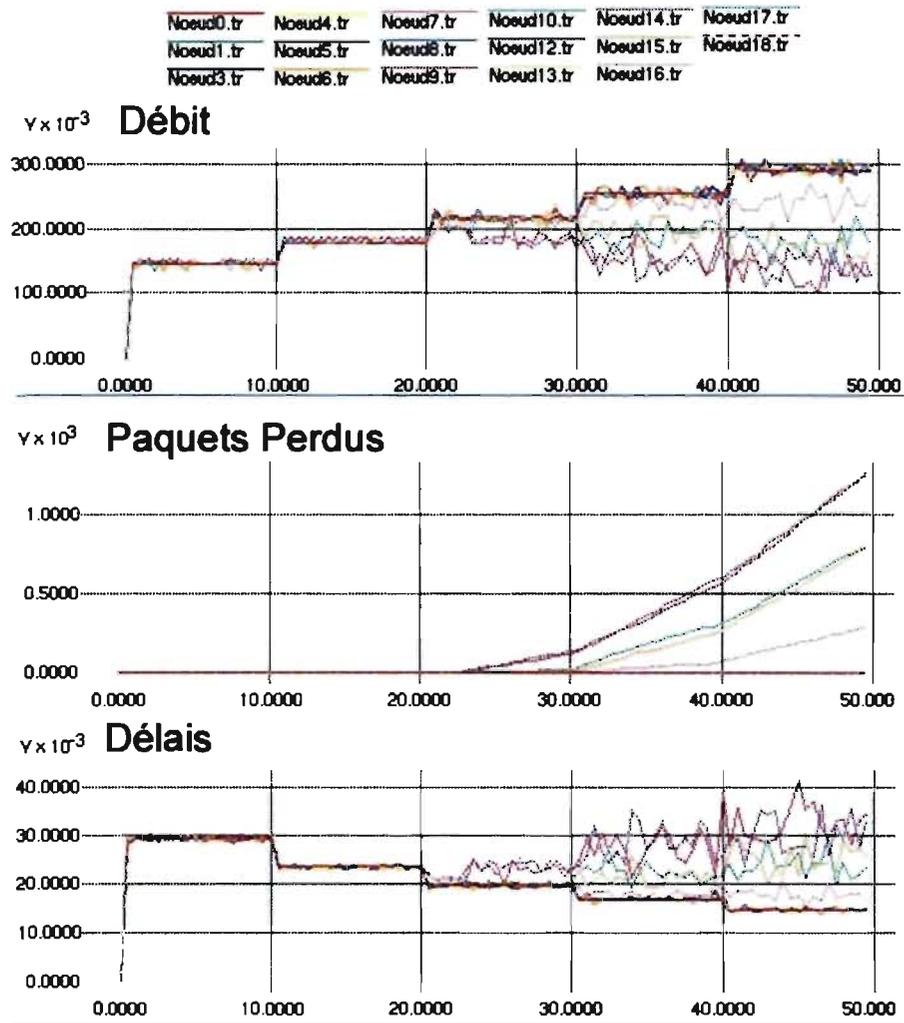


Figure 7.5. Cas 1 : Augmentation graduelle de toutes les demandes

Dans la figure 7.5 toutes les demandes des routeurs augmentent de 35Ko/s toutes les 10 secondes. Lorsque le flot que chaque routeur désire envoyer atteint 220Ko/s, le réseau ne parvient plus à accepter toutes les demandes. Les premiers nœuds qui perdent leurs paquets sont les nœuds 14 et 9 qui se situent à un nombre de sauts vers une passerelle plus grand que les autres nœuds. Ensuite les nœuds 10,15 et 16 ne parviennent plus à envoyer tous leurs paquets.

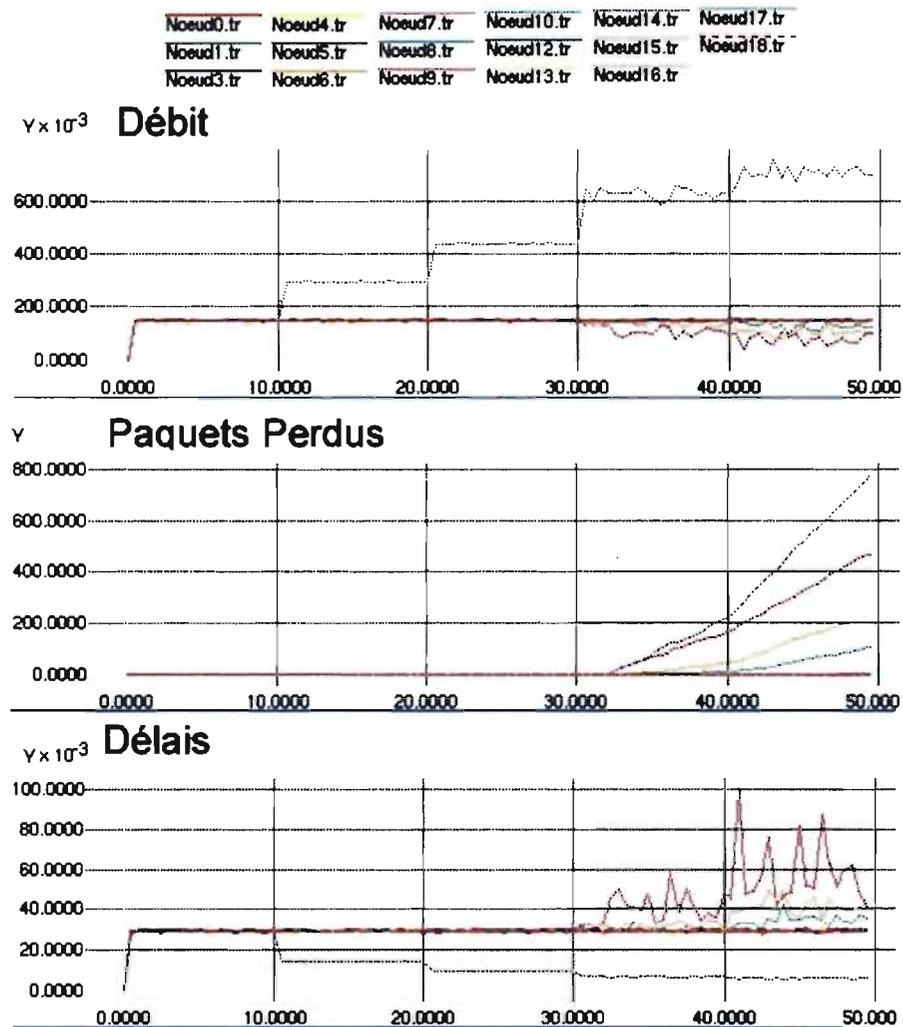


Figure 7.6. Cas 1 : Augmentation de la demande au nœud 14

Lorsque la demande du routeur sans fil 14 augmente à 650Ko/s dans la figure 7.6, les paquets de ce nœud commencent à être perdus. La grande quantité de paquets envoyés influence les nœuds 15, 10, 9 et 16 qui voient leur débit diminuer et leurs délais augmenter.

