

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PLANIFICATION GLOBALE DES RÉSEAUX MOBILES DE LA QUATRIÈME
GÉNÉRATION (4G)

EUNICE ADJARATH LEMAMOU
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE ET GÉNIE LOGICIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR
(GÉNIE INFORMATIQUE)
AVRIL 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

PLANIFICATION GLOBALE DES RÉSEAUX MOBILES DE LA QUATRIÈME
GÉNÉRATION (4G)

présentée par : LEMAMOU Eunice Adjarath
en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. PIERRE Samuel, Ph.D., président

M. GALINIER Philippe, Doct., membre et directeur de recherche

M. CHAMBERLAND Steven, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

Mme BELLAÏCHE Martine, Ph.D., membre

Mme CHERKAOUI Soumaya, Ph.D., membre

À Dieu,
À mon père, Taofiki LEMAMOU, parti si tôt ;
À ma mère, Blandine AGON, qui a toujours été là ;
À mon époux, Mohamed Kéfil LANDOU, la moitié de ma foi ;
À ma fille, Nafissa Makanjuola LANDOU, mon sang, ma vie ;
À toute ma famille ;
Je vous aime...

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont en tout premier lieu à mes directeurs de recherche, Philippe Galinier et Steven Chamberland, pour leur disponibilité, leur implication et leur support tout au long de ce travail de recherche. Je leur suis particulièrement reconnaissante d'avoir été attentifs à mes idées et à mes commentaires. Je les remercie notamment pour les longues heures de discussions au cours desquelles ils me faisaient parfois voir la faille dans mon raisonnement, m'amenant ainsi à voir les problèmes sous d'autres aspects. Sans leurs conseils avisés et leur dynamisme, ce travail de recherche n'aurait sans doute pas abouti.

Je remercie également les membres du jury, M. Samuel Pierre, Mme Martine Bellaïche et Mme Soumaya Cherkaoui pour avoir accepté d'évaluer ce travail malgré leurs nombreuses occupations.

Un travail de recherche ne pourrait être réalisé sans support financier. À ce titre, je voudrais remercier M. Steven Chamberland qui m'a entièrement financée durant ces longues années d'études. Je remercie également le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) pour la bourse qu'ils m'ont accordée.

J'adresse aussi mes remerciements aux membres du Département de Génie Informatique et Génie Logiciel (GIGL) pour le travail qu'ils effectuent afin de nous offrir un cadre d'études agréable. Mes remerciements vont particulièrement à Sabine Kebreau et à Joanne Pinsonneault pour m'avoir souvent aidée à voir la vie plus belle. Vos sourires réchauffent bien des cœurs, mesdames.

Je remercie aussi tous les membres du Laboratoire de recherche en Réseautique et Informatique Mobile (LARIM) pour la bonne ambiance qu'ils ont su mettre dans nos locaux. Je remercie tout spécialement Aurel Randolph et Moussa Ouédraogo pour avoir souvent pris de leur temps pour relire mes drafts afin de m'aider à corriger les fautes oubliées. Je remercie également Georges Abou-Khalil pour l'inspiration qu'il a été pour moi.

Une mention spéciale à mes amis Magda et Djèlil Radji, ainsi qu'au Dr. Franklin Eyelom, Maître Fondateur de l'Académie Moan Kung-fu, pour leur présence, leurs conseils avisés et leurs encouragements tout au long de ces années d'études.

J'aimerais aussi remercier sincèrement mes parents et beaux-parents, mes soeurs Mariama, Nabilath, Chérifath et Zahra, mon frère Ibrahim, ma belle-soeur Geneviève, et toute ma famille pour leur soutien inconditionnel. Un énorme merci à mes adorables neveu et nièce, Noah et Aïcha, qui ont ensoleillé mes journées sombres. Je tiens à ce que vous sachiez combien je vous aime.

Je tiens à remercier mon époux et fan #1, Mohamed Kéfil Landou pour sa patience, sa

compréhension et son soutien inconditionnel durant toutes ces années. Il a toujours cru en moi et m'a toujours poussée à aller de l'avant.

Je ne pourrai pas citer tout le monde. J'aimerais donc enfin remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de cette thèse.

RÉSUMÉ

Dans le contexte actuel où l'information est la clé du succès, peu importe le domaine où l'on se place, les réseaux de télécommunications sont de plus en plus sollicités. D'énormes quantités d'informations circulent sur les réseaux à chaque seconde. Il est primordial d'assurer la disponibilité de ces réseaux afin de garantir la transmission de ces données en toutes circonstances.

Le problème de la planification des réseaux de télécommunications consiste à déterminer, parmi un ensemble de sites potentiels, ceux à utiliser afin de couvrir une zone géographique donnée. Il convient également de choisir les équipements à installer sur ces sites et de faire le lien entre eux en fonction de certaines contraintes bien définies. Depuis des dizaines d'années, plusieurs auteurs se sont penchés sur la résolution de ce problème dans le but de minimiser le coût d'installation du réseau. Ces auteurs se sont intéressés à divers aspects du problème sans le considérer dans sa globalité.

Certaines études ont été effectuées récemment sur la planification globale des réseaux mobiles. Les auteurs se sont intéressés aux réseaux de la troisième génération et ont proposé un modèle pour résoudre le problème de façon globale. Cependant, ils n'ont pas pris en compte la tolérance du réseau aux pannes qui pourraient survenir.

Cette thèse propose un cadre de planification globale pour les réseaux de la quatrième génération (la nouvelle génération des réseaux mobiles). La survivabilité du réseau est prise en compte dans cette étude. Le travail a été effectué en trois phases.

Dans la première phase, un modèle global incluant la tolérance aux pannes a été conçu pour la planification des réseaux 4G (WiMAX) et résolu de manière optimale avec un solveur mathématique, en utilisant la programmation linéaire en nombres entiers. L'objectif du modèle consiste à minimiser le coût du réseau, tout en maximisant sa survivabilité. Afin de montrer la pertinence de la résolution globale, le modèle a été comparé à un modèle séquentiel avec les mêmes contraintes. Le modèle séquentiel consiste à subdiviser le problème en trois sous-problèmes et à les résoudre successivement. Un modèle global qui n'intègre pas les contraintes de fiabilité a également été conçu afin de vérifier l'effet des pannes sur le réseau. Les résultats obtenus par le modèle global proposé sont, en moyenne, 25% meilleurs que ceux des deux autres modèles.

Le problème de planification globale des réseaux et le problème de survivabilité des réseaux de télécommunications sont deux problèmes NP-difficiles. La combinaison de ces deux problèmes donne un problème encore plus difficile à résoudre que chacun des problèmes pris séparément. La méthode exacte utilisée dans la première phase ne peut résoudre que des

instances de petite taille. Dans la deuxième phase, nous proposons une métaheuristique hybride afin trouver de ‘bonnes solutions’ en un temps ‘raisonnable’ pour des instances de plus grande taille. La métaheuristique proposée est une nouvelle forme d’hybridation entre l’algorithme de recherche locale itérée et la méthode de programmation linéaire en nombres entiers. L’hybridation de ces deux méthodes permet de bénéficier de leurs avantages respectifs, à savoir l’exploration efficace de l’espace de recherche et l’intensification des solutions obtenues. L’intensification est effectuée par la méthode exacte qui calcule la meilleure solution possible à partir d’une configuration donnée tandis que l’exploration de l’espace est faite à travers l’algorithme de recherche locale itérée. Les performances de l’algorithme ont été évaluées par rapport à la méthode exacte proposée lors de la première phase. Les résultats montrent que l’algorithme proposé génère des solutions qui sont, en moyenne à 0,06% des solutions optimales. Pour les instances de plus grande taille, des bornes inférieures ont été calculées en utilisant une relaxation du modèle. La comparaison des résultats obtenus par l’algorithme proposé avec ces bornes inférieures montrent que la métaheuristique obtient des solutions qui sont, en moyenne à 2,43% des bornes inférieures pour les instances qui ne peuvent pas être résolues de manière optimale, avec un temps de calcul beaucoup plus faible.

La troisième phase a consisté à la conception d’une métaheuristique multi-objectifs pour résoudre le problème. En effet, nous essayons d’optimiser deux objectifs contradictoires qui sont le coût du réseau et sa survivabilité. L’algorithme proposé permet d’offrir plus d’alternatives au planificateur, lui donnant ainsi plus de flexibilité dans la prise de décision.

ABSTRACT

In the current context where information is the key to success in any field where one stands, telecommunications networks are increasingly in demand. Huge amounts of information circulates on the networks every second. It is essential to ensure the availability of these networks to ensure the transmission of these data at any time.

The problem of planning of telecommunication networks is to determine, from a set of potential sites, those to be used to cover a given geographical area. One should also choose the equipment to be installed on these sites and to link them according to certain well-defined constraints. For decades, several authors have focused on solving this problem in order to minimize the cost of network installation. These authors were interested in various aspects of the problem without considering it in its entirety.

Some studies have recently been performed on the global planning of mobile networks. The authors were interested in the third generation networks. They proposed a model to solve the problem entirely, without breaking it down into sub-problems. However, they did not take into account the fault tolerance of network.

This thesis proposes a global planning framework for the fourth generation (4G) networks (the new generation of mobile networks). The survivability of the network is taken into account in this study. The work was conducted in three phases.

In the first phase, a global model including survivability has been designed for the planning of 4G (WiMAX) networks and solved optimally with a mathematical solver using the integer linear programming method. The objective of the model is to minimize the network cost while maximizing its survivability. To show the relevance of the global resolution, the model was compared to a sequential model with the same constraints. The sequential model is to divide the problem into three sub-problems and solve them successively. A global model which does not include survivability constraints has also been designed to test the effect of failures on the network. The results show that the proposed model performs on average 25% better than the two other models.

The problem of global network planning and the problem of survivability of telecommunications networks are two NP-hard problems. The combination of these two problems provides a problem even more difficult to solve than each problem taken separately. The exact method used in the first phase can only solve small instances. In the second phase, we propose a hybrid metaheuristic to find ‘good solutions’ in a ‘reasonable time’ for instances of larger size. The proposed metaheuristic is a new form of hybridization between the iterated local search algorithm and the integer linear programming method. The hybridization of these two methods

can benefit from their respective advantages, namely the efficient exploration of the search space and the intensification of the solutions obtained. The intensification is performed by the exact method that calculates the best possible solution from a given configuration while the exploration of the search space is made through the iterated local search algorithm. The performance of the algorithm have been evaluated with respect to the exact method given in the first phase. The results show that the proposed algorithm generates solutions that are on average 0,06% of the optimal solutions. For the larger instances, the lower bounds are calculated using a relaxation of the model. The comparison of the results obtained by the proposed algorithm with the lower bounds show that the metaheuristic obtains solutions that are on average 2,43% from the lower bounds, for the instances that cannot be solved optimally, within a much less computation time.

The third phase involved the design of a multi-objective metaheuristics to solve the problem. Indeed, we try to optimize two conflicting objectives which are the cost of network and its survivability. The proposed algorithm allows us to offer more alternatives to the planner, giving him (her) more flexibility in the decision making process.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Définitions et concepts de base	2
1.1.1 Les réseaux mobiles	2
1.1.2 Processus de planification des réseaux	13
1.2 Éléments de la problématique	15
1.3 Objectifs de recherche	17
1.4 Plan de la thèse	18
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	19
2.1 Analyse sommaire du problème	19
2.2 Les étapes de la planification des réseaux mobiles	20
2.3 La survivabilité des réseaux dans la littérature	22
2.4 Planification des réseaux 4G dans la littérature	22
2.5 Méthodes de planification utilisées	24
2.5.1 Les méthodes exactes	24
2.5.2 Les méthodes approchées	25
2.5.3 Les méthodes hybrides	30
2.5.4 L'optimisation multi-objectifs	30
2.6 Analyse des travaux présentés dans la littérature	35

CHAPITRE 3	DÉMARCHES DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE	36
CHAPITRE 4	ARTICLE 1 : A RELIABLE MODEL FOR GLOBAL PLANNING OF MOBILE NETWORKS	40
4.1	Introduction	40
4.2	Literature Review	42
4.3	Problem Definition	45
4.3.1	The Network Architecture	45
4.3.2	The Network Planning Problem	45
4.3.3	An Illustrative Example	45
4.4	Model Formulation	46
4.4.1	Assumptions	46
4.4.2	The Model	47
4.5	Numerical Results	50
4.6	Conclusion and Further Work	57
Appendix A	Model Formulation	59
A.1	Notation	59
A.2	Computation of Constant Parameters	62
A.3	The Cost Function	63
A.4	The Model	63
CHAPITRE 5	ARTICLE 2 : AN HYBRID ITERATED LOCAL SEARCH ALGO- RITHM FOR THE GLOBAL PLANNING PROBLEM OF SURVIVABLE 4G MO- BILE NETWORKS	71
5.1	Introduction	71
5.2	Literature Review	73
5.2.1	Network Planning Problem	73
5.2.2	Hybrid Methods	74
5.2.3	Iterated Local Search Algorithm (ILS)	75
5.3	Problem Definition	76
5.3.1	Network Architecture	76
5.3.2	Network Planning Problem	76
5.3.3	Illustrative Example	77
5.3.4	Problem Modeling	78
5.4	Proposed Algorithm	79
5.4.1	Description of the ILP Procedure	79
5.4.2	Changes Made to the ILP Procedure	80

5.4.3	GPP4G-ILS Algorithm	81
5.5	Numerical Results	83
5.5.1	Test Instances and Previous Results	83
5.5.2	Test Parameters	87
5.5.3	Comparison Between GPP4G-ILS and the Exact Method (ILP)	88
5.5.4	Generation of Lower Bounds and Comparison with GPP4G-ILS	89
5.5.5	CPU Time Performance	91
5.6	Conclusion and Further Work	91
CHAPITRE 6 UNE MÉTAHEURISTIQUE MULTI-OBJECTIFS POUR LE GPP-4G		93
6.1	Introduction	93
6.2	L'optimisation multi-objectifs dans la planification des réseaux	94
6.3	Description de l'algorithme MOGPP4G-ILS	95
6.3.1	Comparaison des solutions : critère d'acceptation d'une nouvelle solution	97
6.3.2	Mise-à-jour du front Pareto	98
6.3.3	Choix de la solution de redémarrage	98
6.3.4	Évaluation d'une solution	99
6.4	Expérimentations numériques et résultats obtenus	99
6.5	Conclusion	102
CHAPITRE 7 DISCUSSION GÉNÉRALE		103
CHAPITRE 8 CONCLUSION		105
8.1	Synthèse des contributions de la thèse	105
8.2	Limitations de la solution proposée	106
8.3	Améliorations futures	107
RÉFÉRENCES		108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Spécifications requises par l'IMT-Advanced pour les réseaux 4G	9
Table 4.1	Features of the BSs types	51
Table 4.2	Features of the ASN-GWs types	51
Table 4.3	Features of the CSNs types	51
Table 4.4	Features of the links types	51
Table 4.5	Composition of the test instances used and the results of the global model (G).	52
Table 4.6	Results obtained with the sequential model (S) and comparison with model G	53
Table 4.7	Results obtained with the model without survivability (NS) and comparison with model G	56
Table 5.1	Features of the BSs types	84
Table 5.2	Features of the gateways types	84
Table 5.3	Features of the switches types	84
Table 5.4	Features of the links types	84
Table 5.5	Composition of the test instances used and the solutions of the ILP algorithm (ILP).	85
Table 5.6	Comparison between the ILS algorithm and the ILP algorithm	86
Table 5.7	Comparison between the ILS algorithm and the ILP-R algorithm on the test instances without optimal solution	90
Tableau 6.1	Comparaison entre les solutions de l'algorithme GPP4G-ILS et ceux obtenus par CPLEX avec l'optimisation séparée des deux objectifs. . .	100
Tableau 6.2	Comparaison des temps de calcul obtenus par les algorithmes MOGPP4G-ILS et GPP4G-ILS.	100

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Types de topologies	2
Figure 1.2	Architecture générale simplifiée des réseaux mobiles	5
Figure 1.3	Architecture des réseaux GSM	5
Figure 1.4	Architecture des réseaux UMTS	6
Figure 1.5	Évolution des réseaux cellulaires	7
Figure 1.6	Architecture des réseaux WiMAX	12
Figure 1.7	Architecture des réseaux LTE	12
Figure 1.8	Processus de planification des réseaux [112]	14
Figure 2.1	Illustration du concept de front Pareto pour un problème de minimi- sation bi-objectifs	31
Figure 4.1	WiMAX mobile network architecture	44
Figure 4.2	Example of mobile WiMAX network planning	46
Figure 4.3	The sequential approach [133]	50
Figure 4.4	Illustration of the results obtained by the global and sequential models on one of the instances of the set #15	55
Figure 4.5	Illustration of the results obtained by the models G and NS on one of the instances of the set #15	58
Figure 5.1	4G mobile network architecture	75
Figure 5.2	Example of 4G mobile network planning	77
Figure 5.3	Differents moves in the LNS algorithm	80
Figure 5.4	Jump in the GPP4G-ILS algorithm	84
Figure 5.5	Evolution of the cost of the solution depending on the number of TPs for ILP-R algorithm	88
Figure 5.6	Comparison between the CPU times of the ILP algorithm and the ILS algorithm	91
Figure 6.1	Illustration d'un déplacement non désiré avec la méthode de comparai- son permissive.	97
Figure 6.2	Illustration de la méthode de comparaison restrictive.	98
Figure 6.3	Résultats obtenus par l'algorithme MOGPP4G-ILS avec la méthode de comparaison CP.	100
Figure 6.4	Comparaison entre les méthodes de comparaison CR et CP.	101

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

1G	Réseau cellulaire de première génération
2G	Réseau cellulaire de deuxième génération
2.5G	Réseau cellulaire de génération intermédiaire entre la 2G et la 3G
2.75G	Réseau cellulaire de génération intermédiaire entre la 2.5G et la 3G
3G	Réseau cellulaire de troisième génération
3.5G	Réseau cellulaire de génération intermédiaire entre la 3G et la 4G
3.75G	Réseau cellulaire de génération intermédiaire entre la 3.5G et la 4G
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Réseau cellulaire de quatrième génération
AAS	Adaptive Antenna Systems
AES	Advanced Encryption Standard
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AMS	Adaptive Modulation Schemes
ASN	Access Service Network
ASN-GW	Access Service Network-Gateway
BE	Best Effort
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
CDMA	Code Division Multiple Access
CPU	Central Processing Unit
CSN	Connectivity Service Network
DES	Data Encryption Standard
EDGE	Enhanced Data for GSM Evolution
E-rtPS	Enhanced real-time Polling Service
ESA	Evolutionary Simulated Annealing
GA	Genetic Algorithm
Gbps	Gigabits par seconde
GE	Gigabit Ethernet
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GHz	Giga Hertz
GMSC	Gateway Mobile service Switching Center
GPRS	General Packet Radio Service

GS	Greedy Search
GSM	Global System for Mobile Communications
HLR	Home Location Register
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ILP	Integer Linear Programing
ILS	Iterated Local Search
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications - Advanced
IP	Internet Protocol
IS	Interim Standard
ITU	International Telecommunication Union
LNS	Large Neighborhood Search
LTE	Long Term Evolution
MAN	Metropolitan Area Networks
Mbps	Mégabits par seconde
MG	Media Gateway
MHz	Méga Hertz
MILP	Mixed Integer Linear Programing
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Message Service
MOGA	Multiple Objective Genetic Algorithm
MSC	Mobile service Switching Center
MTBF	Mean Time Between Failures
NMT	Nordic Mobile Telephone
NPGA	Niched Pareto Genetic Algorithm
nrtPS	non real-time Polling Service
NSGA	Nondominated Sorting Genetic Algorithm
NSS	Network Switching Subsystem
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PDN	Public Data Network
PDN-GW	Public Data Network - Gateway
QoS	Qualité de Service
QoS	Quality of Service

RAM	Random Access Memory
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
RTPC	Réseau Téléphonique Public Commuté
rtPS	real-time Polling Service
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIR	Signal to Interference Ratio
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
SUI	Stanford University Interim
TACS	Total Access Communication System
TDMA	Time Division Multiple Access
TL	Time Limit
TNEP	Transmission Network Expansion Planning
TP	Test Point
TS	Tabu Search
UGS	Unsolicited Grand Service
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UM	Usager Mobile
UMB	Ultra Mobile Brodband
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithms
VLR	Visitor Location Register
VNS	Variable Neighborhood Search
WAN	Wide Area Network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WOBAN	Wireless-Optical Broadband Access Network

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les réseaux de télécommunications ont pris de plus en plus d'importance dans notre société. Pour satisfaire au mieux les besoins et les intérêts des clients, les opérateurs doivent pouvoir offrir, au meilleur prix, des services d'excellente qualité. C'est dans ce cadre que s'inscrit le problème de planification des réseaux qui consiste à optimiser les coûts engendrés par l'installation et l'utilisation du système. Une planification bien effectuée a pour effet de réduire le temps de mise en marché, le coût des dépenses d'investissement ainsi que le coût des dépenses opérationnelles [100].

Les utilisateurs des réseaux de télécommunications sont de plus en plus mobiles et de plus en plus exigeants en termes de fiabilité et de débit. Dans le but de satisfaire à leurs demandes, les normes sont sans cesse améliorées. De nouveaux services peuvent ainsi être offerts par les opérateurs de réseaux. La concurrence existante au niveau du marché oblige les opérateurs à offrir ces services au meilleur prix tout en assurant une certaine qualité de service (QoS). Le terme 'qualité de service' est assez controversé et utilisé dans la littérature pour désigner différentes notions [67]. L'UIT (Union Internationale des Télécommunications) définit la qualité de service comme étant l'effet global produit par la qualité de fonctionnement d'un service qui détermine le degré de satisfaction de l'utilisateur du service' [79]. Cette définition de la QoS est tournée vers l'utilisateur et inclut plusieurs aspects non techniques. Cependant, elle dépend aussi des performances du réseau, notamment le délai, le débit et la disponibilité du réseau, cette dernière elle-même affectée par la fiabilité du réseau [79].

Dans cette thèse, le problème de planification des réseaux 4G est traité de façon globale, de la planification des cellules à celle du réseau cœur, y compris l'attribution des canaux de fréquence et le dimensionnement des liens au sein du réseau. Divers paramètres sont simultanément optimisés, à savoir, le trafic généré dans les deux directions, la performance, la fiabilité, ainsi que les coûts d'installation et d'opération du réseau.

Ce chapitre d'introduction est organisé comme suit. Dans une première partie, nous définissons les réseaux mobiles en général, puis les réseaux 4G en particulier. La technologie et l'architecture générale de ces réseaux sont exposées. Par la suite, nous présentons la problématique de la planification des réseaux mobiles. Les objectifs de recherche sont aussi définis. Enfin, le plan du document est présenté.

1.1 Définitions et concepts de base

Cette section présente une introduction des principaux concepts de base utilisés dans ce document. Les réseaux mobiles sont décrits, ainsi que leur évolution dans le temps. Cette section permet de mieux comprendre les réseaux mobiles ainsi que la technologie des réseaux 4G. Nous y expliquons également le processus général de planification des réseaux.

1.1.1 Les réseaux mobiles

Un réseau informatique est un ensemble d'équipements reliés entre eux dans le but de communiquer [11]. Ces liens peuvent être matériels (câbles) ou immatériels (faisceaux hertziens). On distingue alors les réseaux câblés et les réseaux sans fil. La méthode utilisée pour relier entre eux les divers équipements d'un réseau constitue la topologie du réseau. Il existe six types de topologies applicables à un réseau. Il s'agit des topologies en bus, en arbre, en étoile (simple, multiple ou mixte), en anneau (simple ou multiple), de la topologie complète et de la topologie mixte qui constitue une hybridation des autres topologies. La Figure 1.1 montre des réseaux utilisant chacun l'une de ces topologies. Le problème consistant à déterminer la topologie à utiliser dans un réseau donné selon certains critères prédéfinis est connu sous le nom de conception topologique [111].

Avec l'accroissement et l'amélioration des moyens de déplacement, les utilisateurs des réseaux informatiques sont de plus en plus mobiles. Ils éprouvent aussi le besoin d'accéder aux services auxquels ils ont souscrit, quelque soit l'endroit où ils se trouvent. Cette situation a entraîné le développement des réseaux mobiles. Trois types de mobilités sont donc apparus,

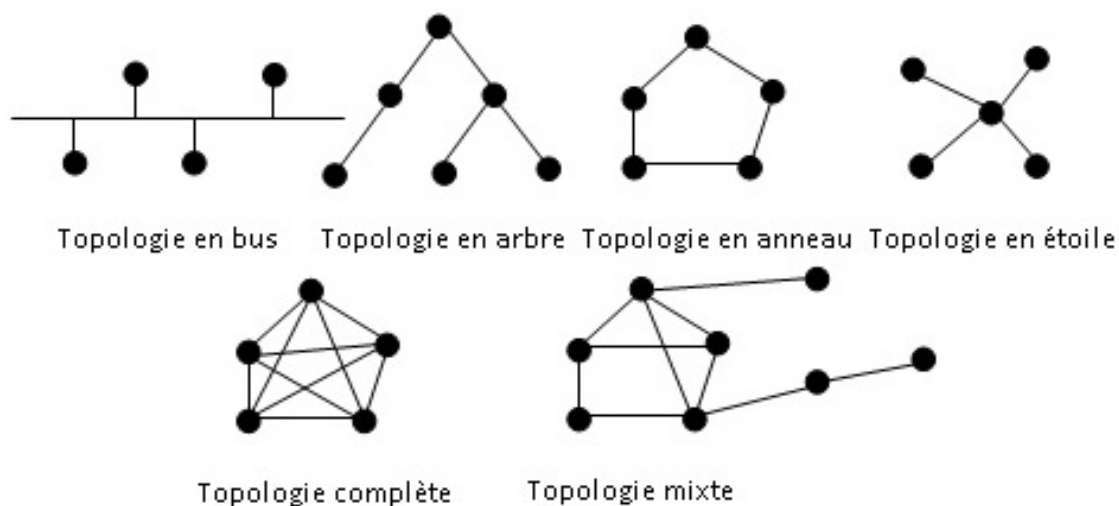


Figure 1.1 Types de topologies

à savoir, la mobilité terminale, la mobilité personnelle et la portabilité des services [110]. La mobilité terminale consiste à localiser et à identifier un terminal mobile quelque soit l'endroit où il se trouve, afin de lui permettre d'accéder aux services de réseau. La mobilité personnelle permet l'identification d'un abonné grâce à un numéro d'identification personnel qui lui permet, à partir de n'importe quel terminal, d'accéder à ses services. La portabilité des services fait référence au concept de réseau intelligent ; elle implique la capacité du réseau à identifier les usagers en mouvement et à leur fournir les services auxquels ils sont souscrits, y compris l'émission et la réception d'appels.

Quelques concepts de base des réseaux mobiles

Le trafic dans un réseau est l'ensemble des données circulant sur le réseau à un instant donné. Lorsque la circulation des données se fait de l'utilisateur vers le réseau, on parle de trafic ascendant. Dans le cas contraire, le trafic est dit descendant. La majorité du trafic de données dans les réseaux se fait dans la direction descendante, le trafic ascendant se résument, la plupart du temps à la signalisation et aux requêtes envoyées au serveur par l'utilisateur. Cependant, il peut y avoir des cas où le trafic ascendant est important, dans le cas d'un téléversement de fichiers par exemple.

La performabilité d'un réseau est une mesure conjointe de sa performance et de sa fiabilité réseau [39]. La fiabilité est la 'probabilité pour qu'une entité puisse accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné' [79]. Dans le cas d'un réseau, on peut donc définir la fiabilité comme étant une mesure de la confiance que l'on peut raisonnablement placer dans le service fourni par ce réseau. La fiabilité pourrait être mesurée, par exemple, par le temps moyen entre deux pannes (MTBF). On pourrait aussi imposer au réseau de survivre à la défaillance d'un équipement ou d'un lien, ce qui implique le principe de survivabilité du réseau. La performance d'un réseau est l'aptitude du réseau ou d'un élément du réseau à 'assurer les fonctions liées à des communications entre usagers' [79]. Elle peut être mesurée, par exemple, par le délai moyen des paquets dans le réseau, le taux moyen de perte de paquets ou la variation moyenne de délai des paquets. La performabilité représente donc une mesure de la performance moyenne du réseau en fonction de sa fiabilité.

La section qui suit présente l'architecture générale des réseaux mobiles.

Architecture des réseaux mobiles

Les réseaux mobiles couvrent généralement une grande zone divisée en plusieurs régions géographiquement limitées appelées cellules. La forme et la taille des cellules dépendent de plusieurs facteurs. La morphologie de la région couverte (plaine, collines, zone rurale, im-

meubles, etc.) est un facteur important en ce sens que les obstacles sur le chemin des faisceaux hertziens diminuent leur portée. Chaque cellule est couverte par une station de base (BS) comprenant une antenne qui assure la transmission radio et la signalisation à l'intérieur de la cellule. La hauteur et le type de l'antenne utilisée comptent aussi car plus haute est l'antenne, plus grande sera l'étendue de la zone couverte [110]. Il faudra également faire attention à l'azimut de l'antenne afin de s'assurer qu'elle couvre aussi la région toute proche d'elle. Lorsque l'antenne est omnidirectionnelle, la forme de la cellule est théoriquement circulaire. Ce cercle est toutefois déformé par les obstacles se trouvant sur le chemin du signal. Une antenne directionnelle couvre seulement un certain angle dans la direction dans laquelle elle est orientée. Le choix de l'antenne dépend donc de l'usage auquel elle est destinée. En général, les cellules se chevauchent partiellement entre elles afin d'assurer une couverture complète de la zone géographique désignée. La taille de la cellule dépend aussi de la densité de la région. En effet, plus le nombre d'abonnés dans une région est élevée, plus petite est la taille de la cellule. Cela est dû au fait que les antennes ont une capacité limitée. Ainsi, pour garantir une bande passante minimale à chaque abonné, on ne peut autoriser qu'un nombre limité d'abonnés par antenne.

L'architecture de base des réseaux mobiles est composée d'une partie fixe et d'une partie mobile. La partie mobile est constituée essentiellement des usagers mobiles (UM). Dans la partie fixe, on retrouve le réseau d'accès composé des stations de base et de leurs contrôleurs qui constituent des passerelles vers le réseau cœur, et le réseau cœur composé de commutateurs et/ou de routeurs. Le réseau d'accès sert d'interface entre les utilisateurs mobiles et le réseau cœur. Le réseau cœur, quant à lui, assure l'interconnexion avec le réseau d'accès et d'autres réseaux cœurs si nécessaire. Lorsque la zone à couvrir est vaste ou que le nombre d'équipements dans le réseau est élevé, un réseau de transport sert d'interface entre le réseau d'accès et le réseau cœur.

L'interconnexion des stations de base aux contrôleurs est effectuée suivant certains critères, et est appelée planification du réseau d'accès tandis que celle des contrôleurs aux commutateurs et des commutateurs entre eux est nommée planification du réseau cœur. Le réseau cœur intègre aussi des bases de données de localisations à savoir une base de données nominale (HLR) et une base de données visiteurs (VLR) pour chaque commutateur. Le HLR est une base de données statique qui gère les abonnés rattachés au commutateur alors que le VLR sert à localiser les abonnés en transit dans la zone contrôlée par le commutateur et est donc dynamique [110].

La Figure 1.2 illustre l'architecture générale simplifiée des réseaux mobiles.

Dans les réseaux GSM (Global System for Mobile Communications), par exemple, les stations de base (BS) sont reliées à des contrôleurs de station de base (BSC) qui gèrent les

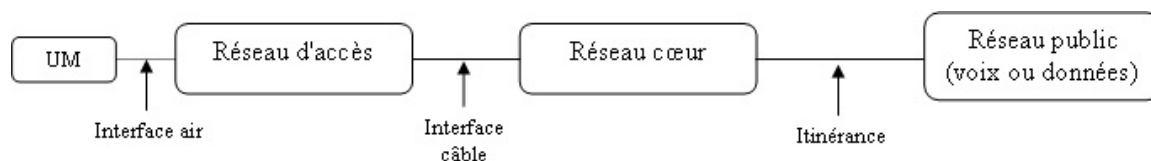


Figure 1.2 Architecture générale simplifiée des réseaux mobiles

ressources radio ou les bandes passantes des BS qui leur sont associées. L'ensemble des BS et des BSC constituent le réseau d'accès, encore appelé sous-système radio (BSS), qui sert d'interface entre les utilisateurs (mobiles) et le réseau (fixe). Le sous-système réseau (NSS) ou réseau cœur est composé de commutateurs appelés MSC (Mobile Switching Center) qui interconnectent les BSC entre elles et avec d'autres éléments fixes du réseau. La Figure 1.3 montre l'architecture des réseaux GSM.

Dans les réseaux UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), les stations de base, appelées nœuds B (node for broadband access), sont reliées à des contrôleurs RNC (Radio Network Controller) qui gèrent les ressources radio des nœuds B qui leur sont associés. Les RNC assurent aussi l'acheminement du trafic du réseau d'accès au réseau cœur. L'ensemble des nœuds B et des RNC auquel ils sont reliés forment le sous-système radio ou RNS (Radio Network Subsystem). Le réseau cœur est composé de deux types de commutateurs à savoir, le MSC utilisé pour la transmission de circuits (voix) et le SGSN (Serving GPRS Support Node) pour la transmission des paquets (données). Le MSC et le SGSN sont respectivement reliés aux passerelles GMSC (Gateway MSC) qui assure la liaison avec le RTPC (Réseau Téléphonique Public Commuté) et le GGSN (Gateway GPRS Support Node) qui le relie au PDN (Public Data Network) ou réseau public de transmission de données. La Figure 1.4

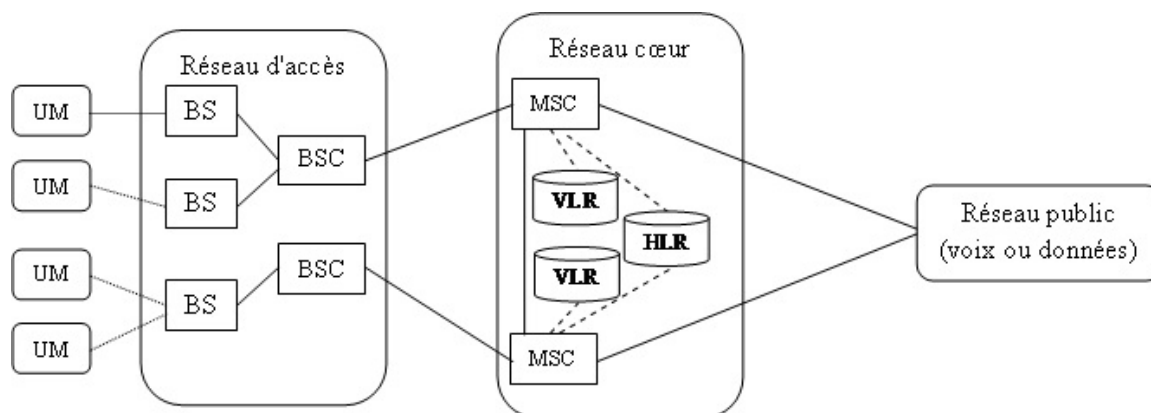


Figure 1.3 Architecture des réseaux GSM

présente l'architecture des réseaux UMTS.

L'évolution des réseaux mobiles est présentée dans la section suivante.

Évolution des réseaux mobiles

Les réseaux mobiles ont beaucoup évolué depuis leur apparition dans les années 1970 à nos jours. Cette évolution, de la première à la quatrième génération des réseaux cellulaires, est illustrée à la Figure 1.5.

La première génération des réseaux cellulaires (1G) est apparue vers le début des années 1970 avec un mode de transmission analogique et des appareils de taille relativement volumineuse. Les standards les plus utilisés à l'époque étaient l'AMPS (Advanced Mobile Phone System), le TACS (Total Access Communication System) et le NMT (Nordic Mobile Telephone).

Le mode de transmission numérique est apparu au début des années 90 avec la deuxième génération des réseaux mobiles (2G). Il devient ainsi possible de transmettre, en plus de la voix, des données numériques de faible volume telles que les SMS (Short Message Service) et les MMS (Multimedia Message Service). Les standards 2G les plus utilisés sont le GSM, l'IS-95 (Interim Standard-95) qui est basé sur le codage CDMA (Code Division Multiple Access) et l'IS-136 (Interim Standard-136) qui se base sur le codage TDMA (Time Division Multiple Access). Le GSM est cependant le standard ayant connu la plus grande percée avec l'utilisation de la bande des 1900MHz en Amérique du Nord et au Japon et de la bande des 900MHz et 1800Mhz sur les autres continents. C'est d'ailleurs sur ce standard que se basent les réseaux GPRS (General Packet Radio Service : 2.5G) et EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution : 2.75G) qui sont venus corriger les faibles débits du GSM (environ 9,6 kbps). Le

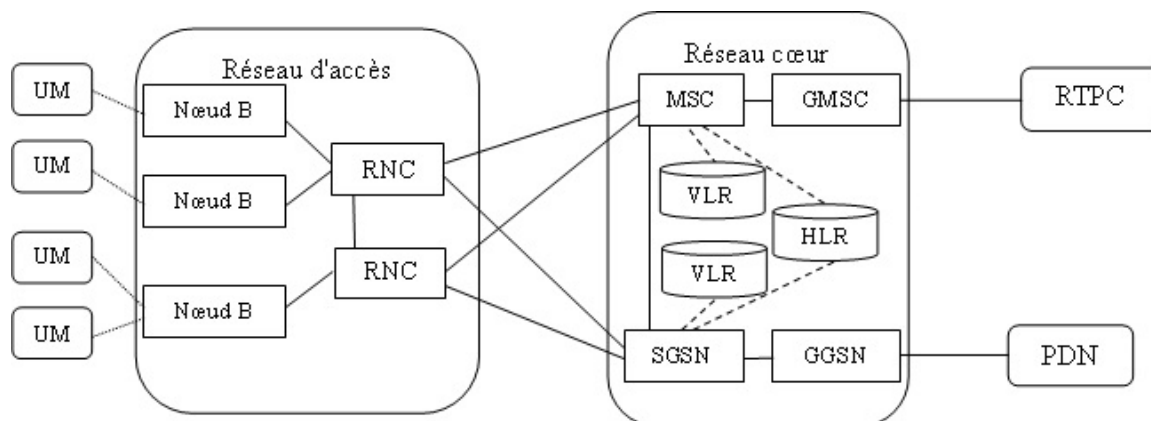


Figure 1.4 Architecture des réseaux UMTS

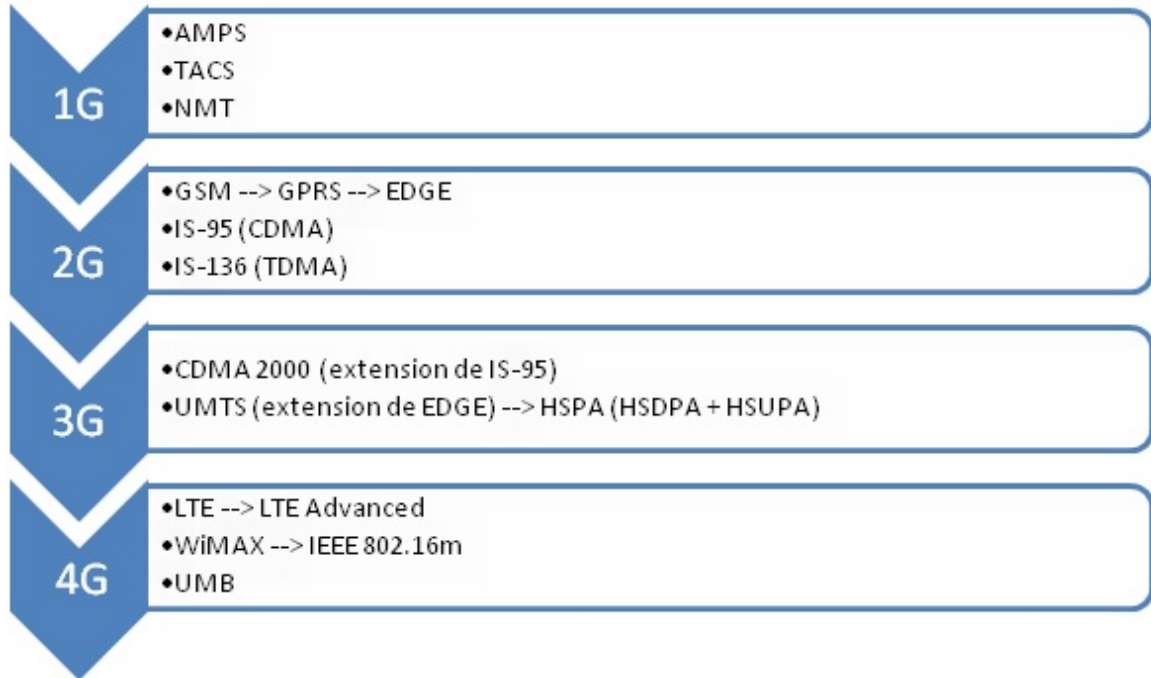


Figure 1.5 Évolution des réseaux cellulaires

GPRS propose un débit théorique de 114 kbps permettant ainsi la transmission simultanée de la voix et de données. L'utilisation des applications multimédias est rendue possible par EDGE qui offre des débits allant jusqu'à 384 kbps.

