Modèles et algorithmes pour l'optimisation robuste dans les Self-Organizing Network (SON) des réseaux mobiles 4G (LTE)

Nourredine Tabia

▶ **To cite this version:**

Nourredine Tabia. Modèles et algorithmes pour l'optimisation robuste dans les Self-Organizing Network (SON) des réseaux mobiles 4G (LTE). Ordinateur et société [cs.CY]. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2013. Français. NNT : 2013BELF0222 . tel-00983358

HAL Id: tel-00983358

https://theses.hal.science/tel-00983358

Submitted on 25 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SPIM

Thèse de Doctorat

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

MODÈLES ET ALGORITHMES POUR L'OPTIMISATION ROBUSTE DANS LES SELF-ORGANIZING NETWORK (SON) DES RÉSEAUX MOBILES 4G (LTE)

Nourredine TABIA

SPIM

Thèse de Doctorat

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

N° 2 2 2

THÈSE présentée par

Nourredine TABIA

pour obtenir le

Grade de Docteur de
l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Spécialité : **Informatique**

MODÈLES ET ALGORITHMES POUR L'OPTIMISATION ROBUSTE DANS LES SELF-ORGANIZING NETWORK (SON) DES RÉSEAUX MOBILES 4G (LTE)

Soutenue le 13 Décembre 2013 devant le Jury :

Dominique GAITI	Rapporteur	Professeur à l'UTT
Pascal LORENZ	Rapporteur	Professeur à l'UHA
François SPIES	Examinateur	Professeur à l'Université Franche-Comté
Mohammed-Said RADJEF	Examinateur	Professeur à l'Université de Béjaia, Algérie
Alexandre CAMINADA	Directeur de thèse	Professeur à l'UTBM
Oumaya BAALA	Co-encadrant	Maitre de conférences à l'UTBM
Alexandre GONDRAN	Co-encadrant	Maitre de conférences à l'ENAC

Je dédie ce travail à mes parents, mes frères et sœurs.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres de mon jury pour avoir accepté de participer à la soutenance de cette thèse en commençant par Monsieur Mohammad-Said Radjef pour avoir fait un long déplacement et Monsieur François SPIES pour avoir accepté de présider le jury. Je remercie vivement Madame Dominique Gaiti et Monsieur Pascal Lorenz pour avoir consacré du temps à la lecture de ce document en tant que rapporteurs de ce travail.

Mes remerciements les plus vifs vont à mon directeur de thèse Monsieur Alexandre Caminada qui m'a soutenue tout au long de mon travail, et à la direction avisée, fidèle et exigeante de laquelle cette thèse doit beaucoup. Je remercie très chaleureusement Madame Oumaya Baala pour tous ses conseils et critiques sur le plan scientifique. Que soit également remercié ici Monsieur Alexandre Gondran pour avoir guidé mes premiers pas dans le domaine des télécommunications sans fil et pour m'avoir suivi et proposé de venir travailler au laboratoire MAAIA de l'Ecole Nationale d'Aviation Civile (ENAC).

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur Pascal Chambreuil et Monsieur Denis Aluze de l'entreprise Orange LABS, pour leurs collaborations dans la réalisation de ce travail.

Je remercie à cette occasion les différentes personnes du Laboratoire Système et Transport de l'univertsité de Belfort-Montbéliard pour m'avoir accueilli dans le laboratoire, mais aussi tous les autres membres de l'équipe COM (Communication, Optimisation et Mobilité) : Laurent, Sid Lamrous, Kahina, qui ont eu un rôle déterminant dans l'avancement de mon travail.

Je remercie toute ma famille pour son soutien tout le long de cette thèse notamment dans les moments les plus difficiles.

Pour finir je tiens à remercier spécialement tous mes amis doctorants pour les bons moments passés tout le long de ces années.

Table des matières

Introduction générale 1

1 Etat de l'art sur l'optimisation dans les réseaux de radiocommunication 5

1.1 Configuration des réseaux 2G/3G 6

1.2 Les réseaux cellulaires 4G/LTE 12

1.2.1 Evolution de la 3G vers LTE 14

1.2.2 Architecture LTE/SAE et E-UTRAN 15

1.2.3 Caractéristiques de l'accès LTE 16

1.3 Self-Organizing Networks (SON) 17

1.3.1 Les systèmes automatisés 18

1.3.2 Le cycle d'un SON 19

1.3.3 Migration UMTS-LTE et fonctionnalités du SON 21

1.3.4 Travaux récents sur l'optimisation des fréquences et des puissances . 30

1.4 Lien avec l'optimisation online 34

1.5 Synthèse 39

2 Etat de l'art sur l'optimisation robuste 41

2.1 Définitions 42

2.2 Points de fragilité 43

2.3 Approches 45

2.3.1 Compromis entre optimisation et robustesse 47

2.3.2 Analyse de sensibilité 48

2.3.3 Traitement des aléas sur l'objectif 51

2.3.4 Traitement des aléas sur des contraintes 54

2.3.5 Les avantages et les inconvénients de ces approches 58

2.4 Synthèse 59

3 Modélisation mathématique du problème 63

3.1 Comment gérer les principes de robustesse 64

3.2 Processus global d'optimisation online . . . 66
3.3 Le modèle de trafic . . . 69
3.4 Modèle de paramétrage des stations de base . . . 71
3.4.1 Stations de base : eNB . . . 71
3.4.2 Puissance d'émission . . . 72
3.4.3 Azimut . . . 73
3.4.4 Tilt . . . 73
3.4.5 Diagramme de rayonnement . . . 74
3.5 Modèle d'allocation des ressources radio . . . 74
3.5.1 Fréquences d'émission : affection des porteuses aux clients . . . 75
3.5.2 Puissances d'émission : affection des puissances des sous-porteuses . 77
3.6 Modèle de propagation Hata . . . 79
3.7 Modèle de débit . . . 82
3.7.1 Modèle d'association . . . 83
3.7.2 Modèle de débit . . . 87
3.8 Modèle de Handover et liste de voisines . . . 89
3.9 Formulation du problème à optimiser . . . 91
3.9.1 Variable de décision . . . 91
3.9.2 Formulation robuste . . . 92
3.10 Synthèse . . . 94

4 Conception et tests de méthodes d'optimisation 97
4.1 Hypothèses de travail . . . 98
4.1.1 Les hypothèses sur les interférences . . . 98
4.1.2 Hypothèses sur le réseau . . . 99
4.1.3 Paramètres de simulation . . . 101
4.1.4 Evaluation des motifs de réutilisation de fréquences . . . 102
4.1.5 Problème à optimiser . . . 104
4.2 Optimisation avec et sans fonction robuste . . . 105
4.2.1 Optimisation des fréquences . . . 106
4.2.2 Optimisation des tilts . . . 109
4.2.3 Optimisation des puissances . . . 112
4.2.4 Synthèse des performances . . . 113
4.3 Recherche Tabou robuste pour l'allocation de fréquence . . . 113
4.3.1 Algorithme Tabou simple (TS) . . . 114
4.3.2 Algorithme Tabou dégradé Dernier Voisin (TDV) . . . 117
4.3.3 Algorithme Tabou dégradé Meilleur Voisin (TMV) . . . 119

4.3.4 Comparaison de Tabou Simple et Tabou dégradé Meilleur Voisin . . 122
4.4 Comparaison des méthodes TS et TMV sur l'optimisation robuste journalière 123
4.4.1 Algorithme Tabou TS pour l'optimisation robuste journalière 125
4.4.2 Algorithme Tabou TMV pour l'optimisation robuste jounalière . . . 128
4.4.3 Synthèse des observations 130
4.5 Synthèse 131

5 Comparaison de différentes options d'auto-optimisation des SON 133
5.1 Options d'auto-optimisation des SON 134
5.2 Optimisation robuste des pics sur la journée 136
5.3 Optimisation non robuste (séquentielle) des pics sur la journée 140
5.4 Optimisation robuste des dominances en 3 périodes successives 144
5.4.1 Optimisation robuste - Période du matin 144
5.4.2 Optimisation robuste - Période de l'après-midi 148
5.4.3 Optimisation robuste - Période du soir 150
5.4.4 Optimisation robuste sur 3 périodes successives - Synthèse sur une journée 153
5.5 Optimisation non robuste des dominances en 3 périodes successives 154
5.5.1 Illustration sur un exemple 155
5.5.2 Optimisation non robuste - Période du matin 157
5.5.3 Optimisation non robuste - Période de l'après midi 159
5.5.4 Optimisation non robuste - Période du soir 161
5.5.5 Optimisation non robuste sur les 3 périodes - Synthèse sur une journée 164
5.6 Synthèse 165

Conclusion et perspectives 169

Publications 173

Liste des tableaux

1.1 Régles de fonctionnement en logique flou. 7
1.2 Différents paramètres nécessaires pour le contrôle du Handover. 36
1.3 Différents paramètres nécessaires pour le contrôle des interférences. 37
1.4 Différents paramètres nécessaires pour le contrôle de capacité et de couverture. 38
1.5 Différents paramètres nécessaires pour le contrôle des interférences. 39

2.1 Avantages et inconvénients des trois principales approches : analyse de sensibilité, optimisation robuste et programmation stochastique. 58
2.2 Avantages et inconvénients des approches selon que les données incertaines soint représentées par des distributions de probabilités, des intervalles de valeurs ou des scénarios. 59

3.1 Données du réseau et notations. 71
3.2 Exemple de sous-canaux à 6 PRB 76
3.3 Les modulations et codages et les valeurs de SINR requis et débit associé [Schoenen *et al.*, 2008]. 87

4.1 Paramètres du réseau LTE sur le lien descendant. 102
4.2 Comparaison du nombre de sites modifiés entre TS et TMV. 123
4.3 Optimisation robuste journalière par la méthode TS : résultats sur les créneaux critiques. 127
4.4 Evaluation de la solution TS sur des créneaux pas pris en compte dans l'optimisation. 128
4.5 Optimisation robuste journalière par la méthode TMV : résultats sur les créneaux critiques. 129
4.6 Evaluation de la solution TMV sur des créneaux pas pris en compte dans l'optimisation. 130

5.1 Dominance des créneaux critiques sur les 3 périodes retenues. 136

5.2 Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation des créneaux critiques. 137
5.3 Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation sur l'ensemble des créneaux de la journée. 138
5.4 Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV4 - Evaluation de tous les créneaux. 139
5.5 Optimisation séquentielle des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation des créneaux critiques. 141
5.6 Optimisation robuste à la suite d'une optimisation séquentielle par Tabou TMV - Méthode des pics. 142
5.7 Evaluation sur tous les plans intermédiaires. 142
5.8 Optimisation séquentielle des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation de tous les créneaux. 143
5.9 Optimisation robuste de la période du matin avec TMV. 147
5.10 Optimisation robuste de la période de l'après-midi avec TMV. 150
5.11 Optimisation robuste de la période du soir avec TMV. 153
5.12 Synthèse des évaluations sur la journée complète avec 3 réseaux robustes successifs. 154
5.13 Optimisation séquentielle de la période du matin avec TMV. 159
5.14 Optimisation séquentielle de la période de l'après-midi avec TMV. 161
5.15 Optimisation séquentielle de la période du soir avec TMV. 164
5.16 Synthèse des évaluations sur la journée complète avec 3 réseaux non robustes successifs. 164
5.17 Synthèse de la méthode TMV avec 4 options différentes d'optimisation. 166

Table des figures

1.1 Architecture des réseaux hétérogénes. 11
1.2 Processus de contrôle automatique du RRM. 11
1.3 Observatoire des déploiements 4G selon l'ANFR. 14
1.4 Cycle de vie du développement de LTE. 15
1.5 Réseau à clusters organisés utilisant l'algorithme de Basagni. 18
1.6 Self-organisation dans les futurs réseaux d'accès radio. 19
1.7 Comparaison de la configuration conventionnelle du réseau et de la Self-organizing. 20
1.8 Migration UMTS vers LTE avec fonctionnalités Self-organizing. 21
1.9 Vue logique de la procédure self-optimisation. 22
1.10 Processus d'otmatisation des paramètres RRM. 23
1.11 Chevauchement de couverture. 25
1.12 Couverture hiérarchique. 26
1.13 Couverture du voisinage. 26
1.14 Interférence inter-cellules sur le lien montant. 27
1.15 Interférence inter-cellules sur le lien descendant. 27
1.16 Exemple d'architecture de réseau avec interfaces et échange de messages entre les nœuds du réseau et le mobile qui doit être standardisé pour l'introduction de Self-organizing. 28
1.17 Exemple de réglage des paramètres antennaires (azimut et tilt). 29
1.18 Différentes techniques d'allocation de la puissance. 33
1.19 Optimisation online du Handover. 35

2.1 Principales approches de la préoccupation de robustesse [Klopfenstein., 2008]. 46
2.2 Nombre de publications annuelles des années 50 à 2007 en aide à la décision sous incertitudes (analyse de sensibilité, optimisation robuste, programmation stochastique) d'après [van der Vlerk., 2007]. Total de publications en anglais : 4791. 46

2.3 Polyèdre à 3 dimensions représentant les contraintes du problème. Le tracé rouge représente l'exploration par l'algorithme du Simplex des solutions situées aux sommets. 47

2.4 Exemple de calcul de la (b, w)-*robustesse* absolue r_{bw} sur 5 scénarios (les croix représentent l'évaluation des scénarios) et pour 4 solutions x_1, x_2, x_3 et x_4. La solution x_2 est la meilleure solution dans ce cas. 50

2.5 Variation du domaine sur lequel on réalise l'optimisation pour un problème à trois données incertaines a_1, a_2 et a_3 variant sur des intervalles. La zone non grisée du cube indique la zone d'optimisation en fonction du paramètre *Gamma* . Plus Γ est élevé plus la zone de recherche est petite et donc plus la solution aura un moins bon coût, par contre sa réalisabilité sera plus importante. Dessin d'après [Klopfenstein., 2008]. 56

3.1 Méthodologie pour corriger le modèle de fonctionnement du système lors d'un processus en ligne. 64

3.2 Les trois modules d'une optimisation sont : le modèle de fonctionnement du système, la formulation du problème à optimiser et l'algorithme d'optimisation. 65

3.3 Exemple d'utilisation de l'analyse de sensibilité pour piloter les reformulations robustes du problème jusqu'à obtenir un niveau de sensibilité satisfaisant. 66

3.4 Processus de l'optimisation online. 67

3.5 Schéma théorique d'allocation de fréquence 1x3x3 avec des cellules hexagonales. La bande de fréquence totale a été découpée en 3 sous-canaux numérotés 1, 2 et 3. Chacune des eNB peux utiliser l'un de ces sous-canaux. 68