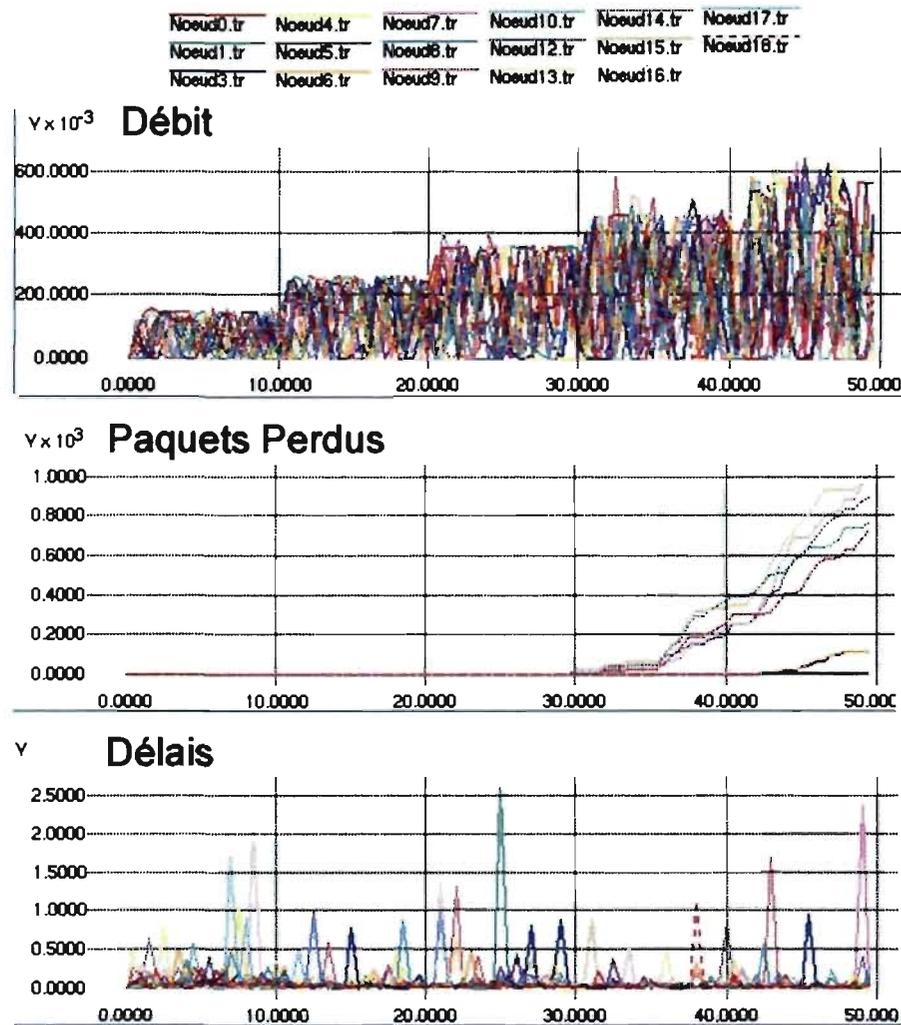


Figure 7.7. Cas 1 : Mobilité avec augmentation des demandes

La mobilité est lorsque les débits des nœuds ne sont pas constants et ils varient avec le temps. Lorsque le débit des nœuds varie entre 0 et 420Ko/s (aléatoire), le réseau ne parvient pas à satisfaire la demande comme le démontre la figure 7.7. Plusieurs routeurs perdent alors des paquets. Les routeurs sans fils nommés 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15 et 16 sont connectés aux passerelles 2 et 7. La capacité utilisée de ces chemins devient saturée en premier, car ces chemins reçoivent trop de flots. Chaque routeur détient d'un flot moyen de 210 Ko/s (débit qui varie entre 0 et 420Ko/s), il y a 11 routeurs desservis par 2 passerelles.

Les liens de ces routeurs disposent d'une capacité maximale de 1 Mégaoctet, les liens deviennent alors saturés et des paquets sont perdus. Les délais sont très variables puisque les débits varient à travers le temps.

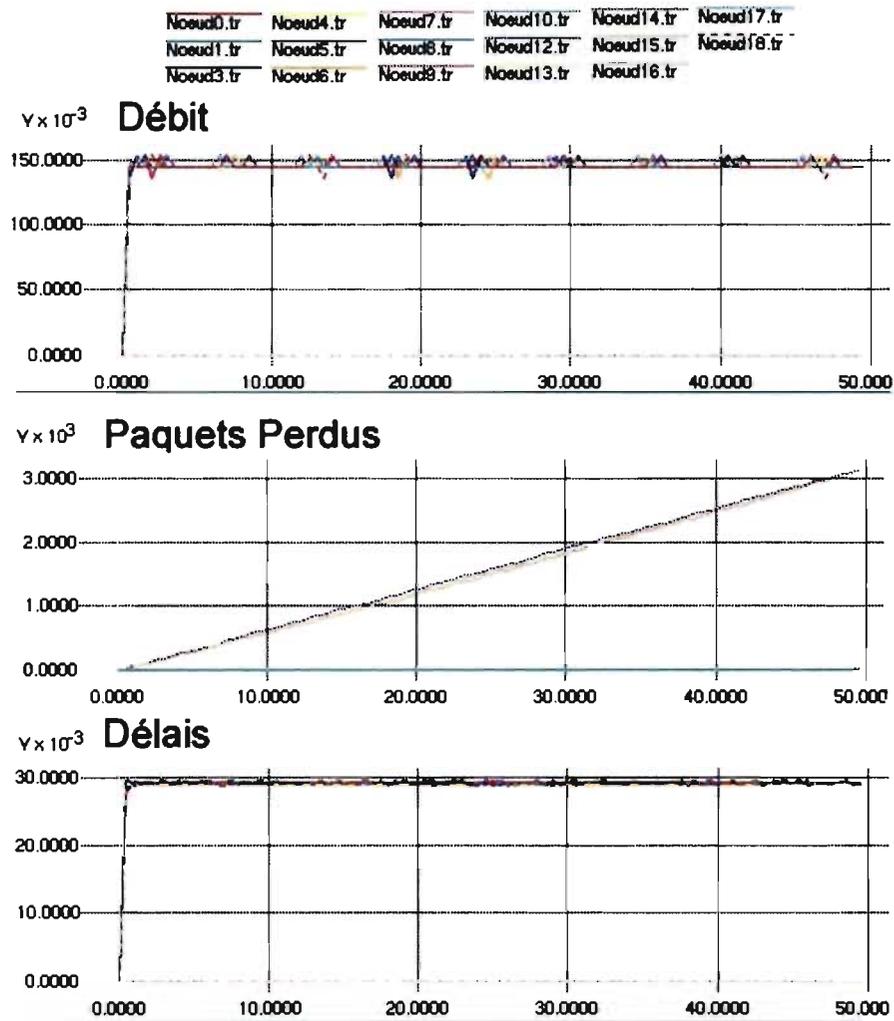


Figure 7.8. Cas 1 : Panne du routeur 16

Dans la figure 7.8, le routeur sans fil 16 tombe en panne. La conséquence de cette panne est que les routeurs 14 et 15 ne trouvent plus de chemins vers une passerelle

puisque un chemin unique existe pour eux. D'après la figure 7.3, on peut visualiser ce qui se passe.

Lorsque simule ce WMN on remarque que la solution proposée fournit un réseau qui fournit une bonne qualité de service. On peut augmenter le flot de chaque routeur de 50% sans que cela occasionne des problèmes. On peut aussi augmenter le flot du routeur 14 sans perte de paquets. Lorsque le débit des routeurs change avec le temps on remarque que le système est capable de supporter une demande qui varie entre 0 et 380Ko/s. Par contre, lorsqu'un routeur tombe en panne, certains routeurs ne trouvent plus de chemins pour acheminer leurs paquets. La basse connectivité de la solution produit un système non fiable (de nouvelles contraintes seront ajoutés au modèle par l'auteur).

CAS 2



Figure 7.9. Cas 2 : Simulation de 40 noeuds

La figure 7.9 présente un WMN formé de 40 nœuds où les nœuds 14, 23 et 33 sont des passerelles. D'après cette figure on peut remarquer que la passerelle 23 va recevoir une grande quantité de flots. Voici les entrées utilisées pour cette simulation :

- *Demande des nœuds* : La moitié des nœuds du réseau désire envoyer un flot de 80Ko/s, l'autre moitié des nœuds désire envoyer un flot de 120 Kilooctets par seconde.
- *Capacité d'un lien (arc)* : La capacité d'un arc est de 1 Mégaoctet.
- *Nombre de radios* : Chaque nœud dispose d'un nombre de radios maximal de 3.
- *Coût d'une passerelle* : Le coût d'une passerelle est de 100\$.
- *Les portées possibles* : 1000m → 10\$, 2000m → 20\$, 3000m → 30\$, 4000m → 40\$, 5000m → 50\$, 6000m → 60\$.
- *Nombre de sauts* : Les nœuds doivent envoyer leurs flots en moins de 4 sauts.
- *Coût de la solution* : Le coût total du WMN est de 1680\$.