La troisième génération des réseaux mobiles (3G) est apparue pour établir des normes internationales afin de garantir une compatibilité mondiale, une mobilité globale, la compatibilité avec les réseaux 2G et des débits de 2 Mbps pour une mobilité faible et allant jusqu'à 144 kbps pour une mobilité forte. Les principales normes 3G sont le CDMA2000 et l'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). La norme CDMA2000 est une amélioration de la norme IS-95 et n'est pas compatible avec le GSM. D'autres améliorations ont été apportées plus tard en terme de débit à l'UMTS donnant lieu aux normes HSDPA (High Speed Downlink Packet Access : 3.5G) qui offre un débit théorique maximum de 14.4 Mbps en ligne descendante et HSUPA (High Speed Uplink Packet Access : 3.75G) offrant un débit théorique maximum en ligne ascendante de 5.76 Mbps [78]. Ces deux normes sont regroupées sous le nom de HSPA (High Speed Packet Access).

La quatrième génération (4G) des réseaux sans fil est caractérisée par une mobilité accrue, des services diversifiés et des débits plus élevés. Elle projette des débits théoriques de 100 Mbps pour une mobilité forte et jusqu'à 1 Gbps pour une faible mobilité [62]. Les principales normes 4G sont le LTE (Long Term Evolution) et le WiMAX. Le LTE a été développé par le groupe 3GPP (Third Generation Partnership Project) et constitue une extension du HSPA.

La première version de LTE était conçue pour offrir un débit théorique maximum de 100 Mbps en ligne descendante et de 50 Mbps en ligne ascendante pour une bande passante maximale de 20 MHz [143]. Des améliorations sont en cours donnant ainsi la norme LTE-Advanced qui prévoit atteindre un débit maximum de 1 Gbps en ligne descendante et la moitié en ligne ascendante [1]. La norme WiMAX, quant à elle, est développée par un nouveau groupe, le WiMAX forum. La technologie WiMAX est généralement utilisée pour le déploiement des réseaux à grande échelle (WAN) en utilisant un nombre réduit de stations de base (BS), en raison de sa longue portée. Basée sur la norme IEEE 802.16, la technologie WiMAX était, à son origine, conçue pour une utilisation dans les réseaux fixes à large bande en offrant une bande passante allant de 10 à 66 GHz avec une portée théorique de 50 km. La technologie WiMAX s'est beaucoup améliorée depuis la sortie de la première version de la norme IEEE 802.16 en décembre 2001 [75]. La mobilité a été introduite en 2005 [76], la rendant ainsi compétitive par rapport aux réseaux 3G avant son évolution vers la norme IEEE 802.16m [4] qui est connue comme étant la norme WiMAX 4G. Une autre norme moins connue, l'UMB (Ultra Mobile Broadband) a été développée par le groupe 3GPP2 pour la quatrième génération. Ces trois normes utilisent la même interface air, l'OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access). Leur objectif à long terme serait de converger pour former la norme 4G IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications - Advanced) [57] dont les spécifications sont données dans le Tableau 1.1.

La norme UMB étant très peu connue, nous nous intéressons dans la suite seulement aux normes WiMAX et LTE.

La technologie dans les réseaux mobiles 4G

Les réseaux mobiles 4G utilisent les technologies MIMO (Multiple Input Multiple Output), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), AAS (Adaptive Antenna Systems), AMS (Adaptive Modulation Schemes), AES (Advanced Encryption Standard) et IP (Internet Protocol). Ces technologies leur permettent d'atteindre des débits de plusieurs dizaines de Mbps et introduisent les principales fonctionnalités nécessaires pour permettre la mobilité à de très grandes vitesses [154].

La technologie MIMO permet de transporter plusieurs flux en parallèle sur des antennes différentes en utilisant la même fréquence. Le principe de cette technologie est l'utilisation de plusieurs antennes, aussi bien en émission qu'en réception. Selon la configuration utilisée, elle permet d'améliorer la qualité ou le débit de la transmission. En réception, le même signal est émis sur chacune des antennes ; le récepteur analyse les données reçues et retient le meilleur signal. Lorsque la technologie MIMO est utilisée en émission, différents signaux sont transmis par chacune des antennes afin d'augmenter le débit de la transmission. Il faut noter que la

Tableau 1.1 Spécifications requises par l'IMT-Advanced pour les réseaux 4G

Spécifications		IMT-Advanced [80]	
		Liaison descendante	Liaison ascendante
Efficacité spectrale par secteur (bits/s/Hz/secteur)	Intérieur	3	2.25
	Microcellule	2.6	1.80
	Couverture urbaine de base	2.2	1.4
	Grande vitesse	1.1	0.7
Efficacité spectrale aux limites de la cellule (bits/s/Hz)	Intérieur	0.1	0.07
	Microcellule	0.075	0.05
	Couverture urbaine de base	0.06	0.03
	Grande vitesse	0.04	0.015
Efficacité spectrale maximale (bits/s/Hz)		15	6.75
Mobilité (bits/s/Hz)	Intérieur :		1.0
	0 à 10 Km/h		
	Microcellule :		0.75
	10 à 30 Km/h		
	Couverture urbaine de base :		0.55
	30 à 120 Km/h		
Grande vitesse :		0.25	
120 à 350 Km/h			
Largeur de bande (MHz)		Jusqu'à 40 MHz	
Latence (ms)	Plan de contrôle	100 ms	
	Plan utilisateur	10 ms	
Temps d'interruption pour la relève (ms)	Intra-fréquence	27.5 ms	
	Inter-fréquence (Intra-bande)	40 ms	
	Inter-fréquence (Inter-bande)	60 ms	
Capacité VoIP (utilisateurs actifs/secteur/MHz)	Intérieur	50	
	Microcellule	40	
	Couverture urbaine de base	40	
	Grande vitesse	30	

technologie MIMO est plus efficace dans les environnements comportant des obstacles, ce qui lui permet de bénéficier des propriétés du multi-chemin [115].

En combinant MIMO avec la technologie OFDM, on peut tirer partie des deux aspects de la technologie MIMO [135]. En effet, le principe de l'OFDM consiste à diviser le signal numérique que l'on veut transmettre sur un grand nombre de porteuses. Afin d'utiliser des fréquences très proches pour les porteuses et ainsi transmettre le maximum d'informations

sur une portion de fréquences données, l'OFDM utilise des porteuses orthogonales entre elles, ce qui réduit les interférences. Un autre avantage de l'OFDM vient du fait que toutes les opérations sont faites dans le domaine fréquentiel. De ce fait, lorsqu'un signal OFDM est envoyé dans le canal, il est atténué et déphasé comme s'il passait dans un filtre. Au niveau du récepteur, le signal reçu est simplement le signal émis multiplié par un coefficient complexe. De cette façon, il est aisé de retrouver le signal envoyé. La technologie MIMO peut ainsi utiliser plusieurs antennes pour transmettre, sur la même fréquence, différentes parties du signal [3] afin d'améliorer le débit. Dans le même temps, chaque antenne peut utiliser des porteuses différentes pour transmettre la même information dans le but d'améliorer la qualité.

Pour contrer l'inconvénient de l'OFDM qui présente un ratio très élevé entre la puissance maximale et la puissance moyenne du signal, les réseaux LTE utilisent en direction ascendante une version pré-codée de l'OFDM nommée Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) [10]. Cela permet d'améliorer la couverture, de réduire la consommation d'énergie dans l'amplificateur de puissance et d'offrir de meilleures performances en bordure de cellule. En associant à l'OFDM un découpage temporel afin d'allouer la bande de fréquences utilisée à des stations différentes dans le temps, on obtient la technique d'accès OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access). Le WiMAX mobile, quant à lui, utilise une version améliorée de l'OFDMA qui permet de diviser la bande de fréquences en plusieurs sous-bandes et d'allouer chaque sous-bande à des stations différentes au fil du temps, améliorant ainsi l'utilisation des canaux ; c'est la technique d'accès SOFDMA (Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) [115]. Le SOFDMA permet d'allouer des bandes passantes de largeur variable aux différents canaux.

La modulation adaptative (AMS) consiste à faire varier dynamiquement certains paramètres du réseau dans le but d'atteindre un débit de transmission maximal tout en assurant une certaine performance de base. Divers paramètres sont ainsi sélectionnés selon les conditions du canal de transmission. Ces paramètres permettent une meilleure efficacité spectrale lorsque les conditions du canal sont bonnes mais, quand les conditions se détériorent, l'efficacité spectrale est aussi diminuée. Dans les réseaux WiMAX, le type de modulation et le codage utilisés sont sélectionnés automatiquement en fonction du rapport du signal par rapport au bruit et aux interférences (SINR) perçus [50].

Les antennes adaptatives (AAS) utilisent un algorithme sophistiqué pour déterminer à chaque instant les signaux utiles ainsi que les interférences et calculer la direction d'où proviennent ces signaux. Cela leur permet non seulement de maximiser la qualité des signaux reçus, mais aussi de localiser l'émetteur et de retransmettre dans sa direction afin de minimiser le mieux possible les interférences [18].

L'Advanced Encryption Standard (AES) [101], qui implémente l'algorithme de chiffrement

Rijndael, est un algorithme de chiffrement par bloc qui a été élaboré à la suite d'un appel pour un système de chiffrement sécurisé qui a été lancé par l'Institut national américain des normes et de la technologie (United States National Institute of Standards and Technology) en 1997 afin de remplacer le DES (Data Encryption Standard) qui était devenu vulnérable aux attaques par force brute. Parmi plusieurs propositions, l'algorithme de chiffrement Rijndael a été choisi et a été rebaptisé AES en 2001. La proposition de Rijndael définit un algorithme de chiffrement dans lequel la longueur de bloc et de la longueur de la clé peut être spécifié de manière indépendante à 128, 192 ou 256 bits [44]. L'AES utilise les trois mêmes alternatives pour la taille de la clé, mais limite la longueur de bloc à 128 bits. L'algorithme consiste en un ensemble d'étapes répétées un certain nombre de fois (rondes). Le nombre de rondes dépend de la taille de la clef et de la taille des blocs de données. Le nombre de rondes dans Rijndael est 10 pour une la clef de longueur 128 bits, 12 pour une clef de longueur 192 bits, et 14 pour une clef de longueur 256 bits. En considérant une séquence binaire X_1, X_2, \dots, X_n de blocs en clair, chaque bloc X_i (i de 1 à n) est chiffré avec la même clef secrète k afin de produire les blocs chiffrés Y_1, Y_2, \dots, Y_n , avec $Y_i = E_k(X_i)$ [101]. L'AES a été choisi entre autres pour sa résistance contre toutes les attaques connues, la vitesse et la compacité du code sur un large éventail de plates-formes et sa simplicité de conception.

Datta et Kaushal [48] effectuent une revue de littérature sur l'architecture des réseaux LTE. Les auteurs identifient la qualité de service comme un enjeu important de recherche.

L'architecture des réseaux 4G

Les réseaux 4G présentent la même architecture générale que les autres types de réseaux mobiles. On peut distinguer trois parties à savoir les terminaux des utilisateurs, le réseau d'accès et le réseau cœur. Les Figures 1.6 et 1.7 présentent respectivement l'architecture d'un réseau WiMAX et l'architecture d'un réseau LTE.

Les terminaux des utilisateurs sont les appareils utilisés par les clients. Ils comprennent les appareils fixes, mobiles et portables et permettent aux utilisateurs d'accéder aux services auxquels ils ont souscrit. Ces terminaux peuvent être tout appareil disposant du protocole IP tel qu'un ordinateur, un téléphone intelligent ou une télévision IP.

Le réseau d'accès WiMAX est appelé ASN (Access Service Network). Il est constitué de stations de base (BS) et de passerelles (ASN-GW), est responsable de la gestion des accès des terminaux mobiles, de la gestion des ressources radio, de la mobilité, de la qualité de service, de l'interopérabilité avec d'autres ASN et de la sécurité. Il joue aussi le rôle d'interface entre les terminaux mobiles et le cœur du réseau. En ce qui concerne les réseaux LTE, on retrouve à ce niveau les eNodeB responsables de la communication radio avec les terminaux mobiles et de l'acheminement du trafic vers le réseau cœur.

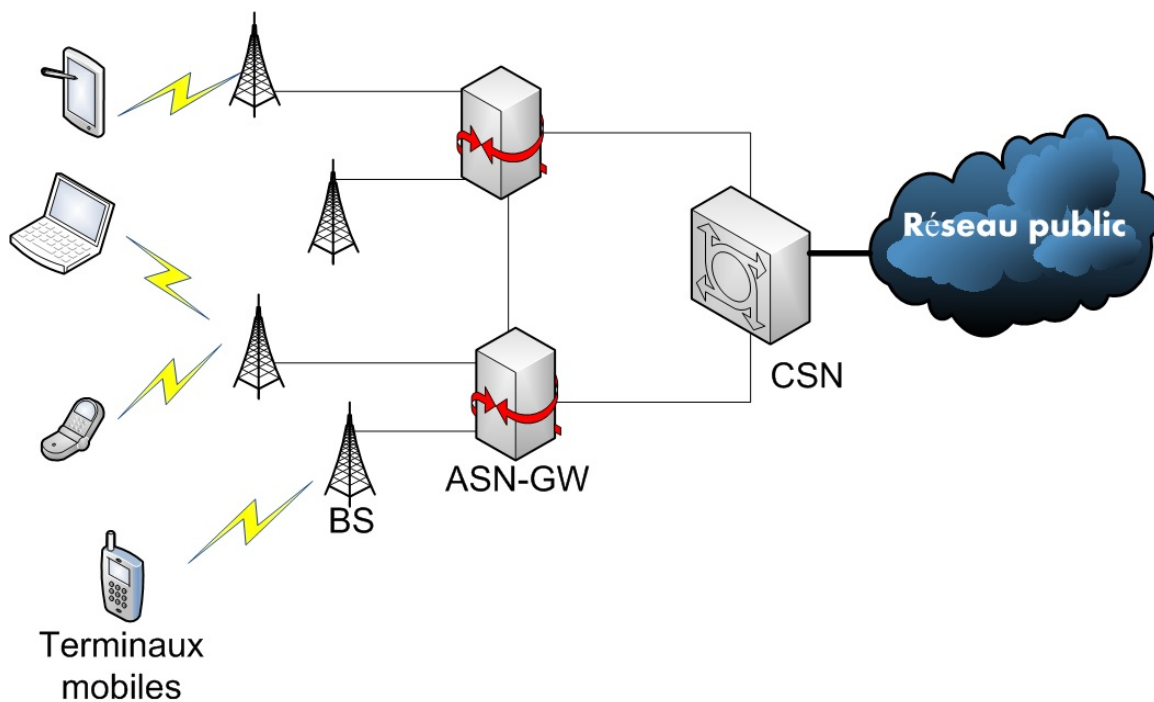


Figure 1.6 Architecture des réseaux WiMAX

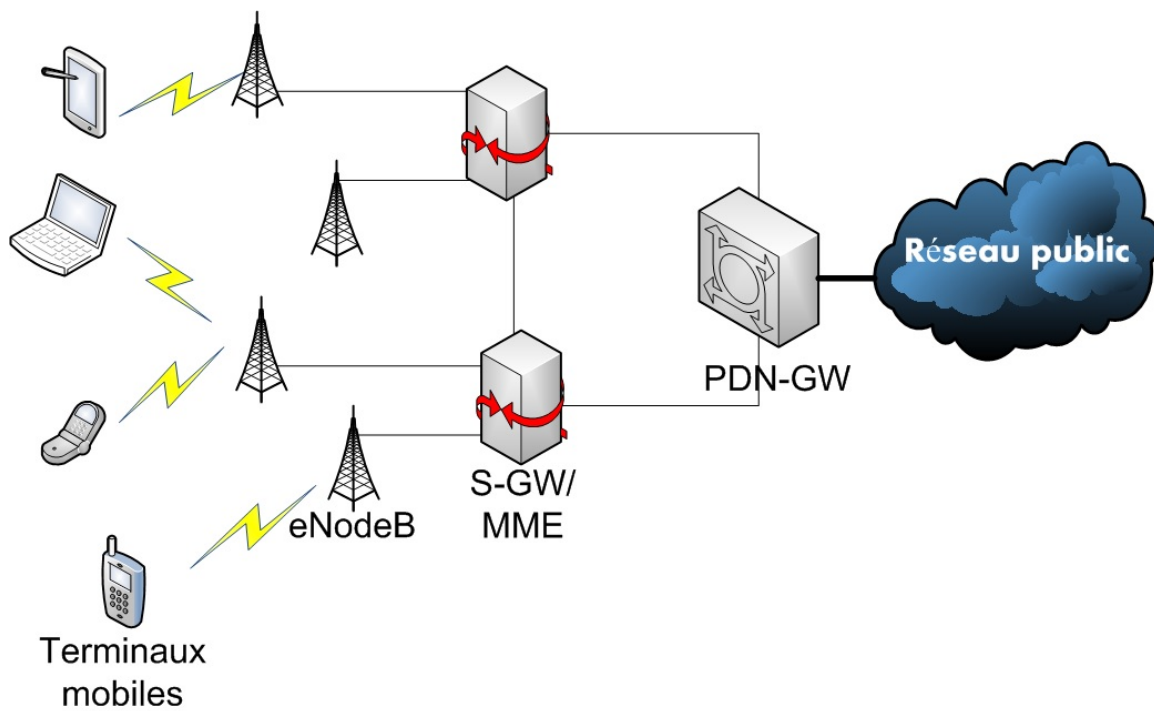


Figure 1.7 Architecture des réseaux LTE

Le CSN (Core Service Network), considéré comme le cœur des réseaux WiMAX, remplit un ensemble de fonctions dans le but de fournir aux abonnés des services de connectivité. Il effectue la gestion des abonnés et fournit des services de transport, de commutation, d'authentification, de facturation, etc. Le CSN est chargé de fournir l'itinérance entre les fournisseurs de services réseau et est responsable de la sécurité des utilisateurs et de la qualité de service. La gestion des adresses IP est également gérée par le CSN. Il se charge aussi de la connectivité aux réseaux de téléphonie publique et à Internet. Le réseau cœur LTE est appelé SAE (System Architecture Evolution). Il comprend les passerelles S-GW (Serving Gateway) et le PDN-GW (Packet Data Network Gateway). Le S-GW s'occupe de la gestion de la mobilité à travers le MME (Mobility Management Entity) et du routage des paquets sortants vers le PDN-GW. Le PDN-GW est responsable de la tarification ainsi que de l'interfaçage du réseau avec les réseaux externes.

1.1.2 Processus de planification des réseaux

Le processus de planification des réseaux mobiles s'effectue de façon itérative et comprend plusieurs phases. Ce processus est représenté à la Figure 1.8.

Une première phase consiste en la collecte de données relatives au coût des équipements, de leur installation et surtout de leur maintenance. Cette phase permet également d'évaluer la demande du trafic qui sera généré dans le réseau. Le choix de la technologie utilisée est effectué à cette étape, ainsi que la définition des contraintes d'utilisation qui doivent être prises en compte afin d'assurer une meilleure performance du réseau (fiabilité, délais de transmission, débit, etc.).

Ces données servent d'entrée pour la phase de conception (ou d'expansion) qui consiste en la détermination de la topologie du réseau, la sélection des liens et des nœuds nécessaires, etc. Il faut aussi paramétrer, localiser et positionner les antennes afin d'assurer une meilleure répartition des signaux à émettre. Par la suite, il faut tenir compte du modèle et de la quantité de trafic circulant dans le réseau pour faire le dimensionnement des liens. Dans le cas des réseaux mobiles, la quantité de trafic entre les différents nœuds n'est pas connue à l'avance et il n'existe pas de formule mathématique pour la calculer. Il est donc souvent nécessaire d'utiliser un simulateur de trafic afin d'estimer le trafic dans le réseau.

La phase d'analyse de performance permet de vérifier si le réseau obtenu respecte les contraintes préétablies. Dans le cas contraire, les paramètres sont resserrés et on retourne à la phase de conception puis à l'analyse de performance et ceci, jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante.

La planification des réseaux nécessite la prise en compte de certains facteurs fondamentaux. Les objectifs doivent être bien identifiés et clairement définis. La zone de couverture, la

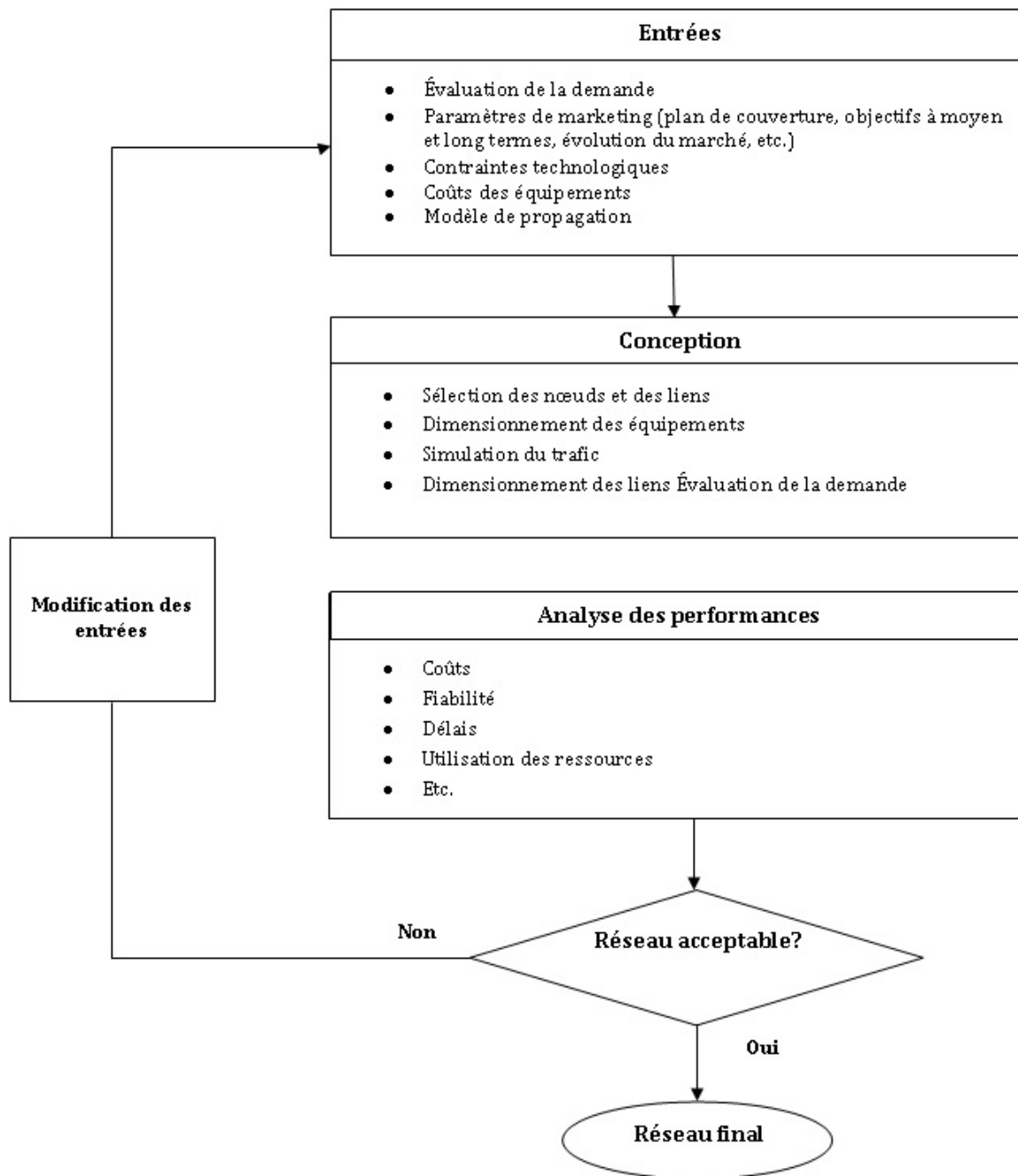


Figure 1.8 Processus de planification des réseaux [112]

distribution du trafic, le nombre estimé d'utilisateurs, la pénétration et le taux de croissance de la demande sont autant d'éléments à considérer.

Sur un plan plus technique, il faut tenir compte du choix des antennes, de leur orientation et de leur puissance, de la bande de fréquence utilisée ainsi que des canaux disponibles pour la transmission et de la configuration de la zone à couvrir (existence ou pas d'obstacles).

L'atténuation du signal dépend, en effet, non seulement de la distance entre la station émettrice et le récepteur, mais aussi de la bande de fréquence utilisée, des effets environnementaux et de la morphologie de la zone de couverture. La puissance et le type des équipements des utilisateurs devraient aussi être pris en compte pour le calcul de l'atténuation en sens inverse, i.e., de ces équipements vers la station de base. Selon la capacité des équipements utilisés, le rapport minimum signal sur bruit (SNR) pour la réutilisation des canaux doit être défini.

1.2 Éléments de la problématique

La planification des réseaux de télécommunications est un problème complexe à résoudre et se fait en plusieurs étapes. La phase de localisation des nœuds consiste à sélectionner les emplacements pour installer les divers nœuds du réseau. Il est théoriquement possible de positionner les nœuds à n'importe quel endroit mais, dans la pratique, les emplacements potentiels sont connus à l'avance. Il s'agit, pour la plupart, de sites ou d'immeubles appartenant à l'opérateur. Le problème consiste alors à déterminer le type et la configuration de l'équipement à disposer à chaque emplacement pour minimiser les coûts tout en respectant les contraintes du réseau. Il faut aussi déterminer la topologie qui correspond le mieux au réseau et déterminer le type et le nombre des liens nécessaires pour satisfaire la demande sans cesse en augmentation. Pour cela, il faut connaître le trafic entre chaque couple de nœuds dans le réseau. Dans les réseaux utilisant, par exemple, les protocoles de routage à vecteur de distance comme OSPF (Open Shortest Path First), l'algorithme du plus court chemin est utilisé pour connaître le chemin emprunté par le trafic. Dans le cas des réseaux mobiles 4G, le modèle de trafic n'est pas précisément défini ; l'utilisation d'un simulateur de trafic est nécessaire afin de connaître la quantité de données devant transiter sur chaque lien de réseau selon son état.

La méthode la plus couramment utilisée dans la littérature pour contourner la difficulté du problème est de le subdiviser en plusieurs sous-problèmes traités séparément. Les solutions partielles obtenues sont ensuite intégrées pour constituer une solution globale au problème. Ainsi, certains chercheurs ont traité le problème de planification des cellules. Dutta et Hsu [54] se sont penchés sur le problème de localisation des stations de bases et sur celui de planification des canaux de fréquence. Thiel *et al.* [141] ont conçu un système automatique de sélection de sites pour les réseaux UMTS. Amzallag *et al.* [8] ont recensé plusieurs travaux sur la planification des cellules dans les réseaux 3G et 4G. Diverses formulations du problème ont été répertoriées par les auteurs selon les objectifs fixés par le planificateur. La plupart de ces formulations sont NP-difficiles. D'autres chercheurs ont préféré s'attaquer à la planification du réseau d'accès. Szlovencsak *et al.* [136] se sont ainsi intéressés aux réseaux d'accès UMTS.

Wu et Pierre [151] ont traité les réseaux d'accès 3G dans un cadre plus général. Harmatos [69] s'est plutôt intéressé à la planification du réseau cœur UMTS.

Il existe cependant diverses interactions entre ces différents sous-problèmes, qui ne sont pas prises en compte lorsqu'ils sont traités séparément. St-Hilaire *et al.* [133] proposent un modèle global pour la résolution du problème de planification des réseaux mobiles de la troisième génération. Ce modèle permet de prendre en compte tous les aspects du problème sans le décomposer. Bien que ce modèle permette d'obtenir d'assez bons résultats, il présente certaines limitations. En effet, il ne permet d'optimiser le trafic que dans une seule direction (ascendante). De plus, il n'inclut pas les notions de qualité de service et de survivabilité du réseau.

Trois approches sont généralement utilisées pour résoudre le problème de planification des réseaux de télécommunications. Autrefois, la majorité des concepteurs planifiaient leur réseau manuellement. Bien que cette approche ait l'avantage d'être flexible, elle requiert beaucoup de travail pour les réseaux de grandes tailles et il devient extrêmement difficile de considérer toutes les alternatives possibles. Pour remédier à cette difficulté, des méthodes automatisées de planification sont développées. Parmi ces méthodes, on distingue l'approche optimale et l'approche heuristique. L'approche optimale consiste à développer des méthodes exactes qui énumèrent, de façon explicite ou non, toutes les solutions possibles du problème et les comparent entre elles. Cette approche procure toujours la solution optimale mais elle est souvent très gourmande en temps de calcul, surtout dans le cas des réseaux de grande taille. La programmation linéaire en nombres entiers et la programmation par contraintes sont parmi les méthodes exactes les plus utilisées. L'approche heuristique, quant à elle, permet parfois d'obtenir, par des méthodes approchées, une 'bonne' solution plus rapidement que les méthodes exactes. Cette approche est essentiellement constituée des méthodes métaheuristiques.

Une métaheuristique est un processus de génération itérative qui permet de guider une heuristique subordonnée par la combinaison de divers concepts tels que l'exploitation et l'exploration de l'espace de recherche, ainsi que des stratégies d'apprentissage qui sont utilisées pour structurer efficacement l'information afin de déterminer des solutions d'excellente qualité [104]. Les métaheuristiques sont, en général, non déterministes et ne donnent aucune garantie d'optimalité, mais elles peuvent faire usage de l'expérience accumulée durant la recherche pour mieux guider la suite de la procédure. On distingue les métaheuristiques à solution unique, parmi lesquelles on retrouve de nombreux algorithmes de recherche locale comme la méthode de descente, le recuit simulé et la recherche taboue, et les métaheuristiques à base de population tels que les algorithmes évolutionnaires, l'optimisation par colonie de fourmis et l'optimisation par essais particuliers.

Dans le sens où il faut minimiser le coût total du réseau tout en satisfaisant la demande de

la clientèle en termes de qualité de service et de fiabilité, le problème que nous désirons appréhender n'est pas un problème mono-objectif. Il nécessite en effet l'optimisation simultanée de plusieurs objectifs contradictoires. Les techniques d'optimisation multi-objectifs constituent alors le moyen le plus approprié pour traiter ce problème. En effet, les algorithmes d'optimisation mono-objectif ne permettent pas d'obtenir un ensemble de solutions non-dominées afin de permettre au décideur de prendre des décisions plus éclairées [158]. En contexte d'optimisation multi-objectifs, l'utilisation de métaheuristiques s'avère souvent d'une grande utilité.

Ces éléments de la problématique nous amènent à nous poser les questions suivantes :

- comment modéliser, à l'aide de formules mathématiques, les réseaux mobiles de la génération prochaine (4G) ?
- comment résoudre le problème de planification globale des réseaux 4G en prenant en compte tous les aspects du problème tout en minimisant les coûts d'installation et d'exploitation et en assurant la qualité de service requise au sein du réseau ?
- serions-nous en mesure de développer un algorithme permettant de résoudre ce problème pour obtenir des résultats satisfaisant en un temps raisonnable ?

Pour tenter de répondre à ces questions, les objectifs de recherche suivants ont été définis.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif principal de cette thèse est de concevoir un cadre de planification globale pour les réseaux mobiles de la quatrième génération (4G). L'optimisation simultanée de plusieurs composantes permettra d'assister le planificateur dans sa tâche en lui proposant plusieurs solutions parmi lesquelles il choisira celle qu'il préfère. Pour atteindre cet objectif général, des objectifs spécifiques ont été définis ci-après.

1. Concevoir un modèle mathématique global pour planifier les réseaux mobiles 4G, en optimisant le trafic dans les deux directions. Intégrer les notions de qualité de service et de survivabilité du réseau à ce modèle. Les modèles proposés dans la littérature concernent essentiellement la localisation des stations de base et la planification des canaux de fréquence. La première étape de notre travail sera donc de modéliser le problème afin de prendre en compte tous les aspects désirés.
2. Concevoir un algorithme basé sur une méthode exacte pour résoudre le problème, avec le modèle proposé, afin de comparer l'approche globale à l'approche séquentielle.
3. Concevoir un algorithme à base de métaheuristiques pour traiter des problèmes de grande taille avec le modèle global de planification.
4. Proposer une métaheuristique pour traiter le problème multi-objectifs afin de donner une meilleure marge de manœuvre au décideur.

1.4 Plan de la thèse

La suite de ce document est organisée de la manière suivante. Dans le chapitre 2, nous présentons l'état actuel de la littérature en ce qui concerne le problème de planification des réseaux 4G, ainsi que les méthodes utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Une analyse des travaux contenus dans la littérature est aussi effectuée. Le chapitre 3 décrit l'ensemble des travaux effectués dans le cadre de cette thèse.

Le chapitre 4 présente le texte intégral d'un article intitulé 'A Reliable Model for Global Planning of Mobile Networks'. Ce dernier propose un modèle de planification globale intégrant la survivabilité pour les réseaux WiMAX. Un algorithme de résolution exacte a été proposé pour le modèle. La pertinence d'un modèle global ainsi que celle de l'intégration de la survivabilité à l'étape de la planification du réseau ont été démontrées dans cet article.

Le chapitre 5 présente le texte intégral d'un article intitulé 'An Hybrid Iterated Local Search Algorithm for the Global Planning Problem of Survivable 4G Mobile Networks'. Une métaheuristique hybride a été proposée dans cet article pour résoudre le problème de planification globale des réseaux 4G. Les résultats obtenus montrent que l'algorithme proposé obtient de très bonnes solutions en un temps réduit, comparé à la méthode de résolution exacte.

Le chapitre 6 propose une métaheuristique multi-objectifs qui permet d'obtenir un ensemble de solutions mutuellement non dominées afin d'offrir plus d'options au décideur. Les solutions obtenues par l'algorithme multi-objectifs sont aussi bonnes que celles obtenues par l'algorithme mono-objectif proposé au chapitre 5.

Dans le chapitre 7, nous discutons des choix méthodologiques effectués. Le chapitre 8 vient conclure cette thèse et indique plusieurs voies de recherche.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Les travaux présentés dans la littérature sur la planification des réseaux 4G sont passés en revue dans ce chapitre. Une analyse sommaire du problème est d'abord effectuée. Les travaux de la littérature sont ensuite exposés et les méthodes utilisées sont présentées. Pour finir, une courte analyse de ces travaux est effectuée.

2.1 Analyse sommaire du problème

Les étapes de planification des réseaux 4G sont assez similaires à celle des réseaux 3G. Le problème de planification des réseaux 4G est souvent divisé en plusieurs sous-problèmes qui sont traités séparément. St-Hilaire *et al.* [133] ont cependant démontré qu'il existe un intérêt à effectuer une planification globale, en intégrant tous les sous-problèmes dans un même modèle. Toutefois, chaque sous-problème est NP-difficile [133] et cette intégration donne lieu à un problème encore plus complexe que chacun des sous-problèmes pris séparément.

Un autre aspect particulier aux réseaux 4G est la notion de qualité de service (QoS). Les vitesses de transmission élevées permettent l'utilisation des applications en temps réel, ce qui pourrait entraîner une surcharge importante sur le réseau. La QoS étant un aspect important des réseaux 4G, il importe d'en tenir compte dans la planification. La QoS est une notion subjective dont la mesure dépend du service concerné. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons à la performance du réseau (en termes de puissance du signal reçu, de débit et de délai) et à sa fiabilité (en termes de survivabilité du réseau en cas de panne). L'optimisation du trafic, aussi bien en direction ascendante que descendante pourrait permettre de réduire les délais afin d'améliorer la QoS. La prise en compte des scénarios de panne permet aussi d'assurer la survivabilité du réseau.

Le problème de planification globale des réseaux 4G consiste donc en l'optimisation de plusieurs objectifs conflictuels, en l'occurrence le coût total d'installation, de fonctionnement et de maintenance du réseau versus la qualité du service offert. L'optimisation multi-objectifs a été conçue pour aborder ce type de problèmes. Contrairement à l'optimisation mono-objectif qui conduit généralement à une solution unique qui est supposée être meilleure que toutes les autres, les méthodes d'optimisation multi-objectifs présentent un ensemble de solutions dites de compromis. Ces techniques ont l'avantage d'être plus flexibles et permettent au décideur de considérer un plus large éventail d'options avant d'en choisir une selon ses préférences.

2.2 Les étapes de la planification des réseaux mobiles

Dans les réseaux mobiles, l'emplacement des usagers n'est pas fixe et n'est donc pas connu à l'avance. L'usage, dans la littérature, est de définir des points de test où mesurer le signal afin de simuler le trafic et de déterminer les performances du réseau [45, 133]. La zone de couverture est, le plus souvent, divisée en de petites régions et les points de test sont situés au centre de ces régions. La demande provenant de ces points de test n'est généralement pas celle d'un utilisateur unique, mais la somme de toutes les demandes provenant de cette région [8].

La première étape de la planification des réseaux mobiles est la planification du sous-système radio, encore appelée planification des cellules. Elle consiste à déterminer le nombre, le type et l'emplacement des stations de bases, tout en considérant certains critères comme le coût des équipements, la configuration de la zone de couverture et la qualité du signal obtenu. L'allocation des canaux de fréquence aux points de test est aussi effectuée à cette étape. La résolution de ce problème requiert généralement les données suivantes :

- la liste des sites potentiels pour installer les stations de bases (BS) ;
- les types de BS disponibles et leurs caractéristiques (puissance, hauteur, sectorisation, orientation, etc.) ;
- les points de test et la demande issue de chacun d'eux ;
- le modèle de propagation du signal suivant la morphologie de la zone de couverture ;
- le seuil du rapport signal sur interférences (SIR) pour la réutilisation des canaux.

Certains auteurs se sont consacrés à la planification des cellules dans les réseaux UMTS. Amaldi *et al.* [6] conçoivent un modèle dans lequel ils considèrent la qualité du signal ascendant, celui émis par l'utilisateur mobile et reçu par la BS. Ils proposent deux algorithmes gloutons aléatoires et un algorithme de recherche taboue basé sur les deux précédents algorithmes pour solutionner leur modèle. Wu et Pierre [150] se sont intéressés au même problème en considérant le signal dans la direction descendante. Le modèle proposé considère, en même temps que la localisation des stations de base (ou nœuds B), la configuration des antennes (hauteur et puissance) de ces nœuds B. Les auteurs utilisent une méthode de satisfaction de contraintes pour obtenir une solution initiale. Pour améliorer cette solution, ils utilisent trois différentes heuristiques de recherche locale (algorithme glouton, algorithme de recherche taboue et recuit simulé) qu'ils comparent entre elles. L'algorithme de recherche taboue semble donner les meilleurs résultats pour le modèle proposé. Velasco *et al.* [147] proposent une architecture de gestion et de contrôle permettant d'allouer dynamiquement des ressources au réseau afin de prendre en compte les variations de trafic. Leur architecture permet d'éviter le surdimensionnement des réseaux, ce qui réduit les coûts d'installation.

La deuxième étape de la planification, celle du réseau d'accès, consiste à déterminer le nombre, le type et l'emplacement des passerelles d'accès et à les relier aux stations de base tout en minimisant le coût total du réseau d'accès. Les emplacements des stations de base et les sites potentiels pour installer les passerelles ainsi que les types de passerelles disponibles sont considérés comme des entrées pour la résolution de ce problème. Wu et Pierre [151] ont aussi travaillé sur le problème de planification du réseau d'accès UMTS. Les auteurs proposent un modèle qui tient compte de la fréquence des relèves entre les différentes cellules. Ils utilisent une heuristique de recherche en trois phases pour traiter leur modèle. La première phase consiste à trouver une solution initiale réalisable à l'aide d'une technique de satisfaction de contraintes. Une procédure de recherche locale est ensuite appliquée à cette solution initiale dans une deuxième phase. La troisième phase sert à améliorer la solution obtenue à l'étape précédente par des méthodes courantes d'optimisation de contraintes. Balakrishnan *et al.* [14] proposent un modèle de programmation en nombres entiers pour ce problème. Ils utilisent la programmation dynamique et la relaxation lagrangienne pour le résoudre. Cependant, les auteurs considèrent que toute la demande à un nœud est traitée par une seule passerelle ; ils ne considèrent pas les cas de panne de la passerelle. Bley et Koch [24], quant à eux, prennent ces cas en considération dans leur modèle ; mais ils simplifient le problème en supposant que le nombre et l'emplacement des passerelles d'accès sont connus à l'avance, ce qui réduit le problème à un problème d'assignation de cellules aux commutateurs [95]. Ils résolvent le modèle proposé à l'aide de méthodes exactes.