3.6 Décomposition du processus global. 68

3.7 Décomposition fonctionnelle pour l'optimisation d'un réseau LTE. 69

3.8 Schémas d'allocation des sous-porteuses aux clients dans le cas du lien descendant (Figure de gauche) et montant (Figure de droite). 75

3.9 (a) Schéma théorique (cellules hexagonales) d'allocation de fréquence 1x3x3 et (b) exemple d'allocation réelle de fréquences (cellules réelles). La bande de fréquence totale a été découpée en 3 sous-canaux numérotés 1, 2 et 3. Chacune des eNB peut utiliser l'un de ces sous-canaux. 76

3.10 Exemple d'allocations multi-porteuses pour des cellules hexagonales trisectorielles. La bande de fréquence totale a été découpée en 3 sous-canaux numérotés 1, 2 et 3. Les 3 eNB de la cellule en gras utilisent respectivement les sous-canaux 1, 2 et 3, tandis que les eNB de la cellule en pointillée utilisent les 3 sous-canaux simultanément c'est-à-dire la totalité de la bande de fréquence, et tous les cas intermédiaires sont possibles. 77

3.11 Structures des algorithmes d'allocation de ressources (extrait de [Lengoumbi., 2008]). 78
3.12 Modèle de propagation avec les paramètres de l'eNB 79
3.13 Le modèle Hata-Okumura 81
3.14 Exposition du point test par rapport à la puissance apparente rayonnée . . 82
3.15 Coupe verticale (a) et horizontale (b) de la liaison eNB/point de test. Explication des différents angles. 83
3.16 eNB B voisine de l'eNB A car la zone hachurée représente plus de 20% de la cellule A pour une marge de puissance supérieure à un seuil 89

4.1 Modèle de cellules hexagonales. a) motif 1x3x1 b) motif 1x3x3 98
4.2 Couverture par antenne dans le Territoire de Belfort. 100
4.3 Exemple d'évolution du trafic au cours d'une journée. 101
4.4 Exemple de concentration de trafic à 18h. 101
4.5 Evaluation des motifs de réutilisation 1x3x1 et 1x3x3. 103
4.6 Plan de fréquences initial déterministe et sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée. 108
4.7 Plan de fréquences initial déterministe et sites choisis au hasard. 108
4.8 Plan de fréquences initial aléatoire et sites choisis au hasard. 109
4.9 Allocation des tilts initiaux déterministe et sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée. 111
4.10 Allocation des tilts initiaux déterministes et sites choisis au hasard. 111
4.11 Allocation des puissances initiales déterministes et sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée. 112
4.12 Allocation des puissances initiales déterministes et sites choisis au hasard. . 113
4.13 Comparaison de la méthode DS et de TS avec fréquences initiales déterministes. 115
4.14 Evolution de la fonction objectif des deux méthodes avec fréquences initiales déterministes. 116
4.15 Comparaison des méthodes DS et TS avec fréquences initiales aléatoires. . . 117
4.16 Evolution de la fonction objectif des deux méthodes avec fréquences initiales aléatoires. 117
4.17 Exemple d'évolution de la solution courante et de la meilleure solution avec la méthode TDV. 118
4.18 Evolution de la fonction objectif des méthodes DS, TS et TDV avec fréquences initiales déterministes. 119

4.19 Evolution de la fonction objectif des méthodes DS, TS et TDV avec fréquences initiales aléatoires. 119
4.20 Exemple d'évolution de la solution courante et de la solution optimale avec la méthode TMV. 120
4.21 Evolution de la fonction objectif des méthodes DS, TS, TDV et TMV avec fréquences initiales déterministes. 121
4.22 Evolution de la fonction objectif des méthodes DS, TS, TDV et TMV avec fréquences initiales aléatoires. 121
4.23 Tabou Simple : fréquences initiales aléatoires et plusieurs racines aléatoires. 122
4.24 Tabou dégradé Meilleur Voisin : fréquences initiales aléatoires et plusieurs racines aléatoires. 122
4.25 Stations critiques et créneaux critiques au vue de l'analyse des données sur les pics de rejets d'appel sur une journée. 124
4.26 Optimisation robuste journalière par la méthode TS : résultats sur les créneaux critiques. 127

5.1 Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation des créneaux critiques. 137
5.2 Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV4 - Evaluation de tous les créneaux. 139
5.3 Optimisation séquentielle des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation de tous les créneaux. 143
5.4 Comparaison d'un réseau initial et d'un réseau robuste sur tous les créneaux de la période du matin. 145
5.5 Comparaison d'un réseau initial et d'un réseau robuste sur tous les créneaux de l'après-midi. 148
5.6 Comparaison d'un réseau initiale et d'un réseau robuste sur tous les créneaux du soir. 151
5.7 Comparaison du réseau entrant et du réseau optimisé pour les 3 périodes en optimisation séquentielle. 156

Introduction générale

Contexte

Les réseaux cellulaires numériques ont démarré en 1992 avec le GSM (*Global System for Mobile Communications*, historiquement le *Groupe Spécial Mobile* inventé par le CNET - Centre National d'Etudes des Télécommunications en France) pour le développement de services de téléphonie mobile. Ce système correspondant à la norme 2G, pour 2ème génération (les systèmes analogiques déployés dans les années 1980 étant la 1ère génération), est le plus déployé dans le monde actuellement. Pour la création de services de transmission de données, le standard 3G UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) a été lancé en décembre 2012 en Norvège. Dans ce système une attention particulière a été donnée sur l'adaptation du débit aux services demandés ; cette adaptation a requis d'introduire plus de logiciel et de paramétrage automatique dans le système lui-même. Le standard 4G LTE (*Long Term Evolution*) a été lancé pour la première fois en décembre 2009 simultanément au Japon (NTT DoCoMo) et en Suède (TéliaSonera). L'objectif est de permettre d'obtenir un débit binaire théorique de 300 Mbit/s en liaison descendante (downlink) pour une bande de 20MHz (la bande peut varier de 1,4 MHz à 20 MHz. Ce standard doit évoluer vers LTE-Advanced qui offrira jusqu'à 1 Gbit/s en downlink avec des bandes de fréquences de 2x100 MHz de largeur. Avec LTE apparait pour la première fois la notion de *Self-Organizing Network* (SON) et l'introduction de fonctions avancées de paramétrage automatique du réseau en fonction de la demande.

Les SON correspondent à une technologie permettant l'auto-configuration, l'auto-exploitation et l'auto-optimisation des équipements de réseaux. Ils ont un impact fort sur les coûts d'exploitation de réseaux. Les opérateurs, qui jusqu'alors configuraient manuellement la gestion des paramètres du réseau, opérations lentes, coûteuses et source d'erreurs, vont pouvoir améliorer la flexibilité et les performances du réseau tout en réduisant les coûts et les délais des opérations. Le SON doit être capable automatiquement de détecter les problèmes de qualité de service via des mesures sur les équipements de réseau (à travers l'OMC - *Operation and Maintenance Center*), de décider d'actions correctives et de les mettre en œuvre dans un délai court. Cette agilité nouvelle dans les réseaux cellulaires

pose alors de nouveaux problèmes dans les méthodes d'optimisation : Quand faut-il optimiser le réseau ? Sur la base de quelles données ? Quel doit être le rythme temporel de l'optimisation (journalier, horaire, continu...) ?

Motivations et objectifs

C'est pour trouver des réponses à ces nouvelles questions que nous avons réalisé ce travail de recherche. Celui-ci s'est déroulé dans le cadre d'un projet collaboratif bilatéral avec le centre de recherche de l'opérateur Orange, les Orange Labs. Cette collaboration a permis de travailler sur la base des remontées de trafic d'un réseau GSM/UMTS réel sur lequel nous avons réalisé une projection de déploiement de réseau LTE à iso-station mais avec une simulation de qualité radio propre à LTE.

La première motivation principale de notre travail a été guidée par l'impact que peut avoir sur le paramétrage automatique la sélection spatiale des stations du réseau à optimiser d'une part, et la sélection temporelle des stations à optimiser d'autre part. Il s'agit d'identifier, où dans le réseau, et à quel moment, il faut optimiser. Pour cela des indicateurs de qualité et des paramètres à optimiser sont nécessaires ; nous avons donc commencé par identifier un ensemble d'indicateurs et de paramètres possibles. Cette étape permet de faire le lien entre ce que voit le réseau en termes de problèmes à régler et les actions correctives qu'un paramétrage automatique peut proposer. Pour formaliser l'ensemble, nous avons décrit un modèle mathématique qui prend en compte l'ensemble des facteurs essentiels du réseau, à savoir un modèle de la demande de trafic, un modèle de propagation d'ondes radio et un modèle d'interférence. L'ensemble de ces modèles mis bout-à-bout s'intègre dans un schéma plus global qui permet de décrire le problème comme un problème d'optimisation combinatoire sous contraintes i.e. problème discret avec des variables prenant des valeurs entières.

La deuxième motivation principale a été de proposer des solutions algorithmiques qui peuvent s'appliquer pour le cas de figure du SON. La taille des réseaux à optimiser a rapidement conduit notre recherche vers les métaheuristiques car les méthodes exactes ne sont pas applicables pour des temps de calcul compatibles avec la taille des problèmes. A cela s'ajoute un nouvel élément essentiel qui est l'incertitude sur les données d'entrée. En effet, le SON est typiquement confronté à différents scénarios sur les données remontées par le réseau (plus ou moins de qualité selon la période et selon les stations) où l'objectif est, malgré ces aléas non prévisibles, de réussir à déterminer un, ou des, paramétrage(s) qui permettent au réseau d'avoir un bon rendement sur l'ensemble de la journée quels que soient les *problèmes incertains* rencontrés. Nous sommes dans le cadre de l'optimisation robuste. Ainsi une part importante de notre travail a été de mettre au point une méthode d'optimisation robuste, qui prend en compte plusieurs scénarios de façon dépendante, d'en

mesurer les performances, et de les comparer à une approche non robuste où les problèmes seraient traités de façon séquentielle et indépendante.

Organisation du mémoire

Ce mémoire de thèse est organisé en cinq chapitres suivis d'une conclusion générale dans laquelle nous présentons aussi des perspectives à ce travail. Le premier chapitre est consacré à un état de l'art sur l'optimisation en ligne des réseaux de radiocommunications cellulaires. Nous tentons de montrer l'évolution du paramétrage automatique des réseaux de la 2G à la 4G bien que ce dernier standard ne soit pas encore complétement défini. La progression des méthodes automatiques a été très importante d'une génération à l'autre avec une introduction de plus en plus poussée d'algorithmes de contrôle et de décision au sein des équipements de réseaux. L'optimisation au sein du SON est abordée sous un angle général en fin de chapitre dans lequel nous tentons de référencer un ensemble de contrôles possibles (handovers, interférences, capacités, voisines) en listant les données remontées du réseau, les paramètres de contrôle et les indicateurs de performances.

Le deuxième chapitre porte sur un état de l'art en optimisation robuste. Ce chapitre tente d'apporter des éléments de réponse sur le *comment optimiser*, alors que le chapitre précédent portait plutôt sur le *quoi optimiser*. Nous apportons tout d'abord quelques définitions sur la notion de robustesse et sur les difficultés principales qui se posent pour modéliser des problèmes dans ce contexte. Ensuite nous examinons les méthodes qui s'appliquent selon que les aléas se portent plutôt sur les données, les contraintes ou les objectifs. Nous comparons les avantages et inconvénients des méthodes probabilistes, des méthodes basées sur des intervalles de valeurs et des méthodes basées sur des scénarios. En dernier lieu, nous faisons le lien avec le problème de l'optimisation dans le SON ; nous avons principalement deux incertitudes, la demande en trafic et la propagation du signal. C'est sur l'incertitude sur la demande en trafic que nous travaillerons et sur son impact sur la qualité radio.

Le chapitre trois constitue notre première contribution à travers la formalisation du problème que l'on doit résoudre. Deux aspects importants s'intègrent à ce stade, des modèles pour représenter la réalité physique du réseau (modèle de trafic, modèle d'interférence, modèle de propagation des ondes radio...) et des modèles pour représenter le problème décisionnel (données disponibles, contraintes à satisfaire, objectifs à atteindre). L'ensemble de ces modèles est décrit en prenant soin de lier les modèles physiques et les modèles décisionnels, ces derniers utilisant les premiers pour certains calculs. Au final, tout cela placé dans le contexte de l'optimisation robuste, nous proposons une architecture globale qui intègre les modèles et qui est piloté par une analyse de la sensibilité des solutions qui pourront être produites par rapport à l'incertitude sur les données d'entrée (la qualité du

réseau pour une certaine demande en trafic).

Dans le chapitre quatre nous présentons la première étape sur l'algorithmique. Nous nous employons à identifier progressivement une solution d'algorithme qui peut être pertinente pour le problème. Plusieurs algorithmes sont élaborés, d'un algorithme glouton simple à plusieurs variantes d'une Recherche Tabou. A chaque fois, nous testons les paramètres principaux que nous avons retenu, à savoir l'optimisation des fréquences d'émission, des inclinaisons verticales des antennes (les tilts) et des puissances d'émission des stations. Deux contextes d'optimisation sont aussi comparés, l'optimisation non robuste et l'optimisation robuste, avec un nombre restreint de scénarios de demande en trafic pour bien identifier l'impact des méthodes. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous testons les deux algorithmes les plus efficaces que nous avons identifiés sur une optimisation robuste à la journée.

Le cinquième et dernier chapitre constitue la deuxième contribution essentielle de notre travail de recherche. C'est dans ce chapitre que nous lions l'ensemble des éléments précédents et que nous tentons d'apporter une réponse aux objectifs présentés préalablement : quand et où optimiser le réseau ? Nous avons retenu un unique algorithme pour cette section, l'algorithme TMV pour *Tabou dégradé Meilleur Voisin*, et un paramètre unique, l'optimisation des fréquences d'émission ; ces choix s'expliquent par les résultats obtenus en chapitre 4. TMV est appliqué dans des contextes croisés que sont l'optimisation robuste et l'optimisation non robuste d'une part, et l'optimisation journalière et l'optimisation par période d'autre part, soit quatre cas de figure. L'ensemble des cas est évalué sur le même jeu de test ; nous donnons à chaque fois l'impact sur la modification du réseau (combien de stations sont modifiées ?), sur l'évolution de la qualité radio au cours du temps (combien de clients sont non couverts et quand ?), sur le temps de calcul (combien de temps pour générer un nouveau paramétrage ?). Puis, au vu des résultats, nous proposons une méthode générale pour l'optimisation du SON.