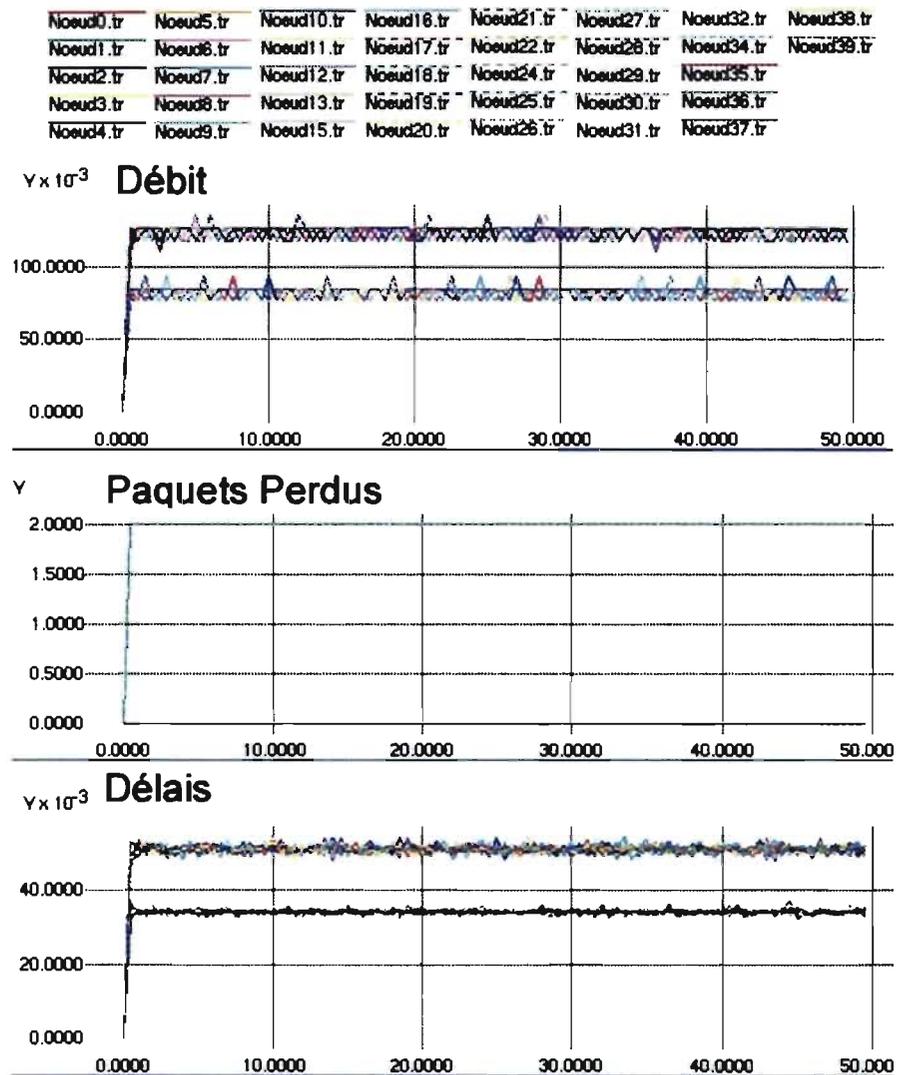


Figure 7.10. Cas 2 : Simulation du réseau

La figure 7.10 présente le réseau simulé, certains routeurs disposent d'une demande à satisfaire plus grande que d'autre. Le système est réalisable et il n'y a aucune perte de paquets.

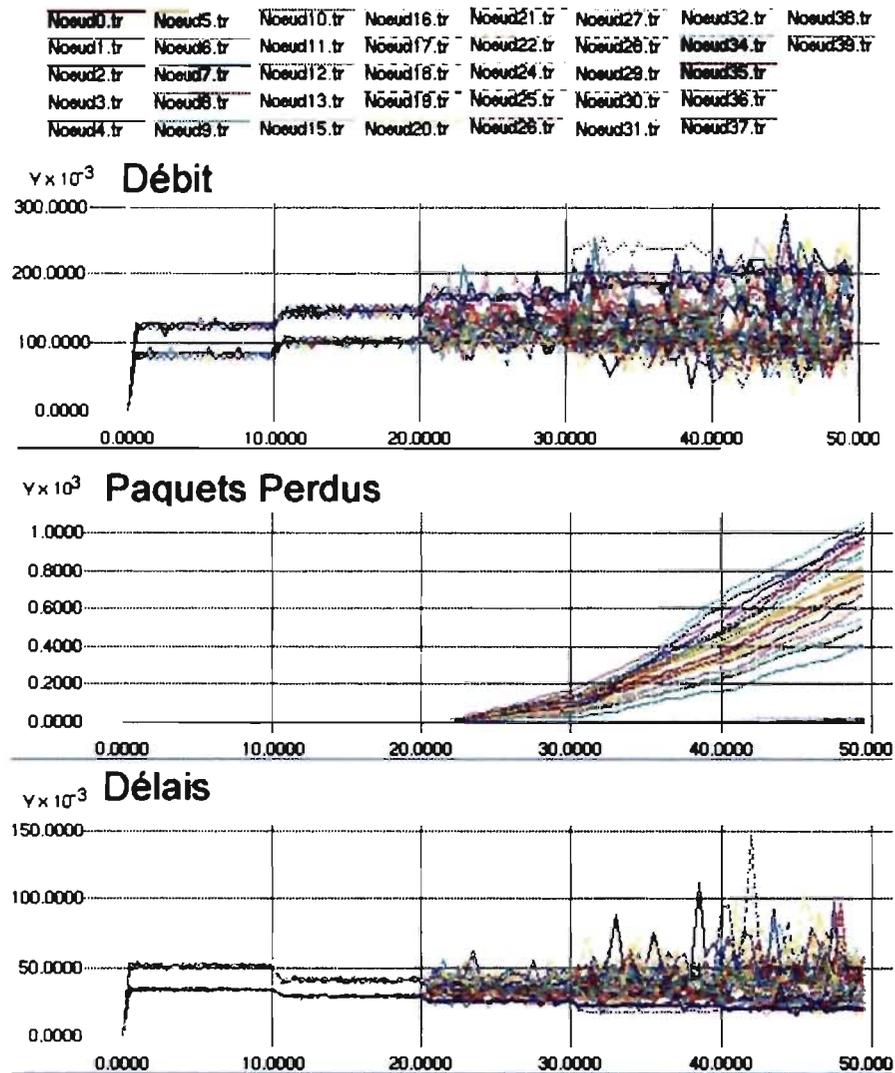


Figure 7.11. Cas 2 : Augmentation graduelle de toutes les demandes

La figure 7.11 démontre que l'on peut augmenter la demande de tous les routeurs jusqu'à 80% de la valeur originale avant l'apparition d'un problème. Lorsque la demande est plus grande que la valeur originale de 80% plusieurs routeurs sans fil perdent des paquets un peu partout dans le réseau.