La troisième étape de la planification des réseaux mobiles est la planification du réseau cœur. Celle-ci consiste en la détermination du nombre, du type et de l'emplacement des commutateurs. Il faut aussi déterminer les types de liens et la topologie à utiliser pour relier ces équipements avec le réseau d'accès. Peu de chercheurs ont travaillé sur ce problème. En effet, il n'est pas très différent du problème de planification dans les réseaux câblés traditionnels [132]. Konstantinopoulou *et al.* [85] conçoivent un outil automatique pour l'optimisation de réseaux cœurs GSM/GPRS existants. Cet outil essaie d'accroître la compétitivité du réseau et la satisfaction des usagers tout en réduisant les coûts opérationnels. Les principaux critères considérés sont le coût, la réutilisabilité, la transférabilité, la performance, la simplicité et la technologie des éléments du réseau. Harmatos [69] s'intéresse à l'interconnexion des RNC (Radio Network Controller), la mise en place de passerelles médias (MG), et la planification du réseau cœur UMTS. En raison de la complexité du problème, l'auteur le traite en deux étapes. Tout d'abord, il trouve l'emplacement des passerelles et une topologie raisonnable en utilisant une fonction de coût linéaire. Il utilise ensuite la fonction de coût réelle, qui est une fonction échelon, afin de réduire le coût du réseau. L'auteur conçoit un algorithme à base de métaheuristiques qu'il utilise pour traiter le modèle proposé. Une caractéristique importante

de ce travail est qu'il fait abstraction des équipements de réseau. Différentes technologies (IP, ATM, etc.) peuvent ainsi être utilisées sans changer l'algorithme. Ricciato *et al.* [120] se concentrent sur l'assignation des RNC aux SGSN dans les réseaux GPRS, avec pour objectifs d'équilibrer le nombre de RNC par SGSN et de minimiser le routage inter-SGSN. Les auteurs conçoivent un modèle en programmation linéaire en nombres entiers et le résolvent avec le logiciel CPLEX.

La planification globale des réseaux mobiles a été très peu étudiée dans la littérature et ses applications concernent essentiellement les réseaux UMTS [90, 109, 131, 132].

2.3 La survivabilité des réseaux dans la littérature

La survivabilité d'un réseau fait référence à sa capacité à offrir des services identiques, même en cas de panne. Dans la plupart des cas, seules les pannes simples (de nœuds ou de liens) sont considérées car elles comptent pour plus de 99% des pannes enregistrées [130]. La mise en place d'un réseau robuste pouvant résister aux pannes est parfois onéreuse. Il est donc judicieux de trouver des méthodes assurant un bon équilibre entre le prix du réseau et sa tolérance aux pannes.

Szlovenscak *et al.* [136] proposent un modèle de fiabilité et une heuristique en deux phases pour déterminer une topologie de coût minimum dans les réseaux d'accès UMTS tout en assurant un taux moyen de perte de paquets inférieur à un seuil donné. Leur fonction objectif comprend un terme pour le coût de la topologie utilisée et un second terme qui représente une pénalité en fonction du nombre de paquets perdus.

Il existe d'autres travaux dans la littérature qui considèrent la tolérance aux pannes lors de la planification des réseaux. Les auteurs considèrent plusieurs états pour le réseau, un état correspondant à un scénario de panne donné, avec une probabilité de réalisation pour chaque état. Ils considèrent alors un trafic nul sur le(s) lien(s) en panne pour chaque état du réseau et calculent la capacité des autres liens en fonction de cet état [32, 35]. Un coût de pénalité lié aux délais engendrés par chaque état du réseau peut aussi être inclus dans la fonction objectif [33, 34].

2.4 Planification des réseaux 4G dans la littérature

Il existe au sein de la littérature une grande variété de travaux effectués sur les réseaux 4G. Dans le domaine de la planification, les auteurs se sont plus intéressés à la planification du sous-système radio des réseaux WiMAX. Ces travaux concernent aussi bien la localisation des stations de base que la planification des canaux de fréquence.

Yarali et Rahman [155] présentent l'architecture des réseaux WiMAX ainsi que le processus de planification des cellules. Ils proposent aussi un modèle d'affaire pour ces réseaux et montrent l'effet de la bande de fréquences utilisée sur la dégradation du signal. On remarque ainsi que la propagation du signal est meilleure pour les basses fréquences que pour les fréquences élevées.

Ntagkounakis et Sharif [102] ont travaillé sur le dimensionnement des réseaux WiMAX, aussi bien le dimensionnement de la couverture et des capacités des liens dans le réseau que celui des services offerts. Les auteurs distinguent cinq classes de service à savoir, l'UGS (Unsolicited Grand Service), le rtPS (real-time Polling Service), le nrtPS (non real-time Polling Service), l'E-rtPS (Enhanced real-time Polling Service) et le BE (Best Effort). Les services UGS nécessitent une bande passante fixe garantie (UGS) tandis que les autres services partagent la bande passante qui leur est attribuée. Parmi ces derniers, les services rtPS, nrtPS et E-rtPS sont prioritaires sur les services BE.

Gordejuela-Sánchez et Zhang [65] proposent un modèle pour minimiser le nombre de BS à installer tout en assurant une bonne couverture avec la qualité de service requise par chaque utilisateur et en maintenant une certaine distance entre ces BS. Ce modèle essaie de minimiser les coûts d'installation et de fonctionnement des BS tout en appliquant certaines pénalités lorsque la qualité de service requise par les utilisateurs n'est pas respectée. Le modèle proposé n'explique pas les contraintes de couverture, de débit et d'interférences car ces contraintes sont implicitement prises en compte dans les fonctions de pénalité. Gordejuela-Sánchez *et al.* [64] améliorent le modèle précédent en ajoutant à la fonction 'objectif' une pénalité par rapport à la fiabilité du réseau. Cette pénalité est utilisée dans les réseaux maillés où des sauts multiples sont souvent effectués pour atteindre l'utilisateur final.

D'Andreagiovanni et Mannino [45], quant à eux, présentent un modèle qui essaie de maximiser le profit généré par l'installation et l'activation des stations de base tout en respectant des contraintes de couverture et d'interférences. La qualité de service n'a pas été considérée dans ce modèle. Les auteurs ont utilisé le solveur ILOG CPLEX pour résoudre leur modèle. Ils soulignent cependant les limites d'une telle méthode, notamment par rapport à la résolution des instances de grande taille.

Yu *et al.* [156] proposent un modèle pour la planification des réseaux d'accès WiMAX avec des stations relais. Ils utilisent la programmation linéaire en nombres entiers pour résoudre leur modèle. D'après les auteurs, cette méthode convient pour résoudre des instances de problème de taille moyenne mais sa complexité temporelle augmente très vite avec la taille des instances.

Mousavi *et al.* [98] présentent un modèle de planification radio pour les réseaux WiMAX utilisant des antennes sectorisées. Carlos Hincapié et Bustamante Miller [30] proposent un

modèle automatique pour la planification des cellules dans les réseaux maillés WiMAX. Hu *et al.* [73] ont présenté un modèle simplifié pour l'allocation des stations de base aux utilisateurs et utilisent un algorithme génétique adaptatif pour le résoudre. Teterin et Hurley [140] proposent un cadre d'optimisation pour la planification du réseau WiMAX, dans lequel ils prennent en compte la planification des cellules et la planification des fréquences. Ils utilisent un algorithme de recuit simulé pour résoudre leur modèle.

2.5 Méthodes de planification utilisées

Les méthodes utilisées dans la littérature pour résoudre le problème de planification des réseaux de télécommunications peuvent se classer en deux groupes : les méthodes exactes et les méthodes approchées.

2.5.1 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes permettent non seulement d'obtenir la solution optimale au problème traité, mais aussi de prouver l'optimalité de la solution trouvée. Ces méthodes induisent des temps de traitement qui varient de façon exponentielle suivant la taille de l'instance, surtout lorsque le problème traité est complexe (NP-difficile) [26].

La plus simple des méthodes exactes est la méthode d'énumération. Elle consiste tout simplement à énumérer toutes les solutions possibles du problème traité, de les évaluer et d'en sélectionner la meilleure. Cependant, le nombre de solutions évaluées par cette méthode évolue de façon exponentielle lorsque la taille des instances augmente.

La procédure par séparation et évaluation [87, 89] permet aussi d'énumérer les solutions possibles du problème, mais cela de façon plus intelligente que la méthode d'énumération. En pratique, seules les solutions potentiellement de bonne qualité seront explorées, les solutions qui sont détectées comme étant de moins bonne qualité que la solution courante ne sont pas visitées. La distinction des solutions est effectuée grâce à certains critères définis selon la nature du problème, le critère le plus souvent utilisé étant la borne supérieure ou inférieure de la fonction objectif. La procédure par séparation et évaluation a été utilisée par Thompson et Wall [142] pour résoudre le problème de localisation des stations de base.

Les techniques de programmation par contraintes se basent sur la recherche d'une solution ou d'un ensemble de solutions via des déductions logiques à partir de contraintes définies pour le problème traité [144]. L'intervalle de définition des variables est ainsi progressivement réduit jusqu'à obtenir un ensemble de solutions satisfaisant toutes les contraintes du problème considéré. Ces techniques sont décrites dans la littérature par divers auteurs [9, 122, 145]. Les auteurs présentent les problèmes de satisfaction de contraintes en général, les règles de

cohérence utilisées ainsi que différents solveurs conçus pour traiter les problèmes à l'aide de la programmation par contraintes. Les techniques de programmation par contraintes sont utilisées par Chabrier *et al.* [31], par exemple, pour résoudre le problème de dimensionnement des capacités des liens dans les réseaux.

La programmation linéaire [37] permet de modéliser le problème traité sous forme d'un système d'équations linéaires à résoudre, le but étant d'optimiser une fonction donnée. Les équations représentent les contraintes du problème. Lorsque toutes les variables du modèle linéaire sont contraintes à prendre des valeurs discrètes, on parle de programmation linéaire en nombres entiers [61]. La programmation linéaire est aussi utilisée conjointement avec d'autres méthodes comme, par exemple, la programmation par contraintes [93] dans le but d'améliorer l'efficacité des algorithmes. Billionnet *et al.* [23] et Koster *et al.* [86] utilisent la programmation linéaire en nombres entiers pour résoudre le problème de planification de réseaux.

2.5.2 Les méthodes approchées

Les heuristiques sont des algorithmes de résolution d'un problème mathématique bien défini, par une approche intuitive qui se base sur l'interprétation et l'exploitation de la structure du problème afin d'en déterminer une solution raisonnable [127]. Elles comprennent, par exemple, les méthodes de construction progressive et les métaheuristiques.

Les méthodes de construction progressive sont basées sur des règles de décision et comprennent, entre autres, les algorithmes gloutons. Ces méthodes construisent une solution de proche en proche selon des règles prédéfinies et ne remettent pas en cause les décisions prises au cours des itérations précédentes. Elles ont pour avantage d'être simples à implémenter et requièrent peu de ressources, leur complexité est souvent très faible. Cependant, on peut noter que pour certains problèmes et pour certaines instances, les algorithmes gloutons peuvent conduire à la pire des solutions au sens de la fonction objectif [15, 68]. Elles peuvent aussi donner parfois de bonnes solutions [28]. Dans les cas où le problème à résoudre peut être modélisé par un matroïde, les algorithmes gloutons conduisent généralement à une solution optimale [55]. Étant donné leur simplicité d'implémentation et leur faible complexité, les algorithmes gloutons sont généralement utilisés pour produire une solution initiale qui sera ensuite améliorée par d'autres types d'heuristiques [6, 13].

Une métaheuristique est un processus de génération itérative qui permet de guider une heuristique subordonnée par la combinaison de divers concepts tels que l'exploitation et l'exploration de l'espace de recherche, ainsi que des stratégies d'apprentissage qui sont utilisées pour structurer efficacement l'information afin de déterminer des solutions de 'bonne' qualité [104]. Les métaheuristiques sont donc assimilables à des 'boîtes à outils' algorithmiques

que l'on peut utiliser pour résoudre différents problèmes d'optimisation. Il est souvent nécessaire d'adapter la métaheuristique à la résolution d'un problème en particulier. Cette adaptation passe, par exemple, par l'encodage des solutions, i.e. la représentation d'une solution du problème sous une forme manipulable par l'algorithme. Les divers mouvements appliqués à la solution doivent aussi être choisis de manière à ce qu'ils aient une signification réelle dans le cadre du problème traité. Les métaheuristicques sont, en général, non déterministes et garantissent pas l'optimalité des solutions obtenues. Elles peuvent néanmoins utiliser l'expérience accumulée au fil des itérations pour mieux guider la suite de la recherche [149]. On rencontre dans la littérature les métaheuristicques à solution unique, parmi lesquelles on retrouve de nombreux algorithmes de recherche locale, et les métaheuristicques à base de population.

Les techniques de recherche locale engendrent itérativement une solution dans le voisinage de la solution courante s dans l'ensemble des solutions du problème d'optimisation considéré. L'espace de recherche est ainsi explorée progressivement en passant d'une solution à l'une de ses voisines. La solution initiale utilisée par ces algorithmes est, le plus souvent, générée aléatoirement ou par un algorithme constructif simple. Divers critères d'arrêt peuvent être considérés pour l'algorithme, tel qu'un temps limite imposé, un nombre d'itérations sans modification de la meilleure solution trouvée ou un écart acceptable par rapport à une borne inférieure.

La méthode de recherche locale la plus simple est la méthode de descente. L'implémentation la plus courante de la méthode de descente génère, à chaque itération, la solution voisine s_{i+1} qui minimise la fonction objectif dans le voisinage de la solution s_i . L'algorithme s'arrête dès qu'il n'y a pas d'amélioration de la fonction objectif entre deux itérations successives. Le principal défaut de la méthode de descente est son arrêt au premier minimum local rencontré. Divers algorithmes ont été proposés pour pallier cette situation.

La technique du recuit simulé [84], par exemple, choisit au hasard une solution s' dans le voisinage de s_i . Cette solution voisine s' est automatiquement acceptée comme nouvelle solution courante (s_{i+1}) si elle est meilleure que la solution s_i . Dans le cas contraire, la solution s' n'est acceptée comme nouvelle solution courante qu'avec une certaine probabilité. Si la solution s' est refusée, une nouvelle solution est choisie au hasard dans le voisinage de s_i , et ainsi de suite. Dans le domaine de la planification des réseaux, la technique du recuit simulé est utilisée, par exemple, par Sarkar *et al.* [123] pour la planification des réseaux hybrides WOBAN (Wireless-Optical Broadband Access Network). Yang *et al.* [152] l'utilisent aussi pour la localisation des stations de base dans les réseaux UMTS et obtiennent de très bons résultats pour cet algorithme par rapport à d'autres techniques.

La recherche taboue [63] choisit, comme solution de l'itération suivante (s_{i+1}), la meilleure solution possible dans le voisinage de la solution s_i . Cependant, l'algorithme ne s'arrête pas

lorsque le premier minimum local est atteint, le principe sous-jacent étant qu'il se peut que l'on doive détériorer la solution courante pour pouvoir atteindre un optimum global. Il n'est pas impossible que la solution courante s_i soit, elle aussi, la meilleure solution dans le voisinage de la solution s_{i+1} . L'algorithme pourrait alors, dans ce cas, boucler autour des solutions s_i et s_{i+1} . Pour contourner cette difficulté, la recherche taboue considère une liste d'attributs dits tabous, i.e. qu'il est interdit de choisir une solution répondant aux critères de cette liste pendant un certain nombre d'itérations. De ce fait, lorsque la recherche taboue se déplace d'une solution s_i vers une solution voisine s_{i+1} , l'attribut introduisant la différence entre les solutions s_i et s_{i+1} est placé dans la liste taboue, empêchant ainsi la boucle de se former. Le statut tabou de l'attribut bloque, non seulement la solution s_i , mais toutes les solutions qui possèdent cet attribut. Cependant, il existe une condition prioritaire appelée condition d'aspiration qui oblige l'algorithme à sélectionner une solution sous certaines conditions. Le critère d'aspiration le plus simple est l'acceptation d'une solution si elle est meilleure que toutes les solutions parcourues jusque-là, même si cette solution possède des attributs de la liste taboue. La recherche taboue a été largement utilisée pour la planification des réseaux mobiles, aussi bien pour la planification des réseaux locaux [106] et des réseaux 3G [7, 131] que pour celle des réseaux d'accès 4G tels que LTE [66] et WiMAX [139]. Les auteurs concluent, en général, que cette méthode permet d'obtenir de bonnes solutions en un temps raisonnable.

La recherche à voisinage variable [97] part du principe qu'il faut parfois changer de méthode de voisinage pour trouver de meilleures solutions et sortir d'un optimum local. Elle utilise donc plusieurs méthodes pour déterminer le voisinage d'une solution donnée. Une descente est ainsi appliquée à partir d'une solution initiale. À chaque minimum local rencontré, l'algorithme change de méthode de voisinage selon une procédure prédéterminée. Cette procédure peut être déterministe, stochastique ou mixte. La recherche à voisinage variable a été utilisée par Zheng *et al.* [157] pour traiter le problème de positionnement des antennes dans les réseaux locaux sans fil à l'intérieur d'un bâtiment.

Contrairement à la recherche locale qui essaie d'améliorer itérativement une solution courante, les méthodes à base de population, quant à elles, travaillent sur un ensemble de solutions en appliquant un processus cyclique composé d'une phase de coopération et d'une phase d'adaptation individuelle qui se succèdent à tour de rôle. Dans la phase de coopération, les solutions de la population courante sont comparées entre elles, puis combinées, dans le but de produire de nouvelles solutions qui héritent des bons aspects de chaque membre de la population. Dans la phase d'adaptation individuelle, chaque solution dans la population peut évoluer de manière indépendante. On peut utiliser les mêmes types de critère d'arrêt que dans la recherche locale, ou alors on peut décider d'arrêter une métaheuristique à base de population dès que les solutions dans la population sont jugées trop similaires.

L'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis [40, 52] a été utilisé la première fois pour la recherche de chemins dans le problème du voyageur de commerce. Les auteurs s'inspirent de leurs observations par rapport à l'exploitation des ressources alimentaires chez les fourmis. Une fourmi (l'éclaireuse) parcourt au hasard l'environnement autour de la colonie. Lorsque celle-ci découvre une source de nourriture, elle rentre au nid, en laissant sur son chemin une piste de phéromones. Ces phéromones sont attractives et les fourmis qui passent à proximité ont tendance à préférer cette piste aux autres. Ces fourmis vont renforcer la piste en y déposant d'autres phéromones. Si deux pistes sont possibles pour atteindre la même source de nourriture, celle étant la plus courte sera parcourue par plus de fourmis que la longue piste. La piste courte est donc de plus en plus renforcée, et donc de plus en plus attractive. Les phéromones étant volatiles, la piste la plus longue finit par disparaître. Cet algorithme peut être utilisé, par exemple, pour déterminer le plus court chemin d'un point à un autre dans un graphe. Ibrahim *et al.* [74] l'utilisent pour relier les appareils des utilisateurs aux stations de bases dans les réseaux filaires. Brun et Garcia [27] ont aussi proposé un algorithme d'optimisation par colonies de fourmis pour traiter le problème d'allocation de ressources dans les réseaux.

L'optimisation par essais particuliers [83] s'inspire des comportements collectifs de déplacement chez certains groupes d'animaux tels que les oiseaux et les poissons. Que ce soit à la recherche de nourriture ou pour éviter leurs prédateurs, ces animaux se déplacent de façon relativement complexe mais cohérente alors que chaque individu n'a accès qu'à des informations limitées telles que la position et la vitesse de ses plus proches voisins [53]. Chaque individu utilise donc l'information dont il dispose par rapport à sa propre histoire et à celle de ses plus proches voisins, afin de déterminer la direction qu'il doit prendre ainsi que sa vitesse de déplacement. Les solutions ici sont appelées des particules. À chaque itération, une nouvelle position est calculée pour chaque particule. Cette position est généralement une combinaison linéaire de sa position actuelle, de sa meilleure position jamais connue et de celle de ses voisines ou informatrices. L'optimisation par essais particuliers a été conçue initialement pour les problèmes d'optimisation continue. Cependant, plusieurs auteurs l'ont adaptée pour résoudre des problèmes discrets comme le problème d'allocation de fréquences dans les réseaux cellulaires [119]. Les auteurs apprécient la convergence rapide de la méthode. Hashemi *et al.* [70] ont utilisé les essais particuliers pour traiter le problème de planification du réseau d'accès UMTS. Afin d'éviter une convergence trop rapide de l'algorithme, les auteurs réalisent une hybridation avec la technique du recuit simulé.

Les algorithmes évolutionnaires ont la particularité de s'inspirer de l'évolution des espèces dans leur cadre naturel, d'après la notion de sélection naturelle développée par Darwin [47] et les méthodes de combinaison de gènes introduites par Gregor Mendel [17]. Ces méthodes

consistent à faire évoluer une population dans le but d'en améliorer les individus. À chaque itération, un ensemble d'individus est mis en avant, générant ainsi un ensemble de solutions pour un problème donné. Selon Darwin [47], l'évolution des êtres vivants dans un milieu donné repose sur la compétition. Les individus les mieux adaptés survivent, se reproduisent et transmettent à leurs descendants les caractères qui ont favorisé leur survie. Quant aux autres, ils finissent par disparaître. On finit donc au fil des générations par obtenir des individus de plus en plus forts et mieux adaptés. Il est rare, mais cependant possible, qu'il y ait au cours de la reproduction ou par un effet de la nature, une modification de la structure génétique d'un individu. Ce phénomène, appelé mutation, se produit aléatoirement au sein d'une population. Ces caractéristiques sont traduites par des opérateurs de sélection et de variation [53]. Les opérateurs de sélection comprennent la sélection pour la reproduction et la sélection pour le remplacement. En ce qui concerne les opérateurs de variation, on distingue l'opérateur de croisement (reproduction) et l'opérateur de mutation.

L'algorithme génétique [72] est un exemple particulier d'algorithme évolutionnaire. Le principe de l'algorithme génétique consiste à partir d'une population initiale qui se compose d'un nombre déterminé d'individus appelés chromosomes. La meilleure solution peut ne pas se trouver dans cette population initiale. À chaque itération (ou génération), une succession d'opérations de sélection, de croisement, de mutation, d'évaluation et de remplacement est appliquée aux individus de la population, afin de produire la génération suivante. Lorsque le critère d'arrêt est atteint, la meilleure solution trouvée est sélectionnée et l'algorithme s'arrête. L'algorithme génétique a été utilisé dans la planification des réseaux mobiles, aussi bien pour la localisation des nœuds dans les réseaux locaux [146] que pour les réseaux maillés [113] 2009). Shahbaz [125] utilise l'algorithme génétique pour traiter le problème de planification du réseau cœur GSM. Liu et St-Hilaire [91] l'utilisent pour traiter le problème de planification globale des réseaux UMTS. Hu *et al.* [73] utilisent un algorithme génétique adaptatif pour résoudre le problème de planification du réseau d'accès WiMAX.

Gordejuela-Sánchez et Zhang [65] ont résolu leur modèle en utilisant quatre différentes méthodes, à savoir le recuit simulé qui a été amélioré en utilisant des opérateurs évolutionnaires (ESA), la recherche taboue (TS), la recherche par voisinage variable (VNS) et l'algorithme génétique (GA). L'algorithme glouton (GS) a été utilisé afin de servir de base de comparaison aux solutions obtenues. L'algorithme de recherche taboue obtient les meilleures probabilités d'obtenir les meilleurs résultats, suivi par l'algorithme génétique et la recherche à voisinage variable. Liu et St-Hilaire [90] conçoivent un algorithme coopératif basé sur la recherche taboue et l'algorithme génétique pour le problème de planification globale des réseaux UMTS. Les auteurs concluent que l'hybridation donne de meilleurs résultats que chaque algorithme pris individuellement.

2.5.3 Les méthodes hybrides

Les techniques de programmation mathématique et les approches métaheuristiques sont deux volets à succès pour les problèmes combinatoires. Ces deux techniques ont été mises en place par différentes communautés plus ou moins isolément les uns des autres. Seulement au cours des dernières années, un plus grand nombre de chercheurs ont reconnu les avantages et les potentialités de l'hybridation de méthodes de programmation mathématique et métaheuristiques. En fait, de nombreux problèmes peuvent être pratiquement résolus beaucoup mieux en exploitant les synergies entre ces différentes approches que par les algorithmes classiques 'purs' [116]. La question cruciale est de savoir comment les méthodes de programmation mathématique et métaheuristiques devraient être combinées pour obtenir ces avantages. De nombreuses approches ont été proposées au cours des dernières années.

Puchinger et Raidl [114] font une revue de littérature sur les méthodes hybrides et une classification des différentes approches existantes. Les auteurs distinguent deux grandes catégories, à savoir les approches intégratives et les approches collaboratives. Les approches collaboratives consistent à exécuter les deux algorithmes séparément (parallèlement ou de façon séquentielle) et à utiliser les résultats de l'un dans l'autre. Dans le cas des approches intégratives l'une des méthodes fait partie intégrante de l'autre. On peut, par exemple utiliser une métaheuristique pour explorer de manière plus efficace les différentes branches à l'intérieur d'une méthode exacte, ou alors utiliser un algorithme exact comme méthode d'intensification dans une métaheuristique.

Une revue de la littérature plus récente a été effectuée par Blum *et al.* [26]. Les auteurs exposent en détail diverses techniques d'hybridation utilisées au sein de la littérature comme, par exemple, l'intégration d'un algorithme de programmation par contraintes ou d'un algorithme de programmation linéaire en nombres entiers dans un algorithme de recherche à large voisinage. Il est également possible d'utiliser une relaxation du problème pour guider le processus de recherche d'une métaheuristique, car une solution optimale pour une relaxation du problème initial indique souvent les régions dans lesquelles de bonnes solutions (voire optimales) peuvent être trouvées pour le problème original.

2.5.4 L'optimisation multi-objectifs

La plupart des problèmes de la vie réelle sont des problèmes d'optimisation multi-objectifs [2], i.e. qu'ils visent la satisfaction de plusieurs objectifs contradictoires. Aucun objectif ne devrait être satisfait unilatéralement, au détriment des autres. Il faut donc trouver des solutions de compromis en tenant compte des préférences du décideur. De ce fait, il n'existe aucune définition précise de la solution optimale. Il s'agit alors de trouver un ensemble de solutions

satisfaisantes qui ne se surclassent pas les unes par rapport aux autres, laissant ainsi le choix au décideur. L'optimisation multi-objectifs consiste donc à déterminer un ensemble de vecteurs de variables de décision qui satisfont toutes les contraintes du problème et produit, pour chaque objectif, une valeur satisfaisante pour le décideur [105].

Au XIXème siècle, Vilfredo Pareto, un mathématicien italien, formule le concept de l'existence d'un équilibre tel que l'on ne peut pas améliorer un objectif sans détériorer au moins un des autres [107]. Cet équilibre est nommé optimum de Pareto. Un point $x^* \in E$ (ensemble

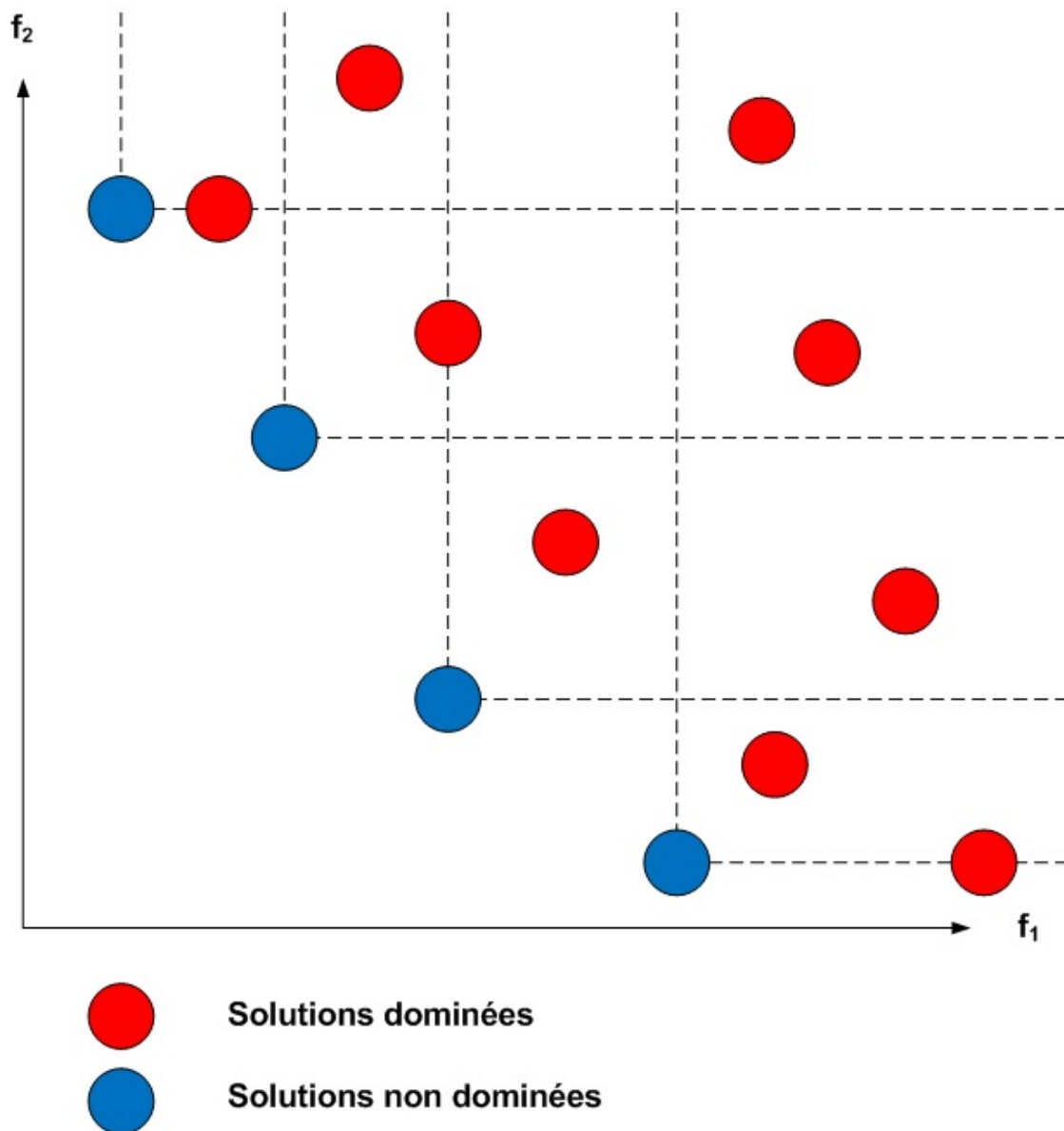


Figure 2.1 Illustration du concept de front Pareto pour un problème de minimisation bi-objectifs

des solutions) est dit Pareto optimal s'il n'est dominé par aucun autre point appartenant à E . Un point $x \in E$ domine un autre point $y \in E$, au sens Pareto, si et seulement si x est meilleur que y quelque soit la fonction objectif considérée. L'ensemble de tous les points Pareto optimaux constitue la frontière Pareto. La Figure 2.1 illustre le concept de front Pareto lorsque deux objectifs sont considérés dans un problème de minimisation. Sur cette figure, les solutions représentées par des ronds bleus représentent les solutions Pareto optimales. La ligne imaginaire reliant ces solutions constitue la frontière Pareto. Les solutions représentées par des ronds rouges sont les solutions dominées.

Plusieurs algorithmes ont été proposés dans la littérature pour résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectifs. Ces algorithmes peuvent être classés selon l'approche de résolution utilisée, se retrouvant ainsi regroupées dans les trois catégories suivantes : les approches basées sur la transformation du problème en un problème uni-objectif, les approches non Pareto et les approches Pareto [138].

Les approches basées sur l'agrégation des objectifs du problème

Les méthodes utilisées par ces approches se basent sur l'axiome selon lequel 'tout décideur essaie inconsciemment de maximiser une fonction d'utilité U ' [21] avec $U = U(f_1, f_2, \dots, f_k)$. Cette fonction peut être additive ou multiplicative. Parmi les méthodes d'agrégation, on peut citer, par exemple, la moyenne pondérée et la programmation par but.

La technique de la moyenne pondérée consiste à additionner tous les objectifs en affectant à chacun d'eux un coefficient de poids, transformant ainsi le problème multi-objectifs en un problème mono-objectif. Les coefficients utilisés représentent l'importance relative que le décideur attribue à chaque objectif. Ce genre de méthode est simple à mettre en œuvre. Cependant, la détermination des poids s'avère être une question délicate qui détermine l'efficacité de la méthode. En effet, il n'est souvent pas possible pour le décideur d'exprimer clairement le poids à attribuer aux différents objectifs du problème [38].

La programmation par but consiste à fixer un but à atteindre pour chacune des fonctions objectif [36] et à s'en approcher le plus possible. L'objectif est donc de minimiser la somme des écarts entre les résultats et les buts à atteindre. Cette méthode est aussi facile à mettre en œuvre mais son efficacité dépend fortement de la définition des buts à atteindre [21].

Les approches d'agrégation permettent d'utiliser les mêmes algorithmes que pour l'optimisation mono-objectif. Cependant, ils ne permettent pas de trouver un ensemble de solutions Pareto-optimales [16]. Certains algorithmes utilisent, pour remédier à ce problème, des poids qui varient durant le processus d'évolution afin de trouver un ensemble de solutions non dominées au lieu d'une seule solution de compromis [158].

Les approches non Pareto

Les approches non Pareto utilisent des procédures pour traiter séparément les différents objectifs du problème. On distingue, entre autres, l'algorithme VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) encore appelée sélection parallèle [124] et la sélection lexicographique [59].

L'algorithme VEGA est une extension de l'algorithme génétique qui a été présentée par Schaffer [124] pour la résolution des problèmes multi-objectifs. Les deux algorithmes diffèrent uniquement par la manière dont la sélection est effectuée. Considérons une population de taille P et un problème avec k objectifs. La sélection dans le cas de l'algorithme VEGA s'effectue en k étapes. À chaque étape, un objectif différent est considéré et P/k individus sont sélectionnés selon leur performance pour cet objectif. Les individus sélectionnés au cours des k étapes sont ensuite mélangés pour former la génération suivante et les opérateurs de croisement et de mutation leur sont appliqués. L'algorithme VEGA permet ainsi de sélectionner des solutions localement non dominées. Cependant, les solutions ainsi sélectionnées sont celles qui excellent pour un objectif donné. Les solutions dites "du milieu", celles qui sont bonnes globalement sans exceller pour un objectif en particulier, sont généralement écartées ce qui limite les chances de trouver des solutions de compromis [38].

La sélection lexicographique requiert une classification initiale des objectifs selon l'importance accordée à chacun d'entre eux par le décideur. Les fonctions objectifs sont ainsi traitées une à une, par ordre décroissant de leur importance, en évitant de détériorer les objectifs précédents. Le piège de cette méthode est la grande importance attribuée aux objectifs classés en premier. La meilleure solution trouvée pour l'objectif le plus important risque de faire converger l'algorithme vers une zone restreinte de l'espace des solutions et d'empêcher l'algorithme d'en ressortir [21]. En effet, avec une telle sélection, les points se répartissent sur les extrêmes de la frontière Pareto au détriment des solutions de compromis qui ont une performance générale acceptable mais ne possèdent aucun objectif fort [138].

Les approches Pareto

Les approches Pareto utilisent directement la notion d'optimum Pareto dans le processus de recherche. Le calcul de la fonction objectif et la sélection des solutions sont généralement basés sur la notion de non-dominance et le partage de fitness. Plusieurs formes de dominance sont rencontrées à travers la littérature.

Certains algorithmes, tel que le MOGA (Multiple Objective Genetic Algorithm), utilisent la dominance basée sur le rang, i.e. le nombre de solutions par lequel une solution est dominée [58]. Soit $p(x)$ le nombre d'individus dominant un individu x . Le rang de x est alors $r(x) = 1 + p(x)$.

La dominance basée sur la profondeur est utilisée par l'algorithme NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm) de Srinivas et Deb [129]. Les individus sont divisés sur plusieurs fronts. Un individu appartient au front $i + 1$ s'il est dominé par au moins un individu du front i . Les individus appartenant au front 1 ont une meilleure évaluation que ceux du front 2 et ainsi de suite. Le NSGA II [49] a été conçu pour résoudre certaines critiques émises au sujet du NSGA, à savoir la complexité, l'élitisme et la diversification.

D'autres algorithmes considèrent la dominance basée sur le nombre d'individus dominés par un individu donné. Le SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm), par exemple, se base à la fois sur la dominance basée sur le rang et celle basée sur le nombre d'individus dominés afin d'éviter que les solutions dominées par les mêmes solutions dans l'archive aient toutes la même valeur d'évaluation [160]. En effet, le SPEA utilise, en plus de la population courante, une population externe appelée archive, pour maintenir les solutions Pareto optimales. Le passage d'une génération à une autre commence alors par la mise à jour de l'archive. Tous les individus non dominés de la population courante sont copiés dans l'archive et les individus de l'archive qui se retrouvent dominés sont supprimés. Si le nombre d'individus dans l'archive excède un nombre donné, on applique une technique de regroupement (clustering), utilisant la densité des solutions dans une région donnée, pour réduire l'archive. La fitness de chaque individu est ensuite mise à jour avant d'effectuer la sélection en utilisant les deux populations. Les opérateurs génétiques de croisement et de mutation sont alors appliqués sur les individus sélectionnés et ainsi de suite. Le SPEA2 [159] a été proposé pour corriger les lacunes de la version précédente. L'algorithme du SPEA2 comporte des améliorations aux niveaux de l'évaluation des solutions, de l'estimation de la densité autour d'une solution et de la méthode de troncature de l'archive. Zitzler *et al.* [158] présentent ces améliorations de façon plus détaillée.

L'algorithme NPGA (Niche Pareto Genetic Algorithm) [117] utilise une sélection par tournoi basée sur la notion de dominance de Pareto. Elle compare deux individus pris aléatoirement avec une sous-population de taille p dont les individus sont également choisis au hasard. Si l'un des deux individus est dominé par le sous-groupe et l'autre non, l'individu non-dominé est sélectionné. Lorsque les deux individus sont soit dominés ou non dominés par le sous-groupe, une fonction de partage de fitness est appliquée pour déterminer celui qui sera sélectionné.

Les principales difficultés rencontrées par les approches Pareto concernent l'évaluation des solutions, la préservation de la diversité et la conservation des meilleures solutions trouvées, ainsi que la mesure de la qualité d'un ensemble de solutions par rapport à un autre. Des propositions ont été faites dans la littérature pour contourner ces problèmes [158]. Bien que les algorithmes les plus populaires pour l'optimisation multi-objectifs se basent sur les algo-

rithmes évolutionnaires (NSGA, MOGA, SPEA, etc.), on retrouve aussi dans la littérature des algorithmes basés, par exemple, sur le recuit simulé [42, 128], la recherche taboue [19, 60] et l'optimisation par essais particuliers [108, 118, 153].

2.6 Analyse des travaux présentés dans la littérature

La littérature actuelle sur la planification des réseaux 4G est assez peu fournie. Les auteurs se sont concentrés sur un seul sous-problème, en l'occurrence la planification des cellules. Les problèmes de planification des réseaux d'accès et cœur n'ont pas été traités. De plus, les modèles proposés au sein de la littérature ne sont pas complets car ils ne prennent pas en compte tous les aspects du problème, en l'occurrence l'assignation des fréquences, la qualité du signal et la survivabilité du réseau.

Dans les travaux recensés, les auteurs sont principalement intéressés par la planification des réseaux WiMAX. En effet, le WiMAX étant une technologie relativement récente, le déploiement de ces réseaux requiert l'installation de nouvelles infrastructures [81]. Les réseaux mobiles 4G ayant la même architecture globale et utilisant les mêmes technologies, il est possible de trouver une formulation prenant en compte l'ensemble de ces réseaux.

Il existe quelques travaux portant sur la planification globale des réseaux au sein de la littérature. Ces travaux portent essentiellement sur les réseaux 3G UMTS. Bien qu'il soit possible d'adapter le modèle proposé par les auteurs [133] pour la résolution du problème de planification des réseaux 4G, ce modèle n'inclut pas la notion de survivabilité du réseau.