Chapitre 1

Etat de l'art sur l'optimisation dans les réseaux de radiocommunication

Ce chapitre présente l'état de l'art sur l'optimisation en ligne des réseaux de radiocommunications ; il est organisé en quatre grandes parties. On distingue tout d'abord le cas de la configuration des réseaux cellulaires 2G et 3G. La configuration de réseaux est comprise principalement dans le sens des méthodes et outils qui ont pu être étudiés pour analyser et configurer automatiquement les paramètres liés aux aériens (diagrammes, orientations, puissances...), les fréquences, les interférences, le handover et les voisines. Ensuite nous abordons le cas du standard 4G/LTE et les principes évoqués au sein du 3GPP (Third Generation Partnership Project) sur les Self-Organizing Networks. Les travaux ne sont pas complétement arrêtés dans la norme mais nous traitons de l'état courant. En dernier lieu, nous faisons le lien avec l'optimisation en ligne (ou online) de ces réseaux dans une dernière section où nous présentons l'ensemble des paramètres qui peuvent intervenir dans le processus du SON.

Sommaire

1.1 Configuration des réseaux 2G/3G 6
1.2 Les réseaux cellulaires 4G/LTE 12
1.3 Self-Organizing Networks (SON) 17
1.4 Lien avec l'optimisation online 34
1.5 Synthèse 39

1.1 Configuration des réseaux 2G/3G

Dans les réseaux 2G et 3G, l'auto-organisation peut se décliner à partir d'une architecture connue mais en introduisant des mécanismes plus intelligents que les mécanismes initialement prévus par les normes. Le cas de la gestion de la mobilité via le handover est le plus souvent étudié. Sa réalisation est complètement guidée par le contexte et donc trouver un principe où un paramétrage standard s'applique est quasi impossible. Il est en effet difficile de prévoir toutes les situations pouvant se produire, et de fait de proposer un principe figé qui marche à coup sûr à tous les coups. Le handover est aussi la première cause de dysfonctionnement au niveau de l'accès radio, la majorité des coupures en cours de communication provient d'une coupure liée à la mobilité. A titre d'exemple, les deux grandes familles de problèmes les plus souvent mentionnées sont les effets ping-pong entre stations de base dus à la fluctuation de valeurs autour des valeurs de décision, et les effets Manhattan en contexte urbain dus à la fluctuation très brutale du champ. Dans ces deux cas il s'agit d'effets bien connus dans les réseaux mobiles terrestres, indésirables, mais absolument inévitables.

La gestion du handoff s'est progressivement enrichie pour tenter de trouver de bonnes réponses. Dans les premiers systèmes tels TACS (Total Access Communication System) ou AMPS (Advanced Mobile Phone System), le handoff était régulé par l'analyse d'un unique paramètre à la station de base, le RSSI (Received Signal Strength Intensity). Dans le GSM (Global System for Mobile communications), on a introduit plusieurs critères de décision, la distance, le BER (Bit Error Rate) et la QoS (Quality of Service), tous les critères étant analysés en même temps. Pour l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), on a repris les éléments du GSM et on a ajouté des critères inter-systèmes entre le GSM et l'UMTS qui permettent de faire une gestion inter-couche. A chaque fois, les méthodes sont basées sur des analyses quantitatives précises où l'on compare une valeur calculée sur la base de mesures à une valeur de seuil fixée à l'avance par l'opérateur. L'inconvénient majeur réside dans l'absence d'adaptation du principe lui-même si ce n'est par l'intervention humaine : la valeur fixée et le mode de comparaison à cette valeur. Si bien que les évènements inhabituels se produisant sur le réseau, vitesse de déplacement inattendue, charge inattendue sur certaines stations, modification du contexte de mobilité autour du mobile... sont hors cadre, peuvent conduire à une mauvaise réponse du réseau (perte de paquets, coupure d'appel...) et contribuer à la dégradation de la qualité perçue par le client.

Des solutions originales ont été proposées dans la littérature et peuvent inspirer les futures normes. La logique floue est une solution qui permet de prendre en compte simultanément plusieurs entrées pour proposer une décision. Les entrées ne sont donc plus traitées une à une par une succession de « if...then...else... » comme c'est le cas du handoff GSM/UMTS par exemple. La première application pour le handoff est citée dans [Edwards

et al., 1998,Edwards *et al.*, 2000]. Le concept de la logique floue se base sur une approche relative de la décision avec des valeurs comprises dans [0,1] au lieu de {0,1}. On définit ainsi plusieurs règles de décision de handoff avec pour chacune une pondération sur le fait que le handoff doit être exécuté ou pas. Selon les entrées présentes, l'ensemble des règles est utilisé simultanément par une fonction de décision pour calculer une valeur de décision de handoff unique. L'expert ne construit plus un processus figé mais donne plutôt des règles de départ puis l'algorithme calcule la sortie en fonction des entrées. Le même principe est appliqué sur du handoff vertical dans le Tableau 1.1, [Hou *et al.*, 2000] . Il n'est pas nécessaire de définir un seuil de handoff par couple de stations. C'est un avantage important. Les mêmes règles sont déclarées pour toutes les stations et le contexte de chaque station fera émerger les règles qui lui sont utiles. C'est assez original et constitue un gain de temps important pour la maintenance du réseau. La table ci-dessous extraite de [Foong *et al.*, 2009] donne un exemple de règles ; « HO factor » désigne la prise de décision résultat et les notions de poids ou d'importance des règles indépendantes sont traduites littéralement.

If Then Rules		
If RSSI	*And BER*	*Then HO Factor*
Strong	Low	Low
Strong	Medium	Medium
Strong	High	High
Medium	Low	Low
Medium	Medium	Medium
Medium	High	High
Weak	Low	Low
Weak	Medium	edium
Weak	High	High

Table 1.1 – Régles de fonctionnement en logique flou.

On voit que la constitution d'une telle table peut poser un problème en soi. Elle résulte d'un travail d'expertise et doit refléter « ce qui se pratique » sur le réseau. Les experts peuvent ne pas être totalement d'accord. [Foong *et al.*, 2009] propose alors un algorithme d'apprentissage à incorporer dans l'algorithme de handoff. Cet algorithme a été étudié dans le contexte de l'intégration de la couche satellite pour les services UMTS et il adresse en particulier les transferts entre les deux segments de réseaux. Il utilise un historique de métriques et décisions sur le réseau pour construire les règles. Cette méthode ne peut donc pas s'appliquer pour l'installation d'un nouveau réseau mais est intéressante pour un réseau existant. L'apprentissage est fait par un Perceptron multicouche (réseau de neurones) avec un algorithme de rétro-propagation du gradient (approche classique pour ce type d'architecture neuronale) composé de 5 couches dont la couche finale à 1 neurone

propose la décision. Les couches forment un mélange de réseau de neurones classique et de système de décision flou étudié théoriquement dans [Jang., 1993]. Le système a été simulé, pas expérimenté. La simulation est faite à 900MHz avec modèle de propagation ITU (International Telecommunication Union) et calcul de BER par Monte-Carlo. La qualité des règles par apprentissage a été comparée avec des règles d'expert pour un résultat de HO (HandOver) à peu près identique mais en faisant émerger deux fois moins de règles à gérer.

Cette approche pourrait être considérée pour l'étude car elle constitue un lien direct entre le fonctionnement courant du réseau et une réponse de paramétrage à apporter. A noter que le domaine du contrôle temps réel, propre à l'automatique, a largement investi les techniques de types réseaux de neurones artificiels et logique floue depuis une vingtaine d'années. Ces techniques ont apporté de bons résultats dans des domaines où les fonctions de contrôle sont difficiles à modéliser de façon analytique, soit parce que les données sont incertaines, soit parce que les connaissances de ces fonctions sont imparfaites (comportement non linéaire des systèmes). Pour prendre un exemple, car on trouve pléthore de références sur le sujet, [Brockmann *et al.*, 1994] présente une combinaison de deux techniques pour modéliser la prédiction temps-réel du comportement d'un fluide dans le domaine biologique (croissance des bactéries dans le fluide) avec apprentissage neuronal et restitution de type floue. Les données d'entrée évoluent au cours du temps. Les auteurs soulignent que la gestion de l'historique des données est cruciale en temps réel : quelle durée d'historique prendre en compte pour la prédiction ? La taille de la fenêtre glissante sur les données d'entrée dépend totalement du problème. Cette question est posée pour le paramétrage en ligne des SON.

On trouve aussi des procédés intelligents appliqués pour identifier des comportements communs au niveau des stations de base en 2G et 3G, et simplifier le paramétrage du réseau. [Miernik.,2007] présente un travail basé sur l'analyse de la distribution spatiale du trafic pour optimiser automatiquement les paramètres de plusieurs stations du réseau radio (constitution de zone de LAC (Location Area Code), réglage de tilt, réglage de puissance du pilote...). L'analyse de trafic est faite heure par heure. L'auteur propose tout d'abord un algorithme de calcul de centroïdes de trafic sur la zone couverte pour caractériser celui-ci. Un modèle est créé pour calculer en chaque point les probabilités de prise de communication des stations en fonction de l'ensemble des RSSI et des relevés de Timing Advance rapportés sur les canaux dédiés lors des appels en service voix, et en fonction de la morphologie du sol. Les cellules sont alors regroupées selon la corrélation de leur graphe de charge par la méthode k-means. Les impacts de la méthode sur les décisions de paramétrage ne sont pas publiés mais sont référencés dans des rapports du projet européen MOMENTUM de 2003. Nous n'avons pas pu nous procurer ces rapports pour raison de confidentialité.

Nokia s'intéresse aussi à ce sujet pour le paramétrage des réseaux 3G en utilisant une carte auto-organisatrice de Kohonen [Kohonen *et al.*, 1996, Lehtimaki *et al.*, 2007] et un algorithme de k-means. Le nombre de paramètres et de mesures des bases UMTS rend complexe le paramétrage complet, aussi [Laiho *et al.*, 2007] cherche à regrouper les cellules par comportement pour leur trouver un paramétrage commun. L'idée est comme pour le handoff de gérer simultanément plusieurs KPI pour décider du paramétrage (KPI tels C/I sur Uplink, FER sur Uplink...) tel que : KPI pour Key Performance Indicator et FER pour Frame Error Rate. Des tests sont effectués sur des réseaux micros UMTS. L'analyse des cellules est basée sur l'utilisation d'histogramme des hits de chaque cellule (pointes de trafic) sur la période d'observation (typiquement la semaine). On ne regarde donc pas seulement H2C, ni non plus tout le trafic, mais une représentation significative. Cette idée est intéressante car elle traduit une distribution tout en retirant ce qui pourrait être du bruit (niveau de charge inférieur à un seuil donné qui rend inutile l'examen du re-paramétrage du réseau). L'étude vise à comparer une analyse de réseau faite avec un outil de planification de réseaux, genre NectAct Planner où l'on visualise plusieurs KPI géo-localisés et où l'étude de corrélation est manuelle, avec le résultat d'une SOM où l'ensemble des KPI est pris en compte pour identifier les cellules cibles à optimiser. A priori l'auteur pense que les cellules à problème seront regroupées dans un seul cluster dont les cellules pourront être géo-localisées. Reste ensuite à focaliser son attention sur ce groupe unique en étudiant son évolution au cours du temps. L'approche semble intéressante comme méthode de diagnostic.

Ericsson publie dans [Baliosian *et al.*, 2006] des propositions sur le fonctionnement de réseaux à décision décentralisée sans parler précisément de 4G. Il faudrait mettre en place des mécanismes de propagation des décisions de configurations prises localement pour que les autres équipements soient « informés » des décisions locales. Pour éviter les mauvaises décisions globales, les auteurs proposent de définir des contraintes entre les équipements pour empêcher de construire une solution localement satisfaisante mais globalement inconsistante. Cette vision est originale dans le sens où le comportement du réseau pourrait être plus ou moins contrôlé par des contraintes dictées par les experts, ainsi les paramètres tentés localement doivent satisfaire ces contraintes qui garantissent un fonctionnement global pour être adoptés. On est dans une approche de type optimisation sous contraintes où l'optimisation vise à améliorer la qualité perçue par le client et les contraintes à ne pas autoriser n'importe quel paramétrage local, non seulement en fonction d'intervalle de définition locaux sur les paramètre de chaque station, ce qui est classique, mais aussi en fonction de contraintes sur les valeurs prises entre équipements. C'est une façon de voir assez originale. Le problème est alors de pouvoir exprimer ces contraintes inter-équipements. Cela peut être par exemple des contraintes d'écart de puissances d'émission entre stations voisines...

Au niveau de la gestion des ressources radio dans le RRM, le domaine le plus productif en matière d'auto-adaptation est celui de la sélection adaptative pour les terminaux multi- interface radio. Les visionnaires envisagent les réseaux futurs comme un mélange de systèmes à architecture et sans architecture où le multi-saut radio deviendrait la norme. Dans ce cas il y a choix du mode de transmission et choix du mode d'accès (multiplexage, modulation, fréquence...). Actuellement les trois étapes d'accès où le RRM intervient sont déjà présentes en 3G avec un choix basé sur la qualité du RSSI, du BER et du FER. Les choix d'accès, comme TD-WCDMA (Time Division Wideband Code Division Multiple Access) ou WCDMA (Code Division Multiple Access) influent ensuite directement sur le débit proposé donc sur la qualité perçue par le client. Par contre le choix du mode de transmission, avec ou sans architecture et multi-saut radio, n'existe pas actuellement en cellulaire. Les raisons qui poussent les réseaux dans cette direction sont liées à l'énergie stockée dans les terminaux. Si un terminal accède mal à une station de base parce qu'il en est éloigné, sa batterie se videra rapidement, et l'accès satellite 3G ne sera d'aucun secours.

Parmi les travaux sur le sujet on peut citer [Lee *et al.*, 2008] du projet européen IT-MKE/IITA d'où le schéma ci-dessous (Figure 1.1) est tiré pour illustrer le propos. Une étude est menée avec 1 station HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access), 4 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), 35 AP 802.11 et 90 mobiles demandant des services de streaming vidéo. On s'attend à ce que le débit proposé soit supérieur dans le cas d'une architecture hétérogène et c'est bien entendu le cas sur les tests en simulation. Deux KPI sont analysés en permanence pour chaque terminal, la bande passante et le SINR (Signal to Interference plus Noise Ration), et une fonction de coût décide en permanence du choix pour chaque terminal. La décision est instantanée, il n'y a pas d'utilisation d'historique, le système répond en temps réel ce qui n'est pas choquant pour une fonction de gestion des ressources radio. On n'est pas dans un processus de planification. Les résultats sont à considérer avec soin car il est probable qu'en situation réelle avec mobilité il y ait un coût de fonctionnement très grand au niveau de la consommation des ressources radio DL/UL (DownLink/UpLink) et de l'énergie du terminal pour les ajustements permanents. A noter par comparaison que les modes de transmission sans architecture multi-saut tels qu'il existe actuellement en 802.11 ne gèrent en pratique que des terminaux quasi-immobiles, ce qui est beaucoup plus simple, et sans aucune garantie de QoS (Quality of Service) pour le client.