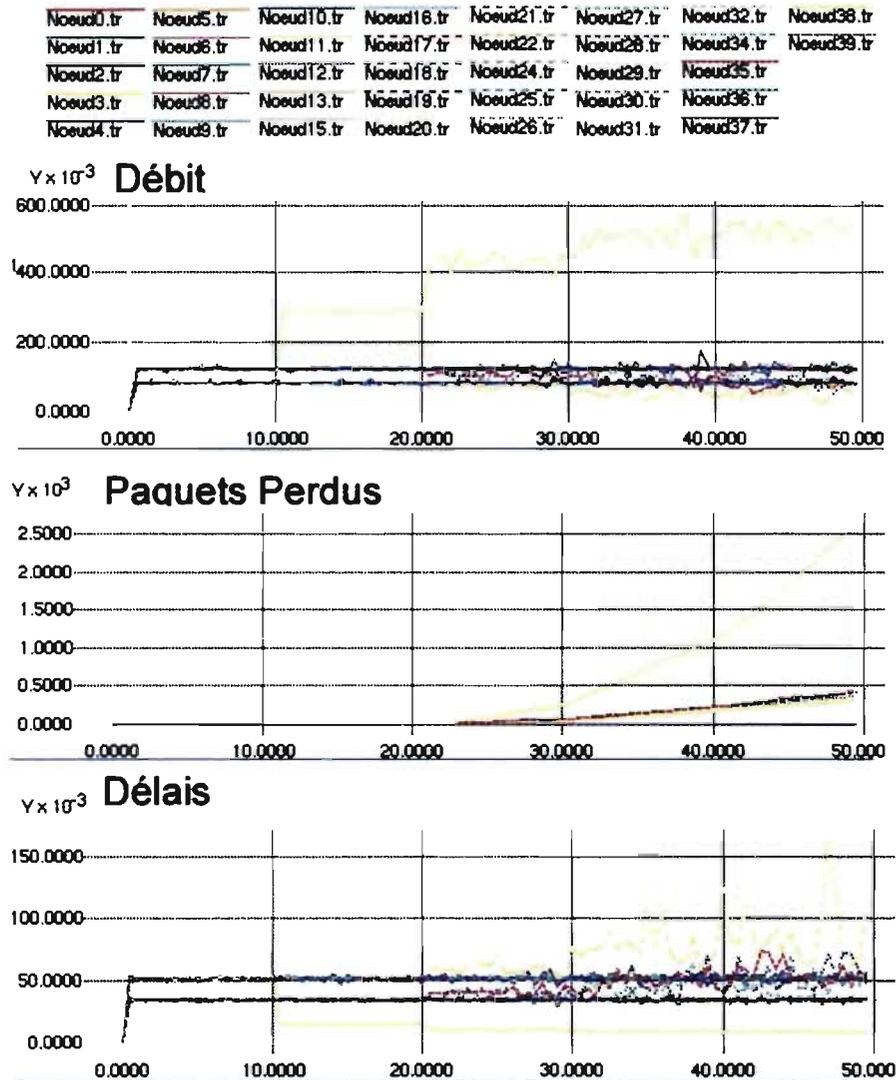


Figure 7.12. Cas 2 : Augmentation de la demande au nœud 38

Dans la figure 7.12, le routeur 38 voit sa demande augmenter d'une charge de 200Ko/s toutes les 10 secondes. Lorsque le routeur 38 désire envoyer un flot de 480Ko/s, le WMN commence à être affecté. Les routeurs 20, 27, 28 et 35 subissent une perte de données. Le routeur 20 est celui qui est le plus affecté, d'après la figure 7.12, on peut remarquer que son délai augmente considérablement.

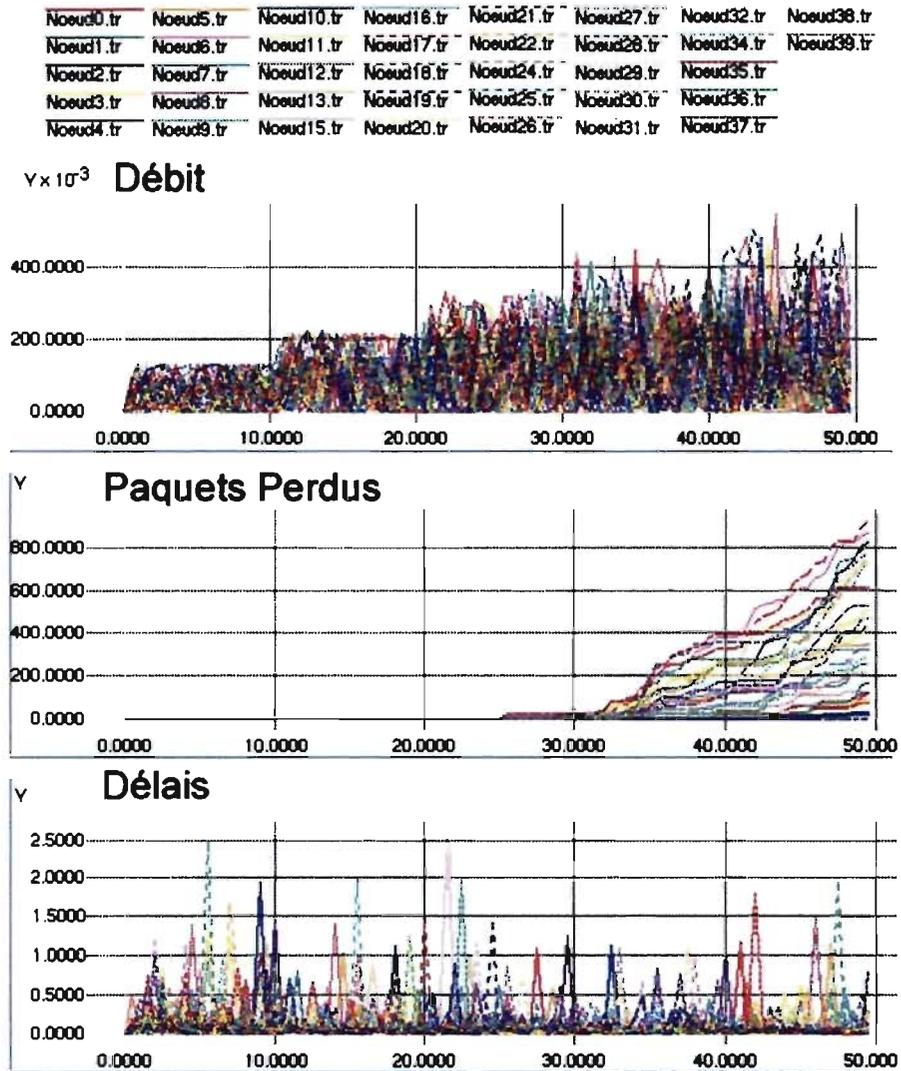


Figure 7.13. Cas 2 : Mobilité avec augmentation des demandes

Dans la figure 7.13, la demande des routeurs varie entre 0 et X à travers le temps. La valeur de X augmente de 80% toutes les 10 secondes. On peut augmenter le trafic de 180% en utilisant un trafic qui n'est pas constant.

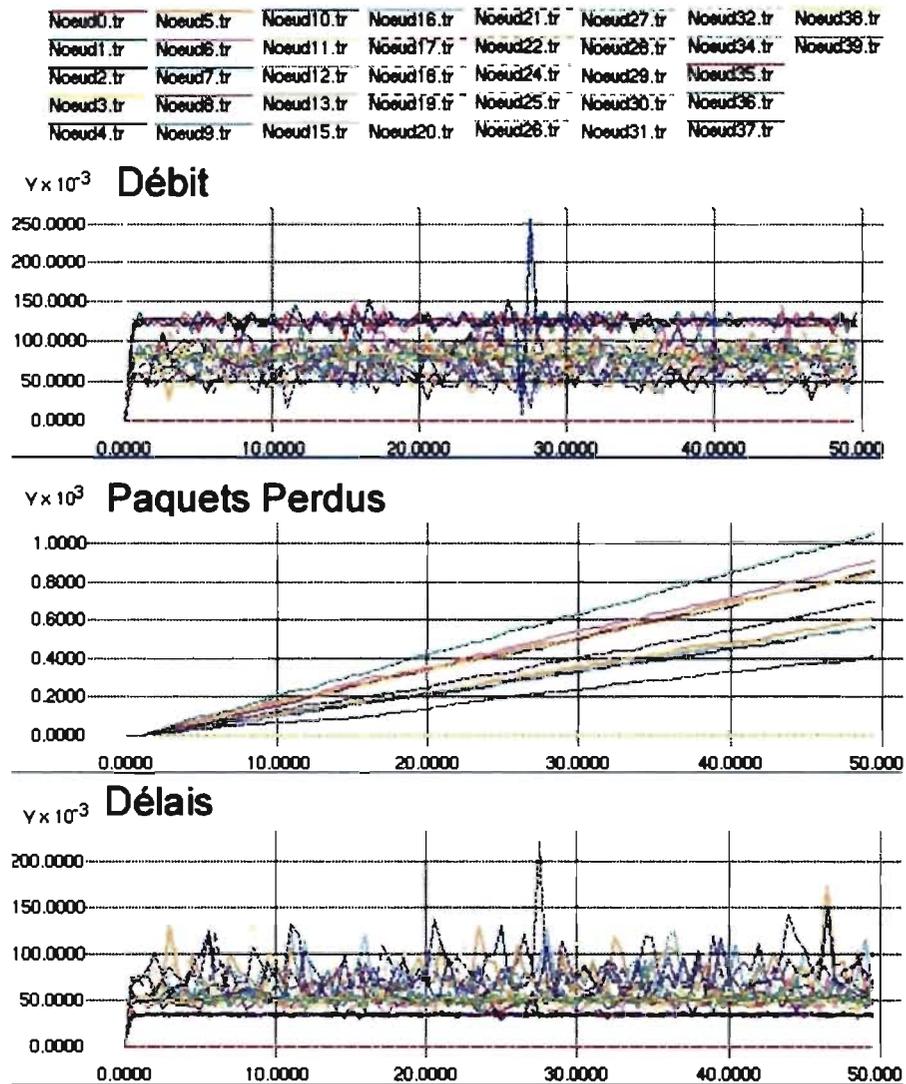


Figure 7.14. Cas 2 : Panne du routeur 17

Lorsque le routeur 17 tombe en panne, la passerelle 23 n'est plus accessible pour les routeurs 4, 5, 6, 10, 11, 16 et 22 qui doivent maintenant envoyer leur flot vers une autre passerelle. Le flot de ces routeurs est donc dévié vers la passerelle 14, la figure 7.14 démontre les conséquences de cette surcharge de flot vers la passerelle 23. Les routeurs sans fil 4, 5, 6, 10, 11, 16 et 22 ne parviennent pas à envoyer tous leurs paquets vers la nouvelle passerelle. Leurs débits sont réduits et leurs délais augmentent.