Dans cette thèse, nous proposons d'intégrer tous les aspects mentionnés ci-dessus afin de fournir un modèle global incluant la survivabilité pour la planification des réseaux 4G. Ce modèle est beaucoup plus complexe à résoudre mais il présente l'avantage d'offrir une solution complète tout en préservant les interactions existant entre les différentes parties du réseau. Le modèle proposé impose l'optimisation simultanée de deux objectifs contradictoires à savoir le coût du réseau et sa tolérance aux pannes. Nous explorons donc à la fin de cette thèse quelques pistes de résolution avec des méthodes d'optimisation multi-objectifs.

CHAPITRE 3

DÉMARCHES DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

La section 1.3 du chapitre 1 énonçait les objectifs de cette thèse. Dans ce chapitre, nous faisons le lien entre ces objectifs et les chapitres subséquents.

Le premier objectif de la thèse consiste à concevoir un modèle mathématique global pour planifier les réseaux mobiles 4G, en optimisant le trafic dans les deux directions, et intégrer les notions de qualité de service et de survivabilité du réseau à ce modèle. Le deuxième objectif de la thèse consiste à concevoir un algorithme exact pour résoudre le modèle proposé afin de comparer les approches globale et séquentielle. Ces deux objectifs ont été atteints dans le chapitre 4. Dans cet article intitulé ‘A Reliable Model for Global Planning of Mobile Networks’, nous proposons un modèle de planification globale intégrant la survivabilité pour les réseaux WiMAX. Les architectures des réseaux 4G étant très semblables (Voir chapitre 1 section 1.1.1), ce modèle peut être appliqué à n’importe lequel de ces réseaux en modifiant seulement les équations représentant le modèle de propagation (équations (A.4), (A.5) et (A.6) du chapitre 4.

Le modèle proposé représente entièrement le problème de la planification du réseau et permet de le résoudre sans le diviser en plusieurs sous-problèmes. La fonction objectif du modèle consiste à minimiser le coût du réseau tout en maximisant sa survivabilité. Afin de faciliter son évaluation, nous avons traduit la survivabilité du réseau par une fonction de coût à minimiser. La survivabilité du réseau est donc représentée par la perte de revenu occasionnée par une panne dans le réseau une fois celui-ci opérationnel. Plusieurs scénarios de pannes peuvent ainsi être considérés, y compris les scénarios de pannes multiples, avec une probabilité d’occurrence pour chaque scénario. La fonction objectif à minimiser représente la somme du coût du réseau et de celui de la survivabilité. Le problème étant de nature multi-objectifs, nous avons choisi une fonction d’agrégation dans laquelle les deux objectifs ont le même poids. Ce choix a été naturel, étant donné le fait que nous ayons réussi à traduire les deux fonctions objectifs dans une même unité de coût (dollars). On peut alors les additionner simplement. Cependant, on peut également décider de leur attribuer des poids différents, selon les priorités du planificateur.

Un algorithme de résolution exacte a été implémenté en langage C++ en utilisant la programmation linéaire en nombres entiers avec la bibliothèque IloCplex. Cet algorithme est nommé ILP (Integer Linear Programming) dans la suite de ce chapitre. Le programme conçu permet de résoudre une instance du problème de façon exacte en utilisant le solveur CPLEX.

Pour des raisons pratiques, nous avons limité le temps de résolution par CPLEX à 21600 secondes. Les autres paramètres du solveur n'ont pas été modifiés.

Afin d'évaluer l'apport de la prise en compte de la survivabilité dans la planification des réseaux 4G, nous avons conçu un deuxième modèle, semblable au premier, mais qui n'inclut pas les scénarios de panne dans la planification. Comme nous nous y attendions, le modèle global sans survivabilité génère des solutions qui coûtent généralement un peu moins cher à mettre en œuvre que ceux du modèle incluant la survivabilité. Nous avons ensuite calculé la perte de revenu que générerait le réseau une fois installé. Cela a permis de montrer que les solutions du modèle sans survivabilité sont en fait beaucoup moins avantageuses à long terme. Le modèle global incluant la survivabilité permet d'économiser en moyenne 30% du coût total par rapport au modèle sans survivabilité.

Nous avons également conçu un modèle séquentiel intégrant la survivabilité qui permet de résoudre le problème en le subdivisant en trois sous-problèmes résolus l'un à la suite de l'autre, les résultats des premiers représentant une entrée pour les suivants. Le premier sous-problème résolu est celui de la planification des cellules, ensuite la planification du réseau d'accès et enfin la planification du réseau cœur. Dans ce cas aussi, les résultats ont été conformes aux attentes. Le modèle séquentiel, n'ayant pas une vue globale du réseau, génère des solutions qui sont en général moins bonnes que celles du modèle global. L'écart moyen entre les deux modèles est de 26%.

Les instances qui peuvent être résolues de façon optimale par le modèle proposé sont d'assez petite taille car le temps de calcul explose rapidement. En effet, le problème étant NP-difficile, l'utilisation de méthodes approchées pourrait être avantageuse afin de trouver de 'bonnes solutions' en un temps raisonnable. Ceci est le sujet de notre troisième objectif qui consiste à concevoir un algorithme à base de métaheuristiques pour traiter des problèmes de grande taille avec le modèle global de planification. Cet objectif a été atteint dans le chapitre 5 qui est un article intitulé 'An Hybrid Iterated Local Search Algorithm for the Global Planning Problem of Survivable 4G Mobile Networks'.

L'algorithme proposé dans ce second article, GPP4G-ILS, est une nouvelle forme d'hybridation entre la métaheuristique ILS (Iterated Local Search) et l'algorithme ILP proposé dans le premier article. Nous proposons une représentation de l'espace de recherche qui permet de réutiliser l'algorithme ILP en l'intégrant directement dans l'algorithme ILS. L'hybridation de ces deux méthodes permet de bénéficier des avantages des deux techniques de résolution. L'algorithme ILS est utilisé pour explorer efficacement l'espace de recherche, tandis que l'algorithme ILP est utilisé pour intensifier les solutions obtenues.

Nous avons comparé les solutions obtenues par l'algorithme GPP4G-ILS avec celles obtenues précédemment avec la méthode exacte. La comparaison a été effectuée dans un premier

temps sur les instances qui ont pu être résolues de façon optimale. Les résultats montrent que l'algorithme GPP4G-ILS est en mesure de trouver des solutions qui sont, en moyenne à 0,06% des solutions optimales. En effectuant trois exécutions de l'algorithme, nous avons pu trouver la solution optimale pour 99,69% de ces instances. Une autre comparaison a été effectuée par rapport à la meilleure solution entière retournée par CPLEX au bout du temps limite, en considérant uniquement les instances pour lesquelles CPLEX n'a pas pu générer de solution optimale. Cette comparaison montre que l'algorithme GPP4G-ILS génère de meilleures solutions entières que CPLEX pour ces instances en un temps réduit.

Pour tester l'algorithme GPP4G-ILS, nous avons généré quelques instances de plus grande taille. Ces instances ne pouvaient être traitées par la méthode exacte, non seulement à cause de la complexité en temps de l'algorithme ILP, mais aussi à cause de sa complexité en espace qui augmente très rapidement. En effet, nous n'avons pas pu résoudre des instances de taille supérieure à 25 points de test avec l'algorithme ILP du fait d'un problème de dépassement de la mémoire sur l'ordinateur utilisé pour les tests. Nous avons alors développé une relaxation du modèle global, ce qui nous a permis de générer rapidement des bornes inférieures fiables, aussi bien pour les instance de grande taille que pour les instances précédentes qui n'avaient pas de solution optimale. Les résultats de l'algorithme GPP4G-ILS ont été comparés à ces bornes inférieures. Les solutions obtenues par l'algorithme sont, en moyenne à 2,43% de la borne inférieure pour les instances qui ne peuvent pas être résolues de manière optimale. De plus, le temps de calcul a été considérablement réduit de même que l'espace mémoire utilisé.

Le quatrième objectif de la thèse est de proposer une métaheuristique multi-objectifs pour résoudre le problème afin de donner une meilleure marge de manœuvre au décideur. En effet, le problème étant de nature multi-objectifs, il est intéressant de fournir au décideur un ensemble de solutions réciproquement non dominées (aussi bien des solutions extrêmes que des solutions de compromis) afin qu'il puisse effectuer un choix plus éclairé. Cet objectif a été atteint au chapitre 6 intitulé 'Une métaheuristique multi-objectifs pour le GPP-4G'.

Dans ce chapitre, nous proposons une métaheuristique multi-objectifs (MOGPP4G-ILS) basée sur l'algorithme GPP4G-ILS précédent. Nous définissons une notion d'ordre sur deux solutions permettant ainsi de comparer des solutions mutuellement non-dominées. Cela nous permet d'utiliser le même algorithme que précédemment. Nous introduisons également dans l'algorithme une mémoire à long terme permettant de sauvegarder l'ensemble des meilleures solutions non-dominées rencontrées tout au long de l'exécution. Cet ensemble est retourné à la fin de l'algorithme.

Les résultats montrent que l'ensemble des solutions obtenues par l'algorithme MOGPP4G-ILS comporte presque toujours la meilleure solution renvoyée par l'algorithme GPP4G-ILS, ainsi que d'autres solutions du même front (réciproquement non-dominées). Les solutions de

l'algorithme GPP4G-ILS étant considérées comme très bonnes, nous concluons que l'algorithme MOGPP4G-ILS obtient également de bonnes solutions. Le temps de calcul de l'algorithme mono-objectif est légèrement inférieur à celui de l'algorithme multi-objectifs mais ce dernier offre l'avantage de retourner un ensemble de solutions de compromis qui permettront au décideur d'avoir une vision plus globale du problème ainsi que diverses solutions possibles.

Les objectifs de cette thèse ont donc été atteints à travers les trois chapitres subséquents. Notre contribution permettra de mieux appréhender la planification des réseaux de la quatrième génération en considérant la survivabilité du réseau. Cela limitera les pertes occasionnées par les pannes, ce qui permettra de résoudre les coûts pour les utilisateurs. Cette thèse a donc, non seulement des répercussions sur le plan scientifique, mais aussi sur le plan social car elle aidera à réduire la fracture numérique en permettant aux opérateurs d'offrir des services plus performants à moindre coût.

CHAPITRE 4

ARTICLE 1 : A RELIABLE MODEL FOR GLOBAL PLANNING OF MOBILE NETWORKS

Auteurs : Eunice Adjarath Lemamou, Steven Chamberland, Philippe Galinier

Revue : *Computers & Operations Research*, 40, pp. 2270 - 2282

Abstract

In this paper, we propose a global model for WiMAX networks planning. This model represents the network planning problem and helps to solve it entirely without dividing it in several subproblems. The objective of the model is to minimize the cost of the network while maximizing its survivability. The model has been compared to a sequential model with the same constraints, which consists in solving the subproblems sequentially, and to a global model without reliability constraints. The results show that the proposed model performs in average 25% better than the other models.

4.1 Introduction

Computer networks have become increasingly important in our society. The users of those networks are more mobile and more demanding than before, in terms of reliability and throughput. In order to meet their demands, standards are continually improved and new services are offered by network operators. Due to the competition in the market, the operators have to provide these services at the best price while maintaining a certain quality of service (QoS). It is in this context that the problem of network planning, which is to optimize the cost of installing and using the system, is posed. A well done planning helps to reduce the time to market and the cost of installation and operation of the network [100].

The term ‘quality of service’ is quite controversial in the literature and is used to describe different concepts [67]. The International Telecommunication Union (ITU) defines QoS as the ‘collective effect of service performance which determine the degree of satisfaction of a user of the service.’ [79]. This definition of QoS is turned towards the user and includes several non-technical aspects. However, it also depends on network performance, including delay, throughput and network availability, the latter itself affected by the reliability of the

network [79].

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) is a fourth generation (4G) network technology using the standard IEEE 802.16. It provides an improved mobility compared to previous generation networks, with a wider coverage, diversified services and a better QoS [77]. The deployment of WiMAX networks, however, requires the installation of new infrastructure [81]. It is therefore necessary to establish a planning model that will minimize the cost of installing and operating the network.

The network planning problem is often subdivided into three subproblems which are solved separately. In the literature, most papers focus on one subproblem. They propose diverse models to solve the cell network subproblem which have been largely studied [5, 45, 46, 65, 71, 82, 99, 103, 121, 156], the access network subproblem [14, 136, 151] and the core network subproblem [69, 85, 120]. St-Hilaire *et al.* [133] have however shown that there is an interest to perform a global planning, integrating all the subproblems in the same model. Each subproblem being NP-hard [130], this integration results in an even more complex model. The global planning of mobile networks has been little studied in the literature and its applications are mainly Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) networks [90, 91, 131, 132].

The planning of WiMAX networks is comparable to the planning of UMTS networks as the two technologies are deployed on three levels. We note two little differences between the two networks technologies. On the one hand, the WiMAX core network contains only one equipment while the UMTS system contains two core network equipments. Furthermore, the propagation models used are not the same for the two technologies since they operate in two different frequency bands. Moreover, the existent works on the global planning do not take into account the survivability of the network.

In this paper, we propose a global model for WiMAX networks planning. The problem is solved integrally, from the cells to the core network. This model is more complex to solve, but it has the advantage of offering a solution that preserves the existing interactions between the different parts of the network. Our model also improves the survivability of the network by taking into account the failure scenarios which are defined by the network planner.

The rest of this paper is organised as follow. A review of the literature is exposed in Section 2. The problem of WiMAX networks planning is briefly presented in Section 3. In Section 4, we describe the proposed model. The computational results are exposed and analysed in Section 5; we compare these results with those obtained by a sequential model with the same constraints. An illustrative example follows to show the differences between the two models. Finally, conclusions and further works are presented in Section 6.

4.2 Literature Review

The most commonly method used in the literature to solve the network planning problem is to subdivide it into several subproblems (cells planning subproblem, access network planning subproblem, core network planning subproblem) which are dealt with separately. The WiMAX technology is relatively new and little work has been done on the planning of these networks. These works focus only on the cells planning subproblem and concern both the location of base stations (BS) and the planning of frequency channels.

Gordejuela-Sánchez et Zhang [65] propose a model for minimizing the number of BSs to install while providing good coverage with the quality of service required by each user and maintaining a distance between the BSs. This model tries to minimize the cost of installation and operation of BSs while applying certain penalties when the QoS required by users is not respected. Authors use the penalty functions to force the respect of coverage, throughput and interference constraints in their model. Gordejuela-Sánchez *et al.* [64] improve the previous model by adding to the objective function a penalty in relation to network reliability. This penalty is designed only for mesh networks where multiple jumps are often needed to reach the end user. They solve the model using multi-objective tabu search.

D'Andreagiovanni et Mannino [45] present a model that tries to maximize the profit generated by the installation and activation of BSs while respecting the constraints of coverage and interference. The QoS is not considered in this model. Authors use the solver ILOG CPLEX 10.0 [41] to solve their model. However, they stress the limits of such a method, particularly for the resolution of large instances. Yu *et al.* [156] also propose a model for planning WiMAX networks with relay stations and use Integer Linear Programming to solve it. According to these authors, the method is suitable for solving medium size problems but its time complexity increases rapidly with the size of the instances.

Hu *et al.* [73] have recently presented a simplified model for the allocation of base stations to users and use an adaptive genetic algorithm to solve it. Berrocal-Plaza *et al.* [22] are interested in finding the BSs location to meet traffic and coverage requirements for the IEEE 802.16 fixed point-to-multipoint with line of sight. They use an artificial bees algorithm to solve the problem. Authors assume that all users within the coverage area of a given BS may be served and do not specify the coverage and signal quality constraints.

The state of the art on WiMAX networks planning is fairly sparse. The authors focus on a single subproblem, namely the cells planning. The planning of access networks and core networks are not addressed. These subproblems have been solved for other network technologies.

Szlovencsak *et al.* [136], for example, are interested in UMTS access networks. These

authors consider a tree topology for the network and take into account the reliability considering only simple failure scenarios. They use simulated annealing to solve the problem. Wu et Pierre [151] also address the subproblem of 3G UMTS access networks. They propose a model that takes into account the frequency of handovers between cells. They use a heuristic search in three phases to treat their model. The first phase is to find an initial feasible solution using a technique of constraint satisfaction. A local search procedure is then applied to the initial solution in a second phase. The third phase is used to improve the solution obtained in the previous step by standard methods of constraints optimization. Balakrishnan *et al.* [14] propose a model of integer programming for this problem. They use dynamic programming and Lagrangian relaxation to solve it. These authors consider that any request to a node is processed by a single switch, but they do not consider the failure of switch. Bley et Koch [25], meanwhile, take these failures into consideration in their model. However, they simplify the problem assuming that the number and location of the switches are known in advance, reducing the problem to a problem of assigning cells to switches [95]. They solve the proposed model using exact methods.

Konstantinopoulou *et al.* [85] design an automatic tool for existing GSM/GPRS core network optimization. This tool attempts to increase the competitiveness of the network and user satisfaction while reducing operational costs. The main criteria considered are cost, reusability, portability, performance, simplicity and technology network elements. Harmatos [69] focuses on the interconnection of the radio network controller (RNC), the establishment of media gateway (MG), and UMTS core network planning. Due to the complexity of the problem, the author treats it in two stages. First, he finds the location of the gateways and a reasonable topology using a linear cost function. He then uses the real cost function to reduce the network cost. The author develops a metaheuristics based algorithm to solve the proposed model. An interesting aspect of this work is that it ignores network equipment. Different technologies (IP, ATM, etc.) can be used without changing the algorithm. Ricciato *et al.* [120] focus on the RNC to SGSN assignment in GPRS networks, with the aim to balance the number of RNC by SGSN and minimize the inter-SGSN routing. These authors develop a model with Integer Linear Programming and solve it with the CPLEX software.

The subproblems of the network planning problem are then solved separately in the literature. The partial solutions obtained by solving these subproblems can be integrated to form a global solution. However, there are various interactions between these subproblems which are not well considered. St-Hilaire *et al.* [133] propose a global model to solve the problem of planning third generation, namely UMTS, mobile networks. This model solves, in one shot, the three subproblems considering the interactions between them. Although the proposed model achieves quite well, it does not take into account reliability or survivability

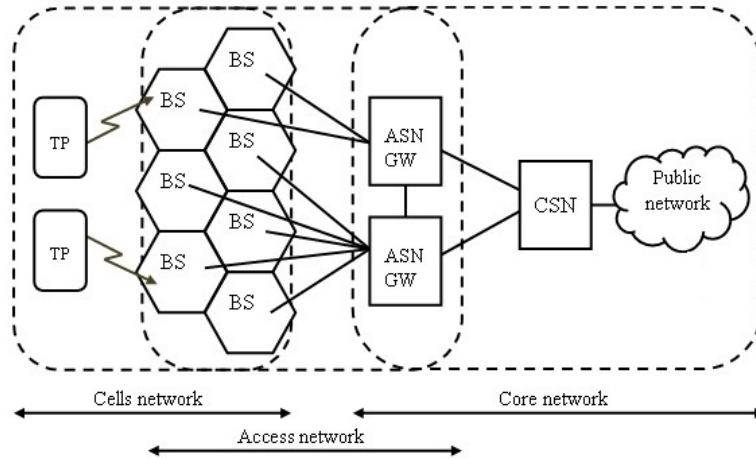


Figure 4.1 WiMAX mobile network architecture

constraints.

Survivability of a network refers to its ability to offer identical services, even in case of failure. In most cases, only simple failures (of nodes or links) are considered because they account for more than 99% of failures recorded [130]. The establishment of a robust network that can withstand the failure is sometimes expensive. It is therefore wise to find ways to ensure a good balance between price and network failure tolerance.

Szlovecnsak *et al.* [136] propose a model of reliability and a two-phase heuristic to determine a minimum cost topology in the UMTS access networks while maintaining an average packet loss below a given threshold. Their objective function includes a term for the cost of the topology used and a term which represents a penalty based on the number of lost packets.

There are other works in the literature that consider failure tolerance in network planning. The authors consider several states for the network, a state corresponding to a given failure scenario, with a probability of occurrence for each state. They consider no traffic on the links which are down for each state of the network and calculate the capacity of other links based on this state [35], [32]. A penalty cost associated with delays caused by each state of the network can also be included in the objective function [33].

The models proposed in the literature for the WiMAX networks planning problem are not complete. The access and core networks planning have not been considered. The cells planning models presented do not consider all aspects of the problem, namely the assignment of frequencies, the signal quality and survivability constraints. The model which we design integrates all these aspects to provide a global model. This model is more complex to solve, but it has the advantage of offering a complete solution preserving the existing interactions between different parts of the network.

4.3 Problem Definition

4.3.1 The Network Architecture

The mobile WiMAX network architecture is illustrated in Figure 4.1. The coverage area is divided into cells. Each cell contains a BS. The mobile users are connected to BSs; this users are represented by test points (TPs). The BSs are connected to Access Service Network gateways (ASN-GWs) and ASN-GWs are connected to Core Service Network (CSNs). Some ASN-GWs can also be interconnected. The access to the public or extern network is provided by the CSNs.

4.3.2 The Network Planning Problem

The mobile WiMAX network planning problem can be divided into three subproblems, compared to the three levels of the network: the cells network planning, the access network planning and the core network planning.

The *cells planning* consists in selecting and locating the BSs with respect to the quality of the signal received at the TPs. This subproblem aims to minimize the cost of installation, operation and maintenance of BSs while ensuring coverage of TPs with the throughput required.

The *access network planning* consists in selecting and locating the ASN-GW and connecting them with the BSs. The capacity constraints associated with each equipment and the traffic routing constraints within the network must be respected. This subproblem aims to minimize the cost of installation, operation and maintenance of the ASN-GWs and the links installed. In order to guarantee the survivability of the network, various failure scenarios can be considered. When a node or link fails, the traffic can be redirected through another network equipment. In the case of a failure of BS, the test points connected to it can reconnect through another BS if available for them.

The problem of the *core network planning* is to determine the types and locations of the CSNs to install and to link them to the ASN-GWs and the public network. The purpose of this subproblem is to minimize the cost of installation, operation and maintenance of the CSNs and the costs of the links used to connect them to the other network equipments. The capacity and traffic routing constraints must also be considered in this subproblem.

4.3.3 An Illustrative Example

An example of mobile WiMAX network planning is given in Figure 4.2. Figure 4.2a represents a geographic area where it is desired to implement a mobile WiMAX network.

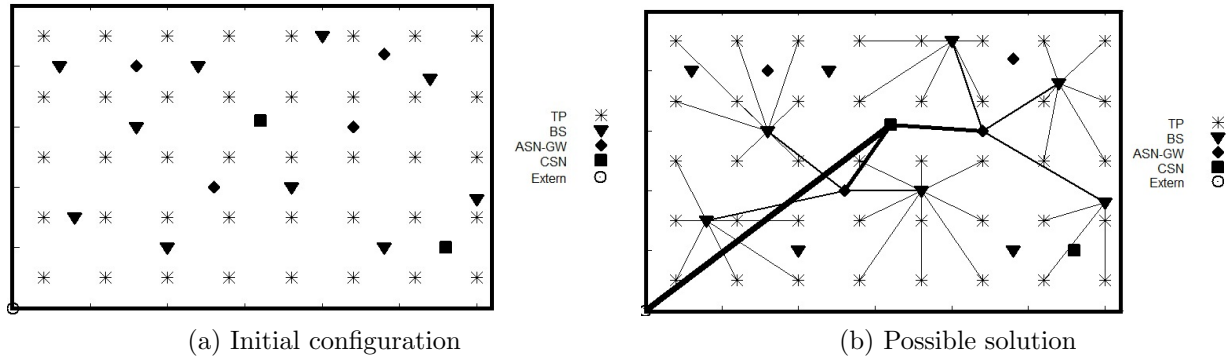


Figure 4.2 Example of mobile WiMAX network planning

The area is divided into 40 smaller regions whose centers are chosen to be the TPs. There are ten potential sites to install BSs, four sites for ASN-GWs and two sites for CSNs. In order to minimize interference, the number of channels per base station was limited to 10, each channel transmitting on a different carrier frequency. The survivability of the network was not considered in this example.

In Figure 4.2b, a possible solution to this problem is presented. In this solution, six BSs, two ASN-GWs and one CSN are used to cover the entire area. All TPs have been served. The maximum number of TPs connected to a base station is nine. Six BSs, two ASN-GWs and one CSN have been used. The CSN is also linked to the extern network.

4.4 Model Formulation

The proposed model considers the whole problem and does not subdivide it into different subproblems. The model aims to minimize the total cost of the nodes and links installed and the cost of the failures of the network while meeting the demand at each TP and providing a good quality signal. The cost of the failures is the loss of income generated by the probability of being in a failure scenario.

4.4.1 Assumptions

We have made these three assumptions concerning our model.

1. In each failure scenario, including the scenario without failure, a TP is connected to at most one BS. This means that a TP is served by only one BS at anytime but the BS serving a TP may change depending on the failure scenarios.
2. A TP which does not obtain the required class of service is considered underserved. We consider that, if a client does not obtain the desired service, he will not pay for it. So

we count it as a loss for the network provider.

3. A single equipment can be installed at any physical location.

The following information is considered as entry for our system.

- The location of the TPs, the potential sites to install the BSs, ASN-GWs and CSNs, and the location of the connector to the public network.
- The types of BSs, ASN-GWs and CSNs available, their number of available ports and their maximum capacity.
- The sum of the costs of installation, operation and maintenance of each type of equipment.
- The types of links needed to connect the equipments and the costs of these links.
- The traffic flows from each TP and their destinations.
- The failure scenarios of interest to the network planner.
- The income generated by each class of service. Several classes of service are considered. The income generated by a TP depends on the class of service required at that TP.

4.4.2 The Model

A brief overview of the notation and the model is presented in this section. See the Appendix for more details.

Sets

- T : the set of TPs.
- B, A, C : respectively the set of potential sites to install the BSs, the ASN-GWs and the CSNs.
- Q : the set of available service classes.
- S : the set of failure scenarios.
- T_A, T_B, T_C : respectively the set of ASN-GW types, BS types and CSN types.
- $L_{BA}, L_{AA}, L_{AC}, L_{CR}$: respectively the set of interface types that can be used to connect a BS to an ASN-GW, an ASN-GW to another, an ASN-GW to a CSN and a CSN to the public network.

Constant Parameters

- C_B^t, C_A^t, C_C^t : respectively the cost (including installation, operation and maintenance costs) of a BS of type $t \in T_B$, of an ASN-GW of type $t \in T_A$ and of a CSN of type $t \in T_C$ in dollars.

- $C_{BA}^{l_1}, C_{AA}^{l_2}, C_{AC}^{l_3}, C_{CR}^{l_4}$: respectively the link and interface costs (including installation, operation and maintenance costs) for connecting a BS to an ASN-GW, an ASN-GW to another, an ASN-GW to a CSN and a CSN to the public network with $l_1 \in L_{BA}, l_2 \in L_{AA}, l_3 \in L_{AC}, l_4 \in L_{CR}$ in dollars/kilometer.
- R_q : Income generated by serving a TP requesting the service class $q \in Q$ in dollars.
- Q_t : the service class requested by the TP $t \in T$.
- D_{xy} : the distance between two nodes at the sites $x \in (T \cup B \cup A \cup C)$ and $y \in (T \cup B \cup A \cup C)$ in meters.
- D_{cr} : the distance between a CSN at the site $c \in C$ and the public network in meters.
- $Pr(s)$: the probability for the network to be in the failure scenario $s \in S$.

Variables

- u_b^t : a 0-1 variable such that $u_b^t = 1$ if and only if a BS of type $t \in T_B$ is installed at site $b \in B$.
- v_a^t : a 0-1 variable such that $v_a^t = 1$ if and only if an ASN-GW of type $t \in T_A$ is installed at site $a \in A$.
- w_c^t : a 0-1 variable such that $w_c^t = 1$ if and only if a CSN of type $t \in T_C$ is installed at site $c \in C$.
- Y_{tb}^s : a 0-1 variable such that $Y_{tb}^s = 1$ if and only if TP $t \in T$ is connected to the BS installed at site $b \in B$ in the scenario $s \in S$.
- n_{ba}^l : the number of interfaces of type $l \in L_{BA}$ used to connect the BS at the site $b \in B$ to the ASN-GW at the site $a \in A$.
- $n_{aa'}^l$: the number of interfaces of type $l \in L_{AA}$ used to connect the ASN-GW at the site $a \in A$ to the ASN-GW at the site $a' \in A$.
- n_{ac}^l : the number of interfaces of type $l \in L_{AC}$ used to connect the ASN-GW at the site $a \in A$ to the CSN at the site $c \in C$.
- n_{cr}^l : the number of interfaces of type $l \in L_{CR}$ used to connect the CSN at the site $c \in C$ to the public network.

The model aims to minimize the sum of costs for installation, operation and maintenance of the network while maximizing the total income. As a customer who does not obtain the requested class of service pays nothing to the operator, this model allows us to guarantee the satisfaction of clients served, generating a good quality of service within the network. The objective function have three components which are the costs for installation, operation and maintenance of the BSs, the ASN-GWs and the CSNs (1), the cost of the links and interfaces

(2) and the cost of the network non-reliability (3).

$$C_N = \sum_{b \in B} \sum_{t \in T_B} C_B^t u_b^t + \sum_{a \in A} \sum_{t \in T_A} C_A^t v_a^t + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T_C} C_C^t w_c^t \quad (4.1)$$

$$C_L = \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} \sum_{l \in L_{BA}} n_{ba}^l C_{BA}^l D_{ba} + \sum_{a \in A} \sum_{a' \in A} \sum_{l \in L_{AA}} n_{aa'}^l C_{AA}^l D_{aa'} + \sum_{a \in A} \sum_{c \in C} \sum_{l \in L_{AC}} n_{ac}^l C_{AC}^l D_{ac} \\ + \sum_{c \in C} \sum_{l \in L_{CR}} n_{cr}^l C_{CR}^l D_{cr} \quad (4.2)$$

$$F_{reliab} = \sum_{s \in S} Pr(s) \left(\sum_{t \in T} \left(1 - \sum_{b \in B} Y_{tb}^s \right) R_{Q_t} \right) \quad (4.3)$$

The objective function is given by Equation (4).

$$\min (F_{reliab} + C_N + C_L) \quad (4.4)$$

The combination of the installing cost and the non-reliability cost in the objective function induce the simultaneous optimization of two contradictory terms. Both terms have been translated into the same unit (cost) and added in the objective function. This can be compared to the weighted aggregation method which is one of the classical methods to solve multi-objective problems [137]. In our implementation, the two terms of the objective function have the same weight. Indeed, the weights can be changed, depending on the importance of each term to the planner. Another method is to optimize one objective, posing the second one as a hard constraint.

The model is subject to the following constraints.

The *assignment constraints* forbid associating a TP or an equipment to a site that has not been used in the solution. It is also specified that the number of TPs assigned to a sector of a BS should not exceed the number of available channels per sector.

The *capacity constraints* impose that the number of equipments of a given type which are connected to an other equipment must not be greater than the number of interfaces available on this equipment. The traffic generated by the equipments of a defined type that are connected to an other equipment, must also not exceed the capacity of this equipment. Moreover, the total capacity of the links between two devices must be higher than the expected traffic between these two devices.

The *signal quality constraints* impose that the power of the signal received at a TP is greater than or equal to the sensitivity of the terminal (or terminals) at the TP. Furthermore, interferences reaching a given TP must be such that the minimum signal to interference ratio (SIR) according to the class of service required is respected. The propagation model used

is the one provided by Stanford University Interim (SUI), which has been proved to be the most accurate for WiMAX networks without direct line of sight [96].

For each failure scenario, the *failure constraints* prohibit the use of a node or a link which is assumed to be in failure during this scenario.

The *integrality and nonnegativity constraints* reduce the domain of decision variables to natural integers.

4.5 Numerical Results

The model was implemented in C++, using the academic solver ILOG CPLEX version 12.2. All experiments were performed on a computer Intel (R) Xeon (R) CPU X5690@3.47 GHz with 6 cores and 126 GB of RAM, and using the Linux operating system CentOS release 6.2.

The features of the BSs, ASN-GWs and CSNs used for the tests are respectively presented in Tables 4.1 - 4.3. Four types of link have been used. OC-3 and OC-12 links can serve to connect a BS to an ASN-GW. OC-48 links are used to connect an ASN-GW to a CSN or another ASN-GW. OC-192 links served to connect the CSNs to the public network. The features of these links are presented in Table 4.4. We generated 40 sets of instances on which we tested our model, considering a geographical area of 4 square kilometers (2x2).

The TPs are distributed uniformly in the coverage area. The BSs use sectorized antennas (3 sectors per BS) with 8 channels per sector. Three failure scenarios are considered for

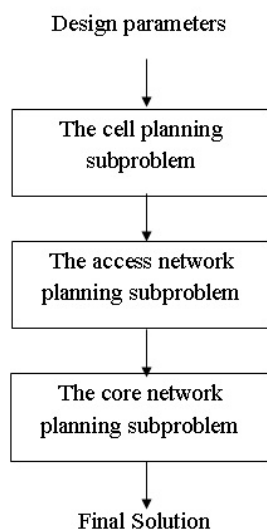


Figure 4.3 The sequential approach [133]

Table 4.1 Features of the BSs types

Characteristics	Type A	Type B
Max Power (dB)	150	300
Antenna gain (dBi)	15	18
Number of interfaces	100	200
Capacity of interfaces (Mb/s)	120	240
Cost (\$)	30,000	50,000

Table 4.2 Features of the ASN-GWs types

Characteristics	Type A	Type B
Number of interfaces to BSs	50	100
Number of interfaces to ASN-GWs	20	50
Number of interfaces to CSNs	10	20
Capacity of interfaces to BSs (Mb/s)	2,000	5,000
Capacity of interfaces to ASN-GWs (Mb/s)	6,000	15,000
Capacity of interfaces to CSNs (Mb/s)	10,000	20,000
Cost (\$)	50,000	90,000

Table 4.3 Features of the CSNs types

Characteristics	Type A	Type B
Number of interfaces to ASN-GWs	15	30
Number of interfaces to public network	2	5
Capacity of interfaces to ASN-GWs (Mb/s)	15,000	20,000
Capacity of interfaces to public network (Mb/s)	50,000	80,000
Cost (\$)	200,000	300,000

Table 4.4 Features of the links types

Link type	Capacity (Mb/s)	Cost (\$/km)
OC-3	155	1500
OC-12	622	4000
OC-48	2,500	12,000
OC-192	10,000	30,000

each problem. The features considered in the definition of the sets of test instances are the number of TPs, BSs, ASN-GWs and CSNs. Table 4.5 shows the composition of the sets. Each set contains 10 randomly generated instances. The results (cost and CPU time) obtained with the global model with survivability (G) are also given in the Table 4.5. We group the test instances by problem size and provide, for each size, the mean cost and the CPU time (minimum, mean and maximum). The time limit (TL) was set to 21,600 seconds. The proportion of instances of each set reaching the TL is indicated in Table 4.5.

Table 4.5 Composition of the test instances used and the results of the global model (G).

Instance set	Number of TPs	Number of BSs	Number of ASNs	Number of CSNs	Mean	CPU Time (s)			Proportion of TL (%)
					Network Cost (M\$)	Min	Mean	Max	
1	5	5	5	5	22.7	0.22	0.50	1.06	0
2	10	5	5	5	22.7	0.52	0.88	1.41	0
3	15	5	5	5	22.8	1.00	2.39	7.09	0
4	20	5	5	5	23.7	2.14	6508.24	<i>TL</i>	30
5	25	5	5	5	24.9	71.71	19452.15	<i>TL</i>	90
6	5	10	5	5	19.2	0.65	3.74	13.37	0
7	10	10	5	5	19.3	4.48	12.37	35.12	0
8	15	10	5	5	19.4	8.77	2239.80	<i>TL</i>	10
9	20	10	5	5	19.9	37.77	6834.78	<i>TL</i>	30
10	25	10	5	5	20.7	715.28	15779.72	<i>TL</i>	70
11	5	15	5	5	22.7	2.15	4.83	6.88	0
12	10	15	5	5	22.7	7.65	14.33	24.40	0
13	15	15	5	5	22.8	7.16	61.19	101.25	0
14	20	15	5	5	23.3	167.95	9574.93	<i>TL</i>	40
15	25	15	5	5	24.3	1120.27	19564.98	<i>TL</i>	90
16	5	20	5	5	22.7	5.84	9.68	22.35	0
17	10	20	5	5	22.7	9.36	25.87	47.66	0
18	15	20	5	5	22.7	16.43	2250.20	<i>TL</i>	10
19	20	20	5	5	23.2	415.66	7224.31	<i>TL</i>	30
20	25	20	5	5	24.2	1767.55	18175.95	<i>TL</i>	70
21	5	25	5	5	17.9	6.33	13.81	34.54	0
22	10	25	5	5	17.9	11.82	47.99	99.74	0
23	15	25	5	5	17.9	33.10	255.93	904.13	0
24	20	25	5	5	18.3	752.45	9974.68	<i>TL</i>	40
25	25	25	5	5	18.9	<i>TL</i>	<i>TL</i>	<i>TL</i>	100
26	15	5	5	10	15.6	1.44	2169.32	<i>TL</i>	10
27	15	5	10	5	18.1	7.79	2212.55	<i>TL</i>	10
28	15	5	10	10	15.3	10.87	4358.49	<i>TL</i>	20
29	15	10	5	10	16.5	3.82	2196.90	<i>TL</i>	10
30	15	10	10	5	21.5	32.33	140.58	353.22	0
31	15	10	10	10	13.6	19.15	2345.16	<i>TL</i>	10
32	15	15	5	10	14.9	5.17	23.33	79.79	0
33	15	15	10	5	19.9	64.21	388.56	1008.99	0
34	15	15	10	10	13.7	12.72	2274.89	<i>TL</i>	10
35	15	20	5	10	16.0	16.65	115.55	334.30	0
36	15	20	10	5	15.4	88.48	770.27	2443.64	0
37	15	20	10	10	12.7	37.57	4458.21	<i>TL</i>	20
38	15	25	5	10	14.5	38.62	223.81	850.79	0
39	15	25	10	5	16.6	52.40	2406.81	<i>TL</i>	10
40	15	25	10	10	14.4	11.04	4336.66	<i>TL</i>	20

Table 4.6 Results obtained with the sequential model (S) and comparison with model G

Instance set	Network Cost (M\$)	Sequential (S) CPU Time (s)			Proportion of TL (%)	Cost gap		
		Min	Mean	Max		Min (%)	Mean (%)	Max (%)
1	26.4	0.60	0.92	1.16	0	0	13	55
2	27.7	0.96	1.19	1.53	0	0	17	34
3	31.6	1.24	3.02	5.68	0	0	21	77
4	37.6	8.36	8660.78	<i>TL</i>	40	2	35	61
5	39.3	358.51	19483.25	<i>TL</i>	90	13	36	59
6	25.3	0.71	1.45	2.56	0	0	24	41
7	23.2	1.08	1.47	1.97	0	1	15	45
8	23.6	1.55	4.96	12.71	0	0	17	46
9	32.7	6.31	6690.58	<i>TL</i>	30	0	32	64
10	41.3	63.59	15789.17	<i>TL</i>	60	10	44	78
11	29.0	1.06	1.89	2.43	0	0	27	72
12	28.2	1.55	2.90	6.75	0	0	23	68
13	25.9	6.37	16.10	50.48	0	0	12	67
14	35.5	136.08	5261.23	<i>TL</i>	10	0	35	72
15	29.9	0.00	17689.14	<i>TL</i>	80	0	30	70
16	28.1	1.17	2.81	4.08	0	0	18	41
17	28.9	2.71	9.15	13.71	0	0	21	65
18	25.8	9.31	36.56	77.75	0	0	12	33
19	32.5	15.50	1239.76	5445.06	0	0	23	46
20	38.7	20388.30	21545.06	<i>TL</i>	90	0	29	67
21	25.9	2.86	7.02	10.73	0	6	28	57
22	23.7	7.62	12.27	20.68	0	1	22	46
23	23.9	11.25	43.46	118.68	0	0	22	57
24	24.3	0.00	756.39	3384.16	0	0	21	64
25	36.3	0.00	15223.98	<i>TL</i>	60	26	49	78
26	27.7	1.05	28.06	135.27	0	0	33	87
27	31.7	1.96	12.57	46.24	0	11	37	74
28	27.0	2.68	2172.69	<i>TL</i>	10	12	40	71
29	23.2	4.81	15.04	42.57	0	0	23	46
30	27.6	6.22	16.36	37.77	0	0	23	59
31	19.2	4.55	8.56	22.22	0	0	28	60
32	22.2	33.34	92.07	162.61	0	0	27	69
33	25.3	29.92	60.99	120.43	0	3	19	40
34	19.8	29.84	72.34	186.14	0	3	25	56
35	21.6	37.90	104.53	198.06	0	0	25	54
36	22.5	19.84	65.27	210.60	0	0	31	50
37	17.8	35.29	75.70	194.08	0	0	27	62
38	19.7	44.14	83.88	160.86	0	0	24	56
39	22.5	17.83	69.62	137.27	0	1	30	72
40	19.0	51.72	93.57	194.78	0	0	25	64

As we can note in Table 4.5, the mean CPU time seems to increase exponentially with the number of TPs. The increase in computation time, while present, is less representative when the number of TPs is fixed and we vary the other parameters. We can also see that the TL have often been reached on the problems with 25 TPs without the proof of optimality of the obtained solution has been established. The TL have been reached for all the 10 instances with 25 TPs and 25 BSs. The network cost also increases with the number of TPs. This can be explained by the need of more BSs to serve all the TPs. This cost can be reduced by the addition of potential sites for installation of BSs, ASN-GWS or CSNS. This makes it possible for the algorithm to find sites closer to each other, thereby reducing costs of links installed in the network. Other site options become also available in order to reduce the penalty due to failure scenarios.