On retrouve aussi les techniques de modélisation statistiques de comportement et d'apprentissage évoquées plus haut pour le contrôle des RRM, donc cette fois avec utilisation d'historique d'information pour un contrôle plus sur. [Altman *et al.*, 2006, Tiwana *et al.*, 2009] présentent une étude sur le monitoring du handoff en 3G en vue de LTE. Les auteurs montrent quelques résultats sur le débit moyen et sur les probabilités d'admission et comparent la méthode avec la RRM 3G. Les gains en simulation existent mais sont très faibles

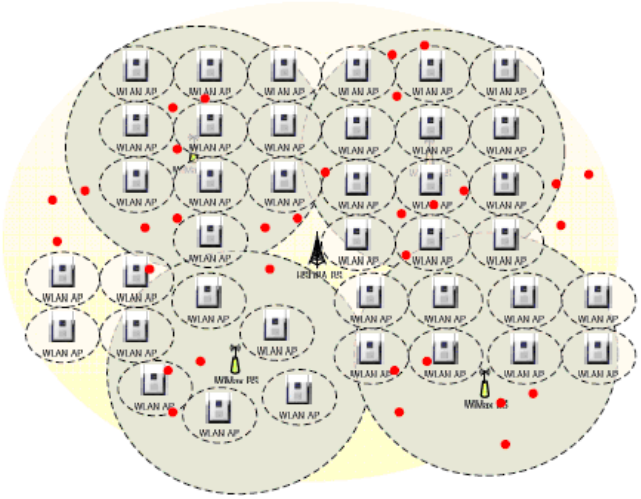


Figure 1.1 – Architecture des réseaux hétérogénes.

sur les tests menés, de 1% à 5% d'amélioration sur le fonctionnement dans des conditions où l'on imagine qu'elles sont favorables au HO adaptatif. L'idée consiste à établir par des régressions linéaires multiples un lien entre une base de données de KPI sur le fonctionnement du réseau et les paramètres RRM correspondants. Le modèle numérique étant fait on s'en sert ensuite pour une auto-configuration des paramètres RRM en fonction des KPI remontés du réseau ou pour faire un monitoring du réseau qui vient aider l'expert pour des prises de décision comme illustré ci-dessous. Il y a donc apprentissage puis projection. Les tests sont menés par simulation sur un réseau de 2 eNB (evolved Node Base) avec une méthode de Monte-Carlo pour simuler les mobiles. Les mobiles bougent à 15 m/s toutes les secondes pour une durée de simulation de 3500 secondes et demandent un trafic FTP (File Transfer Protocol) sur un fichier de 5,7Mb. Les KPI du réseau sont calculés toutes les 1000 secondes et à la fin. Les paramètres RRM sont fixés au début de la simulation pour toute sa durée, on fait uniquement varier le HOM (HO Margin) de 2 à 12 dB au pas de 0,05 dB. Tout ceci permet de constituer la base de données. A noter que l'algorithme de HO simulé est celui du GSM (RSSI), il n'y a pas de calcul de C/I ou similaire.

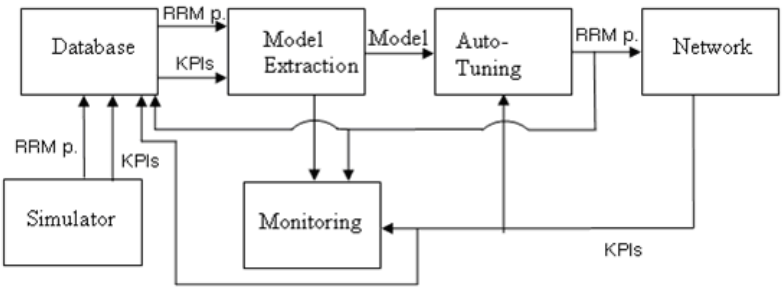


Figure 1.2 – Processus de contrôle automatique du RRM.

Une parenthèse pour finir cette partie sur une autre notion de SON pour Self-Organizing Networks. Ce terme est aussi utilisé depuis une dizaine d'années pour les mises en réseau de terminaux dans un contexte ad hoc notamment les réseaux de capteurs. C'est par exemple le cas de [Itao *et al.*, 2001] qui présente une vue futuriste sur des capteurs auto-organisés en réseau pour résoudre un problème. Cependant dans ces concepts il s'agit surtout de problème de découverte de services et de découverte de routes, donc d'adaptation sur les couches hautes à partir de la couche réseau, plutôt que de la recherche de paramètres de fonctionnement des couches basses comme c'est le cas des SON introduits dans les réseaux LTE. On peut cependant trouver des idées pour le cas où les terminaux eux-mêmes pourraient devenir des relais pour transporter l'information dans un contexte radio multi-saut.

1.2 Les réseaux cellulaires 4G/LTE

Offrir de meilleurs services avec un débit important a toujours été un grand enjeu et un défi permanent pour les différents acteurs de la téléphonie mobile. La norme 3G/UMTS a marqué l'avènement du haut débit mobile pour proposer de premières applications multimédia en mobilité. Dans ce document, nous allons nous concentrer sur la nouvelle norme 4G LTE, l'identifier en termes d'usage, de marché et de promesse de valeurs, et détailler les technologies envisagées jusqu'à présent pour le support de ces évolutions. Cette partie est dédiée plus particulièrement à l'étude de l'état de l'art en matière normative et spécifications techniques pour la technologie LTE.

Nous allons présenter en premier lieu quelques définitions liées aux réseaux 4G ainsi que le groupe 3GPP qui a lancé le projet de partenariat pour le développement de cette norme. Par la suite nous décrirons les spécificités et les technologies (techniques d'accès radio, nouvelles fonctionnalités...) qui seront utilisées pour améliorer la qualité de service tout en minimisant l'ensemble des coûts d'investissement et d'exploitation engendrés. Une étude plus particulière, et celle qui nous concerne le plus, porte sur la Self-Organisation (SON) dans les réseaux de télécommunications. Considérée comme l'une des fonctionnalités les plus importantes, elle sera prise en considération dans la nouvelle norme 4G, elle permet la gestion automatique du système tout en ayant pour objectif principal de réduire les coûts d'investissement du capital (CAPEX pour CAPital EXpenditure) ainsi que les dépenses d'exploitation (OPEX pour OPerational EXpenditure) et aussi, d'améliorer la gestion des tâches tout en réduisant la complexité du système. Plusieurs technologies en cours de déploiement peuvent prétendre à la nomination 4G, on note :

- IEEE 802.16m Gigabit WiMAX (IEEE pour Institute of Electrical and Electronics Engineers)

- 3GPP LTE-Advanced
- UMB (Ultra Mobile Broadband) de 3GGP2 (indépendante de 3GPP)

La migration vers la technologie sans fil 4G se poursuit à un rythme soutenu. Dans l'industrie des télécommunications, LTE est un projet mené par l'organisme de standardisation 3GPP visant à rédiger les normes techniques de la future quatrième génération de la téléphonie mobile. Cette dernière, établie depuis décembre 1998 rassemble plusieurs partenaires du monde des télécommunications. Les principales organisations qui y participent sont [Ericson., 2009] :

- Association of Radio Industries and Businesses (ARIB)
- China Communications Standards Association (CCSA)
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI)
- Alliance for Telecommunication Industry Solutions (ATIS)
- Telecommunications Technology Association (TTA)
- Telecommunications Technology Committee (TTC)

Plusieurs ingénieurs et chercheurs représentant des opérateurs, des fournisseurs ainsi que des instituts de recherche, participent aussi pour développer les spécifications du standard d'accès radio LTE. L'objectif est entre autres le transfert de données à très haut débit, avec une portée plus importante, un nombre d'appels supérieur et une latence plus faible que la 3G.

L'opérateur Telia-Sonera né de l'union entre Telia (Suédois) et Sonera (Finlandais) a lancé la première commercialisation d'une offre mobile 4G (LTE) sur le marché le 15 décembre 2009. Il s'agit de deux grandes villes nordiques, Stockholm (Suède) et Oslo (Norvège). Jusqu'alors, aucun téléphone portable n'était compatible avec les réseaux 4G.

Samsung Electronics a mis en place un ordinateur et une clé 4G permettant une connexion au réseau. Le déploiement à grande échelle n'était pas attendu avant 2011 [http ://fr.wikipedia.org/wiki/4G]. Selon les derniers chiffres de l'ANFR (Agence Nationale des FRéquences [http ://www.anfr. fr]), on compte au 1er juillet 2013, 1533 antennes 4G activées en France (dans les 800 Mhz et les 2,6Ghz), soit 40% de plus qu'il y a un mois (Figure 1.3 extraite du site de l'ANFR).

Au petit jeu du classement, Orange semble avoir creusé l'écart avec ses concurrents avec 886 antennes en service, devant SFR (338 antennes activées), Bouygues Telecom (295 antennes activées), et Free Mobile (14). En un mois, Bouygues Telecom est celui qui a progressé le plus vite car il vient juste d'activer ses antennes autorisées. Sur la période, Orange a activé 73 antennes supplémentaires, SFR 99 et Free aucune, toujours selon l'ANFR. Mais à terme, c'est-à-dire à la fin de l'année 2013, Bouygues Telecom devrait

Au 1er juillet 2013	800 MHz		2,6 GHz		1 800 MHz		Supports 4G	
	Accord ANFR	En service*	Accord ANFR	En service*	Accord ANFR	En service*	Accord ANFR	En service*
Orange	168	2	1 373	884	0	0	1 380	886
SFR	195	55	806	283	0	0	853	285
Bouygues Télécom	29	28	1 115	267	913	0	1 753	295
Free Mobile	0	0	999	14	0	0	999	14
Total théorique	*392*	*85*	*4 293*	*1 448*	*913*	*0*	*4 985*	*1 480*
Nombre de supports	385	85	3 901	1 381	913	0	4 515	1 412

Support : infrastructure supportant une ou plusieurs antennes

* Source: déclarations des opérateurs à l'ANFR

FIGURE 1.3 – Observatoire des déploiements 4G selon l'ANFR.

être devant ses concurrents grâce à son autorisation (contestée) d'utiliser ses antennes 1800 Mhz (2G) ce qui dope mécaniquement son parc théorique. Avec 100 villes couvertes en octobre prochain, l'opérateur estime qu'il couvrira 40% de la population. Du côté de Free Mobile, la 4G n'est pour le moment pas prioritaire, le nouvel entrant promettant néanmoins « une surprise ». Mais rappelons que ce dernier n'a pas de licence pour les 800 Mhz.

1.2.1 Evolution de la 3G vers LTE

La 3ème génération UMTS basée sur la technologie d'accès W-CDMA est déployée partout dans le monde. Pour assurer que ce système reste compétitif dans le futur, 3GPP a commencé en novembre 2004 à étudier de nouvelles spécifications techniques pour les réseaux LTE, une sorte d'amélioration de la technologie cellulaire UMTS. Ces spécifications sont considérées comme l'évolution E-UTRA (Evolved Universal Terrestrial Radio Access) et E-UTRAN (Evolved Universal Mobile Telecommunications System Terrestrial Radio Access Network) dans le projet LTE. La première documentation sur la technologie LTE est apparue dans la Release 8 des spécifications 3GPP.

- Réduction du coût par bit
- Proposition de nouveaux services à moindre coût
- Utilisation flexible des bandes de fréquences
- Simplification de l'architecture du réseau et de ses interfaces
- Consommation raisonnable des terminaux

Pour de plus amples informations concernant le réseau d'accès LTE (E-UTRA et E-UTRAN), deux rapports techniques détaillés, TR 25.912 et TR 25.913, sont disponibles sur le site 3GPP (www.3GPP.org). La norme est en évolution permanente.

Les performances de LTE ont été évaluées par le groupe 3GPP lors d'une rencontre mi-2007 [Ericson., 2009]. Les spécifications développées ont depuis été revues et discutées. De

nouvelles fonctionnalités ont été rajoutées compte tenu des résultats satisfaisants obtenus jusque là. Il s'agit d'études sur l'efficacité du spectre ainsi que d'autres fonctionnalités de type VoIP et sur les performances du MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service). Enfin, des travaux ont été réalisés en mars 2009 concernant des spécifications sur l'architecture du réseau (SAE pour System Architecture Evolution). La phase finale qui constitue le déploiement et les essais ont été prévus de fin 2009 à mi-2010 [Agilent Technologies, 2009]. Le schéma qui suit (Figue 1.4) représente le cycle de vie du développement de LTE [Agilent Technologies, 2009].

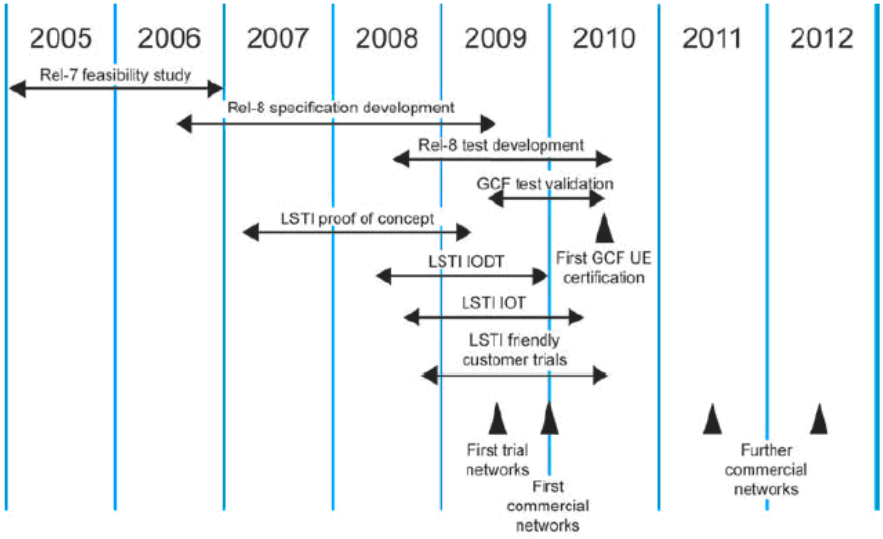


Figure 1.4 – Cycle de vie du développement de LTE.