Le réseau simulé fournit un WMN possible sans perte de paquets. On peut augmenter la valeur des flots des routeurs jusqu'à 80%. La mobilité ne fournit pas de problèmes aussi. Lorsqu'un routeur tombe en panne, les routeurs envoient leurs paquets vers un autre chemin, ce qui provoque une surcharge des capacités. Les passerelles reçoivent trop de données. On remarque encore dans ce cas une basse connectivité ainsi qu'une solution réalisable qui a de la difficulté à réagir aux changements possible dans le réseau.

CAS 3

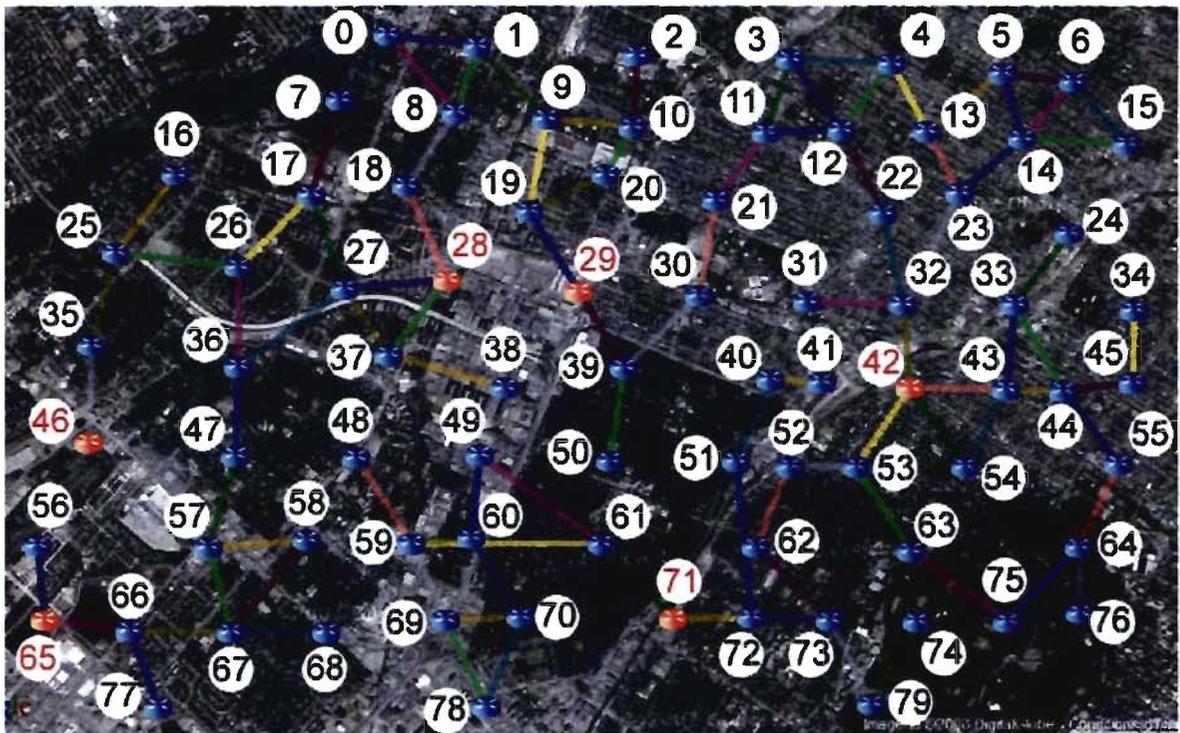


Figure 7.15. Cas 3 : Simulation de 80 nœuds

La figure 7.5 présente un WMN formé de 80 nœuds. Ce réseau compte 6 passerelles nommées 28, 29, 42, 46, 65 et 71. On peut remarquer que les passerelles sont bien situées et

que les flots des routeurs sans fil vont être répartis. Voici les entrées utilisées pour cette simulation :

- *Demande des noeuds* : Chaque nœud désire envoyer un flot de 50 Kilooctets par seconde.
- *Capacité d'un lien (arc)* : La capacité d'un arc est de 1500 Kilooctets.
- *Nombre de radios* : Chaque nœud dispose d'un nombre de radios maximal de 4.
- *Coût d'une passerelle* : Le coût d'une passerelle est de 80\$.
- *Les portées possibles* : 500m → 5\$, 1000m → 10\$, 1500m → 15\$, 2000m → 20\$, 4000m → 25\$
- *Nombre de sauts* : Les nœuds doivent envoyer leurs flots en moins de 4 sauts.
- *Coût de la solution* : Le coût total du WMN est de 1185\$.

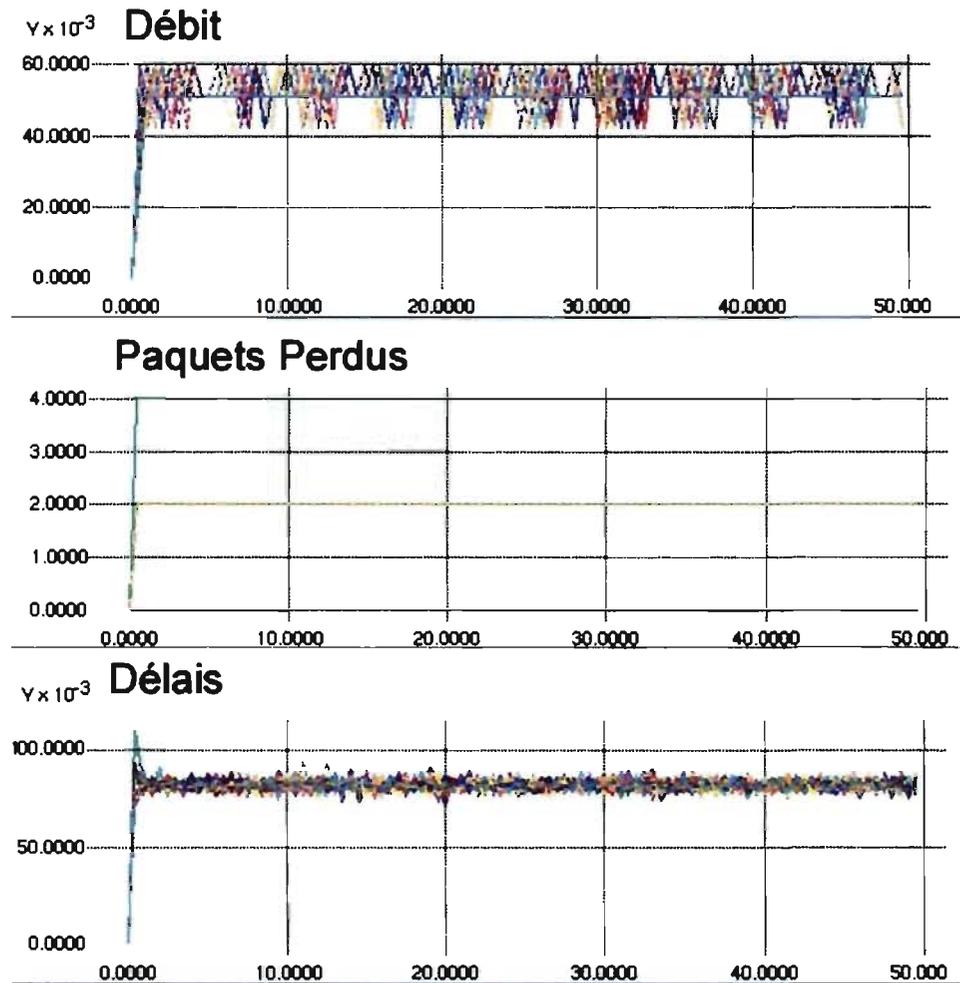


Figure 7.16. Cas 3 : Simulation du réseau

La figure 7.16 démontre que le réseau est réalisable, il n'y a aucune perte de paquets et les délais sont faibles.