In order to demonstrate the contribution of the global approach, we developed a sequential model (S), with the same constraints as the global model, and tested it on the same instances of the problem. The sequential approach, described in Figure 4.3, solves the three subproblems successively; the results obtain from the cells network subproblem are entry for the access network subproblem and the results from the access network are entry for the core network subproblem. The computational results obtained with this model are provided in Table 4.6. This table shows, for each set, the mean cost of the solutions obtained on the 10 test instances by the model S and the CPU time (minimum, mean and maximum) of the algorithm. The proportion of instances of each set reaching the TL is also indicated. The minimum, the mean and the maximum of the cost gaps $((S - G)/S)$ with the model G, expressed in percentage, are also calculated for each set of test instances.

As can be observed in Table 4.6, the cost of the solutions obtained by the model G are always less or equal to the cost of those obtained by the model S. The mean cost gap for each set of instances is at least 12%. The cost gap between the two solutions can reach 87% for the instances solved. The mean cost gap for all the instances is about 26%. The global model with survivability thus allows the network provider to save about a quarter of the network costs. The gaps between the two solutions does not depend visually on the size of the problem. The CPU time looks the same as for the global model. We note that the sequential model's algorithm is, on average, faster than the global model's algorithm. However, the sequential model is sometimes slower than the global model (see instances sets 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 and 32). Indeed, the sequential algorithm actually solves three different models, one after the other. Sometimes one of the models (specially the cell planning model) is difficult to solve and the algorithm takes a long time to do it. The global model is more constrained and the solver can eliminate some branches earlier and thus save time in the resolution. For example, on the test instance #2 of the set #3, which has 15 TPs, 5 BSs, 5

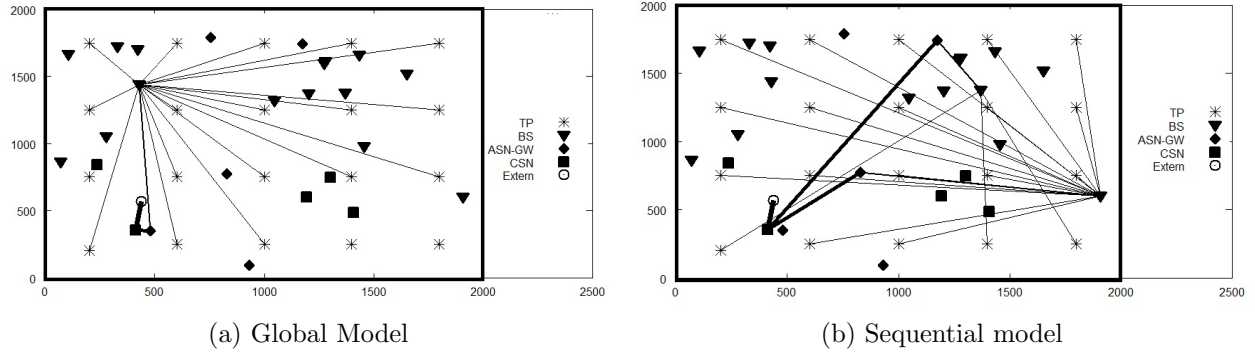


Figure 4.4 Illustration of the results obtained by the global and sequential models on one of the instances of the set #15

ASN-GWs and 5 CSNs, the resolution of the sequential model took 5.68s (4.78s for the cell planning problem) while the global model run it in 1.76s. On the test instance #5 of the set #4, which has 20 TPs, 5 BSs, 5 ASN-GWs and 5 CSNs, the sequential model reach the time limit (21600s) on the cell planning problem while the global model run the overall model in 5.21s and found an optimal solution.

Figure 4.4 shows the solutions returned by the global and sequential models on one of the test instances of the set #15. This instance is constituted of 20 TPs, 15 BSs, 5 ASN-GWs and 5 CSNs. The cost gap between the two solutions is 72%. Note in this illustration that the algorithm with the global model, having access to all the information about the network, does not serve some TPs because the income generated is less than installing another BS and another ASN-GW (Figure 4.4a). The sequential model algorithm (Figure 4.4b) has made local decisions, resulting in a higher cost network. The purpose of the proposed global model is precisely to avoid these bad choices which can be very costly to the network provider.

Our results confirm those of the model proposed by St-Hilaire *et al.* [133]. However, their model did not consider failure tolerance in the network. To demonstrate the relevance of taking into account the failure scenarios, we also tested global model without the failure constraints (NS). For the model NS, we use the global model G in which we consider only one scenario that is the scenario without failure. The model is then solved ignoring all the failure constraints. A survivability cost, which is the loss of income generated by the failures after the network has been installed, is also calculated. The computational results obtained with this model are given in Table 4.7. Table 4.7 presents, for each set of instances, the means of the network cost, the survivability cost and the total cost of the solutions obtained on the 10 test instances by the model NS. The mean of the execution time (CPU time) of the algorithm and the proportion of instances reaching the TL are also indicated. The minimum,

Table 4.7 Results obtained with the model without survivability (NS) and comparison with model G

Instance set	Mean Cost			Mean CPU Time(s)	Proportion of TL(%)	Cost gap		
	Network (M\$)	Survivability (M\$)	Total (M\$)			Min (%)	Mean (%)	Max (%)
1	22.6	5.0	27.5	2.65	0	0	17	34
2	22.6	7.8	30.4	1.99	0	0	25	70
3	22.8	11.6	34.4	2163.14	10	0	29	65
4	23.3	12.8	36.0	4340.74	20	0	32	53
5	24.3	22.4	46.7	15134.91	70	0	42	74
6	19.2	2.7	21.8	2.14	0	0	13	28
7	19.2	9.2	28.3	3.25	0	0	30	45
8	19.4	11.4	30.8	12.10	0	0	33	55
9	19.8	12.9	32.7	4343.53	20	0	33	66
10	20.3	21.8	42.0	13087.98	60	0	45	69
11	22.7	2.0	24.6	0.36	0	0	11	66
12	22.7	4.5	27.2	1.98	0	0	20	43
13	22.8	5.2	28.0	8.79	0	0	15	37
14	23.3	10.0	33.3	10823.48	50	0	28	74
15	23.7	20.5	44.3	19457.59	90	0	36	70
16	22.6	1.5	24.1	0.67	0	0	7	40
17	22.6	7.3	29.9	2.53	0	0	24	41
18	22.7	9.3	32.0	2080.68	0	0	27	67
19	23.1	13.0	36.1	6551.64	30	0	30	73
20	23.6	18.3	41.8	15180.72	70	0	36	74
21	17.8	4.0	21.8	0.67	0	0	14	35
22	17.8	9.5	27.3	1.60	0	0	31	63
23	17.8	9.0	26.8	3.68	0	0	25	30
24	18.3	16.1	34.4	10843.00	50	0	40	70
25	18.8	23.	41.7	19469.36	90	0	51	75
26	15.4	8.7	24.1	2164.74	10	0	29	72
27	17.9	11.3	29.1	1661.15	0	0	32	54
28	14.8	10.8	25.6	2165.99	10	0	36	64
29	16.5	11.2	27.6	25.65	0	0	34	61
30	21.4	10.2	31.6	24.24	0	0	27	67
31	13.6	5.7	19.4	2187.79	10	0	26	82
32	14.9	6.4	21.4	4.11	0	0	22	60
33	19.9	11.4	31.3	8.04	0	0	33	67
34	13.7	10.8	24.5	2167.78	10	0	35	65
35	16.0	9.9	25.9	19.20	0	0	33	64
36	15.4	9.9	25.2	49.56	0	0	32	60
37	12.6	8.2	20.8	66.96	0	0	30	56
38	14.5	10.8	25.3	9.03	0	0	37	67
39	16.6	14.3	30.8	3496.95	10	0	44	65
40	14.3	10.3	24.6	2167.51	10	0	35	65

the mean and the maximum of the cost gaps $((NS - G)/NS)$ with the model G, expressed in percentage, are calculated for each set of test instances, using the total cost obtained.

As can be gathered from Table 4.7, the mean cost of the network given by the model NS is always less or equal to the cost of the network installed using the model G. That is because the model NS does not consider the failure scenarios and have then more choices of sites to install the equipments. However, the total cost (with the survivability cost) of the network from the model NS is always greater or equal to the cost of the network obtained by the model G. The mean cost gap for each set of instances is at least 7%. The cost gap between the two solutions can reach 82% for the instances solved. The mean cost gap for all the instances is about 30%. The CPU time follows the same pattern as the two previous models. The gap between the costs obtained by the two models appears to increase with the number of TPs. Indeed, the more TPs to be served, the greater is the cost of the network survivability. Taking into account the possible failure scenarios when planning the network then ensures the network provider some extra income, even if that means to make a greater investment for the network installation.

Figure 4.5 shows the solutions returned by the global model with survivability and global model without survivability on one of the test instances of the set #15. This instance is constituted of 20 TPs, 15 BSs, 5 ASN-GWs and 5 CSNs. The cost gap between the two solutions is -1% without survivability cost and 65% with survivability cost. Due to the position of the BSs compared to the TPs and given the number of available frequency channels for each BS sector, the BS site #5 is the best position to be able to serve all TPs. However, failure scenarios predict that the BS installed on this site will be unavailable for 50% of the time. The algorithm of the model NS (Figure 4.5b), not having access to this information, installed a BS on the site #5 and assigned all the TPs to that BS in order to avoid penalties for non-serving a TP. The algorithm of the model G (Figure 4.5a) preferred the BS site #13 for which there was no planned failure, even if it does not serve two TPs by lack of available frequency channels. This choice, although it seemed more expensive, has proven to be a good choice thereafter.

4.6 Conclusion and Further Work

In this paper, a global planning model that takes into account the survivability is proposed for WiMAX networks. The model was solved exactly, by Integer Linear Programming, and the results were compared with those obtained sequentially. In order to show the impact of including the survivability in the model, a global model without the failure constraints has also been conceived and compared to the global model proposed.

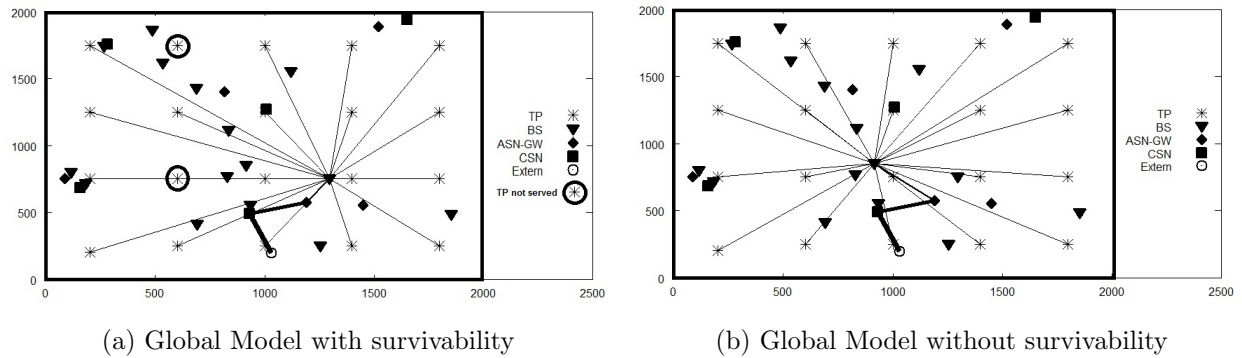


Figure 4.5 Illustration of the results obtained by the models G and NS on one of the instances of the set #15

It has been shown that the global model outperforms the sequential one, giving results with a significant gain in cost performance. The global model without survivability provides solutions that generally cost a little less expensive to implement. However, these solutions are extremely costly in terms of survivability. The cost of that survivability increases with the number of TPs covered. The global model incorporating survivability constraints proves to be the best choice for the planner.

Nevertheless, only small instances could be solved optimally with the exact method used, the execution time increasing highly with the problem size. In fact, WiMAX technology is designed for Metropolitan Area Networks (MAN) which are over 50 km in diameter. The population in these areas is more than 100,000 inhabitants. Assuming a density of 100 inhabitants per TP, the minimum number of TPs for a problem of real life would be 1,000. The sizes of the instances solved by the exact method (4 square kilometers and 25 TPs) are then extremely small compared to those of real-life instances. Moreover, the interfaces considered are no longer used in new installations. We use them in the intent to maintain some basis for comparison with the work of St-Hilaire *et al.* [133] as they use the same interfaces. Despite the fact that we have reached the same conclusion, namely that the global model gives better results than the sequential model, we could not compare our results with those of St-Hilaire *et al.* [133] because of the disparity between the UMTS and WiMAX systems.

Several research avenues are open at this point. The global planning problem for mobile networks is composed of three subproblems that are classified NP-hard. The tests performed in this paper show that the exact method proposed is limited in the size of instances that can be solved. It would be interesting to develop heuristic or metaheuristics algorithms that can find good solutions in a reasonable time for larger instances. We must also develop an effective method for finding lower bounds in order to evaluate the performance of the heuristics

on these instances. Our objective function considers both the minimization of network cost and maximizing the survivability. These two objectives are contradictory. A multiobjective optimization method would consider these two objectives separately to see their respective effects on the overall cost of the network. This will enable providers to make more informed choices when installing the network. The model proposed in this paper considers a greenfield network. Another avenue of research would be to develop models that will integrate WiMAX to existing networks.

Appendix A Model Formulation

A.1 Notation

Sets

- T : the set of TPs.
- B, A, C : respectively the set of potential sites to install the BSs, the ASN-GWs and the CSNs.
- F : the set of channels for each BS.
- K : the set of sectors for each BS.
- Q : the set of available service classes.
- S : the set of failure scenarios.
- T_A, T_B, T_C : respectively the set of ASN-GW types, BS types and CSN types.
- $L_{BA}, L_{AA}, L_{AC}, L_{CR}$: respectively the set of interface types that can be used to connect a BS to an ASN-GW, an ASN-GW to another, an ASN-GW to a CSN and a CSN to the public network.

Cost Parameters

- C_B^t, C_A^t, C_C^t : respectively the cost (including installation, operation and maintenance costs) of a BS of type $t \in T_B$, of an ASN-GW of type $t \in T_A$ and of a CSN of type $t \in T_C$ in dollars.
- $C_{BA}^{l_1}, C_{AA}^{l_2}, C_{AC}^{l_3}, C_{CR}^{l_4}$: respectively the link and interface costs (including installation, operation and maintenance costs) for connecting a BS to an ASN-GW, an ASN-GW to another, an ASN-GW to a CSN and a CSN to the public network with $l_1 \in L_{BA}, l_2 \in L_{AA}, l_3 \in L_{AC}, l_4 \in L_{CR}$ in dollars/kilometer.
- R_q : Income generated by serving a TP requesting the service class $q \in Q$ in dollars.

Other Constants

- Q_t : the service class requested by the TP $t \in T$.
- α_B^t : the maximum number of interfaces that can be installed in a BS of type $t \in T_B$.
- β_B^t : the switch fabric capacity by interface of a BS of type $t \in T_B$ (bps).
- $\alpha_{AB}^t, \alpha_{AA}^t, \alpha_{AC}^t$: respectively the maximum number of interfaces that can be installed in an ASN-GW of type $t \in T_A$ to connect the BSs, the ASN-GWs and the CSNs.
- $\beta_{AB}^t, \beta_{AA}^t, \beta_{AC}^t$: respectively the switch fabric capacity by interface of an ASN-GW of type $t \in T_A$ to connect a BS, an ASN-GW and a CSN (bps).
- $\alpha_{CA}^t, \alpha_{CR}^t$: respectively the maximum number of interfaces that can be installed in a CSN of type $t \in T_C$ to connect the ASN-GWs and the public network.
- $\beta_{CA}^t, \beta_{CR}^t$: respectively the switch fabric capacity by interface of a CSN of type $t \in T_C$ to connect an ASN-GW and the public network (bps).
- $\beta_{BA}^{l_1}, \beta_{AA}^{l_2}, \beta_{AC}^{l_3}, \beta_{CR}^{l_4}$: respectively the capacity of a link of type $l_1 \in L_{BA}, l_2 \in L_{AA}, l_3 \in L_{AC}, l_4 \in L_{CR}$ (bps).
- P_{max}^t : the maximum emission power of a BS of type $t \in T_B$ (dBm).
- G^t : the gain of the antenna of a BS of type $t \in T_B$ (dB).
- GRF : the gain reduction factor (3 dB).
- S_t : the sensibility of the mobile terminal in TP $t \in T$ (dBm).
- δ_q : the minimum signal versus interferences ratio to re-use the channels with the service class $q \in Q$ (dBm).
- $Tr_{tt'}$: the traffic demand between two TPs $t \in T, t' \in T$ (bps).
- D_f : the bandwidth of the channel $f \in F$ (bps).
- D_q^{min} : the minimum bandwidth requested by the service class $q \in Q$ (bps).
- x_n, y_n : the coordinates of node at the site $n, n \in (T \cup B \cup A \cup C)$.
- D_{xy} : the distance between two nodes at the sites $x \in (T \cup B \cup A \cup C)$ and $y \in (T \cup B \cup A \cup C)$ in meters.
- D_{cr} : the distance between a CSN at the site $c \in C$ and the public network in meters.
- d_0 : the reference distance ($d_0 = 100meters$).
- λ_f : the wavelength of the carrier of the channel $f \in F$ in meters.
- h_b : the height of the antenna of the BS installed at the site $b \in B$ in meters.
- h_t : the height at which is the mobile terminal at the TP $t \in T$ in meters.
- C_f : the correction factor of the frequency of channel $f \in F$.
- C_t : the correction factor of the antenna of the mobile terminal at the TP $t \in T$.
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: the morphological constants depending on the area.
- φ : a random constant.
- $Pr(s)$: the probability for the network to be in the failure scenario $s \in S$.

- PaN_n^s : the condition of the node at the site $n \in (B \cup A \cup C)$ in the scénario $s \in S$.
- PaL_{ax}^s : the condition of the potential link between the node at the site $a \in A$ and the node at the site $x \in (B \cup A \cup C)$ in the scénario $s \in S$.
- PaL_{cr}^s : the condition of the potential link between the CSN installed at the site $c \in C$ and the public network in the scénario $s \in S$.
- Y_{tbk} : a 0-1 constant such that $Y_{tbk} = 1$ if the sector $k \in K$ of the BS installed at site $b \in B$ is the one which directly face the TP $t \in T$ and $Y_{tbk} = 0$ else.
- A_{tbkf} : the total attenuation between the signal transmitted by the BS installed at the site $b \in B$ and the mobile terminal at the TP $t \in T$ on the channel $f \in F$ of sector $k \in K$ (dB).
- N : an arbitrary large number.

Decision Variables

- u_b^t : a 0-1 variable such that $u_b^t = 1$ if and only if a BS of type $t \in T_B$ is installed at site $b \in B$.
- v_a^t : a 0-1 variable such that $v_a^t = 1$ if and only if an ASN-GW of type $t \in T_A$ is installed at site $a \in A$.
- w_c^t : a 0-1 variable such that $w_c^t = 1$ if and only if a CSN of type $t \in T_C$ is installed at site $c \in C$.
- Y_{tb}^s : a 0-1 variable such that $Y_{tb}^s = 1$ if and only if TP $t \in T$ is connected to the BS installed at site $b \in B$ in the scenario $s \in S$.
- Y_{tbk}^s : a 0-1 variable such that $Y_{tbk}^s = 1$ if and only if TP $t \in T$ is connected to the sector $k \in K$ of the BS installed at site $b \in B$ in the scenario $s \in S$.
- Y_{tbkf}^s : a 0-1 variable such that $Y_{tbkf}^s = 1$ if and only if the channel $f \in F$ is assigned to the TP $t \in T$, connected to the sector $k \in K$ of the BS installed at site $b \in B$ in the scenario $s \in S$.
- Pa_{ba} : a 0-1 variable such that $Pa_{ba} = 1$ if and only if the BS installed at site $b \in B$ is connected to the ASN-GW installed at site $a \in A$.
- $Pa_{aa'}$: a 0-1 variable such that $Pa_{aa'} = 1$ if and only if the ASN-GW installed at site $a \in A$ is connected to the ASN-GW installed at site $a' \in A$.
- Co_{ac} : a 0-1 variable such that $Co_{ac} = 1$ if and only if the ASN-GW installed at site $a \in A$ is connected to the CSN installed at site $c \in C$.
- Cr_{cr} : a 0-1 variable such that $Cr_{cr} = 1$ if and only if the CSN installed at site $c \in C$ is connected to the public network.
- $Pass_{ta}^s$: a 0-1 variable such that $Pass_{ta}^s = 1$ if and only if TP $t \in T$ is connected to the ASN-GW installed at site $a \in A$ via a BS in the scenario $s \in S$, i.e. the TP is

connected to a BS that is connected to the ASN-GW.

- $Pass_{tba}^s$: a 0-1 variable such that $Pass_{tba}^s = 1$ if and only if TP $t \in T$ is connected to the ASN-GW installed at site $a \in A$ via the BS installed at the site $b \in B$ in the scenario $s \in S$.
- CoM_{tc}^s : a 0-1 variable such that $CoM_{tc}^s = 1$ if and only if TP $t \in T$ is connected to the CSN installed at site $c \in C$ via a BS and an ASN-GW in the scenario $s \in S$.
- CoM_{tac}^s : a 0-1 variable such that $CoM_{tac}^s = 1$ if and only if TP $t \in T$ is connected to the CSN installed at site $c \in C$ via the ASN-GW installed at site $a \in A$ in the scenario $s \in S$.

Other Variables

- n_{ba}^l : the number of interfaces of type $l \in L_{BA}$ used to connect the BS at the site $b \in B$ to the ASN-GW at the site $a \in A$.
- $n_{aa'}^l$: the number of interfaces of type $l \in L_{AA}$ used to connect the ASN-GW at the site $a \in A$ to the ASN-GW at the site $a' \in A$.
- n_{ac}^l : the number of interfaces of type $l \in L_{AC}$ used to connect the ASN-GW at the site $a \in A$ to the CSN at the site $c \in C$.
- n_{cr}^l : the number of interfaces of type $l \in L_{CR}$ used to connect the CSN at the site $c \in C$ to the public network.
- P_{tbkf}^s : the power of the signal received on the canal $f \in F$ of the sector $k \in K$ of the BS installed at site $b \in B$ by the TP $t \in T$, in the scenario $s \in S$.

A.2 Computation of Constant Parameters

The Equations (A.1)-(A.3) determine, for each TP and each BS, the sector of the BS that face directly the TP. This information is used later to assign a sector to the TP in the solution.

$$Y_{tb0} = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_t \geq x_b) \wedge ((y_t \geq y_b) \vee (y_b - y_t \leq D_{tb}/2)) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (t \in T, b \in B) \quad (\text{A.1})$$

$$Y_{tb1} = \begin{cases} 1 & \text{if } (y_t < y_b) \wedge (y_b - y_t > D_{tb}/2) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (t \in T, b \in B) \quad (\text{A.2})$$

$$Y_{tb2} = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_t < x_b) \wedge ((y_t \geq y_b) \vee (y_b - y_t \leq D_{tb}/2)) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (t \in T, b \in B) \quad (\text{A.3})$$

The *propagation model* used is given by Equations (A.4)-(A.6). It is the one provided by Stanford University Interim (SUI), which has been proved to be the most accurate for WiMAX networks without direct line of sight [96].

$$Att_{tbkf} = \max(0, (20 \log(4\pi d_0/\lambda_f) + 10(\alpha - \beta h_b + \gamma/h_b) \log(D_{tb}/d_0) + C_f + C_t + \phi)),$$

$$(t \in T, b \in B, k \in K, f \in F) \quad (A.4)$$

$$C_f = 6 \log \left(\frac{300}{2000\lambda_f} \right), (f \in F) \quad (A.5)$$

$$C_t = \begin{cases} -10.8 \log \left(\frac{h_t}{2000} \right) \text{ for lands of type A or B} \\ -20 \log \left(\frac{h_t}{2000} \right) \text{ for lands of type C} \end{cases} (t \in T) \quad (A.6)$$

A.3 The Cost Function

The three components of the objective function are defined by Equations (A.7) to (A.9). Equation (A.6) shows the total cost of the nodes (BS, ASN-GW and CSN) used in the solution. This cost includes all costs for installation, operation and maintenance of the BSs, the ASN-GWs and the CSNs. Equation (A.8) gives the cost of the interfaces, consisting of all the costs for connecting BSs to ASN-GWs, ASN-GWs one to another, ASN-GWs to CSNs and CSNs to the public network. Equation (A.9) estimates the possible loss of income according to the probability of each scenario to be active. Loss of income is generated by the TPs not served during a scenario $s \in S$, i.e. those which do not get the required class of service when that scenario is active.

$$C_N = \sum_{b \in B} \sum_{t \in T_B} C_B^t u_b^t + \sum_{a \in A} \sum_{t \in T_A} C_A^t v_a^t + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T_C} C_C^t w_c^t \quad (A.7)$$

$$C_L = \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} \sum_{l \in L_{BA}} n_{ba}^l C_{BA}^l D_{ba} + \sum_{a \in A} \sum_{a' \in A} \sum_{l \in L_{AA}} n_{aa'}^l C_{AA}^l D_{aa'} + \sum_{a \in A} \sum_{c \in C} \sum_{l \in L_{AC}} n_{ac}^l C_{AC}^l D_{ac} \\ + \sum_{c \in C} \sum_{l \in L_{CR}} n_{cr}^l C_{CR}^l D_{cr} \quad (A.8)$$

$$F_{reliab} = \sum_{s \in S} Pr(s) \left(\sum_{t \in T} \left(1 - \sum_{b \in B} Y_{tb}^s \right) R_{Qt} \right) \quad (A.9)$$

A.4 The Model

As said before, the objective of the model is to minimize the sum of costs for installation, operation and maintenance of the network while maximizing the total income. The objective

function is given by Equation (A.10).

$$\min (F_{reliab} + C_N + C_L) \quad (\text{A.10})$$

The model is subject to the following constraints.

The *nodes type uniqueness constraints* ((A.11)-(A.13)) impose that at most one type of BS, ASN-GW or CSN is installed at a given site.

$$\sum_{t \in T_B} u_b^t \leq 1, \quad (b \in B) \quad (\text{A.11})$$

$$\sum_{t \in T_A} v_a^t \leq 1, \quad (a \in A) \quad (\text{A.12})$$

$$\sum_{t \in T_C} w_c^t \leq 1, \quad (c \in C) \quad (\text{A.13})$$

The *TPs assignment constraints* forbid associating a TP or an equipment to a site that has not been used in the solution (A.14). It is also specified that a TP cannot be assigned to more than a BS (A.15).

$$Y_{tb}^s \leq \sum_{t' \in T_B} u_b^{t'}, \quad (s \in S, t \in T, b \in B) \quad (\text{A.14})$$

$$\sum_{b \in B} Y_{tb}^s \leq 1, \quad (t \in T, s \in S) \quad (\text{A.15})$$

The *BSs assignment constraints* specify that a BS site is linked to an ASN-GW site if and only if the equipments are installed on both sites ((A.16)-(A.17)). Moreover, a BS can be connected to only one ASN-GW (A.16). Links are used between a BS and an ASN-GW if and only if they are connected in the solution ((A.18)-(A.19)).

$$\sum_{a \in A} Pa_{ba} = \sum_{t \in T_B} u_b^t, \quad (b \in B) \quad (\text{A.16})$$

$$Pa_{ba} \leq \sum_{t \in T_A} v_a^t, \quad (a \in A, b \in B) \quad (\text{A.17})$$

$$n_{ba}^l \leq Pa_{ba} N, \quad (a \in A, b \in B, l \in L_{AB}) \quad (\text{A.18})$$

$$n_{ba}^l \geq Pa_{ba}, \quad (a \in A, b \in B, l \in L_{AB}) \quad (\text{A.19})$$

The *ASN-GWs assignment constraints* impose that an ASN-GW site is linked to another ASN-GW site or a CSN site if and only if the equipments are installed on both sites ((A.20)-(A.23)). Furthermore, an ASN-GW can be assigned to only one ASN-GW or to only one

CSN, not to both (A.24). Equations (A.25)-(A.28) specify that links are used between two equipments if and only if they are connected in the solution. An ASN-GW cannot be assigned to itself (A.29) nor to an ASN-GW that is already assigned to it (A.30). This constraint prevents from loops and bad solutions where no CSN will be used.

$$\sum_{a' \in A} Paa_{aa'} \leq \sum_{t \in T_A} v_a^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.20})$$

$$Paa_{aa'} \leq \sum_{t \in T_A} v_{a'}^t, \quad (a \in A, a' \in A) \quad (\text{A.21})$$

$$\sum_{c \in C} Co_{ac} \leq \sum_{t \in T_A} v_a^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.22})$$

$$Co_{ac} \leq \sum_{t \in T_C} w_c^t, \quad (a \in A, c \in C) \quad (\text{A.23})$$

$$\sum_{a' \in A} Paa_{aa'} + \sum_{c \in C} Co_{ac} = \sum_{t \in T_A} v_a^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.24})$$

$$n_{aa'}^l \leq Paa_{aa'} N, \quad (a \in A, a' \in A, l \in L_{AA}) \quad (\text{A.25})$$

$$n_{ac}^l \leq Co_{ac} N, \quad (a \in A, c \in C, l \in L_{AC}) \quad (\text{A.26})$$

$$n_{aa'}^l \geq Paa_{aa'}, \quad (a \in A, a' \in A, l \in L_{AA}) \quad (\text{A.27})$$

$$n_{ac}^l \geq Co_{ac}, \quad (a \in A, c \in C, l \in L_{AC}) \quad (\text{A.28})$$

$$Paa_{aa} = 0, \quad (a \in A) \quad (\text{A.29})$$

$$Paa_{aa'} + Paa_{a'a} \leq 1, \quad (a \in A, a' \in A) \quad (\text{A.30})$$

The *CSNs assignment constraints* specify that a CSN site is linked to the public network if and only if a CSN is installed on the site (A.31). Links are used between a CSN and the public network if and only if they are connected in the solution ((A.32)-(A.33)).

$$Cr_{cr} = \sum_{t \in T_C} w_c^t, \quad (c \in C) \quad (\text{A.31})$$

$$n_{cr}^l \leq Cr_{cr} N, \quad (c \in C, l \in L_{CR}) \quad (\text{A.32})$$

$$n_{cr}^l \geq Cr_{cr}, \quad (c \in C, l \in L_{CR}) \quad (\text{A.33})$$

Equations ((A.34)-(A.37)) impose that a TP is connected to an ASN-GW via a BS if and only if the TP is connected to that BS and the BS is connected to the ASN-GW. A TP can

be connected to at most one ASN-GW (A.38).

$$Pass_{tba}^s \leq Y_{tb}^s, \quad (t \in T, a \in A, b \in B, s \in S) \quad (\text{A.34})$$

$$Pass_{tba}^s \leq Pa_{ba}, \quad (t \in T, a \in A, b \in B, s \in S) \quad (\text{A.35})$$

$$Pass_{tba}^s \geq Y_{tb}^s + Pa_{ba} - 1, \quad (t \in T, a \in A, b \in B, s \in S) \quad (\text{A.36})$$

$$Pass_{ta}^s = \sum_{b \in B} Pass_{tba}^s, \quad (t \in T, a \in A, s \in S) \quad (\text{A.37})$$

$$Pass_{ta}^s \leq 1, \quad (t \in T, a \in A, s \in S) \quad (\text{A.38})$$

Equations ((A.39)-(A.42)) impose that a TP is connected to an CSN via an ASN-GW if and only if the TP is connected to that ASN-GW and the ASN-GW is connected to the CSN. A TP can be connected to at most one CSN (A.43).

$$CoM_{tac}^s \leq Pass_{ta}^s, \quad (t \in T, a \in A, c \in C, s \in S) \quad (\text{A.39})$$

$$CoM_{tac}^s \leq Co_{ac}, \quad (t \in T, a \in A, c \in C, s \in S) \quad (\text{A.40})$$

$$CoM_{tac}^s \geq Pass_{ta}^s + Co_{ac} - 1, \quad (t \in T, a \in A, c \in C, s \in S) \quad (\text{A.41})$$

$$CoM_{tc}^s = \sum_{a \in A} CoM_{tac}^s, \quad (t \in T, c \in C, s \in S) \quad (\text{A.42})$$

$$CoM_{tc}^s \leq 1, \quad (t \in T, c \in C, s \in S) \quad (\text{A.43})$$

The *frequency channel assignment constraints* ((A.44)-(A.45)) impose that only one TP is assigned to a channel on a BS sector and only one channel is attributed to a TP. Equation ((A.46)-(A.47)) state that a TP is assigned to a BS sector if and only if it is assigned to this BS; the TP is assigned to the BS sector that faces it directly. It is also specified that a served TP must obtain at least the minimum bandwidth corresponding to its class of service (A.48).

$$\sum_{t \in T} Y_{tbkf}^s \leq 1, \quad (s \in S, b \in B, k \in K, f \in F) \quad (\text{A.44})$$

$$\sum_{f \in F} Y_{tbkf}^s = Y_{tbk}^s, \quad (s \in S, t \in T, b \in B, k \in K) \quad (\text{A.45})$$

$$\sum_{k \in K} Y_{tbk}^s = Y_{tb}^s, \quad (s \in S, t \in T, b \in B) \quad (\text{A.46})$$

$$Y_{tbk}^s = Y_{tbk} Y_{tb}^s, \quad (s \in S, t \in T, b \in B, k \in K) \quad (\text{A.47})$$

$$D_{Qt}^{min} \leq N \left(1 - \sum_{b \in B} Y_{tb}^s \right) + \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} Y_{tbkf}^s D_f, \quad (s \in S, t \in T) \quad (\text{A.48})$$

The *capacity constraints at the interface level* ((A.49)-(A.54)) impose that the number of equipments of a given type which are connected to an other equipment must not exceed the number of interfaces available on this equipment. An installed BS must be connected to at least one ASN-GW (A.55). An installed ASN-GW must be connected to at least one BS (A.56); it must also be connected to a CSN or another ASN (A.57). An installed CSN must be connected to at least one ASN-GW (A.58) and to the public network (A.59).

$$\sum_{l \in L_{AB}} \sum_{a \in A} n_{ba}^l \leq \sum_{t \in T_B} \alpha_B^t u_b^t, \quad (b \in B) \quad (\text{A.49})$$

$$\sum_{l \in L_{AB}} \sum_{b \in B} n_{ba}^l \leq \sum_{t \in T_A} \alpha_{AB}^t v_a^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.50})$$

$$\sum_{l \in L_{AA}} \sum_{a' \in A} n_{aa'}^l \leq \sum_{t \in T_A} \alpha_{AA}^t v_a^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.51})$$

$$\sum_{l \in L_{AC}} \sum_{c \in C} n_{ac}^l \leq \sum_{t \in T_A} \alpha_{AC}^t v_a^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.52})$$

$$\sum_{l \in L_{AC}} \sum_{a \in A} n_{ac}^l \leq \sum_{t \in T_C} \alpha_{CA}^t w_c^t, \quad (c \in C) \quad (\text{A.53})$$

$$\sum_{l \in L_{CR}} n_{cr}^l \leq \sum_{t \in T_C} \alpha_{CR}^t w_c^t, \quad (c \in C) \quad (\text{A.54})$$

$$\sum_{l \in L_{AB}} \sum_{a \in A} n_{ba}^l \geq \sum_{t \in T_B} u_b^t, \quad (b \in B) \quad (\text{A.55})$$

$$\sum_{l \in L_{AB}} \sum_{b \in B} n_{ba}^l \geq \sum_{t \in T_A} v_a^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.56})$$

$$\sum_{l \in L_{AC}} \sum_{c \in C} n_{ac}^l + \sum_{l \in L_{AA}} \sum_{a' \in A} n_{aa'}^l \geq \sum_{t \in T_A} v_a^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.57})$$

$$\sum_{l \in L_{AC}} \sum_{a \in A} n_{ac}^l \geq \sum_{t \in T_C} w_c^t, \quad (c \in C) \quad (\text{A.58})$$

$$\sum_{l \in L_{CR}} n_{cr}^l \geq \sum_{t \in T_C} w_c^t, \quad (c \in C) \quad (\text{A.59})$$

The *capacity constraints at switch fabric level* ((A.60)-(A.67)) specify that the traffic carried by the equipments of a defined type that are connected to an other equipment, must not

exceed the capacity of this equipment.

$$\sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} (Y_{tb}^s - 1 + \sum_{b' \in B} Y_{t'b'}^s) Tr_{tt'} \leq \sum_{t'' \in T_B} u_b^{t''} \alpha_B^{t''} \beta_B^{t''}, \quad (b \in B, s \in S) \quad (\text{A.60})$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} (Y_{tb}^s - 1 + \sum_{b' \in B} Y_{t'b'}^s) Tr_{t't} \leq \sum_{t'' \in T_B} u_b^{t''} \alpha_B^{t''} \beta_B^{t''}, \quad (b \in B, s \in S) \quad (\text{A.61})$$

$$\sum_{l \in L_{AB}} \sum_{a \in A} n_{ba}^l \beta_{BA}^l \leq \sum_{t \in T_B} u_b^t \alpha_B^t \beta_B^t, \quad (b \in B) \quad (\text{A.62})$$

$$\sum_{l \in L_{AB}} \sum_{b \in B} n_{ba}^l \beta_{BA}^l \leq \sum_{t \in T_A} v_a^t \alpha_{AB}^t \beta_{AB}^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.63})$$

$$\sum_{l \in L_{AC}} \sum_{c \in C} n_{ac}^l \beta_{AC}^l \leq \sum_{t \in T_A} v_a^t \alpha_{AC}^t \beta_{AC}^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.64})$$

$$\sum_{l \in L_{AC}} \sum_{a \in A} n_{ac}^l \beta_{AC}^l \leq \sum_{t \in T_C} w_c^t \alpha_{CA}^t \beta_{CA}^t, \quad (c \in C) \quad (\text{A.65})$$

$$\sum_{l \in L_{AA}} \sum_{a' \in A} n_{aa'}^l \beta_{AA}^l \leq \sum_{t \in T_A} v_a^t \alpha_{AA}^t \beta_{AA}^t, \quad (a \in A) \quad (\text{A.66})$$

$$\sum_{l \in L_{CR}} n_{cr}^l \beta_{CR}^l \leq \sum_{t \in T_C} w_c^t \alpha_{CR}^t \beta_{CR}^t, \quad (c \in C) \quad (\text{A.67})$$

The *traffic conservation and failure constraints* ((A.68)-(A.76)) impose that the total traffic carried by a link is less than or equal to the capacity of this link. The traffic between two TPs is given and the traffic between other equipments are calculated. For example, the traffic between a BS and the ASN-GW which is connected to, is the sum of the traffic between the TPs connected to the BS and the served TPs that are not connected to this BS. Note that when an equipment fails, it generates no traffic and when a link fails, it carries no traffic too.

$$Y_{tb}^s \leq 1 - PaN_b^s, \quad (s \in S, t \in T, b \in B) \quad (\text{A.68})$$

$$\sum_{t' \in T} (Y_{tb}^s - 1 + \sum_{b' \in B} Y_{t'b'}^s) Tr_{tt'} \leq \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} Y_{tbkf}^s D_f, \quad (t \in T, b \in B, s \in S) \quad (\text{A.69})$$

$$\sum_{t' \in T} (Y_{tb}^s - 1 + \sum_{b' \in B} Y_{t'b'}^s) Tr_{t't} \leq \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} Y_{tbkf}^s D_f, \quad (t \in T, b \in B, s \in S) \quad (\text{A.70})$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} (Y_{tb}^s - 1 + \sum_{b' \in B - \{b\}} Y_{t'b'}^s) Tr_{tt'} \leq \sum_{a \in A} \sum_{l \in L_{BA}} N_{ba}^l \beta_{BA}^l (1 - PaN_b^s)(1 - PaN_a^s)(1 - PaL_{ab}^s), \quad (b \in B, s \in S) \quad (\text{A.71})$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} (Y_{tb}^s - 1 + \sum_{b' \in B - \{b\}} Y_{t'b'}^s) Tr_{t't} \leq \sum_{a \in A} \sum_{l \in L_{BA}} N_{ba}^l \beta_{BA}^l (1 - PaN_b^s) (1 - PaN_a^s) (1 - PaL_{ab}^s),$$

$$(b \in B, s \in S) \quad (\text{A.72})$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} (Pass_{ta}^s - 1 + \sum_{a' \in A - \{a\}} Pass_{t'a'}^s) Tr_{t't} \leq \sum_{a' \in A} \sum_{l \in L_{AA}} N_{aa'}^l \beta_{AA}^l (1 - PaN_a^s) (1 - PaN_{a'}^s) (1 - PaL_{aa'}^s)$$

$$+ \sum_{c \in C} \sum_{l \in L_{AC}} N_{ac}^l \beta_{AC}^l (1 - PaN_a^s) (1 - PaN_c^s) (1 - PaL_{ac}^s), \quad (a \in A, s \in S) \quad (\text{A.73})$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} (Pass_{ta}^s - 1 + \sum_{a' \in A - \{a\}} Pass_{t'a'}^s) Tr_{t't} \leq \sum_{a' \in A} \sum_{l \in L_{AA}} N_{aa'}^l \beta_{AA}^l (1 - PaN_a^s) (1 - PaN_{a'}^s) (1 - PaL_{aa'}^s)$$

$$+ \sum_{c \in C} \sum_{l \in L_{AC}} N_{ac}^l \beta_{AC}^l (1 - PaN_a^s) (1 - PaN_c^s) (1 - PaL_{ac}^s), \quad (a \in A, s \in S) \quad (\text{A.74})$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} (CoM_{tc}^s - 1 + \sum_{c' \in C - \{c\}} CoM_{t'c'}^s) Tr_{t't} \leq \sum_{l \in L_{CR}} N_{cr}^l \beta_{CR}^l (1 - PaN_c^s) (1 - PaL_{cr}^s),$$

$$(c \in C, s \in S) \quad (\text{A.75})$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} (CoM_{tc}^s - 1 + \sum_{c' \in C - \{c\}} CoM_{t'c'}^s) Tr_{t't} \leq \sum_{l \in L_{CR}} N_{cr}^l \beta_{CR}^l (1 - PaN_c^s) (1 - PaL_{cr}^s),$$

$$(c \in C, s \in S) \quad (\text{A.76})$$

The *signal quality constraints* are given by Equations ((A.77)-(A.81)). Equations ((A.77)-(A.79)) help to calculate the power of the signal received by a TP from each BS. Equation (A.80) impose that the power of the signal received at a TP from the BS to which it is assigned is greater than or equal to the sensitivity of the terminal (or terminals) at the TP. Moreover, interferences reaching a given TP must be such that the minimum signal to interference ratio (SIR) according to the class of service required is respected (A.81).

$$P_{tbkf}^s \leq Y_{tbk} \sum_{t' \in T} Y_{t'bkf}^s N, \quad (s \in S, t \in T, b \in B, k \in K, f \in F) \quad (\text{A.77})$$

$$P_{tbkf}^s \leq \sum_{t' \in T_B} \left(P_{max}^{t'} + G^{t'} \right) u_b^{t'} - GRF - Att_{tbkf}, \quad (s \in S, t \in T, b \in B, k \in K, f \in F) \quad (\text{A.78})$$

$$P_{tbkf}^s + \left(2 - Y_{tbk} - \sum_{t' \in T} Y_{t'bkf}^s \right) N \geq \sum_{t' \in T_B} \left(P_{max}^{t'} + G^{t'} \right) u_b^{t'} - GRF - Att_{tbkf},$$

$$(s \in S, t \in T, b \in B, k \in K, f \in F) \quad (\text{A.79})$$

$$P_{tbkf}^s \geq S_t - N (1 - Y_{tbkf}^s), \quad (s \in S, t \in T, b \in B, k \in K, f \in F) \quad (\text{A.80})$$

$$2P_{tbkf}^s - \sum_{b' \in B} \sum_{k' \in K} P_{tb'k'f}^s \geq \delta_{Qt} - N(1 - Y_{tbkf}^s), \quad (s \in S, t \in T, b \in B, k \in K, f \in F) \quad (\text{A.81})$$

The *integrality and nonnegativity constraints* guarantee that the decision variable can only take boolean values and reduce the domain of the other variables to natural integers, except for the received power P_{tbkf}^s which is a positive real number.