1.2.2 Architecture LTE/SAE et E-UTRAN

En termes de vocabulaire, le futur réseau s'appelle EPS (Evolved Packet System). Comme le projet d'accès LTE, 3GPP est en train de développer un projet parallèle à LTE qui constitue le réseau cœur appelé SAE (System Architecture Evolution) ; il décrit l'architecture du réseau avec pour objectif de permettre d'optimiser les performances du réseau et de réduire les coûts engendrés. La combinaison de LTE et de SAE nous donne le réseau EPS. Selon le contexte, EPS peut désigner la combinaison d'EPC (Evolved Packet Core) et du RAN (Radio Access Network) évolué (E-UTRA plus E-UTRAN) [Olsson *et al.*, 2009]. Les notations suivantes, LTE, E-UTRA, E-UTRAN, SAE, EPC et EPS peuvent être employées pour décrire une partie ou tout le système. Bien qu'EPS soit le terme le plus correct qui puisse décrire le système entier, nous allons nous contenter d'utiliser simplement la notation LTE dans la suite de ce document.

1.2.3 Caractéristiques de l'accès LTE

Les principaux objectifs tracés par l'organisme en termes d'accès radio sont divers. En ce qui concerne le débit, il s'agit de l'augmenter sur l'interface radio E-UTRAN de telle sorte à supporter des débits importants, pouvant atteindre jusqu'à 100Mbits/s sur le lien descendant et 50Mbits/s sur le lien montant, en considérant une allocation de bande de fréquence de 20MHz. Les technologies utilisées à cet effet sont le SC-OFDMA (Single Carrier Orthogonal Frequency Division Multiple Access) pour le sens descendant et SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) pour le sens montant. Cela correspond à une efficacité de 5bit/s/Hz et de 2,5bit/s/Hz pour le sens descendant et montant respectivement [Sesia *et al.*, 2009].

Le délai de transmission des données est aussi l'une des préoccupations du projet 3GPP pour la réduction de la latence (le délai entre le moment où une information est envoyée et celui où elle est reçue) : elle est de 5ms entre UE (User Equipment) et GW (Gateway), et ceci dans une situation de non charge, c'est-à-dire dans le cas où un seul terminal est actif sur l'interface radio. La valeur moyenne du délai devrait avoisiner 25ms en situation de charge moyenne de l'interface radio. Le but est de permettre de supporter le service pour les services de type voix sur IP (Internet Protocol), streaming sur IP... [Effort., 2009]. On cite dans ce qui suit les caractéristiques principales d'accès radio LTE :

Extensibilité : Extensibilité de la bande passante du canal d'une manière flexible allant jusqu'à 20MHz pour opérer sur des bandes de fréquences de différentes tailles incluant (1.4, 3, 5,10, 15 et 20 MHz) sur les deux types de lien (ascendant et descendant).

Mobilité : Optimiser les performances en mobilité pour des vitesses allant de 0 à 15 km/h, assurer une performance de qualité pour les vitesses 15-120 km/h, et les fonctionnalités de base pour les vitesses 120-350 Km/h ; prendre en considération des vitesses de plus de 350 km/h jusqu'à 500 Km/h.

Support du multicast : Support multicast pour les applications multimédia comme la télévision en broadcast par exemple.

Coexistence 2G/3G : Le déploiement de LTE doit assurer une coexistence et l'interfonctionnement avec 2G/3G (GSM, UMTS) ; en d'autres termes, les handover E-UTRAN (LTE) et UTRAN (3G) doivent être pris en considération (réalisés en moins de 300 ms pour les services temps réel et 500 ms pour les autres services non temps réel). Le handover pourra aussi s'effectuer entre LTE et les réseaux 2G CDMA et CDMA-2000 [Hung *et al.*, 2009].

Couverture des zones suburbaines et rurales : Une autre possibilité de LTE est de couvrir des zones suburbaines et rurales dans la mesure où LTE permet d'opérer sur des bandes de fréquences basses telles 700 MHz (d'ailleurs choisies par les opérateurs

AT&T et Verizon Wireless aux USA) ; cela permettra de considérer des cellules avec un diamètre de couverture très large (très favorable dans les zones suburbaines).

Les techniques OFDMA et CS-OFDMA : Le schéma d'accès radio en lien descendant dans LTE utilise la technologie OFDMA et en lien montant CS-FDMA. L'intérét de l'utilisation de ces techniques d'accès multiple est l'amélioration de la capacité du réseau, mais aussi d'assurer une meilleure gestion des interférences entre plusieurs utilisateurs [Holma *et al.*, 2009].

La technique d'accès OFDMA est utilisée en LTE à la place de CDMA. L'avantage d'OFDMA est qu'elle peut diviser la bande de fréquence totale en sous-porteuses et chaque sous-porteuse est exclusivement assignée à un seul utilisateur éliminant ainsi les interférences intra-cellules. Mais la technique permet aussi une meilleure flexibilité dans la façon d'allouer les ressources du système et dans l'utilisation de la bande passante [Nas *et al.*, 2007]. Le traitement du signal à la réception n'a pas besoin d'opérations complexes, cette propriété permet de réduire les coûts et d'économiser l'énergie au niveau du terminal [Astély *et al.*, 2009]. Par contre CS-FDMA, dérivée de l'OFDM, intervient dans la liaison montante car elle accroit le rendement des amplificateurs de puissance. Cet aspect est primordial pour l'allongement de la durée de vie des batteries des téléphones portables LTE qui alimenteront les transmissions montantes [Agilent Technologies, 2009].

1.3 Self-Organizing Networks (SON)

Le marché de la téléphonie mobile continue de croitre, le nombre d'abonnés avoisine 4,6 milliards dans le monde fin 2009, et à la fin 2012, ce sont plus de 6 milliards d'abonnements mobile qui étaient souscrits, soit une croissance de plus de 7,55% sur un an toujours selon l'International Telecommunication Union d'après les statistiques de l'ITU, cependant le secteur est trés concurrentiel et les opérateurs et les fournisseurs d'accès font face à d'énormes dépenses de R&D et d'exploitation. Par ailleurs les clients sont de plus en plus exigeants sur le débit et la qualité. C'est dans ce contexte que les études sur une nouvelle génération de téléphonie mobile LTE ont été lancées. Le secteur attend de cette technologie qu'elle permette du haut débit et des services de qualité, mais aussi de réduire considérablement les coûts d'investissement et d'exploitation dits CAPEX et OPEX [NEC Corporation, 2009, Van Den Berg *et al.*, 2008] qui sont trés élevés. Dans cette section, nous nous intéressons plus particuliérement à la fonctionnalité SON qui a pour objectif d'étudier le rapport entre la gestion automatisée du réseau et les coûts OPEX/CAPEX en réduisant par exemple le personnel impliqué dans la gestion de ce dernier tout en prenant en compte l'optimisation technique du réseau. Plusieurs travaux ont été initiés,

voir entre autres les travaux normatifs de 3GPP dans la release 9 [3GPP TS 32.521 V1.1.0., 2009], ou encore [SOCRATES., 2008, Van Den Berg *et al.*, 2008], et quelques projets de partenariat [SOCRATES., 2008, Ngmn07., 2007, Ngmn08., 2008] pour le déploiement de SON.

1.3.1 Les systèmes automatisés

[Prehofer *et al.*, 2005] définit un système automatisé comme étant un système doté d'une structure et de fonctionnalités, définition classique issue de l'automatique. La structure regroupe un ensemble d'entités qui sont arrangées de manière à interagir et communiquer entre elles afin d'atteindre certains objectifs prédéfinis (les fonctionnalités). [Prehofer *et al.*, 2005] s'est inspiré de certains phénomènes naturels comme le comportement des bancs de poissons et des colonies de fourmis pour proposer quelques paradigmes permettant d'atteindre des propriétés globales à partir des interactions locales entre les différentes entités. L'intérét de ces systèmes automatisés est le fait qu'ils réagissent et s'adaptent aux différents changements dans leur environnement (flexibilité, robustesse, scalabilité...) sans aucune intervention externe ni coordination centrale, ce sont des systèmes dits non centralisés et distribués. On parle de SON dans la suite de ce document quand il s'agit d'un système automatisé appliqué aux réseaux de radiocommunications.

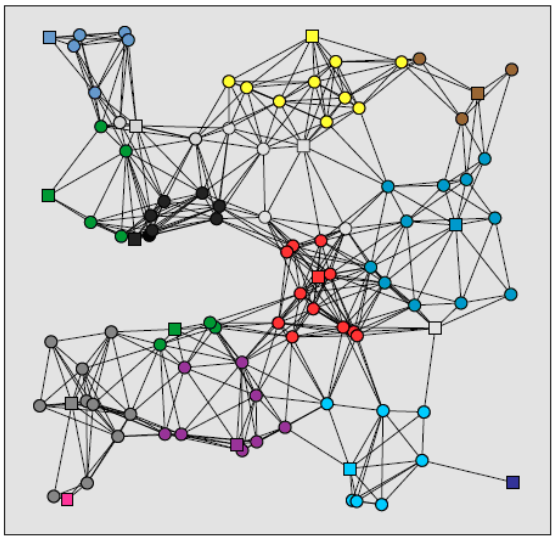


FIGURE 1.5 – Réseau à clusters organisés utilisant l'algorithme de Basagni.

Le schéma de le Figure 1.5 montre un exemple de fonctionnement d'un système automatisé. Présenté dans [Prehofer *et al.*, 2005], il représente l'algorithme de Basagni conçu pour la gestion automatisé d'un réseau à partir d'un ensemble de cluster (un ensemble de nœuds reliés par des liens, chaque cluster apparaît en couleur différente sur le schéma).

L'idée est d'organiser le réseau localement d'une manière à atteindre certaines propriétés globales définies à priori. Pour atteindre la/ou les propriétés globales, le système est décrit comme suit : chaque nœud appartient à un et un seul clusters, et chaque cluster contient un et un seul nœud principal (présenté par un carré sur la figure). Ce nœud principal permet de contenir les informations concernant le cluster et de les communiquer à ses voisins. De cette façon, chaque cluster réagit localement et interagit avec ses voisins sans contrôle central ; avec ce simple protocole, le réseau converge vers des propriétés globales.

1.3.2 Le cycle d'un SON

La Figure 1.6 illustre le cycle complet de la self-organisation qui sera introduit dans les futurs réseaux d'accès radio [Van Den Berg *et al.*, 2008]. Ce cycle montre trois étapes importantes (self-configuration, self-optimisation et self-healing). Comme expliquée aussi dans [SOCRATES., 2008], la premiére étape consiste en l'état pré-opérationnel du cycle entier, c'est-à-dire avant l'émission des signaux radio d'eNB. Dans cette étape, on procède par exemple à la configuration IP et l'authentification des stations de base suivies de la configuration radio comme par exemple la liste des voisines d'une station eNB. Le but principal de cette phase est de permettre une configuration automatisée de tous les paramètres d'une station de base (tilt, azimut...) ; un exemple typique est lors de l'insertion d'une nouvelle eNB au sein du système. Cette fonctionnalité permet de régler les paramètres de façon autonome, indépendamment de l'implication humaine ou avec un minimum de personnel possible. Le terme plug & play est une procédure qui permet de jouer sur ces paramètres afin de choisir la meilleure combinaison possible tenant compte de plusieurs critères tels la couverture, la capacité...

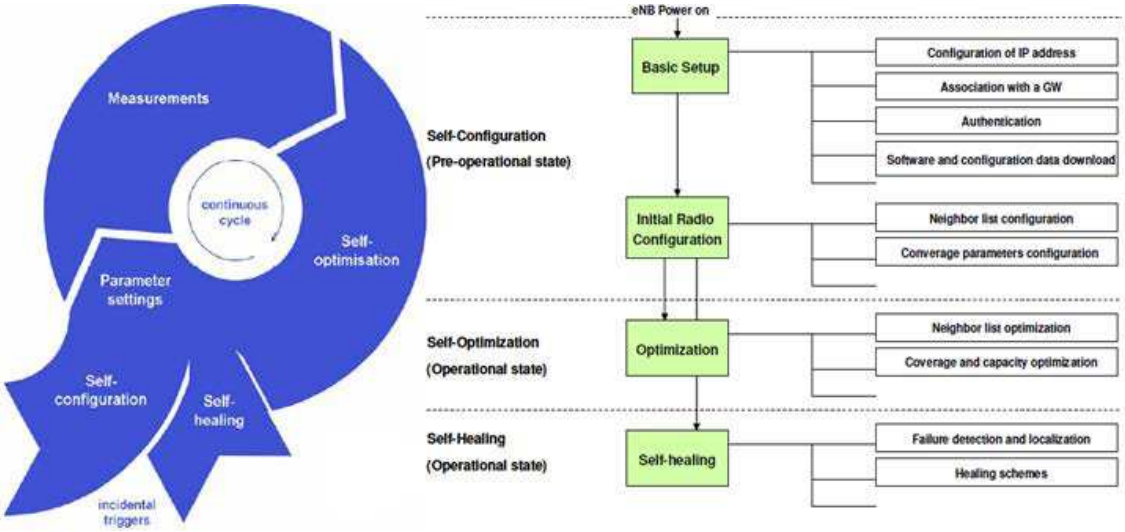


Figure 1.6 – Self-organisation dans les futurs réseaux d'accès radio.

La phase de self-optimisation est précédée par une étape de mesures effectuée sur l'ensemble des ressources afin de récupérer les différentes données au fur à mesure du déroulement des opérations [Van Den Berg *et al.*, 2008,SOCRATES., 2008]. Ceci permettra entre autres d'évaluer les performances du réseau vis-à-vis de la demande utilisateur comme le trafic et la mobilité. Les mesures peuvent concerner les caractéristiques des canaux radio, l'admission, la congestion, le handover... Ces mesures serviront de données d'entrée pour la self-optimisation. Dans la self-optimisation, considérée comme la phase intelligente de SON, des méthodes efficaces sont appliquées aux données précédentes afin de mener à bien la gestion du réseau en fonction des besoins des utilisateurs en demande de trafic et en qualité de service. L'optimisation peut concerner les paramètres physiques des antennes (tilt, azimut, diagramme de rayonnement...) mais aussi d'autres paramètres tels que la puissance du signal ou les paramètres RRM. On reviendra un peu plus loin sur cette phase pour discuter d'une façon plus exhaustive sur la manière dont elle agit sur ces paramètres afin d'atteindre de meilleures performances.