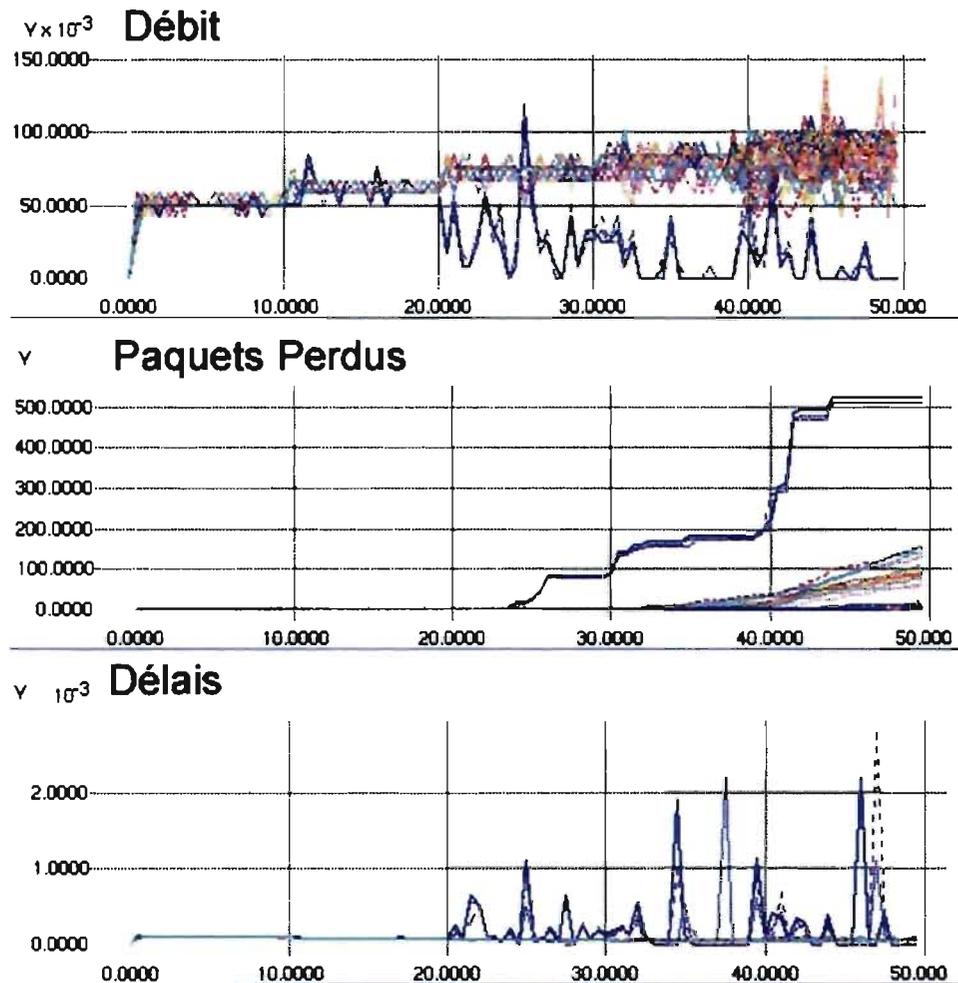


Figure 7.17. Cas 3 : Augmentation graduelle de toutes les demandes

Dans la figure 7.17, la demande des nœuds augmente de 10Ko/s toutes les 10 secondes. Lors de la première augmentation de la demande de 50Ko/s à 60Ko/s, des problèmes commencent à apparaître. Les routeurs sans fil 2 et 20 sont les premiers à avoir de la difficulté à faire parvenir leurs flots, mais aucun paquet n'est encore perdu. Une augmentation des débits à 70Ko/s se produit à 20 secondes; les routeurs 2 et 20 voient leur débit réduit significativement et leurs délais augmenter. Lorsque la demande des nœuds augmente à 80Ko/s plusieurs nœuds dans le WMN ne parviennent plus à envoyer leur flot.

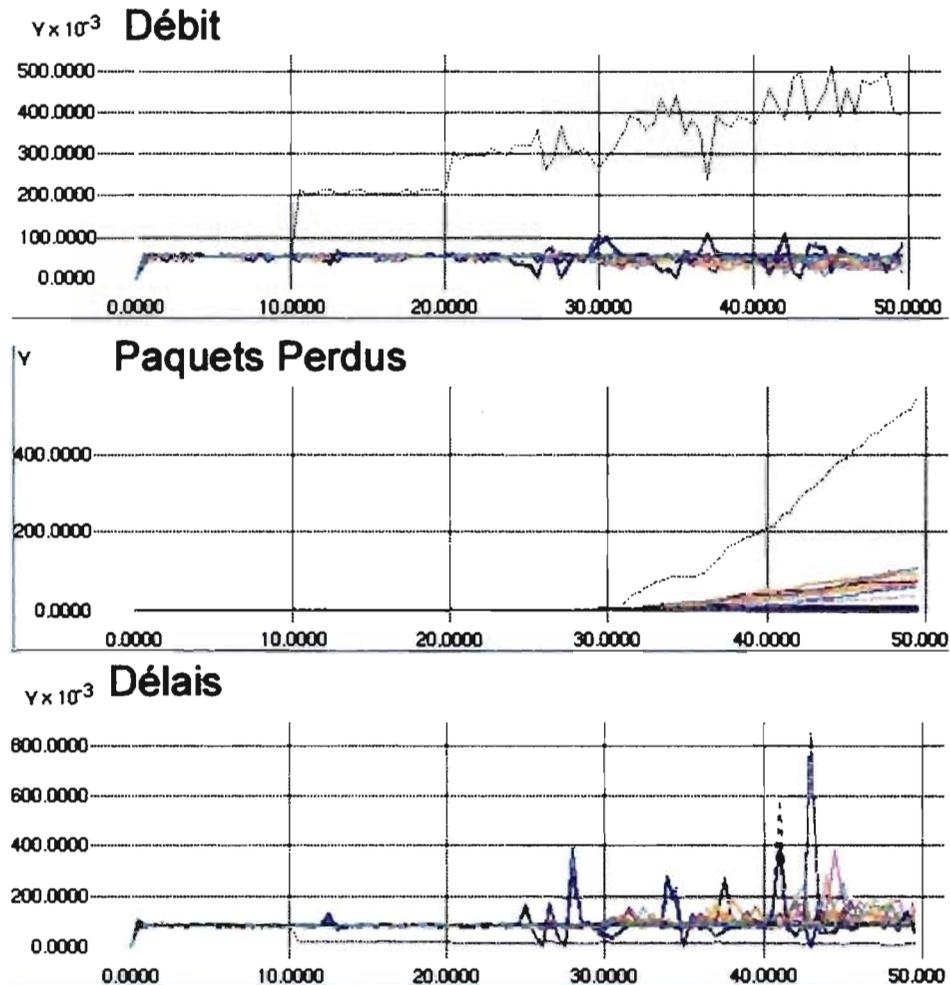


Figure 7.18. Cas 3 : Augmentation de la demande au nœud 12

Dans la prochaine simulation à la figure 7.18, le débit du nœud 12 est augmenté à 200Ko/s à 10 secondes, 300Ko/s à 20 secondes, 400Ko/s à 30 secondes et 500Ko/s à 40 secondes. Lorsque son débit atteint 300Ko/s des problèmes commencent à se manifester. Les chemins vers une passerelle des routeurs sans fil 3, 4, 5, 6, 13, 14, 15 et 23 sont saturés. Ces routeurs peuvent alors détourner leur flot vers la passerelle 29. Le flot étant trop grand sur les deux chemins, certains paquets commencent à être perdus.