CHAPITRE 5

ARTICLE 2 : AN HYBRID ITERATED LOCAL SEARCH ALGORITHM FOR THE GLOBAL PLANNING PROBLEM OF SURVIVABLE 4G MOBILE NETWORKS

Auteurs : Eunice Adjarath Lemamou, Philippe Galinier, Steven Chamberland

Revue : Soumis à *IEEE/ACM Transactions on Networking*

Abstract

In this paper, we propose an hybrid iterated local search (ILS) heuristic, named GPP4G-ILS, to solve the global planning problem of survivable mobile networks. The planning problem of mobile networks is to determine a set of sites among potential sites to install the various network devices, in order to cover a given geographical area. It should also make the connections between the devices in accordance with well-defined constraints. The global planning consists in solving this problem without dividing it into several subproblems. The objective is to minimize the cost of the network while maximizing its survivability.

The GPP4G-ILS algorithm is a new form of hybridization between the ILS algorithm and the integer linear programming (ILP) method. We propose a configuration that allows to reuse a previously developed ILP algorithm by integrating it in the ILS algorithm. This allows to benefit from the advantages of both methods. The ILS algorithm is used to effectively explore the search space, while the ILP algorithm is used to intensify the solutions obtained. The performance of the algorithm was evaluated using an exact method that generate optimal solutions for small instances. For larger instances, lower bounds have been calculated using a relaxation of the problem. The results show that the proposed algorithm is able to reach solutions that are, in average within 0,06% of the optimal solutions and 2,43% from the lower bounds for the instances that cannot be solved optimally, within a reduced computation time.

5.1 Introduction

The fourth generation (4G) of wireless networks is characterized by an increased mobility, diversified services and higher data rates. Theoretical rates of 100 Mbps for high mobility and up to 1 Gbps for low mobility are supposed to be reached with this generation [62]. The

main standards are LTE-Advanced and WiMAX. Their long term goal would be to converge to form the 4G standard IMT-Advanced [57]. The users of these networks are increasingly demanding in terms of throughput and reliability.

Reliability is “the probability that an item can perform a required function under stated conditions for a given time interval” [79]. In the case of a network, we can define the reliability as a measure of confidence that can reasonably be placed in the service provided by that network. Reliability can be measured, for example, using the mean time between failures (MTBF) or it can also require the network to survive the failure of one or several equipment or links, which implies the principle of network survivability. Survivability of a network refers to its ability to offer identical services, even in case of failure. In most cases, only single faults (of nodes or links) are considered because they account for more than 99% of failures recorded [130]. The network survivability can be achieved by adding more connectivity to the latter, introducing several alternative routes for all traffic. However, the existing competition in the market forces operators to offer services at the best price and that solution can be very expensive. It is therefore important to find ways of ensuring a good tradeoff between price and network fault tolerance. This objective can be achieved by taking into account, when planning the network, the failure scenarios most likely to occur in order to produce a robust network at lower cost.

The network planning problem is often subdivided into three subproblems which are solved separately. In the literature, most papers focus on only one subproblem. They propose diverse models to solve the cell network subproblem [8, 45, 65, 150], the access network subproblem [14, 136, 151] and the core network subproblem [69, 85, 120].

In [88], we propose a global model to solve the 4G networks planning problem. Unlike the sequential approach that decompose the problem, we solve it as a whole, from the cells to the core network, using CPLEX [41]. The model proposed also improves the survivability of the network by taking into account the failure scenarios which are defined by the network planner. The results show that our model can reach solutions that are, in average, 26% better than the sequential model and 30% better than the global model without survivability. Since the problem is NP-hard, we were not able to solve large instances with an exact solver.

One way to improve the performance of an algorithm or fill some of its gaps is to combine it with another method [12]. This general principle, called hybridization, can be applied to a large number of methods. The current trend is the emergence of hybrid methods that try to take advantage of combining different approaches [26]. In this paper, we propose a new form of hybridization between the iterated local search (ILS) algorithm and the integer linear programming (ILP) method, in order to find good solutions for the 4G networks planning problem, using the model proposed in [88]. The ILS algorithm is used to effectively explore

the search space, while the ILP algorithm is used to intensify the solutions obtained. The balance between these two criteria (intensification and diversification) produces an efficient algorithm that gives good solutions for the proposed model within a reasonable amount of CPU time.

The rest of the paper is organized as follows. A literature review is presented in Section 2. The problem of 4G networks planning is briefly presented in Section 3. In Section 4, we describe the proposed algorithm. The computational results are presented and analyzed in Section 5 where we compare these results with those obtained using CPLEX. Finally, conclusions and further works are presented in Section 6.

5.2 Literature Review

5.2.1 Network Planning Problem

Amzallag *et al.* [8] identify several works on cell planning in 3G and 4G networks. The authors claim that there are various formulations for this problem and that, in most cases, they are NP-hard. Amaldi *et al.* [6] propose, for UMTS networks, a model in which they consider the quality of the uplink signal that is emitted by the mobile users and received by the base stations. They propose two randomized greedy algorithms and a tabu search algorithm based on the previous two algorithms to find solutions for their model.

Wu and Pierre [150] propose, for UMTS networks, a model in which they consider the quality of the downstream signal. The proposed model considers, along with the location of nodes B (base stations), the configuration of the antennas (height and power) of these nodes B. To solve their model, the authors use a method of constraint satisfaction to generate an initial solution. To improve this solution, they use three different local search heuristics (greedy algorithm, tabu search algorithm and simulated annealing) to handle the problem.

Gordejuela-Sánchez and Zhang [65] propose, for WiMAX mobile networks, a model for minimizing the number of BSs to install while providing good coverage with the quality of service required by each user and maintaining a distance between the base stations. This model tries to minimize the cost of installation and operation of the BSs while applying certain penalties when the QoS required by users is not respected. Authors use the penalty functions to force the respect of coverage, throughput and interference constraints in their model. Gordejuela-Sánchez *et al.* [64] improve the previous model by adding to the objective function a penalty in relation to network reliability. This penalty is designed only for mesh networks where multiple jumps are often needed to reach the end user. They find good solutions for the model using a multi-objective tabu search.

Other researchers have preferred to address the planning of the access network. Wu and

Pierre [151], for example, treat the 3G access networks in a broader context. The authors propose a model that takes into account the frequency of handovers between cells. They use a heuristic search in three phases to handle their model. The first phase is to find an initial feasible solution using a technique of constraint satisfaction. A local search procedure is then applied to the initial solution in a second phase. The third phase is used to improve the solution obtained in the previous step by standard methods of constraints optimization.

A few researchers have worked on the core network planning problem. Indeed, it is not very different from the planning problem in traditional wired networks [132]. Ricciato *et al.* [120] handle the problem of RNC to SGSN assignment in GPRS networks, with the aim to balance the number of SGSN and RNC in order to minimize the inter-SGSN routing. The authors develop a model in integer linear programming and solved it with CPLEX software.

Most authors in the literature treat the subproblems separately. However, St-Hilaire *et al.* [133] have shown that there is an interest to perform a global planning, integrating all the subproblems in one model. Each subproblem being NP-hard [130], this integration results in an even more complex model. They propose a global model for solving the planning problem of universal mobile telecommunications system (UMTS) networks. This model allows to take into account all aspects of the problem without decomposing it. Although the proposed model allows to obtain quite good results, it does not include the concepts of service quality and network survivability. The global planning of mobile networks has been little studied in the literature and its applications are mainly in UMTS networks [131, 132, 134].

5.2.2 Hybrid Methods

There are several ways to address difficult optimization problems. The exact optimization techniques (including methods based on linear programming) and metaheuristic approaches are two aspects that have success for combinatorial problems. Both techniques have been implemented by different communities, more or less in isolation from each other. While the exact optimization methods seek the optimum solution when solving a problem, metaheuristics are designed to find the best possible solution within a reasonable time. In the recent years, a greater number of researchers have recognized the benefits and the enormous potential of hybridization of exact methods and metaheuristics. In fact, many problems can be practically handled much better by exploiting synergies between these two methods [116]. The crucial question is how the two methods should be combined to achieve these benefits. Many approaches have been proposed in the recent years.

Puchinger and Raidl [114] propose a literature review on hybrid methods and classification of various existing approaches. The authors distinguish two main categories, namely integrative and collaborative approaches. Collaborative approaches consist in running both

algorithms separately (in parallel or sequentially) and to use the results of one in the other. In the case of integrative approaches, one of the methods is an integral part of the other. One can, for example, use a metaheuristic to explore more effectively the various branches within an exact method, or can use an exact algorithm as an intensification method of a metaheuristic.

A more recent review of the literature was conducted by Blum *et al.* [26]. The authors describe in detail various hybridization techniques used in the literature, such as, integration of an algorithm of constraint programming (CP) algorithm in a large neighborhood search (LNS) algorithm. It is also possible to use a relaxation of the problem to guide the search process of a metaheuristic, as an optimal solution for a relaxation of the original problem often indicates regions where good solutions can be found for the original problem.

5.2.3 Iterated Local Search Algorithm (ILS)

The principle of the ILS heuristic is to perform several times a local search technique, starting each time from a different solution. One of the limitations of simple local search methods is to get stucked in a local minimum. A simple solution would be to relaunch the local search several times starting each time from a different configuration. However, this method, called *repeated local search*, makes no use of information gathered in the previous researches. The method of iterated local search fills this gap by starting each new iteration of local search from a solution obtained by applying a disturbance to one of the solutions generated during previous local searches. The initial configuration of the local search may be the best

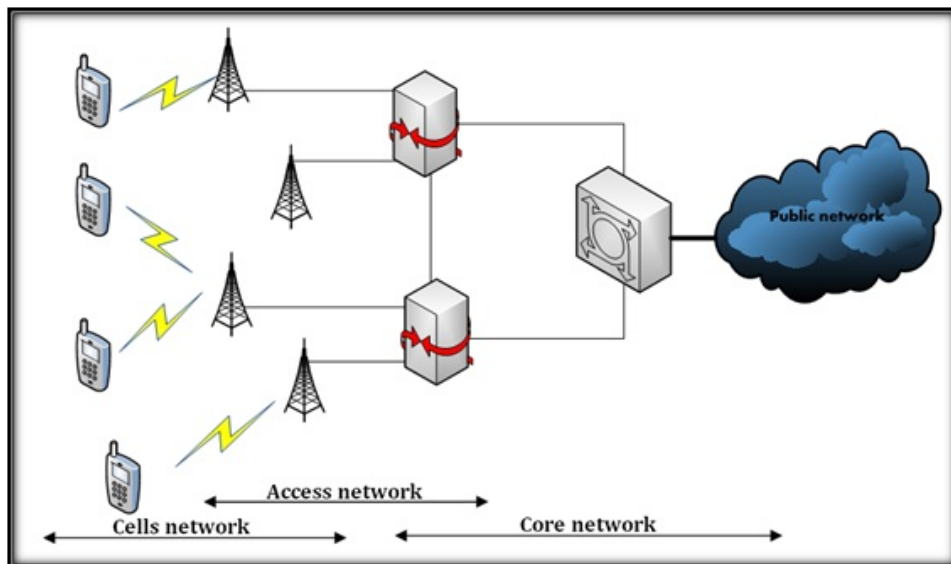


Figure 5.1 4G mobile network architecture

configuration obtained by the latest iteration of local search or one of the best configurations obtained in all iterations of previous local searches. The purpose of this technique is to find better solutions than if one had relaunched several times the integrated local search algorithm [92].

The ILS algorithm has been used in the literature for instance, by Wang and Rushforth [148] to solve the channel-assignment problem for cellular radio networks and by Carello *et al.* [29] to solve the hub location problem in telecommunication network design.

5.3 Problem Definition

5.3.1 Network Architecture

Figure 5.1 illustrates the 4G mobile network architecture. The coverage area is divided into cells; a base station (BS) is installed in each cell. Mobile users or test points (TPs) are connected to the BSs. The BSs are connected to access network equipment (gateways) and the gateways are connected to core network equipment (switches). Some gateways can also be interconnected and the switches provide access to Internet and to external networks.

5.3.2 Network Planning Problem

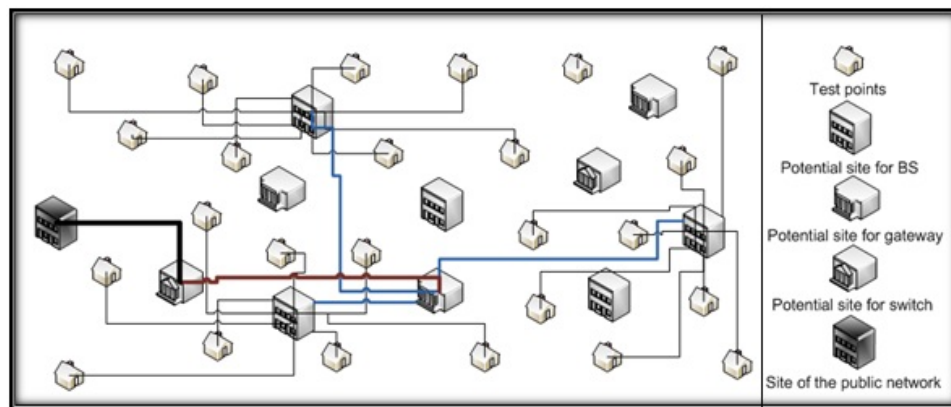
The mobile network planning problem can be divided into three subproblems, in respect to the three levels of the network: the cells network planning, the access network planning and the core network planning subproblems. We maintain this subdivision in order to present the different aspects of the problem.

The *cells network planning subproblem* consists in selecting and locating the BSs taking into account the quality of the signal received at the TPs. The purpose of this subproblem is to minimize the cost of installation, operation and maintenance of base stations while ensuring the coverage of TPs with the throughput required and the traffic constraints. In the case of a failure of BS, the test points connected to it can reconnect through another BS, if available for them.

The *access network planning subproblem* consists in selecting and locating the gateways and connecting them with the BSs while following the capacity constraints associated with each equipment and the traffic routing constraints within the network. This subproblem aims to minimize the cost of installation, operation and maintenance of the gateways and the links installed while ensuring the survivability of the network. Various failure scenarios can be considered. When a node or link fails, traffic can be redirected through another network equipment or path.



(a) The initial configuration



(b) A possible solution

Figure 5.2 Example of 4G mobile network planning

The subproblem of the *core network planning* is to determine the types and the locations of the switches to install and to link them to the gateways and to the public network. The purpose of this subproblem is to minimize the cost of installation, operation and maintenance of the switches and the costs of the links used to connect them to other network equipment. The capacity and traffic routing constraints must also be considered in this subproblem. The case of failure of the switches can also be considered.

5.3.3 Illustrative Example

An example of the global planning for 4G mobile networks is given in Figure 5.2. This figure shows (in Figure 5.2a) a geographic area where it is desired to implement the network. Some (25) TPs have been chosen randomly in the area. There are five potential sites to install base stations, three sites for gateways and two sites for switches. To minimize interferences, the number of channels per base station was limited to eight, each channel transmitting on

a different carrier frequency.

Figure 5.2b shows a possible solution to this problem found randomly. In this solution, three base stations, one gateways and one switch are used to cover the entire area. The switch is also linked to the extern network. One TP had not been served because it would be necessary to install a fourth BS to cover it and that would not be profitable.

5.3.4 Problem Modeling

We name this problem GPP-4G (Global Planning Problem - 4G) and we propose in [88] a detailed mixed integer linear programming model for it. This model aims to minimize the total cost of the nodes and links installed and the cost of the failures in the network while meeting the demand at each TP and providing a good quality signal. The cost of the nodes is the sum of the costs of all the equipment (BSs, gateways and switches) installed in the solution, depending on their type. The cost of the links is the sum of the costs of the links between any pair of sites. The cost of the links between two sites depends on the type of the links installed, their number and the distance between them. The reliability cost is the sum of the losses of income generated by the probability of being in a failure scenario. We consider that a TP which does not obtain the required class of service for a failure scenario will not be served in that scenario. So we count the income that this TP would generate if it was served in that failure scenario as a loss for the network provider. This model allows us then to guarantee the satisfaction of clients served, generating a good quality of service within the network.

It is also assumed that, in each failure scenario, a TP is connected to at most one BS. This means that a TP is served by only one BS at anytime but the BS serving a TP may change depending on the failure scenarios. A single equipment can be installed at any physical location.

The following information is considered as entry for our system.

- The location of the TPs, the potential sites to install the BSs, gateways and switches, and the location of the connector to the public network.
- The types of BSs, gateways and switches available, their number of available ports and their maximum capacity.
- The sum of the costs of installation, operation and maintenance for each type of equipment.
- The types of links needed to connect the equipment and the costs of these links.
- The traffic flows from each TP and their destinations.
- The failure scenarios of interest to the network planner.
- The income generated by each class of service. Several classes of service are considered.

The income generated by a TP depends on the class of service required by that TP.

- The class of service required by each TP.

The model is subject to several constraints, namely, assignment constraints, capacity constraints, signal quality constraints, failure constraints, integrality and nonnegativity constraints. This model has been proposed in [88] for WiMAX networks, and it was solved using CPLEX with an ILP algorithm. The results were compared with those of a sequential model including survivability of the one hand, and on the other hand, with those obtained by a global model without survivability. We have shown that the GPP-4G model outperforms the two others giving solutions that are, in average, 25% better. We have also shown that the exact method is limited in the size of instances that can be solved. As the problem is NP-hard, the execution time increases rapidly with the size of the instances. It is therefore difficult, if not impossible, to solve optimally large instances within a reasonable time.

The work presented in this paper is intended to address the problem of global planning of fourth generation (4G) mobile networks. As can be noted in the Figure 5.1, the 4G networks (WiMAX and LTE-Advanced) have the same general architecture. The difference between the two types of networks is at the radio appearance. In fact, the two technologies do not operate in the same frequency band and the propagation models are different. The names of the equipment also change from one type of network to another. We can therefore use the model designed for WiMAX networks to solve the planning problem for LTE-Advanced networks, taking care to use the correct propagation model for each type of network. In this paper, for the purpose of comparing results, we used the model developed in [88] without modification.

We propose here an hybrid algorithm, based on an iterated local search algorithm and the ILP algorithm used in [88], to find good solutions in a reasonable time for larger instances of the problem.

5.4 Proposed Algorithm

We propose in this section an hybrid iterative local search algorithm, named GPP4G-ILS, to find good feasible solutions for the problem of global planning for 4G mobile networks.

5.4.1 Description of the ILP Procedure

In [88], we solve the model using the Integer Linear programming (ILP) method with CPLEX. Let us name this procedure $ILP(s, t)$ where s is a configuration and t is a time limit.

A configuration s is a vector noted (s_1, s_2, \dots, s_n) where the i^{th} element (i from 1 to n)

represents a potential site to install the BSs, the gateways or the switches. The value of s_i is the type of equipment installed at site i . Initially, all the values s_i are set to -1 indicating that the sites are *free*. The ILP algorithm is therefore in charge to assign a value to each site. This value is an integer between 1 and $\alpha(i)$ when the site i is used in the solution computed by the ILP algorithm, where $\alpha(i)$ is the number of available equipment types depending on the considered site (BS site, gateway site or switch site). When no equipment is installed on a site, its value is set to 0 by the ILP algorithm. The ILP algorithm is an exact solving method that tries to find the optimal solution for the model. Since the problem is NP-hard, this method can solve optimally only small size instances.

5.4.2 Changes Made to the ILP Procedure

Since the problem contains multiple hard constraints, the quickest way to evaluate a solution and make sure it is feasible is to use an exact mathematical tool. We reuse for this purpose the ILP procedure in GPP4G-ILS, modifying the configuration and the time limit.

The modification of the configuration is to fix the values attributed to some sites in the configuration, the remaining sites being *free*. This method reduces the size of the instance passed to the ILP procedure, allowing a more rapid computation. The ILP procedure can then be able to find good solutions quickly. Therefore, the time limit allowed to the ILP procedure can be significantly reduced. In the event that an optimal solution cannot be found within the time limit, the best solution found by the ILP procedure is returned with its cost. When the ILP algorithm is not able to compute any solution from a configuration passed within the time limit defined, it attributes a very large cost value to that configuration and returns it to the GPP4G-ILS algorithm. Those configurations will therefore be avoided.

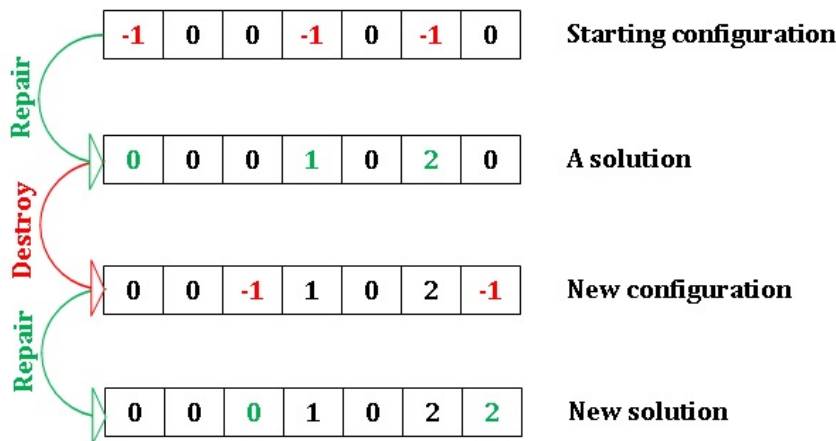


Figure 5.3 Different moves in the LNS algorithm

For the sites which values are set, the value of s_i is set to 0 if no equipment is installed on site i ; otherwise the value is set to an integer between 1 and $\alpha(i)$. The value of the site is set to -1 for a site that is *free*.

When solving the problem sequentially in [88], we noted that very few computation effort were put in solving the problem of assigning values to the gateway and switch sites. So we decide to let all the values for gateway and switch sites set to *free*, allowing the ILP algorithm to find the best assignments for these sites. Only the BS sites are manipulated in the ILS algorithm.

In the following, we make a difference between a solution and a configuration. A configuration is the vector passed to the ILP algorithm with some sites which values are free and others sites which values are fixed. A solution is the vector returned by the ILP algorithm with all values assigned (no free site).

5.4.3 GPP4G-ILS Algorithm

Initial Configuration

The initial configuration in the ILS algorithm is obtained by freeing a sufficient number of BSs to cover all the TPs. The remaining sites are set to 0 (no equipment installed). To choose the sites that will be free, we compute the central points to determine the closest BS sites of the TPs. We first calculate the mean distance from each BS site to all the TPs. We use then a stochastic bias selection algorithm based on the distances calculated to determine the BS sites to free in the initial configuration. The shorter the average distance calculated for a BS site is, the more likely this BS site is to be selected. The pseudocode of the procedure that generates the initial solution is given by Algorithm 5.1.

Algorithm 5.1 : Generation of the the initial solution

- Step 1:** Calculate $nbBS$ (the minimum number of BS necessary to serve all TPs)
 - Step 2:** For all BS sites, determine the mean distance from the TPs to the BS site.
 - Step 3:** Choose $nbBS$ sites, each with a probability proportional to their average distance from TPs,
and free them.
 - Step 4:** Evaluate the configuration x with ILP (the result is a solution s with its cost).
-

Local Search Algorithm

The local search method used in the GPP4G-ILS algorithm is a large neighborhood search (LNS) heuristic [126]. The LNS heuristic is a local search method where the neighborhood

is implicitly defined by a destroy method and repair method. The solution is thus destroyed and repaired repeatedly in order to obtain various configurations and explore a large neighborhood. An acceptance criterion is defined in order to reject solutions that would not lead the algorithm in favorable areas. This avoids a random exploration of the search space.

Figure 5.3 shows the different moves made in the LNS algorithm.

The *Destroy* method we propose is to set the values of several BS sites randomly chosen in a solution, to free, generating a new configuration. Different sites are selected at each iteration to obtain different configurations.

The *Repair* method is the procedure $ILP(s, t)$, used to generate the optimal solution (or the best possible solution within the time limit) from a given configuration. This procedure makes it possible to achieve a good intensification in the search space generated by the release of some of the variables. The acceptance criteria used is to accept a new solution only if it is at least as good as the current solution (cost of the new solution less than or equal to the cost of the current solution).

A move in the LNS algorithm consists in freeing randomly a fixed number of BS sites in a solution, generating a new configuration. This configuration is then passed to the ILP algorithm which compute the corresponding solution. As the problem size is reduced by the LNS algorithm, the ILP algorithm has more chances to find quickly the optimal solution for a configuration.

The pseudocode of the LNS algorithm is given by Algorithm 5.2.

Algorithm 5.2 : Large neighborhood search (LNS) algorithm

(Repeat until stop criterion for LNS)

Step 1: Generate a move.

Step 1.1: Free $SizeFreeLNS$ sites randomly $s \Rightarrow s'$ (*Destroy*).

Step 1.2: Evaluate s' with ILP (*Repair*).

Step 2: If the solution obtained (s') is better than the current solution (s)
(cost is less or equal \Rightarrow Descent criterium),

Step 2.1: Apply the move ($s' \rightarrow s$).

Step 2.2: Update the best solution so far.

Hybridization is thus carried out within the LNS algorithm between the destroy method and the procedure $ILP(s, t)$. The destroy method allows diversification within the algorithm by exploring different areas of the search space. The procedure $ILP(s, t)$ allows intensification because it always returns the best possible solution at the end of the allotted time. As the size of the instance was reduced, the work is more easy for the exact method that often returns the optimal solution for the considered configuration. This hybridization makes it

possible to capitalize on the strengths of local search and those of an exact method. Using the ILS algorithm to restart the search from the best solution found so far when the LNS algorithm stagnates, it allows the algorithm to leave local minima and explore other areas of the search space.

Jump Method

Figure 5.4 how a jump is performed in the GPP4G-ILS algorithm. The *Jump* method allows the ILS algorithm, when the LNS algorithm stagnates, to modify some sites by assigning them a different type of equipment (or removing the equipment installed). This movement is performed from the best solution found so far by the algorithm. This method computes a new start solution for the LNS algorithm in a new area of the search space.

Pseudocode of GPP4G-ILS

The pseudocode of the GPP4G-ILS algorithm is given by Algorithm 5.3.

Algorithm 5.3 : Iterated Local Search (GPP4G-ILS) algorithm

Step 1: Generate the initial solution s .

Step 2: Apply the LNS algorithm on s .

(Repeat Steps 3-5 until stop criterion for ILS)

Step 3: Make a jump in the search space (using the best solution).

Step 3.1: Modify (don't free) $SizeJump$ sites randomly (*Jump*).

Step 3.2: Evaluate the solution obtained (s').

Step 4: Update the best solution so far.

Step 5: Apply the LNS algorithm on s' .

Step 6: Return the best solution.

5.5 Numerical Results

The algorithm is implemented in C++. All experiments were performed on a computer Intel (R) Core(TM)2 Quad CPU Q6700 @ 2.66GHz with 8 Go of RAM, and using the Windows 7 operating system.

5.5.1 Test Instances and Previous Results

We used the 40 sets of instances previously generated for our tests in [88]. To complete the tests with more instances of realistic size, we generated 2 more sets of 10 instances considering a geographical area of 2500 square kilometers (50x50). The features of the BSs, gateways

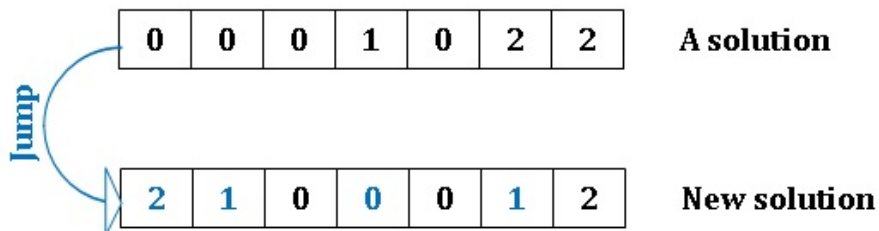


Figure 5.4 Jump in the GPP4G-ILS algorithm

Table 5.1 Features of the BSs types

Characteristics	Type A	Type B
Max Power (dB)	150	300
Antenna gain (dBi)	15	18
Number of interfaces	24	48
Capacity of interfaces (Mb/s)	1 024	1 024
Cost (\$)	30 000	50 000

Table 5.2 Features of the gateways types

Characteristics	Type A	Type B
Number of interfaces to BSs	12	24
Number of interfaces to gateways	4	8
Number of interfaces to switches	8	12
Capacity of interfaces to BSs (Mb/s)	1 024	1 024
Capacity of interfaces to gateways (Mb/s)	1 024	1 024
Capacity of interfaces to switches (Mb/s)	1 024	1 024
Cost (\$)	50 000	90 000

Table 5.3 Features of the switches types

Characteristics	Type A	Type B
Number of interfaces to gateways	24	48
Number of interfaces to external	2	4
Capacity of interfaces to gateways (Mb/s)	1 024	1 024
Capacity of interfaces to external (Mb/s)	10 240	10 240
Cost (\$)	200 000	300 000

Table 5.4 Features of the links types

Link type	Capacity (Mb/s)	Cost (\$/km)
1GE	1 024	115 000
10GE	10 240	650 000

Table 5.5 Composition of the test instances used and the solutions of the ILP algorithm (ILP).

Instance set	Number of TPs	Number of BSs	Number of gateways	Number of switches	Mean Network Cost (M\$)	Mean CPU Time (s)	Proportion of TL (%)
1	5	5	5	5	22,7	0,50	0
2	10	5	5	5	22,7	0,88	0
3	15	5	5	5	22,8	2,39	0
4	20	5	5	5	21,3	39,76	30
5	25	5	5	5	50,1	71,71	90
6	5	10	5	5	19,2	3,74	0
7	10	10	5	5	19,3	12,37	0
8	15	10	5	5	19,9	88,32	10
9	20	10	5	5	19,8	503,37	30
10	25	10	5	5	23,2	2152,62	70
11	5	15	5	5	22,7	4,83	0
12	10	15	5	5	22,7	14,33	0
13	15	15	5	5	22,8	61,19	0
14	20	15	5	5	25,3	1554,11	40
15	25	15	5	5	17,0	1120,27	90
16	5	20	5	5	22,7	9,68	0
17	10	20	5	5	22,7	25,87	0
18	15	20	5	5	22,9	100,07	10
19	20	20	5	5	23,9	1056,48	30
20	25	20	5	5	23,2	10136,38	70
21	5	25	5	5	17,9	13,81	0
22	10	25	5	5	17,9	47,99	0
23	15	25	5	5	17,9	255,93	0
24	20	25	5	5	17,1	2216,77	40
25	25	25	5	5	<i>TL</i>	<i>TL</i>	100
26	15	5	5	10	14,4	10,23	10
27	15	5	10	5	16,2	58,20	10
28	15	5	10	10	12,9	47,35	20
29	15	10	5	10	14,5	40,79	10
30	15	10	10	5	21,5	140,58	0
31	15	10	10	10	13,1	205,49	10
32	15	15	5	10	14,9	23,33	0
33	15	15	10	5	19,9	388,56	0
34	15	15	10	10	13,6	127,50	10
35	15	20	5	10	16,0	115,55	0
36	15	20	10	5	15,4	770,27	0
37	15	20	10	10	12,7	172,14	20
38	15	25	5	10	14,5	223,81	0
39	15	25	10	5	17,6	273,65	10
40	15	25	10	10	15,5	20,57	20
41	50	25	5	5	-	-	-
42	50	50	5	5	-	-	-

and switches used for those test instances are respectively presented in Tables 5.1 - 5.3. Two types of link have been used. 1GE links can serve to connect a BS to a gateway, a gateway

Table 5.6 Comparison between the ILS algorithm and the ILP algorithm

Test instances with optimal solution						Test instances without optimal solution				
Instance Set	ILS		Cost gap with ILP			ILS		Cost gap with ILP		
	Mean Network Cost (M \$)	Mean CPU Time (s)	Min (%)	Mean (%)	Max (%)	Mean Network Cost (M \$)	Mean CPU Time (s)	Min (%)	Mean (%)	Max (%)
1	22,7	38,05	0,00	0,00	0,00					
2	22,7	98,71	0,00	0,00	0,00					
3	22,8	295,50	0,00	0,00	0,00					
4	21,3	1505,00	0,00	0,00	0,00	29,5	4368,05	-0,29	0,97	1,63
5	50,1	1163,02	0,00	0,00	0,00	22,4	5546,66	-0,05	1,32	3,63
6	19,2	58,00	0,00	0,00	0,00					
7	19,3	138,18	0,00	0,00	0,00					
8	19,9	359,49	0,00	0,00	0,00	14,3	2545,80	0,00	0,00	0,00
9	19,8	1259,21	0,00	0,00	0,00	20,1	3802,55	-0,54	0,09	1,35
10	23,2	3338,40	0,00	0,03	0,04	19,4	5052,99	-2,51	-0,88	0,44
11	22,7	40,91	0,00	0,00	0,00					
12	22,7	100,43	0,00	0,00	0,01					
13	22,8	254,22	0,00	0,00	0,00					
14	25,3	935,34	0,00	0,00	0,00	20,4	2111,42	-0,01	0,15	0,47
15	17,0	1864,96	0,00	0,00	0,00	24,7	4619,93	-4,55	-4,20	-3,75
16	22,7	52,00	0,00	0,08	0,23					
17	22,7	121,49	0,00	0,06	0,17					
18	22,9	310,62	0,00	0,14	0,42	21,0	736,89	0,00	0,00	0,00
19	23,9	1086,58	0,00	0,13	0,38	21,4	1281,98	-0,90	-0,48	-0,27
20	23,2	2942,92	0,00	0,00	0,00	24,0	4269,90	-2,99	-2,45	-1,42
21	17,9	60,74	0,00	0,09	0,22					
22	17,9	147,03	0,00	0,35	0,59					
23	17,9	360,94	0,11	0,27	0,58					
24	17,2	1094,34	0,00	0,19	0,46	20,1	1632,85	-0,54	-0,22	0,16
25						18,9	4258,69	-0,91	-0,34	0,56
26	14,4	439,75	0,00	0,00	0,00	27,0	3354,17	0,00	0,03	0,10
27	16,2	1068,37	0,00	0,00	0,00	35,2	3129,90	0,00	0,00	0,00
28	12,9	840,42	0,00	0,00	0,00	24,8	3179,45	0,45	0,48	0,52
29	14,5	457,20	0,00	0,00	0,00	35,4	1914,01	0,00	0,00	0,00
30	21,5	608,26	0,00	0,00	0,00					
31	13,1	602,48	0,00	0,00	0,00	18,7	1118,03	0,00	0,00	0,00
32	14,9	305,94	0,00	0,00	0,00					
33	19,9	411,48	0,00	0,00	0,00					
34	13,6	594,65	0,00	0,00	0,00	14,1	1696,84	0,00	0,00	0,00
35	16,0	447,06	0,00	0,00	0,00					
36	15,4	614,00	0,00	0,10	0,29					
37	12,7	660,04	0,00	0,00	0,00	12,5	1805,33	-0,34	-0,04	0,24
38	14,6	399,35	0,00	0,47	1,42					
39	17,6	565,17	0,00	0,21	0,55	8,0	693,23	0,00	0,00	0,00
40	15,5	542,09	0,00	0,08	0,16	10,3	1042,97	-0,58	-0,09	0,78

to a switch or to another gateway. 10GE links served to connect the switches to the public network. The features of these links are presented in Table 5.4.

The TPs are distributed uniformly in the coverage area. The BSs use sectorized antennas (3 sectors per BS) with 8 channels per sector. Three failure scenarios are considered for each problem. The features considered in the definition of the sets of test instances are the number of TPs, BSs, gateways and switches.

Table 5.5 shows the composition of the sets. Each set contains 10 randomly generated

instances. The results (cost and CPU time) obtained with ILP algorithm in CPLEX are also given in the Table 5.5. These results are, for each problem size, the mean of the costs and CPU times obtained on the test instances that have been solved optimally. The time limit (TL) was set to 21 600 seconds. The proportion of instances of each set reaching the TL is also indicated in Table 5.5.