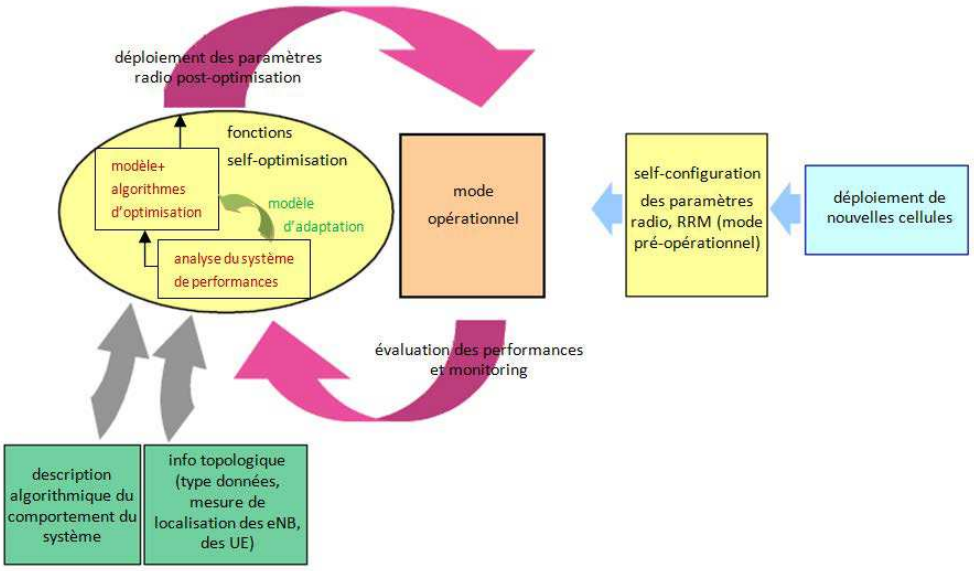


FIGURE 1.7 – Comparaison de la configuration conventionnelle du réseau et de la Self-organizing.

La dernière phase de SON est le self-healing. Dans cette dernière, le système sera guidé de manière à ce qu'il soit capable de détecter des erreurs dans le réseau dues essentiellement à l'arrivée de pannes inopinées. Il s'agit d'identifier les causes de défaillances ainsi que les sources et déclencher, par la suite, un mécanisme permettant la réparation des pannes ou plutôt de réagir de manière à ce que le système absorbe les perturbations engendrées. Un exemple typique concerne la panne d'une station de base qui engendre une absence de couverture. Une manière intelligente d'agir à cette panne est de changer les paramètres des stations voisines de telle sorte à couvrir la zone défaillante. Cela permettra d'assurer

la couverture en attendant l'intervention pour la réparation de l'antenne défectueuse. D'une certaine manière la self-configuration fonctionne en mode pré-opérationnel et la self-optimisation intervient en mode opérationnel (mentionnées dans les zones jaunes en Figure 1.7 [Kuehn *et al.*, 2007].

1.3.3 Migration UMTS-LTE et fonctionnalités du SON

Le schéma ci-dessous tiré de [Kuehn *et al.*, 2007] représente une description succincte d'une migration des réseaux 3G (UMTS) vers LTE en ajoutant l'approche self-x (self-configuration et self- optimisation). Cette solution permettrait l'accès RAN avec un minimum d'opérations possibles, réduisant la complexité de déploiement et les différents coûts CAPEX et OPEX engendrés, tout en assurant une meilleure adaptabilité du réseau aux comportements dynamiques du système.

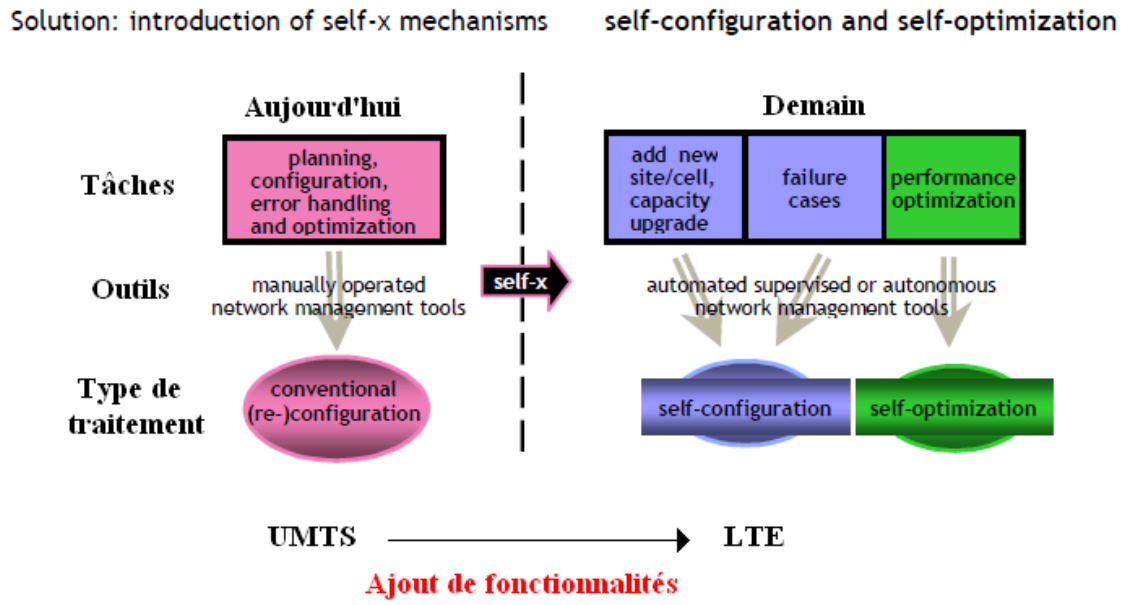


Figure 1.8 – Migration UMTS vers LTE avec fonctionnalités Self-organizing.

1.3.3.1 La self-optimisation

Cette fonctionnalité a pour but de contrôler les performances du réseau en fonctionnement. Aprés l'étape d'analyse des données, des algorithmes d'optimisation et de corrections seront déclenchés automatiquement afin de prendre des décisions sur la façon de piloter le système et ceci en fonction des objectifs des opérateurs et des besoins des utilisateurs.

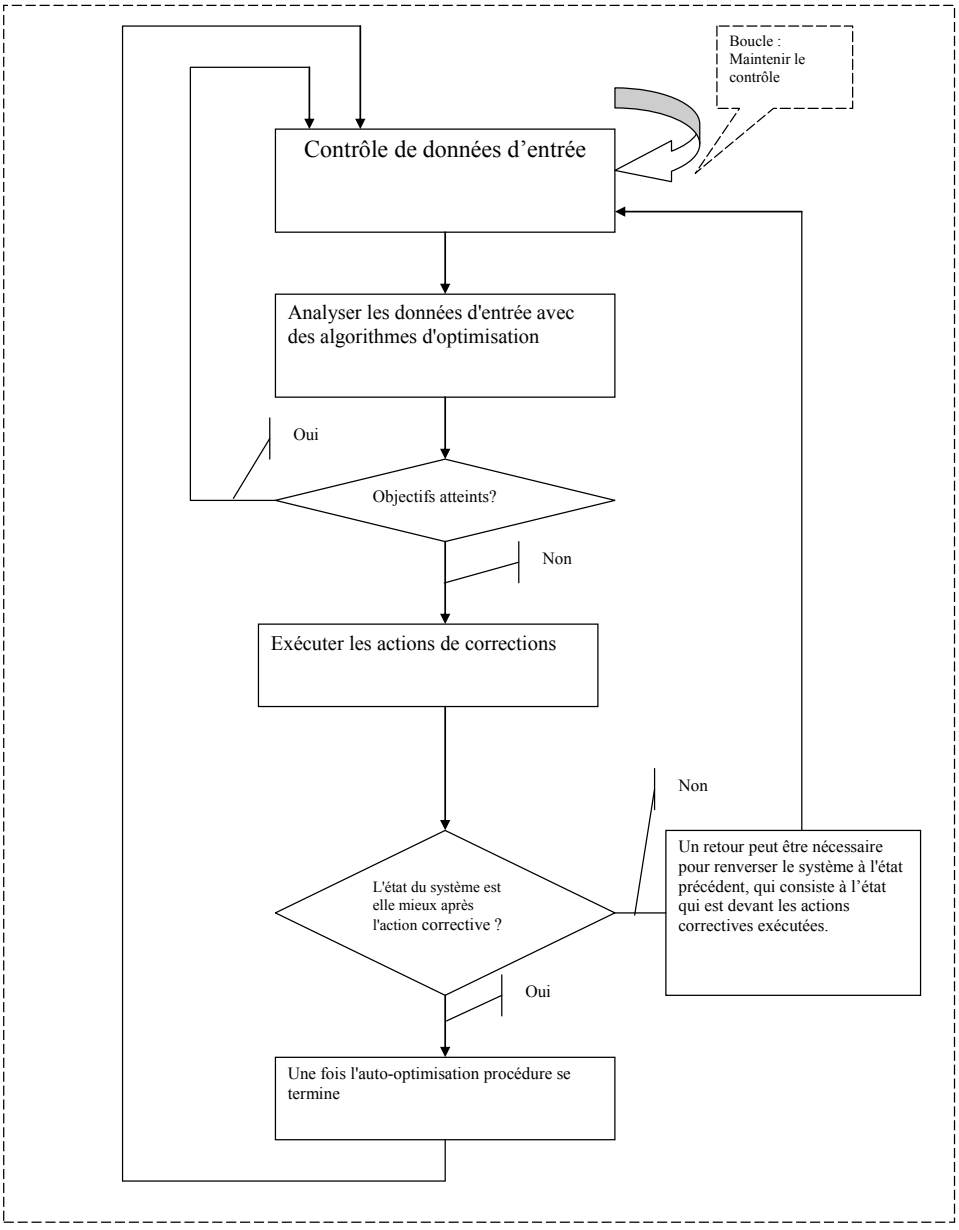


FIGURE 1.9 – Vue logique de la procédure self-optimisation.

La Figure 1.9 [3GPP TS 32.521 V1.1.0., 2009] représente la vue logique de la self-optimisation avec trois étapes importantes :

– Analyse des données en entrée et évaluation des performances

- Déclenchement des algorithmes d'optimisation et de corrections en cas d'instabilité du système
- Validation des choix mis en place ou retour à l'étape initiale en cas de résultats non satisfaisants

Dans les sections qui suivent, on présentera quelques modèles de description du système pour l'analyse des données afin d'évaluer les performances des indicateurs qui nous intéressent ; on citera par la suite les techniques à maitriser pour optimiser la couverture et la capacité du réseau (handover, load balancing, contrôle d'interférence...). On discutera aussi des différents types d'optimisation en considérant plusieurs critères à la fois.

1.3.3.2 Analyse des données du système

Une analyse des données extraites à partir du système est primordiale afin de comprendre le comportement de ce dernier, ce qui permet par la suite de développer des approches flexibles et robustes pilotant le système vers des solutions de plus en plus performantes. Plusieurs travaux ont été réalisés récemment dans ce sens. [Tiwana *et al.*, 2009] a utilisé une méthode d'apprentissage statistique (la régression linéaire multiple) dans le but d'améliorer les fonctionnalités de SON. Un modèle de régression linéaire adapté aux données extraites du système permet une approximation de la relation entre les différents indicateurs de performance KPI et les paramètres correspondants. L'impact du handover margin (HM) sur plusieurs KPI (BCR Block Call Rate, DCR pour Drop Call Rate, L pour Loading , ABR pour Average Bit Rate) est estimé à travers des équations issues des régressions linéaires correspondantes. Une fois le modèle conçu, il est utilisé afin de développer des algorithmes efficaces pour le SON. Le diagramme suivant (Figure 1.10) rappelle le processus général d'automatisation des paramètres.

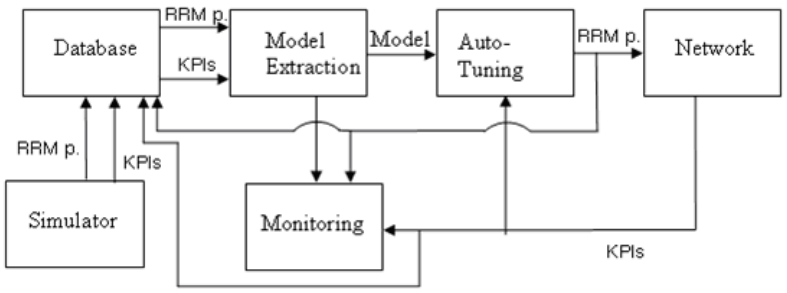


Figure 1.10 – Processus d'otmatisation des paramètres RRM.

Les paramètres du système (ici RRM) sont déterminés en faisant des évaluations sur les indicateurs de performance. Le modèle de régression multiple est donné sous la forme d'un vecteur-matrice comme suit :

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{1.1}$$

Tel que

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k \tag{1.2}$$

Où, k est le nombre de variables explicatives, X est une variable explicative de dimension k, β représentent les coefficients de la régression et Y est la variable à expliquer de la dimension L, $i \in [1, ..., l]$.
Dans notre cas, Y représente les indicateurs de performance KPI (Key Performance Indicator), alors que X représente les paramètres qu'on veut maitriser (variables explicatives).

$$KPI_j = f_i(p), j \in [1, ..., j] \tag{1.3}$$

Où, p est le paramètre, j est le nombre d'indicateurs de performance à expliquer et $f_i(p)$ représente la fonction linéaire avec les coefficients β_k.

Y.A Ghassabeh et H.A Moghaddam [Ghassabeh *et al.*, 2007] ont adapté des algorithmes d'apprentissage pour l'extraction des caractéristiques du réseau à partir des données multidimensionnelles. L'analyse des données est faite en utilisant la méthode LDA (Linear Discriminant Analysis) ainsi que la méthode d'analyse en composante principale connue en analyse de données statistiques. Cela permet de réduire l'espace des données tout en conservant les caractéristiques du réseau.

1.3.3.3 Optimisation du Handover

Le handover est défini comme étant l'ensemble des opérations permettant à une station mobile de changer de cellule sans interruption de service. L'optimisation des paramètres du handover revient à minimiser les défaillances et la réduction des pannes qui peuvent dégrader le bon fonctionnement du système. L'optimisation peut concerner l'utilisation efficace des ressources du système afin d'éviter les handovers inutiles ou aussi, trouver le bon timing pour ajuster les seuils reliés à la cellule concernée. La procédure d'optimisation peut être faite automatiquement ou avec un minimum d'intervention humaine [3GPP TS 32.521 V1.1.0., 2009, Racz *et al.*, 2007].

Plusieurs recherches ont été déjé réalisées sur les réseaux GSM par le passé pour l'optimisation du handover. Ces recherches portent essentiellement sur la manière de gérer les seuils des cellules et l'équilibrage de charge entre des cellules adjacentes [Tiwana *et al.*, 2009, Magnusson *et al.*, 2001]. LTE ne s'intéresse qu'aux problèmes du hard handover (le soft handover est abandonné par 3GPP pour le standard LTE).