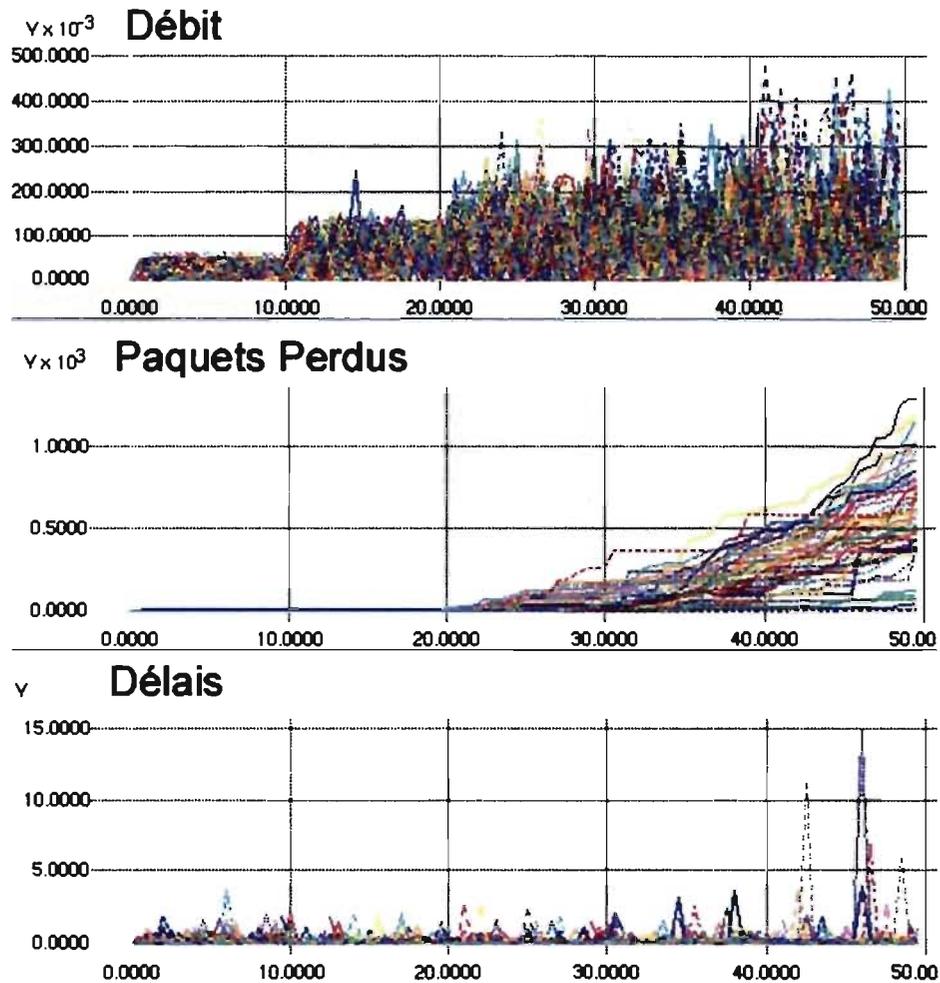


Figure 7.19. Cas 3 : Mobilité avec augmentation des demandes

La mobilité des utilisateurs entraîne des débits aux nœuds qui ne sont pas constants et varient avec le temps. Dans le réseau, le débit ne sera pas constant, certains nœuds auront plus de débits que d'autres pendant un certain laps de temps. La figure 7.19 indique que lorsque le flot de chaque nœud oscille entre 0 et 120Ko/s, le WMN fonctionne normalement. Lorsque le flot des nœuds augmente à 120Ko/s, le réseau commence à perdre des paquets.

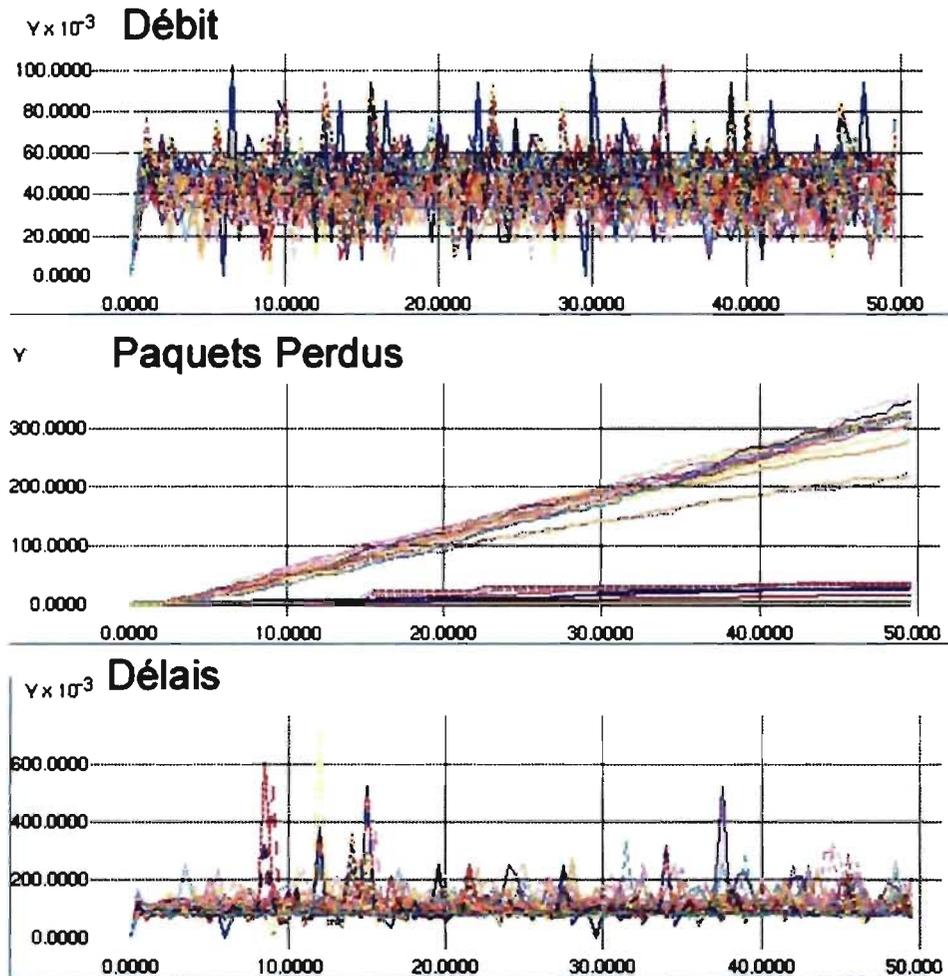


Figure 7.20. Cas 3 : Panne d'une radio de la passerelle 42

Dans la dernière simulation de la figure 7.20, une radio de la passerelle 42 tombe en panne. Ce lien était responsable de communiquer avec le routeur 32. La figure représente la conséquence de dévier tous les flots qui ont perdu leur connexion vers la passerelle 29.

Dans ce cas on remarque que la panne d'un routeur occasionne des problèmes importants pour plusieurs routeurs sans fils. Certains routeurs ont qu'un seul chemin vers une passerelle. Lorsque les paquets sont déviés vers de nouveaux chemins, ces chemins ne disposent pas de la capacité nécessaire. Ce problème peut être résolu en ajoutant des

contraintes qui augmentent la connectivité des routeurs ainsi que la capacité totale d'un chemin. Le modèle développé procure un système réalisable qui peut réagir négativement à des changements. Ce modèle est donc une base pour des travaux futurs par son auteur.

Chapitre 8

Conclusion et perspectives

Dans ce mémoire de nouveaux outils ont été conçus pour les réseaux sans fil maillés. Ce travail est une contribution aux travaux de Beljadid, Hafid et Gendreau [1]. L'outil de cartographie créé est utile pour ajouter les entrées nécessaires à l'heuristique et pour fournir à un utilisateur des aperçus visuels sur les WMNs. L'heuristique développée permet de résoudre le modèle, propose de nouvelles idées dans la résolution du problème et peut servir de point de comparaison avec d'autres heuristiques qui seront développées. Enfin, le simulateur WMN vérifie que les réseaux théoriques sont réalisables.

D'après les résultats, on observe que les simulations obtenues fournissent des réseaux réalisables. Notre heuristique parvient à fournir des solutions de qualité qui respectent toutes les contraintes établies dans la problématique. Le modèle actuel réagit négativement à des changements dans le réseau (augmentation de la demande, bris de routeur, mobilité). La minimisation du coût du WMN entraîne que les portées des routeurs sont aussi minimisées. Les solutions actuelles fournissent une basse connectivité entre les routeurs sans fil. Lorsqu'une passerelle ou un routeur sans fil tombe en panne, plusieurs chemins peuvent être détruits.