As we can note in Table 5.5, the CPU time seems to increase exponentially with the number of TPs. The increase in computation time, while present, is less representative when the number of TPs is fixed and we vary the other parameters. We can also see that the TL have often been reached on the problems with 25 TPs before the proof of optimality of the obtained solution has been established. The TL have been reached for all the instances with 25 TPs and 25 BSs. The ILP algorithm was not able to compute any solution for the instances with more than 25 TPs due to a buffer overflow.

We also notice, considering only the sets for which all the ten test instances have been solved optimally, that the network cost increases with the number of TPs. This can be explained by the need of more BSs to serve all the TPs. This cost can be reduced by the addition of potential sites for installation of BSs, gateways or switches. This makes it possible for the algorithm to find sites closer to each other, thereby reducing costs of links installed in the network.

5.5.2 Test Parameters

Preliminary tests performed on a small number of instances (4 out of 420) allowed us to define the parameters of the algorithm. The parameters used are those that give the best results on the tested instances. Those parameters are:

- *SizeFreeLNS* : 5;
- *SizeJump* : 2;
- stop criterion for LNS : 5 iterations since the last improvement of the solution;
- stop criterion for ILS : total number of iterations ≥ 50 ;
- time limit for CPLEX : 4 times the number of TPs (in seconds).

We have launched the ILS algorithm three times for each instance. The results obtained by the ILS algorithm are compared with those obtained by CPLEX. We use, for the comparison, the mean cost obtained by the ILS algorithm on each instance and the mean CPU time of the algorithm.

5.5.3 Comparison Between GPP4G-ILS and the Exact Method (ILP)

Table 5.6 shows the comparison of the ILS algorithm with the solutions obtained by the ILP algorithm. We report in this table, for each set, the mean cost of the solutions obtained on the test instances by the ILS algorithm (the mean of the three executions of the algorithm for each instance) and the mean CPU time of the algorithm. The minimum, the mean and the maximum of the cost gaps ($(ILS - ILP)/ILS$) with the optimal solution, expressed in percentage, are also calculated for each set of test instances. We consider in the first part of the table (left) only the test instances that have been solved optimally by the ILP algorithm, and in the last part (right) only the test instances that could not be solved optimally by the ILP algorithm within the TL.

As can be gathered from the first part of Table 5.6, the ILS algorithm is able to reach, most of the time, quasi-optimal solutions. Optimal solutions have been found for 80% of the instances. The mean cost gap between the ILS algorithm and the ILP algorithm for all the instances that have been solved optimally by the ILP algorithm is about 0,06% considering the three executions. Taking the best of the three executions of the algorithm, we were able to compute the optimal solution for 326 instances out of 327 (99,69 %).

Considering the second part of the table, we note that many of the cost gaps are negative. The ILS algorithm has been able to find in much less time, better feasible solutions than the ILP algorithm for 41% of the instances and an equivalent solution for 53% of the instances. The average cost gap between the ILS algorithm and the ILP algorithm for all the instances that could not be solved optimally by the ILP algorithm is -0,27% considering the three

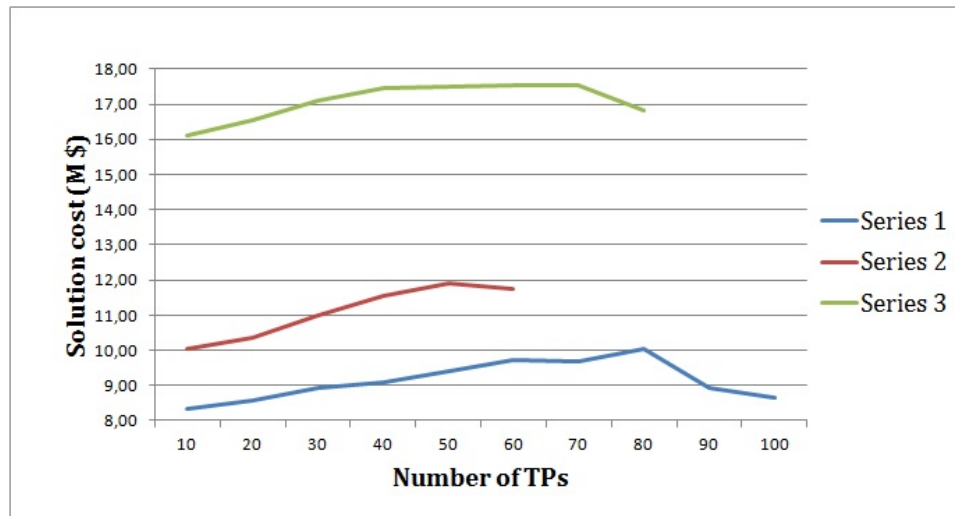


Figure 5.5 Evolution of the cost of the solution depending on the number of TPs for ILP-R algorithm

executions of the algorithm.

5.5.4 Generation of Lower Bounds and Comparison with GPP4G-ILS

In order to evaluate the performance of the ILS algorithm on the tests instances that could not be solved optimally, we develop a linear relaxation (named ILP-R) with the ILP algorithm to generate lower bounds of the network cost for those instances.

Our model contains several variables and integrity constraints are imposed on most variables, which makes the model complex to solve when the number of variables increases. For an overview of the entire model and to examine the variables used, see [88]. To perform the linear relaxation, we released the integrity constraints on the variables indicating the number of interfaces used to connect the various installed equipment (BSs, gateways and switches) as well as decision variables indicating in each test scenario, if a test point is connected by a given frequency channel to a sector of a base station. These variables are used in the validation of the assignment constraints, the capacity constraints, the traffic conservation constraints and the signal quality constraints. The relaxation of these constraints allows the ILP-R algorithm to find very quickly a lower bound for the considered instance.

The tests performed show that the ILP-R algorithm always finds a solution of the same cost as the optimal solution for instances that the ILP algorithm could solve optimally. This shows that relaxation is good enough because the lower bound found is close to the optimal solution, but this can be surprising. One can think that the relaxed constraints were useless in the original ILP algorithm. To more accurately assess the quality of relaxation, we generated three series of test instances of 25 BSs by gradually adding test points without changing the elements already in place. We expect to see in this case, an increase in the cost of the resulting solution when the number of TPs increases.

Figure 5.5 shows how the cost of the solution obtained by the ILP-R algorithm behave. We note in this figure that, from 50 TPs, the algorithm is unpredictable; the cost obtained by ILP-R decreases sometimes when the number of TPs increases. The quality of the lower bound deteriorates then with the size of the instances. Indeed, the solutions obtained by the relaxation deviate more from the optimal solution, generating a lower quality lower bound. We can conclude that the relaxed constraints are necessary to guarantee the integrality of the solutions. Note that the ILP-R algorithm was not able to solve all the instances due to a buffer overflow problem on the computer that we use. Due to this buffer overflow problem, we limit the size of instances solved to 50 TPs and 50 BSs.

We present in Table 5.7 the solutions obtained by the ILS algorithm on the test instances that have reach the time limit before completion with the ILP algorithm. We report in this table, for each set, the mean cost of the solutions obtained by the ILS algorithm and the ILP-

Table 5.7 Comparison between the ILS algorithm and the ILP-R algorithm on the test instances without optimal solution

Instance Set	ILP-R	ILS		Cost gap		
	Mean Lower Bound (M \$)	Mean Network Cost (M \$)	Mean CPU Time (s)	Min (%)	Mean (%)	Max (%)
4	28,6	29,5	4368,05	1,89	3,21	3,90
5	21,1	22,4	5546,66	7,53	9,21	12,12
8	14,2	14,3	2545,80	0,65	0,65	0,65
9	19,5	20,1	3802,55	2,09	2,73	4,00
10	18,6	19,4	5052,99	2,50	4,31	5,78
14	20,2	20,4	2111,42	1,64	1,80	2,12
15	24,2	24,7	4619,93	2,69	3,08	3,61
18	21,0	21,0	736,89	0,18	0,18	0,18
19	20,7	21,4	1281,98	2,57	3,00	3,22
20	23,3	24,0	4269,90	2,89	3,46	4,57
24	19,9	20,1	1632,85	0,55	0,86	1,25
25	18,4	18,9	4258,69	2,63	3,23	4,16
26	27,0	27,0	3354,17	0,08	0,12	0,18
27	35,1	35,2	3129,90	0,24	0,24	0,24
28	24,1	24,8	3179,45	5,87	5,89	5,95
29	35,3	35,4	1914,01	0,13	0,13	0,13
31	18,7	18,7	1118,03	0,36	0,36	0,36
34	14,1	14,1	1696,84	0,06	0,06	0,06
37	12,4	12,5	1805,33	0,66	0,96	1,24
39	7,6	8,0	693,23	5,19	5,19	5,19
40	9,9	10,3	1042,97	4,15	4,68	5,62
41	9842,5	9885,5	4223,35	0,00	0,36	0,93
42	11064,4	11237,4	6213,29	0,46	2,09	4,01

R algorithm and the mean CPU time of the ILS algorithm. We use, for the ILS algorithm, the mean cost and the mean CPU time obtained after the three executions of the algorithm on each instance.

We can note, in Table 5.7, that the ILS algorithm generates solutions which costs are, on average, 2,43% from the lower bounds. The ILS algorithm is able to produce high quality solutions for large instances with a reduced computation time. It is possible to argue that these solutions are even closer to the optimal solution. Considering the difficulty of the problem, these results can be described as excellent. Indeed, an average gap of less than 5% is considered good for this type of problem [134].

5.5.5 CPU Time Performance

Figure 5.6 illustrates the comparison of CPU time between the ILS algorithm and the CPLEX ILP algorithm. The figure uses a logarithmic scale. The mean CPU time has been computed for all of the instances according to the number of TPs. Remember that a time limit has been set for the ILP algorithm. We can note that, in respect to the number of TPs, the CPU time of the ILP algorithm grows much faster than that of the ILS algorithm. The ILS algorithm offers then a good tradeoff between the CPU time and the quality of the solutions. Moreover, the size of test instances solved with the global approach in the literature is limited to 40 TPs and 30 BSs, on a problem less complex than the one we treat [134]. The ILS algorithm proposed here is able to solve larger instances, up to 50 TPs and 50 BSs.

5.6 Conclusion and Further Work

In this paper, an hybrid ILS algorithm has been proposed to find good solutions for the global planning problem for 4G mobile networks with survivability constraints.

The results show that the GPP4G-ILS algorithm is able to compute quasi-optimal solutions, being in average 0,06% from the optimal solutions found by CPLEX. The ILS algorithm has solved 99,69% of the instances optimally and is able to find better solutions for some test instances that cannot be solved optimally by the ILP algorithm within the time limit. In regard to the hardness of the problem that we handled, this results can be qualified as good.

The sizes of the instances solved exactly are extremely small. As the exact method is not able to handle larger instances, we develop linear relaxation model to find lower bounds for the instances that cannot be solved optimally, in order to evaluate the performance of our

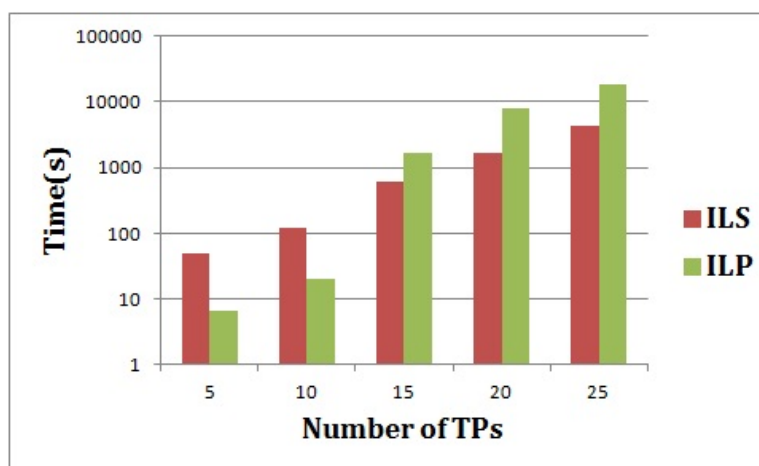


Figure 5.6 Comparison between the CPU times of the ILP algorithm and the ILS algorithm

algorithm on these instances. The GPP4G-ILS algorithm is, in average 2,43% from the lower bounds computed and can solve larger instances than those solved in the literature. Some instances (those with more than 25 TPs) could not be solved with the ILP algorithm due to a buffer overflow (limit of the computer). These instances have still been treated by the ILS algorithm on the same computer. We can then conclude that the GPP4G-ILS algorithm consumes less memory than the ILP algorithm.

In this paper, the network cost and the survivability cost are included in a single objective function. Future works will consist in developing a multiobjective optimization method to see their respective effects on the overall cost of the network. This will enable providers to make more informed choices when installing the network. The model used in this paper considers a greenfield network. Another avenue of research would be to develop models that will take into account existing networks.

CHAPITRE 6

UNE MÉTAHEURISTIQUE MULTI-OBJECTIFS POUR LE GPP-4G

6.1 Introduction

Le problème de planification globale des réseaux 4G avec contraintes de survivabilité (GPP-4G) est un problème d'optimisation multi-objectifs dans le sens où nous essayons d'optimiser deux objectifs contradictoires. Le premier objectif est la minimisation du coût total du réseau (coût des noeuds et des liens). Le second objectif est la maximisation de la survivabilité, ce que nous avons traduit dans le modèle proposé au chapitre 4 par la minimisation du coût de la survivabilité. Plus forte est la survivabilité du réseau, moins élevé sera le coût de la survivabilité. Cependant, il faudrait peut-être installer plus d'équipements ou choisir des sites plus éloignés les uns des autres pour atteindre un niveau de survivabilité élevé, ce qui a pour effet d'augmenter le coût total du réseau.

Comme indiqué dans la revue de littérature au chapitre 2, il existe trois catégories d'algorithmes d'optimisation multi-objectifs à savoir les approches d'agrégation, les approches non Pareto et les approches Pareto.

Les approches d'agrégation permettent de transformer le problème en un problème mono-objectif que l'on peut résoudre avec les algorithmes de résolution habituels. Cette transformation passe par l'attribution de poids à chacun des objectifs, ce qui exige également une connaissance préalable des priorités du décideur. Les algorithmes basés sur cette approche renvoient à la fin une unique solution, ce qui ne laisse aucune marge de manoeuvre au décideur ; c'est l'approche que nous avons utilisée pour résoudre le problème dans les chapitres précédents, en accordant des poids équivalents à chaque fonction objectif. Une amélioration de cette approche serait de faire varier les poids attribués à chaque objectif afin d'obtenir un ensemble de solutions parmi lesquelles le décideur pourrait effectuer son choix. Cependant, cette amélioration exigerait plusieurs résolutions du problème et donc un temps de calcul beaucoup plus élevé.

Les approches non Pareto sont basées sur la sélection des solutions séparément suivant chaque objectif. Ces approches ignorent les solutions 'du milieu' qui peuvent constituer des compromis intéressants entre plusieurs objectifs. De plus, certains algorithmes nécessitent la classification préalable des objectifs du problème, ce qui nécessite une connaissance préalable des priorités du décideur.

Les approches Pareto, quant à elles, sont basées sur l'exploitation de la notion de domi-

nance directement dans le processus de la recherche et plus précisément lors de la sélection des individus pour la prochaine itération. Ces approches, comme les approches non Pareto, utilisent une populations d'individus qu'elles font évoluer à chaque itération. Divers algorithmes ont été adaptés aux approches Pareto, notamment les algorithmes à base de population (algorithmes génétiques, algorithmes évolutionnaires, optimisation par essais particuliers, etc.). On retrouve également certains algorithmes à solution unique (recherche taboue, recuit simulé, etc.). Ces derniers maintiennent à chaque étape un ensemble de solutions non dominées (front) dont ils font évoluer chaque individu séparément. Le front est mis à jour à chaque itération et les nouvelles solutions dominées sont éliminées [64].

Nous proposons dans ce chapitre une nouvelle approche Pareto dans le sens où nous utilisons la notion de dominance au sein de l'algorithme, lors de la comparaison des solutions. Notre algorithme, MOGPP4G-ILS, est basé sur l'algorithme à solution unique GPP4G-ILS proposé dans le chapitre 5, mais il ne maintient pas un front à chaque itération. En effet, l'évaluation d'une solution est la partie de l'algorithme qui consomme la plus grande part de la puissance de calcul durant une optimisation évolutionnaire [53]. Par conséquent, plus il y a de solutions à faire évoluer simultanément, plus grand sera le temps de calcul. Notre objectif, dans cette partie du travail est de concevoir un algorithme multi-objectifs qui renvoie un ensemble de solutions réciproquement non dominées, dans un temps de calcul comparable à celui de l'algorithme GPP4G-ILS proposé précédemment.

La suite du chapitre se présente comme suit. La section 2 fait une brève revue de littérature de l'optimisation multi-objectifs dans la planification des réseaux. Dans la section 3, nous décrivons l'algorithme MOGPP4G-ILS. Nous présentons et analysons les résultats obtenus dans la section 4. La section 5 conclut le chapitre et énonce les travaux futurs.

6.2 L'optimisation multi-objectifs dans la planification des réseaux

Plusieurs auteurs de la littérature ont essayé de résoudre diverses versions du problème de planification des réseaux en utilisant une formulation multi-objectifs.

Delgado et Claro [51], par exemple, ont proposé un modèle MILP multi-objectifs pour le problème de la planification de l'expansion des réseaux de transport avec incertitude au niveau de la demande et aversion au risque (TNEP). Pour résoudre le modèle, les auteurs agrègent les différents objectifs et utilisent le solveur CPLEX. Engels *et al.* [56] ont proposé un modèle multi-objectifs pour les réseaux de stations relais multi-sauts 4G, dans lequel ils agrègent les objectifs. Ils résolvent plusieurs fois le modèle avec CPLEX en modifiant le poids accordé à la première fonction objectif afin de trouver un ensemble de solutions pour chaque instance du problème.

Da Silva Maximiano *et al.* [43] proposent un algorithme multi-objectifs basé sur les colonies d'abeilles artificielles pour résoudre le problème d'assignation de fréquence dans les réseaux GSM. Benyamina *et al.* [20] s'intéressent à la planification des réseaux maillés sans fil. Les auteurs proposent trois différentes formulations du problème qu'ils résolvent avec un algorithme multi-objectif basé sur les algorithmes génétiques et l'optimisation par essais particuliers.

Gordejuela-Sánchez *et al.* [64] ont essayé de résoudre le problème de planification des réseaux WiMAX dans une perspective multi-objectifs. Les auteurs ont traité le problème de planification cellulaire des réseaux WiMAX en utilisant la notion de dominance Pareto intégrée à la recherche taboue. Ils proposent une version multi-objectifs de leur premier modèle [65] et ils minimisent le coût du réseau tout en maximisant la qualité du service reçue par les utilisateurs (minimisation des interférences et maximisation du débit utile). Dans l'algorithme proposé, les auteurs essaient, à chaque étape, d'améliorer un front de recherche en sélectionnant le meilleur voisin de chaque solution du front. Un voisin est obtenu en modifiant l'état d'une station de base dans la solution courante, soit en l'activant ou en la désactivant. Les solutions non-dominées sont utilisées pour mettre à jour le front Pareto (meilleur front obtenu et sauvegardé). Les nouveaux voisins obtenus sont insérés dans la liste taboue afin de ne pas les reconsidérer pendant un certain nombre d'itérations. Pour maintenir la diversité au sein de l'algorithme, le nouveau front courant est construit en sélectionnant aléatoirement des solutions parmi celles qui ont été générées au cours des itérations précédentes.

Mai *et al.* [94] proposent également un algorithme multi-objectifs pour la planification des cellules dans les réseaux 4G. Les auteurs essaient de minimiser le coût d'installation du réseau tout en maximisant sa couverture et sa capacité.

6.3 Description de l'algorithme MOGPP4G-ILS

Nous avons légèrement modifié l'algorithme du chapitre précédent pour en faire un algorithme multi-objectifs. Les modifications effectuées se situent aux niveaux de l'acceptation d'une solution par l'algorithme LNS (Étape 2.3) et du choix de la solution de redémarrage de l'algorithme LNS lorsque celui-ci stagne (Étape 3.1). La mise-à-jour du front Pareto sera également détaillée. La différence fondamentale entre l'algorithme GPP4G-ILS et l'algorithme MOGPP4G-ILS est que ce dernier renvoie un ensemble de solutions réciproquement non dominées alors que l'algorithme GPP4G-ILS renvoie une solution unique de coût minimum.

Le pseudo-code de l'algorithme LNS multi-objectifs est donné par l'Algorithme 6.1.

Le pseudo-code de l'algorithme MOGPP4G-ILS est donné par l'Algorithme 6.2. Dans la suite, nous expliquons les choix que nous avons effectués.

 Algorithm 6.1 : Algorithme LNS multi-objectifs pour le GPP-4G

(Répéter jusqu'au critère d'arrêt pour LNS)

Étape 1 : Générer un mouvement.

Étape 1.1 : Libérer *SizeFreeLNS* sites aléatoirement $s \Rightarrow s'$ (Destroy)

Étape 1.2 : Évaluer s' avec la procédure ILP (Repair)

Étape 2 : Si la solution obtenue est acceptée

Étape 2.1 : Appliquer le mouvement ($s' \rightarrow s$)

Étape 2.2 : Mettre à jour le front Pareto.

Algorithm 6.2 : Algorithme multi-objectifs (MOGPP4G-ILS) pour le GPP-4G

Étape 1 : Générer la solution initiale s (Algorithme 5.1).

Étape 2 : Appliquer l'algorithme LNS multi-objectifs (Algorithme 6.1) sur la solution s .
(Répéter les Étapes 3-5 jusqu'au critère d'arrêt pour ILS)

Étape 3 : Effectuer un saut dans l'espace de recherche.

Étape 3.1 : Choisir aléatoirement une solution parmi les solutions du front Pareto.

Étape 3.2 : Modifier (ne pas libérer) *SizeJump* sites aléatoirement.

Étape 3.3 : Évaluer la solution s' obtenue avec la procédure ILP.

Étape 4 : Mettre à jour le front Pareto.

Étape 5 : Appliquer l'algorithme LNS multi-objectifs (Algorithme 6.1) sur la solution s' .

Étape 6 : Retourner les solutions du front Pareto.

Nous avons pour objectif de concevoir un algorithme multi-objectifs qui renvoie un ensemble de solutions réciproquement non dominées, dans un temps de calcul comparable à celui de l'algorithme GPP4G-ILS proposé précédemment. Pour ce faire, nous désirons maintenir à peu près le même nombre d'évaluations de solutions pour notre algorithme MOGPP4G-ILS. Deux choix s'offrent à nous.

Le premier consisterait à faire comme dans la littérature, c'est-à-dire concevoir un algorithme à base de population ou un algorithme à solution unique qui maintient un ensemble de solutions à chaque itération. Il faudra dans ce cas diminuer le nombre d'itérations afin de maintenir le même nombre d'évaluations de solutions. Cela pourrait résulter à la fin en un ensemble de solutions moins évoluées et donc moins performantes.

Le second choix, celui que nous avons effectué, consiste à maintenir une solution unique que nous faisons évoluer au fil du temps. Cependant, deux problèmes se posent à ce niveau. D'une part, les métaheuristiques multi-objectifs n'admettent pas un ordre total entre les solutions. Nous devons donc trouver un moyen efficace pour comparer deux solutions à l'étape de l'acceptation ou non d'une nouvelle solution par l'algorithme LNS. D'autre part, il faudra trouver le moyen de conserver l'ensemble des solutions non dominées trouvées par l'algorithme

afin de renvoyer à la fin, non pas une solution unique, mais un ensemble de solutions. Ces points sont discutés ci-après.

6.3.1 Comparaison des solutions : critère d'acceptation d'une nouvelle solution

Deux méthodes de comparaison ont été proposées et testées, l'une étant plus permissive (CP) et l'autre plus restrictive (CR).

Avec la méthode de comparaison permissive (CP), l'algorithme LNS (algorithme 6.1) accepte une nouvelle solution si et seulement si cette dernière n'est pas dominée par la solution courante. Dans ce cas, soit la nouvelle solution est meilleure que la solution courante, soit les deux solutions sont incomparables. Dans le deuxième cas, nous pouvons supposer une certaine équivalence entre les deux solutions (elles sont mutuellement non dominées). Nous avons donc établi un ordre entre les solutions, ce qui nous permet d'appliquer une méthode de descente : la nouvelle solution est acceptée si et seulement si elle est au moins aussi bonne que la solution courante. Cette méthode est dite permissive car elle peut générer un comportement non désiré. Ce comportement est illustré par la Figure 6.1. Cette figure montre un premier déplacement d'une solution S_1 vers une solution S_2 qui est non dominée par S_1 . Un second déplacement est ensuite effectué de la solution S_2 vers une solution S_3 qui est non dominée par la solution S_2 , mais la solution S_3 est dominée par la solution S_1 . Cela pourrait être vu comme une marche aléatoire dans l'espace de recherche. Cependant, grâce à la procédure ILP qui renvoie généralement la meilleure solution pour une configuration donnée, notre algorithme a très peu tendance à effectuer ce genre de déplacement.

Avec la méthode de comparaison restrictive (CR), un vecteur de référence S^* est maintenue et mis-à-jour à chaque déplacement. Ce vecteur contient, pour chaque objectif, la valeur



Figure 6.1 Illustration d'un déplacement non désiré avec la méthode de comparaison permissive.

optimale obtenue pour toutes les solutions rencontrées jusque-là. Lorsqu'un déplacement est effectué d'une solution S_1 vers une solution S_2 non dominée, les valeurs des objectifs qui ont été améliorés sont mises-à-jour dans le vecteur de référence. Une nouvelle solution est acceptée si et seulement si elle n'est pas dominée par le vecteur de référence S^* . La Figure 6.2 illustre un déplacement avec la méthode de comparaison CR. Cette méthode est dite restrictive car elle empêche tout déplacement de la nouvelle solution S_2 vers toute solution S_3 qui peut être non dominée par les solutions S_1 et S_2 mais qui serait dominée par le vecteur S^* . Ceci limite la capacité d'exploration du voisinage par l'algorithme.

6.3.2 Mise-à-jour du front Pareto

L'algorithme MOGPP4G-ILS dispose d'une mémoire à long terme, le front Pareto, qui lui permet de stocker l'ensemble des solutions non dominées trouvées. Chaque fois qu'une nouvelle solution est acceptée par l'algorithme LNS, cette mémoire est mise à jour. La nouvelle solution est comparée aux solutions du front Pareto. Si la nouvelle solution est dominée par l'une des solutions du front, aucune mise-à-jour n'est effectuée. Dans le cas contraire, la nouvelle solution est ajoutée au front. L'algorithme vérifie alors si certaines solutions du front sont dominées par la nouvelle solutions. Le cas échéant, ces dernières sont retirées du front. La mémoire à long terme contient donc, en tout temps, un ensemble des meilleures solutions mutuellement non dominées trouvées par l'algorithme.

6.3.3 Choix de la solution de redémarrage

Les solutions du front Pareto sont mutuellement non dominées. Elles sont donc considérées équivalentes. Il n'y a donc pas une solution qui est meilleure qu'une autre. De ce fait, lors

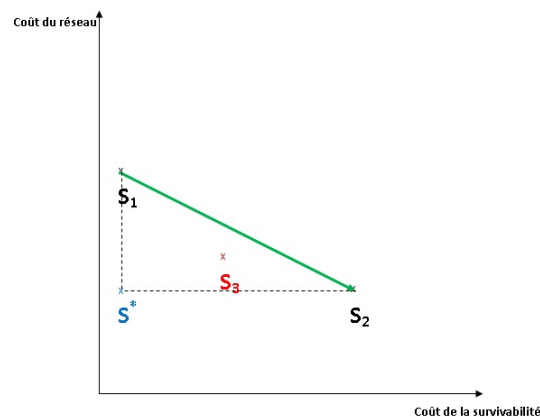


Figure 6.2 Illustration de la méthode de comparaison restrictive.

du redémarrage de l'algorithme LNS lors que ce dernier stagne, une solution de redémarrage est choisie au hasard parmi toutes les solutions du front pareto, avec la même probabilité de sélection pour chaque solution.

6.3.4 Évaluation d'une solution

Pour évaluer chaque solution, nous utilisons la procédure ILP définie dans la méthode mono-objectif. On pourrait objecter que cette méthode n'a rien de multi-objectifs. Cependant, le problème est lui-même un problème multi-objectifs et, comme indiqué au chapitre 4, le modèle proposé est un modèle multi-objectifs dans lequel les fonctions objectif ont été agrégées pour en faire un problème mono-objectif. La procédure ILP est donc une approche de programmation multi-objectifs à moyenne pondérée dans laquelle toutes les fonctions objectif ont le même poids. On peut donc conclure que l'algorithme MOGPP4G-ILS effectue une hybridation entre l'approche Pareto et l'approche d'agrégation pour la résolution d'un problème multi-objectifs.

6.4 Expérimentations numériques et résultats obtenus

Pour effectuer nos tests, nous avons choisi quatre instances de problème au hasard parmi les instances de grande taille générées au chapitre 5, deux de chaque taille.

Afin de comparer les résultats, nous avons également optimisé séparément les deux objectifs avec CPLEX. Pour ce faire, nous avons d'abord considéré uniquement la minimisation du coût du réseau dans un premier temps. Ensuite, fixant le coût du réseau au coût minimum obtenu à la première étape, nous avons minimisé le coût de la survivabilité. Les résultats obtenus sont consignés dans le Tableau 6.1. Ces résultats sont comparés avec les meilleures solutions obtenues par l'algorithme GPP4G-ILS au bout des trois exécutions de l'algorithme.

Dans la plupart des cas, la solution obtenue par l'algorithme GPP4G-ILS est la même que celle obtenue en optimisant successivement les deux fonctions objectifs. Ceci est dû au fait que le coût de la seconde fonction objectif (pénalité pour la non-fiabilité du réseau) est très faible par rapport à celui de la première fonction objectif (coût du réseau), ce qui fait qu'il est moins significatif. Cependant, on constate que dans certains cas, la solution n'est pas la même (instance #3). On peut également remarquer que l'algorithme GPP4G-ILS trouve toujours une solution dont le coût total est inférieur ou égal au coût de la solution obtenue lorsque les deux objectifs sont traités séparément.

Nous avons également essayé de considérer les deux objectifs dans l'ordre inverse (minimisation du coût de la survivabilité en premier). Cependant, CPLEX n'est arrivé à trouver aucune solution dans le temps limite imparti.

Tableau 6.1 Comparaison entre les solutions de l'algorithme GPP4G-ILS et ceux obtenus par CPLEX avec l'optimisation séparée des deux objectifs.

Numéros d'Instance	Nombre de TPs	Nombre de BSs	Optimisation séparée (M\$)			GPP4G-ILS (M\$)		
			Réseau	Survivabilité	Total	Réseau	Survivabilité	Total
1	50	25	5832,66	30,97	5863,63	5832,66	30,97	5863,63
2	50	25	16706,60	51,15	16757,75	16706,60	51,15	16757,75
3	50	50	16416,70	41,42	16458,12	16424,10	32,71	16456,81
4	50	50	2800,13	27,74	2827,87	2800,13	27,74	2827,87

Tableau 6.2 Comparaison des temps de calcul obtenus par les algorithmes MOGPP4G-ILS et GPP4G-ILS.

# d'instance	MOGPP4G-ILS (s)	GPP4G-ILS (s)	Écart (%)
1	5374,91	4724,43	13,77
2	4759,33	3993,06	19,19
3	5464,83	4991,35	9,49
4	8115,98	6786,80	19,58

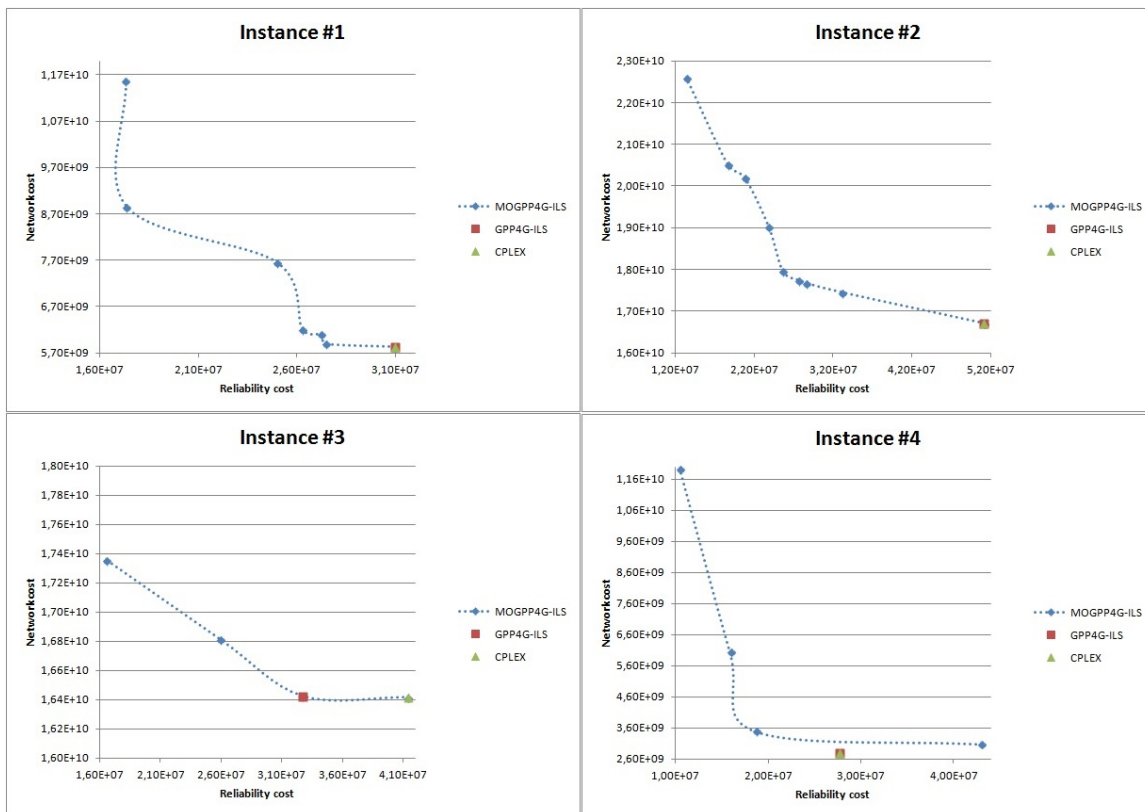


Figure 6.3 Résultats obtenus par l'algorithme MOGPP4G-ILS avec la méthode de comparaison CP.

Pour chaque méthode de comparaison, l'algorithme MOGPP4G-ILS a été lancé trois fois sur chacune des instances. Les solutions obtenues pour chaque instance ont été réunies et les solutions dominées dans l'ensemble ont été retirées. La Figure 6.3 présente pour la méthode de comparaison CP, pour chacune des instances, l'ensemble des solutions non dominées obtenues par l'algorithme MOGPP4G-ILS ainsi que la meilleure solution obtenue par l'algorithme GPP4G-ILS et la solution obtenue par CPLEX pour l'optimisation séparée des deux objectifs.

La Figure 6.3 montre que la meilleure solution obtenue par l'algorithme GPP4G-ILS et la solution renvoyée par CPLEX pour l'optimisation séparée des deux objectifs sont presque toujours (3 cas sur 4) incluses dans le front Pareto obtenu par l'algorithme MOGPP4G-ILS. Ce résultat témoigne de la qualité du front Pareto final obtenu. L'algorithme MOGPP4G-ILS présente, en plus de ces solutions, des solutions de compromis et d'autres solutions extrêmes qui permettront au décideur d'augmenter, s'il le désire, la survivabilité du réseau. L'algorithme MOGPP4G-ILS permet donc, en investissant plus, de concevoir un réseau plus fiable que celui généré par l'algorithme GPP4G-ILS. Cela donne plus de choix au décideur, rendant la planification plus flexible.

La Figure 6.4 présente les résultats obtenus par l'algorithme MOGPP4G-ILS avec chacune

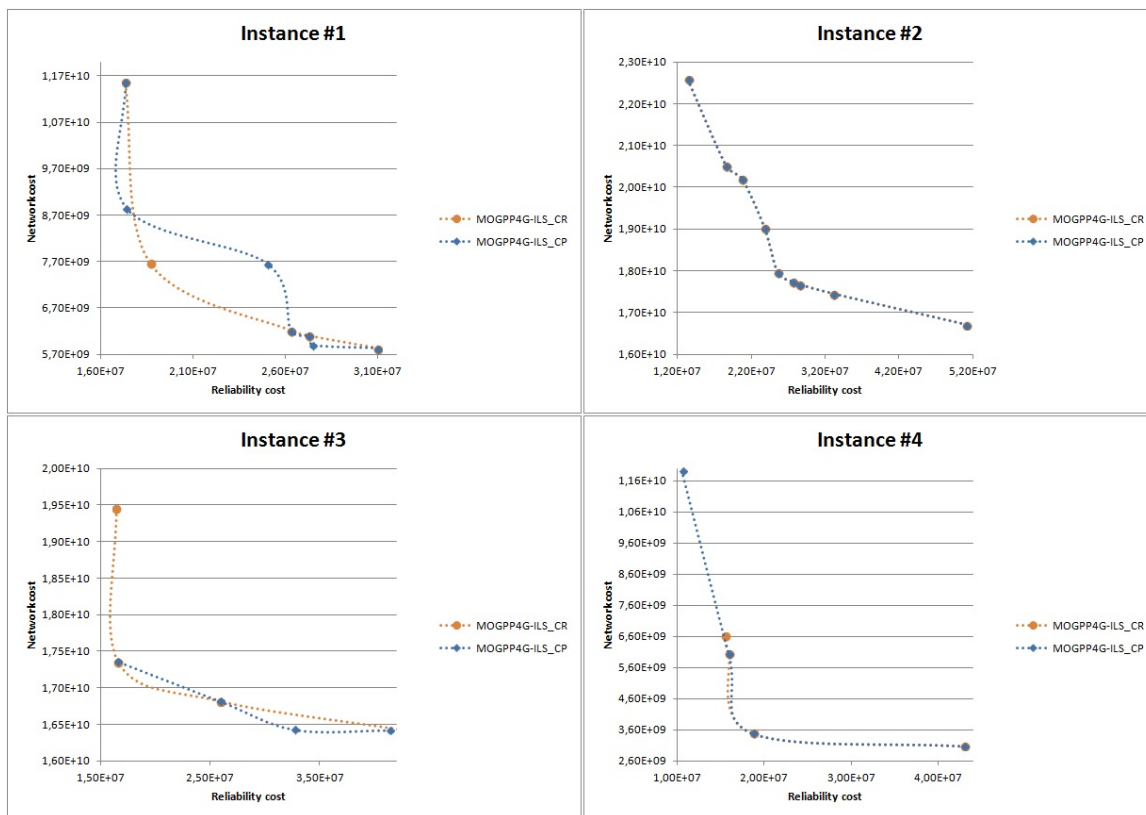


Figure 6.4 Comparaison entre les méthodes de comparaison CR et CP.

des deux méthodes de comparaison CP et CR. Cette figure montre que les deux méthodes s'équivalent. La méthode CP permet une meilleure exploration du voisinage mais peut accepter de moins bonnes solutions. La méthode CR, quant à elle, restreint l'exploration du voisinage mais permet de maintenir la qualité des solutions acceptées. Il serait intéressant de concevoir une méthode mixte qui tirerait avantage des forces de chacune de ces deux méthodes de comparaison afin d'améliorer la qualité du front Pareto final obtenu.

Le Tableau 6.2 montre, pour chaque instance, le temps CPU moyen de l'algorithme MOGPP4G-ILS en comparaison avec ceux de l'algorithme GPP4G-ILS. L'écart entre les deux temps CPU est calculé par la formule $(\text{MOGPP4G-ILS} - \text{GPP4G-ILS})/\text{GPP4G-ILS}$ et est exprimé en pourcentage. On remarque que cet écart ne dépend pas de la taille de l'instance et qu'il n'excède pas 20%. L'écart entre les deux temps de calcul est dû au traitement supplémentaire nécessaire dans l'algorithme MOGPP4G-ILS pour comparer deux solutions et pour mettre à jour le front Pareto. Nous avons donc atteint notre objectif, qui est de concevoir un algorithme multi-objectifs performant qui s'exécute avec des temps de calcul comparables à ceux de l'algorithme mono-objectif GPP4G-ILS.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un algorithme d'optimisation multi-objectifs pour le problème GPP-4G. Pour ce faire, nous avons établi un ordre entre les diverses solutions afin de les comparer. L'algorithme proposé offre plus d'alternatives au décideur rendant ainsi la planification flexible. De plus, les solutions obtenues sont comparables aux meilleures solutions obtenues par l'algorithme mono-objectif GPP4G-ILS avec des temps de calcul semblables.