Parmi les paramètres à contrôler pour la gestion optimale du handover, on trouve la puissance ainsi que le HO margin. Une formule permettant à une station mobile M connectée à une eNB e de déclencher un handover vers une station eNB k voisine en fonction de leur charge est donnée par [Nas *et al.*, 2007, Tiwana *et al.*, 2009] :

$$PBQ = p_k - p_e \geq HM(e,k) + Hysteresis \tag{1.4}$$

Où, PBQ représente la différence de puissance entre l'eNB k et l'eNB e, HM (Handover Margin) est un facteur qui dépend de la charge des deux stations eNB.

$$HM = f(X_e, X_k), \tag{1.5}$$

Où X_e , X_k sont la charge de l'eNB e et k respectivement. L'objectif est de minimiser les échecs des handovers (interruption de service) et d'éviter l'effet ping-pong dans l'intra RAT handovers (Radio Access Technologies) ainsi que dans l'inter RAT handovers (inter technologies). Différentes analyses sur les indicateurs de performance doivent être réalisées comme par exemple le taux d'échec du handover, la distribution du temps de visite des cellules concernées, les mesures concernant les interférences et le signal, la localisation de la station mobile dans la cellule... L'analyse peut être déclenchée d'une manière périodique ou manuelle [Ambrosy *et al.*, 2007].

1.3.3.4 Contrôle du load balancing

Le load balancing doit être pris en considération pour améliorer les performances du réseau. L'objectif du load balancing est d'optimiser le débit global en évitant les situations de surcharge révélant une augmentation du taux de blocage affectant la qualité de service attendue. Trois cas peuvent se présenter dans la pratique selon le rapport technique de 3GPP [3GPP TS 32.521 V1.1.0., 2009]. Ils sont illustrés sur les Figures 1.11, 1.12 et 1.13.

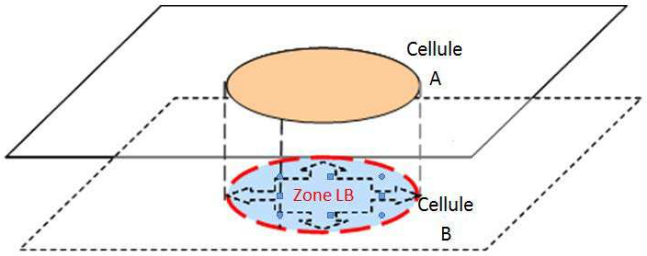


Figure 1.11 – Chevauchement de couverture.

Ce premier cas (Figure 1.11) se présente quand deux cellules A et B coincident et

couvrent exactement la même zone (LB pour Load Balancing Area).

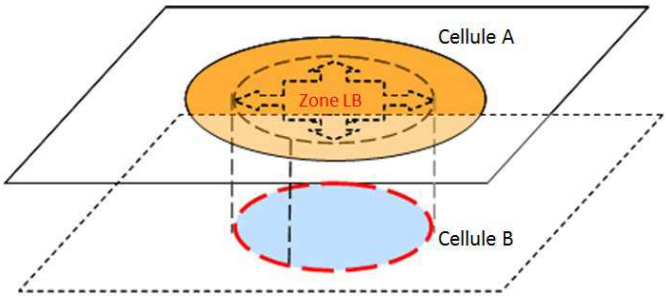


FIGURE 1.12 – Couverture hiérarchique.

Dans ce scénario (couverture hiérarchique en Figure 1.12), la cellule A est de taille plus grande que la cellule B, elle couvre entiérement la zone de la cellule B. On doit tenir compte du load balancing entre ces deux cellules au niveau de la zone de chevauchement (zone LB sur le schéma).

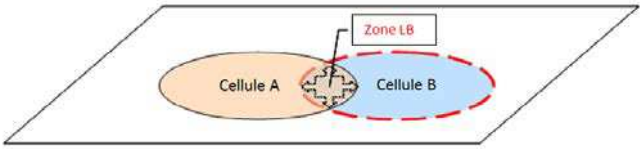


FIGURE 1.13 – Couverture du voisinage.

La couverture du voisinage (Figure 1.13) est le cas le plus fréquent dans la pratique, les deux cellules A et B sont adjacentes et leurs zones de couverture se chevauchent partiellement. La charge entre les cellules adjacentes doit être équilibrée.

La charge d'une cellule ou d'un néud est mesurée en termes de degré d'utilisation des ressources radio disponibles dans la mesure où ces ressources sont limitées [Ambrosy *et al.*, 2007]. La charge est une caractéristique spécifique d'une cellule, plusieurs paramètres peuvent être associés à la situation de charge de la cellule ; on cite par exemple la puissance d'émission, la puissance reçue, les débits des liens montants et descendants, ainsi que l'interférence.
Le load balancing peut être réalisé comme suit :

- Modification des paramètres du handover (seuils et hystérésis) et prise en compte du handover vertical entre les couches et entre les systèmes pour faire basculer la charge dans les cellules adjacentes.
- Redistribution des ressources radio entre les cellules adjacentes conduisant à une

diminution relative de la surcharge au niveau des cellules concernées.

1.3.3.5 Contrôle des interférences

L'interférence peut limiter considérablement les performances du réseau. Dans les systèmes LTE, il y aura interférence lors des transmissions de données sur la même sous-porteuse. L'intensité de l'interférence dépendra surtout de la position du mobile en bordure de deux cellules voisines lorsque les différents signaux arrivant en réception seront proches en puissance [Nas *et al.*, 2007]. LTE s'intéresse aux problèmes d'interférence inter-cellules entre les utilisateurs en lien montant et descendant [Astély *et al.*, 2009].

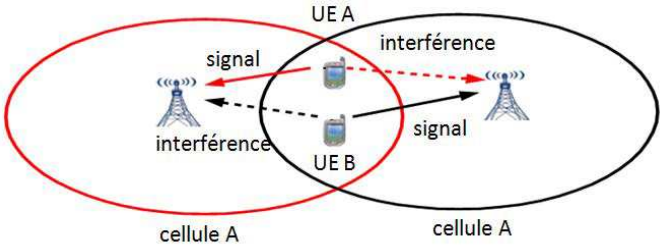


Figure 1.14 – Interférence inter-cellules sur le lien montant.

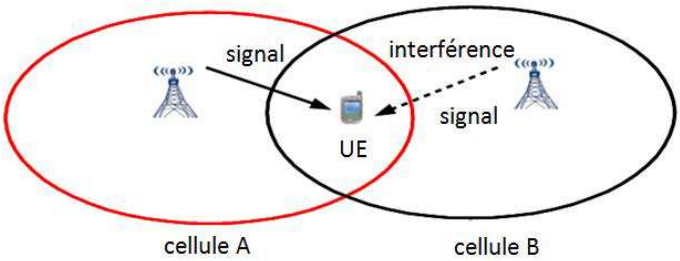


Figure 1.15 – Interférence inter-cellules sur le lien descendant.

Il y a deux cas d'interférence à gérer [3GPP TS 32.521 V1.1.0., 2009]. Le premier cas, illustré sur la Figure 1.14 montre une interférence inter-cellules sur le lien montant où les deux UE se brouillent mutuellement au niveau des stations de base en réception. Une coordination entre les deux cellules adjacentes doit être faite. La gestion automatique doit permettre d'améliorer les performances des systèmes au bord des cellules adjacentes afin d'assurer une meilleure qualité de service pour l'utilisateur. Tandis que le deuxième cas (Figure 1.15) illustre le cas d'interférence sur le lien descendant ou l'UE reçoit des signaux depuis les deux stations de base (A et B).

L'un des mécanismes cité dans [Astély *et al.*, 2009] et qui sera utilisé par LTE comme pour la 3G est le contôle de la puissance. Cette technique est employée de manière à perme-

ttre aux émetteurs proches de leurs récepteurs d'utiliser moins de puissance afin de réduire les interférences générées sur les autres signaux reçus venant d'émetteurs plus éloignés. Une autre façon de faire est d'utiliser la stratégie ICIC (Inter-Cell Interference Coordination) pour limiter les interférences. Ce schéma qui est proposé par LTE, n'utilise pas toute la bande de fréquence mais améliore le rapport signal/interférence pour les fréquences utilisées. Bien que la perte due à la réduction de la bande de fréquence soit plus importante que le gain du rapport signal/interférence, LTE va fournir des outils permettant la gestion dynamique de la bande de fréquence au niveau des cellules adjacentes [Astély *et al.*, 2009].

1.3.3.6 Optimisation de la liste des voisines

L'une des principales tâches dans la self-configuration est d'établir une liste de voisines pour chaque station de base eNB. Les informations sur cette liste sont nécessaires pour la gestion des ressources radio comme par exemple le handover entre plusieurs paires de cellules mais aussi pour l'optimisation de l'accès radio dans le réseau [Ambrosy *et al.*, 2007] (problème de couverture, coordination des interférences...). Les relations entre cellules de réseaux hétérogènes doivent être prises en considération pour établir une liste de voisines. Lors de l'installation d'une nouvelle station, la liste de ses voisines doit être déduite en fonction des informations sur la précédente configuration ainsi que sur la topologie du réseau. Dans ce cas, la mise à jour des listes des voisines est nécessaire. Les mises à jour doivent aussi être réalisées dans le cas ou une cellule devient défectueuse.

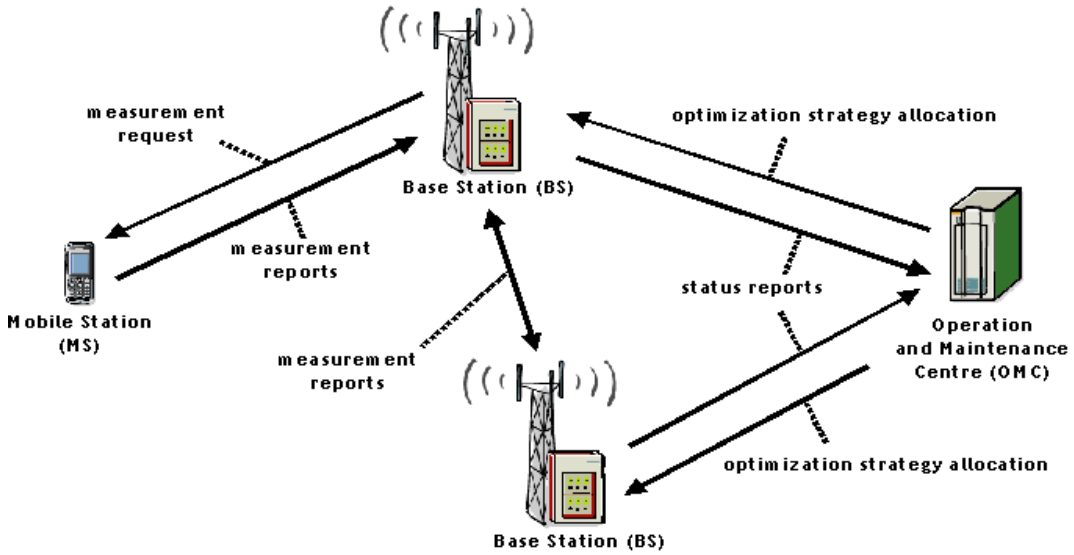


FIGURE 1.16 – Exemple d'architecture de réseau avec interfaces et échange de messages entre les nœuds du réseau et le mobile qui doit être standardisé pour l'introduction de Self-organizing.

Les informations sur les nouvelles mises à jour peuvent être sauvegardées dans les

nœuds et dans les bases de données liées à l'OMC (Operation and Maintenance Centre).

L'optimisation de la liste des voisines doit être effectuée en mode opérationnel d'une manière périodique ou sur commande de l'opérateur dés lors que la configuration initiale de la liste ne reflète plus la topologie du réseau. La relation entre les différentes cellules peut être mieux gérée si elle est faite en se basant sur l'analyse des indicateurs de performance du réseau (interruption de service, échec du handover...), des informations concernant la station mobile (localisation...) ou aussi des modifications de l'espace urbain [Kuehn *et al.*, 2007].

1.3.3.7 Optimisation de la capacité et de la couverture du réseau

Parmi les paramètres les plus importants dans les réseaux UMTS, l'optimisation des paramètres de l'antenne (tilt, azimut, puissance du signal...) est déterminante. Les deux premiers paramètres sont étudiés dans une analyse quantitative pour en mesurer les effets sur les performances des réseaux UMTS [Didan *et al.*, 2007]. Ce travail a montré qu'une variation de 10° sur les deux paramètres (tilt, azimut) à un effet important sur les indicateurs de performances KPI (couverture, interférence et soft handover) et qu'ils doivent donc être optimisés finement. Plusieurs scénarios de simulation ont été réalisés sur environ

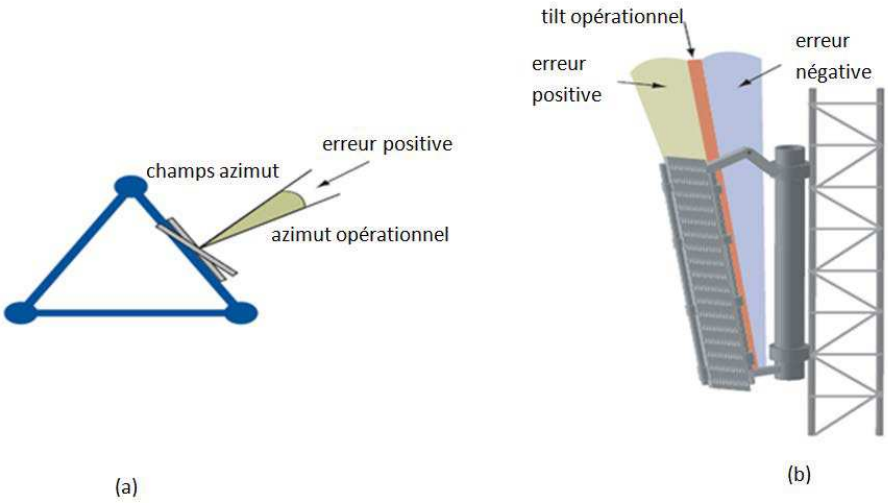


Figure 1.17 – Exemple de réglage des paramètres antennaires (azimut et tilt).

60 sites dans un intervalle de 65 degrés pour l'azimut et de 7 degrés pour le tilt. L'étude est menée en fixant les autres paramètres du système à des valeurs standards : puissance de transmission à 20 watts, fréquence à 2150 Mhz en lien descendant... L'idée de base est qu'à chaque scénario, on fait une simulation et une évaluation des indicateurs de performance sur la couverture et on calcule les interférences ainsi que le soft handover. Les indicateurs de performances permettent de choisir la combinaison la plus intéressante vis-à-vis des

objectifs des opérateurs. On voit bien sur cette étude l'intérét des techniques SON sur le paramétrage antennaire.