Le modèle actuel ne permet pas d'interférences, ce qui fournit un résultat de qualité, mais non réalisable puisque le nombre de canaux disponibles est limité dans un environnement réel. Le modèle RTS/CTS d'interférence peut être utilisé pour minimiser le nombre de canaux en permettant l'interférence. Le modèle de conception sera amélioré pour mieux réagir aux changements dans un WMN. Des contraintes supplémentaires seront ajoutées pour prendre en considération la connectivité dans le réseau et permettent d'accorder plus d'importance à certains routeurs sans fil dans le système (connectés aux

passerelles). Un autre modèle d'interférence sera aussi utilisé, puisque le modèle d'interférence protocole fixe demande un nombre de canaux disponibles élevés.

Les travaux futurs vont fournir une topologie WMN qui utilise un routage dynamique, qui prend en compte les pannes possibles dans un réseau et où les routeurs sans fil disposent d'une multitude de chemins vers les passerelles. Le traitement de l'heuristique devient plus complexe avec un plus grand nombre de nœuds, de nouvelles heuristiques plus efficaces peuvent être développées. Une étude sur l'allocation du spectre utilisé dans le réseau serait aussi pertinente pour des travaux futurs pour vérifier si toute la largeur de bande est bien utilisée et répartie dans le réseau.

Bibliographie

- [1] A. Beljadid, A. S. Hafid et M. Gendreau, *Optimal design of broadband Wireless Mesh Networks*. GlobeCom 07, pages 1-7, 2007.
- [2] A. Beljadid, A. S. Hafid et M. Gendreau, *Design of Infrastructure Wireless Mesh Networks: Formulation and Solution*. pages 1-10, 2007.
- [3] A. Beljadid, A. S. Hafid et M. Gendreau, *Design of Wireless Mesh Networks: Expansion and Reliability Studies*. pages 1-6, 2007.
- [4] L. Fan, W. Yu, L. et X. Yang, *Gateway Placement for Throughput Optimization in Wireless Mesh Networks*. IEEE ICC, pages 1-11, 2007.
- [5] X. W. Ian, F. Akyildiz et W. Wang, *Wireless mesh networks: a survey*. Computer Networks, vol. 47, no 4, pages 445-487, 2005.
- [6] Y. Li, L. Qiu, Y. Zhang et R. Mahajan, *Effects of Interference on Wireless Mesh Networks: Pathologies and a Preliminary Solution*. MobiCom, pages 1-7, 2006.
- [7] P. Gupta et P. Kumar, *The capacity of wireless networks*. IEEE Trans. on Information Theory, vol. 46, no. 2, pages 388-404, 2000.
- [8] X. Y. Li, Y. Wu et W. Wang, *Throughput optimization in multi-hop multi-radio multi-channel wireless networks*. pages 1-7, 2007.
- [9] W. Wang, Y. Wang, X. Y. Li, W.-Z. Song et O. Frieder, *Efficient interference-aware TDMA link scheduling for static wireless networks*. ACM MobiCom, pages 1-12, 2006.
- [10] S. Yi, Y. Pei et S. Kalyanaraman, *On the capacity improvement of ad wireless networks using directional antennas*. dans ACM MobiHoc 03, pages 1-8, 2003.
- [11] A. Behzad et I. Rubin, *On the performance of graph-based scheduling algorithms for packet radio networks*. GlobeCom 03, pages 1-11, 2003.
- [12] C. Gomes, C. Molle, P. Reyes et H. Rivano, *Placement optimal de points d'accès dans les réseaux maillés*. Projet Mascotte, pages 1-7, 2004.

- [13] S. Tajima, T. Higashino, N. Funabiki et S. Yoshida, *An Internet Gateway Access-Point Selection Problem for Wireless Infrastructure Mesh Networks*. 7ième Conférence International sur MDM 06, pages 12-16, 2006.
- [14] Y. Nomura, N. Funabiki et T. Nakanishi, *A proposal of access-point channel assignment algorithm and an evaluation of access-point allocation algorithm in wireless infrastructure mesh networks*. 3ième ANWS, pages 1-13-1-16, 2006.
- [15] P. Kyasanur et N. H. Vaidya. *Capacity of multi-channel wireless networks: impact of number of channels and interfaces*. Dans MobiCom 05, pages 43-57, 2005.
- [16] P. Kyasanur et N. Vaidya. *Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks*. Dans WCNC, pages 1-6, 2005.
- [17] M. Alicherry, R. Bhatia, et L. E. Li. *Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks*. Dans MobiCom 05, pages 58-72, 2005.
- [18] M. Kodialam et T. Nandagopal. *Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks*. Dans MobiCom 05, pages 73-87, 2005.
- [19] A. K. Das, H. M. K. Alazemi, R. Vijayakumar et S. Roy, *Optimization Models for Fixed Channel Assignment in Wireless Mesh Networks with Multiple radios*, IEEE SECON 2005, pages 463-474, 2005.
- [20] A. Raniwala K. Gopalan et T-c. Chiueh, *Centralized Channel Assignment and Routing Algorithms for Multi Channel Wireless Mesh Networks*, SIGMOBILE comput. commun. Rev. vol 8 no 2 pages 50-65, 2004.
- [21] J. L. Qiu, R. Chandra, K. Jain, et M. Mahdian. *Optimizing the placement of integration Points in Multi-hop Wireless Networks*. ICNP 04, pages 271-282, 2004.
- [22] J. Jun et M. L. Sichitiu. *The nominal capacity of wireless mesh networks*. IEEE Wireless Communications, pages 1-6, 2003.
- [23] D. M. Tate and A. E. Smith, *A genetic approach to the quadratic assignment problem*, Computers and Operations Research Vol 22 pages 73-83, 1995.
- [24] F. Glover and M. Laguna, *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, pages 1-60, 1997.

- [25] Motorola wireless, <http://www.motorola.com/wireless>, 3 octobre 2008
- [26] BelAir Networks, <http://www.belairnetworks.com>, 3 octobre 2008
- [27] Tropos networks, <http://www.tropos.com>, 3 octobre 2008
- [28] Meshdynamics Inc, <http://www.meshdynamics.com>, 3 octobre 2008
- [29] IEEE 802.16 standard - July 2004,
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16.pdf>, 3 octobre 2008
- [30] MIT Roofnet, <http://pdos.csail.mit.edu/roofnet/doku.php>, 3 octobre 2008
- [31] IEEE 802.11a standard - 1999,
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11a.pdf>, 3 octobre 2008
- [32] IEEE 802.11b standard, <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11b.pdf>,
3 octobre 2008
- [33] Multi-channel multi-interface for wireless networks,
<http://greenw.blogspot.com/2006/06/extend-ns2-to-support-multi-channle.html>,
3 octobre 2008
- [34] Make hyacinth run on Debian NS-2.29.2,
<http://my.opera.com/HenryFD/blog/show.dml/202861>, 3 octobre 2008
- [35] Multi-channel Multi-interface Simulation in NS2 (2.29),
<http://www.cse.msu.edu/~wangbo1/ns2/nshowto8.html>, 3 octobre 2008
- [36] Traces for UDP-based application over wireless networks,
<http://140.116.72.80/~smallko/ns2/wireless-udp-1.htm>, 3 octobre 2008
- [37] Bluetooth Technology Info Site, <http://www.bluetooth.com/bluetooth/>,
3 octobre 2008
- [38] ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/en/index.asp>, 3 octobre 2008
- [39] HiperLAN2, <http://www.palowireless.com/hiperlan2/about.asp>, 3 octobre 2008
- [40] WiMAX Technology with focus on Applications and Networks,
<http://www.wimaxday.net/site/>, 3 octobre 2008
- [41] GSM Association, <http://www.gsmworld.com/about/history.shtml>, 3 octobre 2008
- [42] Google Map API examples,
<http://code.google.com/apis/maps/documentation/examples/>, 3 octobre 2008

- [43] Google Map API links, <http://www.geocodezip.com>, 3 octobre 2008
- [44] Google Map API tutorial, <http://econym.googlepages.com/index.htm>,
3 octobre 2008
- [45] Asynchronous JavaScript and XML Documentation,
<http://developer.mozilla.org/fr/docs/AJAX>, 3 octobre 2008
- [46] The NS2 Manual,
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/index.html>, 3 octobre 2008
- [47] Des exemples de métaheuristique,
<http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9taheuristique>, 3 octobre 2008