L'approche proposée est une approche Pareto du fait qu'elle utilise la notion de dominance dans le processus de recherche. Cependant, contrairement aux approches Pareto utilisées dans la littérature, l'algorithme proposé fait évoluer une solution unique à chaque itération. Nos futurs travaux consisteront à implémenter d'autres approches multi-objectifs afin de les comparer avec celle que nous proposons.

L'évaluation de la solution utilise la procédure ILP conçue précédemment pour l'algorithme mono-objectif, qui utilise la méthode de la moyenne pondérée afin d'avoir une fonction objectif unique à évaluer. Bien que l'agrégation des objectifs soit une approche multi-objectifs reconnue, il serait intéressant de trouver le moyen d'intégrer une approche multi-objectifs à CPLEX afin que la procédure renvoie un ensemble de solutions non dominées plutôt qu'une solution unique.

CHAPITRE 7

DISCUSSION GÉNÉRALE

Dans ce chapitre, nous parlerons de la méthodologie utilisée dans le cadre de cette thèse et nous discuterons des différents choix que nous avons effectués, par rapport aux alternatives disponibles.

L'objectif principal de cette thèse était de concevoir un cadre de planification globale pour les réseaux mobiles de la 4G. La méthodologie utilisée a été la suivante.

Dans la première partie de cette thèse, nous avons conçu un modèle global de planification pour les réseaux mobiles 4G. Nous nous sommes assurés, en appliquant le modèle à de petits réseaux conçus manuellement, que tous les aspects du problème ont été représentés dans le modèle. Nous avons ensuite résolu le modèle en utilisant le solveur mathématique CPLEX. Pour évaluer notre modèle, nous l'avons comparé à un modèle séquentiel et à un modèle global sans survivabilité que nous avons nous-même conçu. La pertinence des deux principaux aspects de notre modèle (la globalité et la survivabilité) a ainsi pu être confirmée. Nous avons ensuite conçu une métaheuristique afin de trouver de bonnes solutions en un temps réduit, en intégrant le solveur CPLEX dans la résolution. La troisième partie du travail a consisté à la conception d'une métaheuristique multi-objectifs pour traiter le modèle.

L'analyse critique de l'ensemble de notre travail nous amène à nous poser les trois questions suivantes, auxquelles nous apportons des réponses dans la suite.

1. Pourquoi utiliser CPLEX ?
2. Pourquoi ne pas avoir utilisé une formule mathématique pour évaluer les solutions dans la métaheuristique ?
3. Pourquoi ne pas avoir comparé nos résultats avec d'autres algorithmes de la littérature ?

Il existe une multitude de solveurs mathématiques pour la résolution exacte. Notre choix s'est porté sur CPLEX non seulement à cause de sa puissance, mais aussi parce que c'est celui qui était disponible sur nos ordinateurs. La prise en main du logiciel a été difficile au début, mais une fois effectuée, cela a grandement facilité la suite du travail. Pour résoudre les instances, nous avons utilisé les réglages de base du logiciel. Il pourrait être possible en modifiant ces réglages, par exemple en concevant un algorithme de branchement plus performant, d'améliorer les performances de la résolution exacte. Nous aurions ainsi pu augmenter la taille des instances traitées. Cependant, cela ne modifierait pas les conclusions de notre travail car il y aurait toujours une limite pour la résolution exacte, le problème étant NP-difficile.

La métaheuristique proposée utilise également CPLEX dans la résolution ; ses performances devraient donc être améliorées elles-aussi si la méthode exacte est améliorée.

En ce qui concerne la deuxième question, nos premiers efforts ont en effet consisté à chercher une équation mathématique pour l'évaluation des solutions dans la métaheuristique. Cependant, nous n'avons pas réussi à trouver une représentation de la solution permettant d'intégrer le respect de toutes les contraintes. Une première réaction a été d'introduire une pénalité pour chaque violation de contrainte. Nous avons ainsi conçu une fonction pour évaluer le nombre de contraintes violées afin d'appliquer une pénalité selon ce nombre mais cette fonction était très gourmande en temps de calcul et de plus elle devait être exécutée à chaque évaluation de la solution. Nous avons alors pensé à utiliser CPLEX pour valider les solutions évaluées mais cette méthode empêcherait toute violation de contrainte et limiterait l'exploration du voisinage. L'une des forces de la méthode exacte est de renvoyer la solution optimale lorsque la taille de l'instance est très petite. Nous avons donc décidé d'exploiter cette force pour réaliser l'intensification au sein de la métaheuristique, d'où la conception d'une métaheuristique hybride intégrant l'utilisation de CPLEX pour l'évaluation des configurations.

Tout au long de la thèse, nous avons utilisé comme base de comparaison des algorithmes que nous avons nous-même conçus. Cela est dû au fait que le problème que nous traitons n'avait jamais été modélisé auparavant. Il n'existe donc pas, au sein de la littérature, d'autres travaux auxquels nous aurions pu nous comparer de façon équitable. De la même manière, il n'existait pas de jeux de données pour ce problème. Nous avons dû générer les instances que nous avons utilisées en nous basant sur les caractéristiques des réseaux 4G et sur les jeux de test existant pour d'autres problèmes de la littérature.

En conclusion, nous avons eu à effectuer divers choix méthodologiques tout au long de la thèse. Ces choix ont été motivés par diverses raisons et certains ont été la suite logique de travaux préliminaires qui n'ont pas nécessairement été exposés dans ce document.

CHAPITRE 8

CONCLUSION

Un récapitulatif des travaux effectués dans le cadre de cette thèse est effectué dans ce chapitre. Nous commençons par une synthèse des contributions de la thèse. Ensuite, les limitations des travaux effectués sont présentées et des améliorations futures sont proposées.

8.1 Synthèse des contributions de la thèse

Cette thèse a donné lieu à des contributions, aussi bien dans le domaine de la planification des réseaux que dans celui des métaheuristiques.

Dans le domaine de la planification des réseaux, un nouveau modèle a été conçu pour les réseaux de la quatrième génération. Ce modèle est générique et peut permettre de planifier tout réseau qui présentera la même architecture. Ce modèle permet de résoudre intégralement le problème de planification sans le subdiviser en plusieurs sous-problèmes, ce qui permet de réduire le coût total du réseau. De plus, le modèle intègre la survivabilité du réseau à l'étape de la planification. La prise en compte des scénarios de panne possibles à cette étape permet de concevoir un réseau plus robuste qui résiste aux pannes. Cela permet de réduire les pertes occasionnées par une panne du réseau.

Nous avons également proposé un nouvel algorithme hybride, basé sur l'utilisation combinée d'une métaheuristique et d'un algorithme exact pour résoudre le problème de planification. Contrairement aux travaux existants, l'intégralité du problème a été conservée au sein de la métaheuristique, permettant ainsi une meilleure intensification des solutions. L'algorithme proposé obtient d'excellents résultats, aussi bien en ce qui concerne le temps de calcul que la qualité des solutions retournées.

Une troisième contribution a été la conception d'un algorithme multi-objectifs pour résoudre le problème. En effet, le problème étant de nature multi-objectifs, un tel algorithme permet d'avoir un aperçu de différentes solutions possibles dépendamment des priorités du planificateur. L'algorithme retourne à la fin un ensemble de solutions mutuellement non dominées, aussi bien des solutions extrêmes que des solutions de compromis. Le planificateur a alors le choix de privilégier l'un des deux objectifs du problème ou de faire un compromis entre les deux.

Dans le domaine des métaheuristiques, la contribution a consisté à adapter une méthode peu connue, l'hybridation d'une métaheuristique avec une méthode exacte, à un problème

de la vie réelle. Nous avons proposé une nouvelle représentation de l'espace de recherche qui permet d'exploiter les caractéristiques de deux méthodes, une méthode heuristique et une méthode exacte, afin de les hybrider. Cette hybridation a permis d'utiliser une métaheuristique pour résoudre un problème qu'elle n'aurait pas pu résoudre toute seule. De plus, les temps de calculs sont nettement meilleurs que ceux obtenus en utilisant exclusivement la méthode exacte et les solutions obtenues sont très proches de l'optimum. On pourrait envisager d'utiliser cette méthode pour résoudre d'autres problèmes très contraints pour lesquels l'utilisation de métaheuristicques n'était pas envisagée à cause de la difficulté de représenter et d'évaluer une solution.

8.2 Limitations de la solution proposée

Malgré les contributions énoncées ci-dessus, notre travail présente quelques limitations à savoir :

- La principale limitation de cette thèse est le fait que l'aspect 'mobilité' n'a pas été étudié. En effet, le modèle proposé n'intègre pas la gestion de la mobilité. Nous avons considéré des points de test et des quantités de données transmises d'un point de test à un autre sans nous préoccuper de la mobilité des utilisateurs. Ce choix a été effectué car la gestion de la mobilité est intégrée à la technologie des réseaux de quatrième génération. Il serait tout de même intéressant d'étudier comment cette gestion s'effectue et comment la mobilité des usagers peut influencer la charge circulant sur le réseau.
- Le modèle proposé suppose une matrice de trafic connue et pré-déterminée. Il ne prend pas en compte la notion d'incertitude sur la demande. De plus, le trafic n'est pas réparti uniformément sur l'ensemble des liens du réseau. On pourrait améliorer la robustesse du réseau en intégrant ces notions dans le modèle.
- La relaxation proposée pour la génération de bornes inférieures n'arrive pas à traiter efficacement des instances de grande taille. De plus, certaines instances ne peuvent être traitées à cause de la mémoire consommée. Il faudrait trouver une meilleure méthode de génération de la borne inférieure afin de pouvoir évaluer des instances de plus grande taille.
- L'approche multi-objectifs proposée, bien qu'utilisant la notion de dominance dans le processus de recherche, diffère des approches Pareto utilisées dans la littérature du fait qu'elle fait évoluer une solution unique à chaque itération. Il serait intéressant d'implémenter d'autres approches multi-objectifs afin de les comparer avec celle que nous proposons. De plus, l'évaluation de la solution utilise la procédure ILP conçue précédemment pour l'algorithme mono-objectif, qui utilise la méthode de la moyenne

pondérée afin d'avoir une fonction objectif unique à évaluer. Bien que l'agrégation des objectifs soit une approche multi-objectifs reconnue, il serait intéressant de trouver le moyen d'intégrer une approche multi-objectifs à CPLEX afin que la procédure renvoie un ensemble de solutions non dominées plutôt qu'une solution unique.

8.3 Améliorations futures

Plusieurs voies de recherche s'offrent à ce point. Ces voies de recherche découlent, pour la plupart, des limitations présentées dans la section précédente.

Une première voie de recherche serait d'étudier l'aspect mobilité dans les réseaux 4G et d'intégrer cette étude au modèle proposé. Des travaux existent au sein de la littérature sur la gestion de la mobilité ainsi que son intégration dans la planification des réseaux. Ces travaux seraient un bon point de départ.

La deuxième voie de recherche que nous proposons est dans le domaine de l'optimisation combinatoire. Elle consisterait à trouver un meilleur moyen pour calculer des bornes inférieures de bonne qualité pour les instances de plus grande taille. Cela pourrait être, par exemple, une équation mathématique dont on pourra évaluer la valeur en temps polynomial de la taille de l'instance.

Une autre voie de recherche consisterait à prendre en compte le fait que certains équipements sont déjà installés à l'avance dans le réseau et considérer le problème d'expansion d'un réseau déjà existant. En effet, dans le contexte actuel où plusieurs réseaux sont déjà implémentés, les opérateurs seraient intéressés à étendre leurs réseaux existants plutôt que d'en construire un entièrement nouveau. On peut également considérer l'intégration de plusieurs technologies différentes.

Nos futurs travaux porteront sur l'amélioration de l'approche multi-objectifs proposée, plus précisément sur l'intégration de l'aspect multi-objectifs dans la procédure ILP. Nous projetons également d'implémenter quelques approches multi-objectifs de la littérature et nous évaluerons dans quelles mesures nous pourrions les adapter à notre problème afin d'améliorer les résultats obtenus.

RÉFÉRENCES

- [1] 3GPP (2010). Requirements for further advancements for evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) LTE-Advanced. *ETSI TR 136 913 V9.0.0*.
- [2] ABRAHAM, A. et JAIN, L. (2005). Evolutionary multiobjective optimization. A. Abraham, L. Jain et R. Goldberg, éditeurs, *Evolutionary Multiobjective Optimization*, Springer London, Advanced Information and Knowledge Processing. 1–6.
- [3] AHMAD, I. et HABIBI, D. (2009). Quality of service in WiMAX. Y. Zhang, éditeur, *WiMAX Network Planning and Optimization*, Auerbach Publications, Boca Raton, USA, chapitre 1. 3–18.
- [4] AHMADI, S. (2010). Overview of IEEE 802.16m radio access technology. K. Etemad et M. Lai, éditeurs, *WiMAX Technology and Network Evolution*, John Wiley & Sons, Inc., chapitre 5. 87–145.
- [5] AMALDI, E., BELOTTI, P., CAPONE, A. et MALUCELLI, F. (2006). Optimizing base station location and configuration in UMTS networks. *Annals of Operations Research*, 146, 135–151.
- [6] AMALDI, E., CAPONE, A. et MALUCELLI, F. (2003). Planning UMTS base station location : optimization models with power control and algorithms. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2, 939–952.
- [7] AMALDI, E., CAPONE, A. et MALUCELLI, F. (2008). Radio planning and coverage optimization of 3G cellular networks. *Wireless Networks*, 14, 435–447.
- [8] AMZALLAG, D., LIVSCHITZ, M., NAOR, J. et RAZ, D. (2005). Cell planning of 4G cellular networks : Algorithmic techniques and results. *6th IEEE International Conference on 3G and Beyond 2005*. 1–5.
- [9] APT, K. (2003). *Principles of constraint programming*. Cambridge University Press.
- [10] ASTÉLY, D., DAHLMAN, E., FURUSKAR, A., JADING, Y., LINDSTROM, M. et PARKVALL, S. (2009). LTE : the evolution of mobile broadband. *Communications Magazine, IEEE*, 47, 44–51.
- [11] ATELIN, P. (2009). *Réseaux informatiques - Notions fondamentales (Normes, Architecture, Modèle OSI, TCP/IP, Ethernet, Wi-Fi,...)*. Editions ENI.
- [12] BACHELET, V. et TALBI, E.-G. (2000). COSEARCH : a co-evolutionary metaheuristic. *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*. IEEE, vol. 2, 1550–1557.

- [13] BAHRI, A. et CHAMBERLAND, S. (2005). On the wireless local area network design problem with performance guarantees. *Computer Networks*, 48, 856–866.
- [14] BALAKRISHNAN, A., MAGNANTI, T. et WONG, R. (1995). A decomposition algorithm for local access telecommunications network expansion planning. *Operations research*, 58–76.
- [15] BANG-JENSEN, J., GUTIN, G. et YEO, A. (2004). When the greedy algorithm fails. *Discrete Optimization*, 1, 121–127.
- [16] BARICHARD, V. et HAO, J.-K. (2002). Un algorithme hybride pour le problème de sac à dos multi-objectifs. *Huitiemes Journées Nationales sur la Résolution Pratique de Problemes NP-Complets JNPC*.
- [17] BATESON, W. (1902). *Mendel's principles of heredity*. University Press.
- [18] BEDELL, P. (2001). *Wireless crash course*. McGraw-Hill Professional.
- [19] BELFARES, L., KLIBI, W., LO, N. et GUITOUNI, A. (2007). Multi-objectives tabu search based algorithm for progressive resource allocation. *European Journal of Operational Research*, 177, 1779–1799.
- [20] BENYAMINA, D., HAFID, A., HALLAM, N., GENDREAU, M. et MAUREIRA, J. (2012). A hybrid nature-inspired optimizer for wireless mesh networks design. *Computer Communications*, 35, 1231–1246.
- [21] BERRO, A. (2001). *Optimisation multiobjectifs et stratégies d'évolution en environnement dynamique*. Thèse de doctorat, ANRT.
- [22] BERROCAL-PLAZA, V., VEGA-RODRIGUEZ, M., GOMEZ-PULIDO, J. et SANCHEZ-PEREZ, J. (2011). Artificial bee colony algorithm applied to WiMAX network planning problem. *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA) 2011*. IEEE, 504–509.
- [23] BILLIONNET, A., DJABALI, R. et SUTTER, A. (2000). Integer linear programming for optimizing urban networks. *TSI-Technique et Science Informatiques-RAIRO*, 19, 1127–1150.
- [24] BLEY, A. et KOCH, T. (2008). Integer programming approaches to access and backbone IP network planning. H. G. Bock, E. Kostina, H. X. Phu et R. Rannacher, éditeurs, *Modeling, Simulation and Optimization of Complex Processes*, Springer Berlin Heidelberg. 87–110.
- [25] BLEY, A. et KOCH, T. (2008). Integer programming approaches to access and backbone IP network planning. *Modeling, Simulation and Optimization of Complex Processes*, 87–110.

- [26] BLUM, C., PUCHINGER, J., RAIDL, G. R. et ROLI, A. (2011). Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization : A survey. *Applied Soft Computing*, 11, 4135–4151.
- [27] BRUN, O. et GARCIA, J.-M. (2002). Ressource allocation in communication networks. *5th IEEE International Conference on High Speed Networks and Multimedia Communications*. IEEE, 229–233.
- [28] CALÉGARI, P., GUIDEC, F., KUONEN, P. et NIELSEN, F. (2001). Combinatorial optimization algorithms for radio network planning. *Theoretical Computer Science*, 263, 235–245.
- [29] CARELLO, G., DELLA CROCE, F., GHIRARDI, M. et TADEI, R. (2004). Solving the hub location problem in telecommunication network design : A local search approach. *Networks*, 44, 94–105.
- [30] CARLOS HINCAPIÉ, R. et BUSTAMANTE MILLER, R. (2009). Automatic and optimized cell-mesh planning in WiMAX. Y. Zhang, éditeur, *WiMAX Network Planning and Optimization*, Auerbach Publications, Boston, MA, USA, chapitre 16. Première édition, 329–348.
- [31] CHABRIER, A., DANNA, E., LE PAPE, C. et PERRON, L. (2004). Solving a network design problem. *Annals of Operations Research*, 130, 217–239.
- [32] CHAMBERLAND, S. (2005). Point of presence design in Internet protocol networks with performance guarantees. *Computers & operations research*, 32, 3247–3264.
- [33] CHAMBERLAND, S. et SANZO, B. (1995). Reliability in computer network synthesis - a parallel approach. *IEEE International Conference on Communications 1995 (ICC'95), 'Gateway to Globalization'*. IEEE, vol. 1, 156–160.
- [34] CHAMBERLAND, S. et SANZO, B. (1997). Sequential and parallel approaches to incorporate reliability in the synthesis of computer networks. *Journal of Network and Systems Management*, 5, 131–157.
- [35] CHANG, S. et GAVISH, B. (1993). Telecommunications network topological design and capacity expansion : Formulations and algorithms. *Telecommunication Systems*, 1, 99–131.
- [36] CHARNES, A. et COOPER, W. W. (1957). Management models and industrial applications of linear programming. *Management Science*, 4, 38–91.
- [37] CHARNES, A. et COOPER, W. W. (1962). Programming with linear fractional functionals. *Naval Research logistics quarterly*, 9, 181–186.
- [38] COELLO, C. A. C. C. (2001). A short tutorial on evolutionary multiobjective optimization. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Springer, 21–40.

- [39] COLBOURN, C. J. (1999). Reliability issues in telecommunications network planning. *Telecommunications network planning*, Springer. 135–146.
- [40] COLORNI, A., DORIGO, M., MANIEZZO, V. ET AL. (1991). Distributed optimization by ant colonies. *Proceedings of the first European conference on artificial life*. Paris, France, vol. 142, 134–142.
- [41] CPLEX, I. (2006). ILOG CPLEX 10.0 user’s manual. *ILOG SA, January*.
- [42] CZYZŻAK, P. ET JASZKIEWICZ, A. (1998). Pareto simulated annealing - a metaheuristic technique for multiple-objective combinatorial optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 7, 34–47.
- [43] DA SILVA MAXIMIANO, M., VEGA-RODRÍGUEZ, M. A., GÓMEZ-PULIDO, J. A. ET SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. (2013). A new multiobjective artificial bee colony algorithm to solve a real-world frequency assignment problem. *Neural Computing and Applications*, 1–13.
- [44] DAEMEN, J. ET RIJMEN, V. (1998). AES proposal : Rijndael. *First Advanced Encryption Standard (AES) Conference*.
- [45] D’ANDREAGIOVANNI, F. ET MANNINO, C. (2009). An optimization model for WiMAX network planning. Y. Zhang, éditeur, *WiMAX Network Planning and Optimization*, Auerbach Publications, Boca Raton, USA, chapitre 18. 369–386.
- [46] D’ANDREAGIOVANNI, F., MANNINO, C. ET SASSANO, A. (2012). GUB covers and power-indexed formulations for wireless network design. *Management Science*.
- [47] DARWIN, C. (1859). On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. *Murray, London*.
- [48] DATTA, P. ET KAUSHAL, S. (2014). Exploration and comparison of different 4g technologies implementations : A survey. *Engineering and Computational Sciences (RAECS), 2014 Recent Advances in*. 1–6.
- [49] DEB, K., AGRAWAL, S., PRATAP, A. ET MEYARIVAN, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization : NSGA-II. *Lecture notes in computer science*, 1917, 849–858.
- [50] DELANNOY, P., NGUYEN, H. D., MAROT, M., AGOULMINE, N. ET BECKER, M. (2010). WiMAX quality-of-service estimations and measurement. *Computer Communications*, 33, S71–S77.
- [51] DELGADO, D. ET CLARO, J. (2013). Transmission network expansion planning under demand uncertainty and risk aversion. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44, 696–702.

- [52] DORIGO, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy.*
- [53] DRÉO, J., PÉTROWSKI, A., TAILLARD, É. D. et SIARRY, P. (2003). *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Eyrolles (Editions).
- [54] DUTTA, A. et HSU, V. (2001). Cellular network design site selection and frequency planning. *Annals of Operations Research*, 106, 287–306.
- [55] EDMONDS, J. (1971). Matroids and the greedy algorithm. *Mathematical programming*, 1, 127–136.
- [56] ENGELS, A., REYER, M. et MATHAR, R. (2010). Profit-oriented combination of multiple objectives for planning and configuration of 4G multi-hop relay networks. *7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) 2010*. IEEE, 330–334.
- [57] ERGEN, M. (2009). *Mobile Broadband - Including WiMAX and LTE*. Springer Publishing Company.
- [58] FONSECA, C. et FLEMING, P. (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimization : Formulation, discussion and generalization. *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 416–423.
- [59] FOURMAN, M. P. (1985). Compaction of symbolic layout using genetic algorithms. *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms*. L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA, 141–153.
- [60] GANDIBLEUX, X. et FREVILLE, A. (2000). Tabu search based procedure for solving the 0-1 multiobjective knapsack problem : the two objectives case. *Journal of Heuristics*, 6, 361–383.
- [61] GARFINKEL, R. S. et NEMHAUSER, G. L. (1972). *Integer programming*, vol. 4. Wiley New York.
- [62] GAVRILOVSKA, L. et ATANASOVSKI, V. (2007). Interoperability in future wireless communications systems : A roadmap to 4G. *Microwave Review*, 13, 19–28.
- [63] GLOVER, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13, 533–549.
- [64] GORDEJUELA-SÁNCHEZ, F., JUTTNER, A. et ZHANG, J. (2009). A multiobjective optimization framework for IEEE 802.16e network design and performance analysis. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 27, 202–216.

- [65] GORDEJUELA-SÁNCHEZ, F. et ZHANG, J. (2008). Practical design of IEEE 802.16e networks : A mathematical model and algorithms. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) 2008*. 1–5.
- [66] GORDEJUELA-SANCHEZ, F. et ZHANG, J. (2009). LTE access network planning and optimization : A service-oriented and technology-specific perspective. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) 2009*. 1–5.
- [67] GOZDECKI, J., JAJSZCZYK, A. et STANKIEWICZ, R. (2003). Quality of service terminology in IP networks. *IEEE Communications Magazine*, 41, 153–159.
- [68] GUTIN, G., YEO, A. et ZVEROVICH, A. (2002). Traveling salesman should not be greedy : domination analysis of greedy-type heuristics for the TSP. *Discrete Applied Mathematics*, 117, 81–86.
- [69] HARMATOS, J. (2002). Planning of UMTS core networks. *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2002*. IEEE, vol. 2, 740–744.
- [70] HASHEMI, S. M., REZAPOUR, M. et MORADI, A. (2010). An effective hybrid PSO-based algorithm for planning UMTS terrestrial access networks. *Engineering Optimization*, 42, 241–251.
- [71] HEIKKINEN, T. et PRÉKOPA, A. (2005). Optimal power control in a wireless network using a model with stochastic link coefficients. *Naval Research Logistics (NRL)*, 52, 178–192.
- [72] HOLLAND, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University Michigan Press.
- [73] HU, T., CHEN, Y. et BANZHAF, W. (2010). WiMAX network planning using adaptive-population-size genetic algorithm. *Applications of Evolutionary Computation*, 31–40.
- [74] IBRAHIM, L. F., METWALY, O., KAPEL, K. et AHMED, A. (2005). Enhancing the behavior of the ant algorithms to solving network planning problem. *Third ACIS International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications 2005*. IEEE, 250–255.
- [75] IEEE (2002). IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16 : Air interface for fixed broadband wireless access systems. *IEEE Std 802.16-2001*.
- [76] IEEE (2006). IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16 : Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems amendment 2 :

- Physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed bands and corrigendum 1. *IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005 (Amendment and Corrigendum to IEEE Std 802.16-2004)*.
- [77] IEEE (2009). IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16 : Air interface for broadband wireless access systems. *IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004)*, C1–2004.
- [78] ISOTALO, T. et LEMPIAINEN, J. (2010). Measurements on HSUPA with uplink diversity reception in indoor environment. *European Wireless Conference (EW) 2010*. IEEE, 523–527.
- [79] ITU (1994). Terms and definitions related to quality of service and network performance including dependability. *ITU-T Rec. E. 800*.
- [80] ITU (2008). Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s). *REPORT ITU-R M.2134*.
- [81] JOHNSTON, N. et AGHVAMI, H. (2007). Comparing WiMAX and HSPA - a guide to the technology. *BT Technology Journal*, 25, 191–199.
- [82] KALVENES, J., KENNINGTON, J. et OLINICK, E. (2006). Base station location and service assignments in WCDMA networks. *INFORMS Journal on Computing*, 18, 366–376.
- [83] KENNEDY, J. et EBERHART, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995*. vol. 4, 1942–1948.
- [84] KIRKPATRICK, S., JR., D. G. et VECCHI, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671–680.
- [85] KONSTANTINOPOULOU, C., KOUTSOPOULOS, K., LYBEROPOULOS, G. et THEOLOGOU, M. (2000). Core network planning, optimization and forecasting in GSM/GPRS networks. *Symposium on Communications and Vehicular Technology 2000 (SCVT-2000)*. IEEE, 55–61.
- [86] KOSTER, A. M., KUTSCHKA, M. et RAACK, C. (2010). Towards robust network design using integer linear programming techniques. *6th EURO-NF Conference on Next Generation Internet (NGI) 2010*. IEEE, 1–8.
- [87] LAND, A. H. et DOIG, A. G. (2010). An automatic method for solving discrete programming problems. *50 Years of Integer Programming 1958-2008*, Springer. 105–132.
- [88] LEMAMOU, E. A., CHAMBERLAND, S. et GALINIER, P. (2013). A reliable model for global planning of mobile networks. *Computers & Operations Research*, 40, 2270 – 2282.

- [89] LITTLE, J. D., MURTY, K. G., SWEENEY, D. W. et KAREL, C. (1963). An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations research*, 11, 972–989.
- [90] LIU, S. et ST-HILAIRE, M. (2010). Cooperative algorithm for the global planning problem of UMTS networks. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) 2010*. IEEE, 1–5.
- [91] LIU, S. et ST-HILAIRE, M. (2010). A genetic algorithm for the global planning problem of UMTS networks. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) 2010*. IEEE, 1–5.
- [92] LOURENCO, H. R., MARTIN, O. C. et STUTZLE, T. (2003). Iterated local search. F. Glover et G. Kochenberger, éditeurs, *Handbook of Metaheuristics*, Springer US, vol. 57 de *International Series in Operations Research & Management Science*. 320–353.
- [93] MACULAN, N., DE MENDONÇA PASSINI, M., DE MOURA BRITO, J. A. et LOISEAU, I. (2003). Column-generation in integer linear programming. *Recherche opérationnelle (RAIRO)*, 37, 67–83.
- [94] MAI, W., LIU, H.-L., CHEN, L., LI, J. et XIAO, H. (2013). Multi-objective evolutionary algorithm for 4g base station planning. *Computational Intelligence and Security (CIS), 2013 9th International Conference on*. 85–89.
- [95] MERCHANT, A. et SENGUPTA, B. (1995). Assignment of cells to switches in PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 3, 521–526.
- [96] MILANOVIC, J., RIMAC-DRLJE, S. et BEJUK, K. (2007). Comparison of propagation models accuracy for WIMAX on 3.5 ghz. *14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS) 2007*. IEEE, 111–114.
- [97] MLADENOVIĆ, N. et HANSEN, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24, 1097–1100.
- [98] MOUSAVI, M., CHAMBERLAND, S. et QUINTERO, A. (2007). A new approach for designing WIMAX networks. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2007 (CCECE 2007)*. 487–490.
- [99] NAOUM-SAWAYA, J. et ELHEDHLI, S. (2010). A nested benders decomposition approach for telecommunication network planning. *Naval Research Logistics (NRL)*, 57, 519–539.
- [100] NEUBAUER, T. et TOELTSCH, M. (2005). UMTS radio network planning - maximizing return on investment. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 122, 108–113.
- [101] NIST (2001). Announcing the advanced encryption standard (AES). *Federal Information Processing Standards Publication*, n.197.

- [102] NTAGKOUNAKIS, K. et SHARIF, B. (2009). WiMAX networks dimensioning. Y. Zhang, éditeur, *WiMAX Network Planning and Optimization*, Auerbach Publications, Boston, MA, USA, chapitre 13. Première édition, 267–287.
- [103] OLINICK, E. V. et ROSENBERGER, J. M. (2008). Optimizing revenue in CDMA networks under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 186, 812–825.
- [104] OSMAN, I. H. et LAPORTE, G. (1996). Metaheuristics : A bibliography. *Annals of Operations Research*, 63, 513–623.
- [105] OSYCZKA, A. (1985). Multicriteria optimization for engineering design. J. Gero, éditeur, *Design optimization*, Academic Press. 193–227.
- [106] OUELLET, M.-O., CHAMBERLAND, S. et GALINIER, P. (2008). On the planning problem of wireless local area networks with directional antennas. *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications 2008 (WIMOB '08)*. 655–660.
- [107] PARETO, V. (1964). *Cours d'économie politique*. Librairie Droz.
- [108] PARSOPOULOS, K. E. et VRAHATIS, M. N. (2002). Particle swarm optimization method in multiobjective problems. *Proceedings of the 2002 ACM symposium on Applied computing*. ACM, 603–607.
- [109] PASANDIDEH, M. R. et ST-HILAIRE, M. (2014). A local search heuristic to solve the planning problem of 3g umts all-ip release 4 networks with realistic traffic. *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, 7, 1–20.
- [110] PIERRE, S. (2007). *Réseaux et systèmes informatiques mobiles : fondements, architectures et applications*. Presses internationales Polytechnique, Montréal.
- [111] PIERRE, S. et LEGAULT, G. (1998). A genetic algorithm for designing distributed computer network topologies. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics*, 28, 249–258.
- [112] PILIOURAS, T. C. (2004). *Network design : management and technical perspectives*. CRC Press.
- [113] PRIES, R., STAEHLE, D., STOYKOVA, M., STAEHLE, B. et TRAN-GIA, P. (2009). Wireless mesh network planning and optimization through genetic algorithms. *Second International Conference on Advances in Mesh Networks (MESH) 2009*. IEEE, 55–61.
- [114] PUCHINGER, J. et RAIDL, G. R. (2005). Combining metaheuristics and exact algorithms in combinatorial optimization : A survey and classification. *Artificial intelligence and knowledge engineering applications : a bioinspired approach*, Springer. 41–53.

- [115] PUJOLLE, G. et SALVATORI, O. (2010). *Les réseaux*. Editions Eyrolles.
- [116] RAIDL, G. R. et PUCHINGER, J. (2008). Combining (integer) linear programming techniques and metaheuristics for combinatorial optimization. *Hybrid Metaheuristics*, Springer. 31–62.
- [117] REY HORN, J., NAFPLIOTIS, N. et GOLDBERG, D. E. (1993). Multiobjective optimization using the Niche Pareto Genetic Algorithm. *IlliGAL report*, 61801–2296.
- [118] REYES-SIERRA, M. et COELLO, C. C. (2006). Multi-objective particle swarm optimizers : A survey of the state-of-the-art. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2, 287–308.
- [119] RIAZ, M., IMRAN, M. A. et HOSHYAR, R. (2010). Frequency planning of clustered cellular network using particle swarm optimization. *7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) 2010*. IEEE, 646–650.
- [120] RICCIATO, F., PILZ, R. et HASENLEITHNER, E. (2006). Measurement-based optimization of a 3G core network : A case study. *Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking*, 70–82.
- [121] ROSENBERGER, J. M. et OLINICK, E. V. (2007). Robust tower location for code division multiple access networks. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54, 151–161.
- [122] SAM-HAROUD, D. et FALTINGS, B. (1996). Consistency techniques for continuous constraints. *Constraints*, 1, 85–118.
- [123] SARKAR, S., YEN, H.-H., DIXIT, S. et MUKHERJEE, B. (2008). Hybrid wireless-optical broadband access network (WOBAN) : network planning and setup. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26, 12–21.
- [124] SCHAFFER, J. D. (1985). Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms*. L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA, 93–100.
- [125] SHAHBAZ, M. (1995). Fixed network design of cellular mobile communication networks using genetic algorithms. *Fourth IEEE International Conference on Universal Personal Communications*. IEEE, 163–167.
- [126] SHAW, P. (1998). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. *Principles and Practice of Constraint Programming (CP98)*, Springer. 417–431.
- [127] SILVER, E. A., VICTOR, R., VIDAL, V. et DE WERRA, D. (1980). A tutorial on heuristic methods. *European Journal of Operational Research*, 5, 153–162.

- [128] SMITH, K. I., EVERSON, R. M., FIELDSEND, J. E., MURPHY, C. et MISRA, R. (2008). Dominance-based multiobjective simulated annealing. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12, 323–342.
- [129] SRINIVAS, N. et DEB, K. (1994). Multiobjective optimization using non dominated sorting in genetic algorithms. *Evol. Comput.*, 2, 221–248.
- [130] ST-HILAIRE, M. (2006). *Planification globale des réseaux mobiles de troisième génération*. Thèse de doctorat, École polytechnique de Montréal.
- [131] ST-HILAIRE, M. (2009). A new approximative algorithm for the expansion problem of 3G networks. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 47, 105–115.
- [132] ST-HILAIRE, M. (2009). Topological planning and design of UMTS mobile networks : a survey. *Wireless communications and mobile computing*, 9, 948–958.
- [133] ST-HILAIRE, M., CHAMBERLAND, S. et PIERRE, S. (2006). Uplink UMTS network design - an integrated approach. *Computer Networks*, 50, 2747–2761.
- [134] ST-HILAIRE, M. et LIU, S. (2011). Comparison of different meta-heuristics to solve the global planning problem of UMTS networks. *Computer Networks*, 55, 2705–2716.
- [135] STUBER, G. L., BARRY, J. R., MCLAUGHLIN, S. W., LI, Y., INGRAM, M. A. et PRATT, T. G. (2004). Broadband MIMO-OFDM wireless communications. *Proceedings of the IEEE*, 92, 271–294.
- [136] SZLOVENCSAK, A., GODOR, I., HARMATOS, J. et CINKLER, T. (2002). Planning reliable UMTS terrestrial access networks. *IEEE Communications Magazine*, 40, 66–72.
- [137] TABUCANON, M. (1988). *Multiple criteria decision making in industry*, vol. 8. Elsevier Science Ltd.
- [138] TALBI, E.-G. (1999). Métaheuristiques pour l’optimisation combinatoire multi-objectifs : État de l’art. *Rapport CNET (France Telecom) Octobre*.
- [139] TAPLIN, R., RYAN, D., ALLEN, S., HURLEY, S. et THOMAS, N. (2007). Algorithms for the automatic design of WIMAX networks. *The 2007 International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2007 (NGMAST’07)*. 322–327.
- [140] TETERIN, V. et HURLEY, S. (2014). Optimized network dimensioning and planning for wimax technology. *Ad Hoc Networks*, 13, 381–403.
- [141] THIEL, S., GIULIANI, P., IBBETSON, L. et LISTER, D. (2002). An automated UMTS site selection tool. *Third International Conference on 3G Mobile Communication Technologies 2002 (Conf. Publ. No. 489)*. 69–73.

- [142] THOMPSON, G. L. et WALL, D. (1981). A branch and bound model for choosing optimal substation locations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 2683–2688.
- [143] TOSKALA, A., HOLMA, H., PAJUKOSKI, K. et TIIROLA, E. (2006). UTRAN long term evolution in 3GPP. *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2006*. IEEE, 1–5.
- [144] VAN HENTENRYCK, P. (1989). *Constraint satisfaction in logic programming*. MIT press.
- [145] VAN HENTENRYCK, P., SARASWAT, V. et DEVILLE, Y. (1995). Design, implementation, and evaluation of the constraint language cc (FD). *Constraint Programming : Basics and Trends*, Springer. 293–316.
- [146] VANHATUPA, T., HANNIKAINEN, M. et HAMALAINEN, T. (2007). Genetic algorithm to optimize node placement and configuration for WLAN planning. *4th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) 2007*. IEEE, 612–616.
- [147] VELASCO, L., CASTRO, A., KING, D., GERSTEL, O., CASELLAS, R. et LOPEZ, V. (2014). In-operation network planning. *Communications Magazine, IEEE*, 52, 52–60.
- [148] WANG, W. et RUSHFORTH, C. (1996). An adaptive local-search algorithm for the channel-assignment problem (CAP). *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 45, 459–466.
- [149] WIDMER, M., HERTZ, A. et COSTA, D. (2000). Ordonnancement de la production : Les métaheuristiques.
- [150] WU, Y. et PIERRE, S. (2003). Base station positioning in third generation mobile networks. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (IEEE CCECE) 2003*. vol. 1, 31 – 34 vol.1.
- [151] WU, Y. et PIERRE, S. (2003). Optimization of access network design in 3G networks. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (IEEE CCECE) 2003*. IEEE, vol. 2, 781–784.
- [152] YANG, J., AYDIN, M. E., ZHANG, J. et MAPLE, C. (2007). UMTS base station location planning : a mathematical model and heuristic optimisation algorithms. *Communications, IET*, 1, 1007–1014.
- [153] YANGYANG, Z., CHUNLIN, J., PING, Y., MANLIN, L., CHAOJIN, W. et GUANGXING, W. (2004). Particle swarm optimization for base station placement in mobile communication. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control 2004*. IEEE, vol. 1, 428–432.

- [154] YARALI, A. et RAHMAN, S. (2008). WiMAX broadband wireless access technology : services, architecture and deployment models. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (IEEE CCECE) 2008*. IEEE, 77–82.
- [155] YARALI, A. et RAHMAN, S. (2009). WiMAX : Architecture, planning and business model. Y. Zhang, éditeur, *WiMAX Network Planning and Optimization*, Auerbach Publications, Boston, MA, USA, chapitre 12. Première édition, 245–265.
- [156] YU, Y., GENC, V., MURPHY, S. et MURPHY, L. (2009). Network planning for IEEE 802.16j relay networks. Y. Zhang, éditeur, *WiMAX Network Planning and Optimization*, Auerbach Publications, Boca Raton, USA, chapitre 14. 289–310.
- [157] ZHENG, Y., BAALA, O. et CAMINADA, A. (2010). Efficient design of indoor positioning systems based on optimization model. *Wireless Days (WD), 2010 IFIP*. IEEE, 1–5.
- [158] ZITZLER, E., LAUMANN, M. et BLEULER, S. (2004). A tutorial on evolutionary multiobjective optimization. *Metaheuristics for Multiobjective Optimisation*, Springer. 3–37.
- [159] ZITZLER, E., LAUMANN, M., THIELE, L., ZITZLER, E., ZITZLER, E., THIELE, L. et THIELE, L. (2001). SPEA2 : Improving the strength pareto evolutionary algorithm.
- [160] ZITZLER, E. et THIELE, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms : A comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **3**, 257–271.