Les problèmes de couverture et de capacité de certaines zones du réseau doivent être détectés automatiquement d'une manière périodique ou déclenchés manuellement en analysant les différentes mesures effectuées sur la station mobile (la puissance, le niveau d'interférence...) combiné par l'analyse des indicateurs de performance de la station mobile (interruption du service, échec du handover...).
Les actions de corrections ou de compensation de ces problèmes peuvent être menées en agissant sur les paramètres du système suivant [Kuehn *et al.*, 2007] :

- La puissance d'émission
- Le tilt de l'antenne
- La direction de l'antenne (azimut)

Lorsqu'on procède à l'optimisation de la couverture du réseau, on doit prendre en compte certaines contraintes comme par exemple les seuils de tolérance aux interférences des cellules voisines et les seuils de handover. On voit bien que tout cela est étroitement lié et ne peut pas être géré de façon indépendante.

1.3.4 Travaux récents sur l'optimisation des fréquences et des puissances

Dans les réseaux radio multi-cellules, la clé principale pour améliorer le débit atteignable en moyenne par utilisateur est de réduire les interférences inter-cellules dues à l'utilisation de la même fréquence dans les cellules adjacentes. Divers systèmes de réutilisation des fréquences ont été proposés dans la littérature [Mao *et al.*, 2008, Rahman *et al.*, 2010]. Les techniques de réduction d'interférence sont généralement classées en trois grandes techniques comme montré dans [Rahman *et al.*, 2009] : annulation d'interférences, interférences en moyenne, et les techniques d'évitement des interférences.

Habituellement, tous les schémas se réfèrent à une technique de réutilisation de fréquence fractionnaire (FFR pour Fractional Frequency Reuse). Deux variantes de réutilisation de fréquence fractionnaire peuvent être trouvées dans la littérature. La technique Partial Frequency Reuse (PFR) a été adoptée pour la premiére fois dans les systèmes LTE 3GPP [3GPP. R1-050738., 2005]. Celle-ci améliore considérablement les interférences au bord de la cellule, mais perd en capacité en raison de la répartition du spectre [Rahman *et al.*, 2010]. L'idée principale est de partitionner la cellule en deux zones statiques, la zone centrale de la cellule utilise généralement 2/3 du spectre disponible alors que la zone du bord utilise le dernier tiers ; celui-ci est lui même redivisé en 3 parties égales si la cellule est sur un site trisectoriel. Une description détaillée de réutilisation des fréquences partielles

peut être trouvée dans [Rahman *et al.*, 2010].

Soft Frequency Reuse (SFR) est une autre variante de réutilisation de fréquence fractionnaire présenté dans [Mao *et al.*, 2008,3GPP. R1-050507., 2005]. Cette dernière impose certaines restrictions en termes d'allocation de fréquences et de puissances dans les zones centrales et au bord des cellules. L'avantage de ce motif de réutilisation est qu'il fournit des services améliorés aux UE situés à la frontière de la cellule. Cette technique permet au système d'utiliser une puissance plus élevée dans la frontière que dans le centre de la cellule, et la fréquence qui est allouée d'une manière dynamique au bord de la cellule doit être orthogonale aux cellules adjacentes pour atténuer les interférences inter-cellules. Les deux techniques, PFR et SFR, sont généralement connues comme des techniques ICIC (Inter-Cell Interference Coordination), Elles exigent au planificateur de développer des fonctions de coordination entre les eNBs afin de gérer les interférences tout en maintenant un maximum de ressources utilisables.

Par ailleurs, le contrôle de la puissance est une fonction cruciale dans les réseaux cellulaires. Il est généralement utilisé pour maximiser la puissance des signaux reçus souhaités afin de limiter les interférences engendrées et la consommation des terminaux mobiles en energie.

Plusieurs travaux ont été réalisée dans la littérature pour optimier la puissances d'emission dans les sens montant et descendant. Iana Siomina et Di Yuan ont étudié l'impact du CPICH (Common Pilot Channel) sur la couverture des réseaux UMTS (WCDMA). Le CPICH est utilisé essentiellement par les terminaux mobiles pour estimer la qualité du canal, sélectionner la cellule serveuse, la mobilité et le handover. La portée du signal CPICH permet entre autre de déterminer la zone de couverture de la cellule, de piloter la capacité du réseau ainsi que la qualité du service offert. c'est un paramètre crucial d'optimisation. [Siomina *et al.*, 2006] a étudié le problème de couverture de la zone de service tout en minimisant la quantité de puissance émise par le canal CPICH. Deux modèles mathématiques et une approche de solution basée sur une technique de relaxation lagrangienne ont été proposées. L'approche vise à trouver une solution proche de l'optimum dans un laps de temps raisonnable de calcul.

E. Dinan et R. Kurochkin ont mesuré dans [Didan *et al.*, 2007] l'impact de l'azimut et du tilt sur les performances du réseau considérant trois principaux indicateurs de performances : la couverture de service, les zones du soft-handover, et le rapport de l'énergie sur interférence E_c/N_o. L'outil d'optimisation utilisé pour améliorer la liste des KPIs citée ci-dessus est l'algorithme d'optimisation récursif. De nombreux résultats de simulation montrent qu'une erreur de réglage de l'azimut dans la plage de ± 8 degrés est tolérable pour conserver une bonne performance du réseau. Le paramètre tilt a le même effet sur les performances du réseau tandis que la tolérance de réglage est à peu près de $\pm 0,5$ degrés.

L'approche du recuit simulé est utilisé dans [Siomina *et al.*, 2006] pour étudier l'impact d'un certain nombre de paramètres de configuration réseau (la puissance du CPICH, le tilt mécanique, le tilt électrique et l'azimut de l'antenne) vis-à-vis de la couverture du réseau UMTS. Le cas d'étude montre comment l'optimisation automatisée peut offrir un gain de performances significatif comme par exemple la consommation d'énergie des canaux communs, ce qui est une indication forte pour réduire les interférences dans le réseau.

[Simonsson *et al.*, 2008] et [Mullner *et al.*, 2009] montrent l'impact du contrôle de la puissance d'émision sur le lien montant dans les réseaux LTE. Le but est de maximiser la puissance du signal reçu tout en minimisant les interférences engendrées. Les deux travaux présentent le mécanisme de contrôle de la puissance sur le lien montant. Deux mécanismes ont été développés sur le contrôle de la puissance en boucle ouverte et en boucle fermée.

Sur la voie descendante, le contrôle de la puissance joue un rôle moins critique qu'en voie montante. En effet, un mode d'opération typique du réseau est de transmettre à puissance maximale sur le lien descendant, en s'appuyant sur l'adaptation de lien pour maximiser le débit en fonction de la qualité du signal reçue. Néanmoins, il est nécessaire de modifier dans certains cas la façon d'allouer les puissances d'émission sur le canal PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) [Bouguen *et al.*, 2012]. Comme par exemple dans le cas de transmission MIMO où la puissance disponible est partagée entre les UE servis simultanément ou aussi pour la coordination d'interférence (ICIC) mentionnée auparavant.

Beaucoup de travaux ont été réalisés dans cette optique afin de développer des algorithmes efficaces dans le but d'optimiser le problème d'allocation des puissances dans les réseaux LTE. Les auteurs dans [Wang *et al.*, 2012] ont combiné la théorie des jeux et la logique floue pour le concept d'auto-optimisation dans le SON. Cette technique nécessite peu d'échanges d'informations entre les eNB. L'algorithme proposé résout les problèmes existants dans les algorithmes classiques dits «water-filling algorithms» centralisés et distribués. Il prend soigneusement en compte les effets d'interférence co-canal dans l'examen de la procédure d'attribution de puissance de transmission. Le problème général peut être formulé sous forme d'un jeu non-coopératif où les eNB sont les joueurs ayant chacun une stratégie définie et une fonction d'utilité.

Plusieurs techniques d'allocation de ressources (combinaison fréquences/puissances) reposent sur le contrôle de la puissance. La technique typique est le contrôle de la puissance simple (PC pour Power Control), qui adapte la même puissance transmise sur toute la bande de fréquence disponible (Figure 1.18.a). La technique dynamique FFR (Fractional Frequency Reuse) quand à elle, adapte la puissance transmise sur différentes sous-bandes (Figure 1.18). Une autre technique appelée FL (Fractional Load) proposée par [Combes *et al.*, 2011] consiste à subdiviser la bande totale en sous-bandes de fréquence et chaque sous-bande se voit attribuée une puissance selon deux modes : soit une puissance nulle,

soit une valeur non nulle inférieure à la puissance maximale, (Figure 1.18.c). Des solutions d'algorithmes distribués sur la base de la méthode de descente de gradient ont été développées dans [Combes *et al.*, 2011]. La coordination entre les eNBs est réalisée grâce aux informations échangées sur l'interface X2 entre les eNBs. Des simulations numériques d'un réseau LTE à grande échelle montrent les avantages potentiels de la fonctionnalité d'auto-optimisation, avec des gains de performance très significatifs.

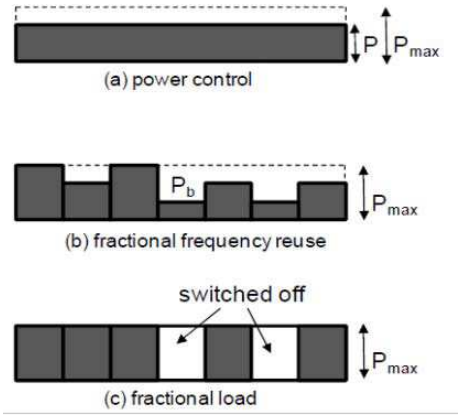


Figure 1.18 – Différentes techniques d'allocation de la puissance.

Les eNBs échangent des informations avec leurs voisins afin d'ajuster dynamiquement leur puissance pour maximiser l'utilité du réseau global [Combes *et al.*, 2011]. Le modèle d'optimisation dans le cas du FFR et du FL (étant donné que le FL est un cas particulier du FFR) est formulé dans [Combes *et al.*, 2011]. Nous renvoyons à d'autres travaux qui s'intéressent au problème d'allocation des puissance comme par exemple dans [Chung Shue Chen *et al.*, 2012, Wang *et al.*, 2010, Yang *et al.*, 2011].

Le cadre multiobjective présenté dans [Gonzalez *et al.*, 2013] vise principalement à améliorer la performance de la technique SFR (Soft Frequency Reuse) dans les réseaux cellulaires réalistes et irréguliers, dans lequel la performance des configurations par défaut a été démontré comme étant loin d'être optimale. L'approche présentée dans ce papier permet de trouver des ensembles de configurations de SFR démontrant l'efficacité de cette technique par rapport à un groupe de scénarios de référence. L'algorithme multiobjectif est basé sur l'approche évolutionniste. Les principaux résultats peuvent être résumés comme suit :

- Une réduction significative des interférences inter-cellules dans les zones de bord de cellules peut être réalisée sur la capacité. La couverture du réseau a été améliorée de 30%. C'est un bon résultat étant donnée que la cible principale des techniques ICIC est en effet l'amélioration de la qualité de service au niveau des bords des cellules.
- L'algorithme implémenté est capable de trouver un ensemble de solutions dominant un large éventail de scénarios de référence.

– Le cadre proposé est flexible pour être adapté aux besoins supplémentaires des opérateurs tels que de nouveaux indicateurs de performance ou d'optimisation, même partielle, du réseau.

La majorité des contributions envisagent, pour n'en citer que quelqu'unes, essentiellement de proposer différents types de bande passante et des réaffectations des puissances basées sur les techniques SFR. Comme par exemple dans [Lee *et al.*, 2013, Racz *et al.*, 2008, Hu *et al.*, 2010, Chung Shue Chen *et al.*, 2012, Wang *et al.*, 2010, Yang *et al.*, 2011, Park *et al.*, 2012].

Les auteurs dans [Awada *et al.*, 2011] ont développé une procédure d'optimisation basée sur la méthode itérative de Taguchi pour trouver des réglages radio de bonne qualité. La méthode de Taguchi a été appliquée auparavant dans les systèmes de production et a récemment été utilisée dans plusieurs domaines de l'ingénierie. Contrairement aux heuristiques de recherche locale qui cherche à explorer l'espace multidimensionnel des paramètres afin de générer les solutions candidates, la méthode de Taguchi propose une méthodologie scientifiquement rigoureuse afin d'explorer l'espace de recherche. C'est une méthode statistique utilisée pour réaliser des plans d'expérience. Appliquée dans l'industrie, cette méthode se concentre avant tout à minimiser les variations autour de la valeur de consigne.

Dans [Chung *et al.*, 2012] les auteurs parlent d'un modèle analytique pour décrire le CAC (Call Admission Control) dans les systèmes à base du SFR. Deux mesures de performance sont utilisés : la probabilité de bloquage d'appel (Call Blocking Probability) et la probabilité de coupure (Outage Probability). De plus, une comparaison des performances des systèmes de SFR aux systèmes non-SFR a été faite.

1.4 Lien avec l'optimisation online

Plusieurs outils de planification automatique de type ACP (Automatic Cell Planning) sont utilisés actuellement chez les opérateurs de téléphonie mobile et permettent un design efficace en termes de localisation de site, de paramétrage antennaire (diagramme, azimut, tilt) et de réglage des puissances des canaux. Bien que ces outils fournissent en sortie des scénarios de déploiement réalistes pour atteindre des objectifs de couverture, de capacité, de qualité de service... ils s'appliquent en général sur des visions abstraites du fonctionnement du réseau, comme par exemple une demande exprimée en entrée sous la forme d'une carte de trafic en $2^{\text{ème}}$ heure la plus chargée sur la semaine, qui ne correspondent pas à une réalité physique sur le terrain.

Dans une ingénierie en ligne on vise avant tout à réduire cet écart entre la réalité

et les données actuellement prise en compte pour proposer des améliorations continues du fonctionnement du réseau en adéquation avec les indicateurs de qualité que le réseau remonte régulièrement. Les intervalles temporels de remontée de mesure d'une part et de modifications des paramètres d'autre part dépendent essentiellement du type d'intervention souhaitée par l'opérateur : contrôle dynamique des paramètres correspondant quasiment à du temps réel ou ingénierie en différée dont les modifications sont réalisées sur des échelles de temps plus ou moins longues mais pas en temps réel.

Dans cette synthèse on donne une analyse transversale centrée sur LTE sur les données remontées par le réseau, sur les paramètres configurables ainsi que sur les indicateurs de performance. Cette analyse est proposée pour les sous problèmes de contrôle du handover, des interférences, des stations voisines et de capacité et de couverture. Ces éléments seront à préciser dans la phase suivante de l'étude visant à proposer ceux qui pourront effectivement être pris en compte en fonction notamment des données d'entrée qui seront disponibles.

Contrôle du Handover : Pour tous les systèmes analysés et pour différents services, le paramétrage incorrect du handover influe considérablement sur la qualité perçue par le client en situation de mobilité (coupure fréquente sur handover) et sur la bonne gestion des ressources du réseau occupées par la signalisation (effet de ping-pong sur handover).

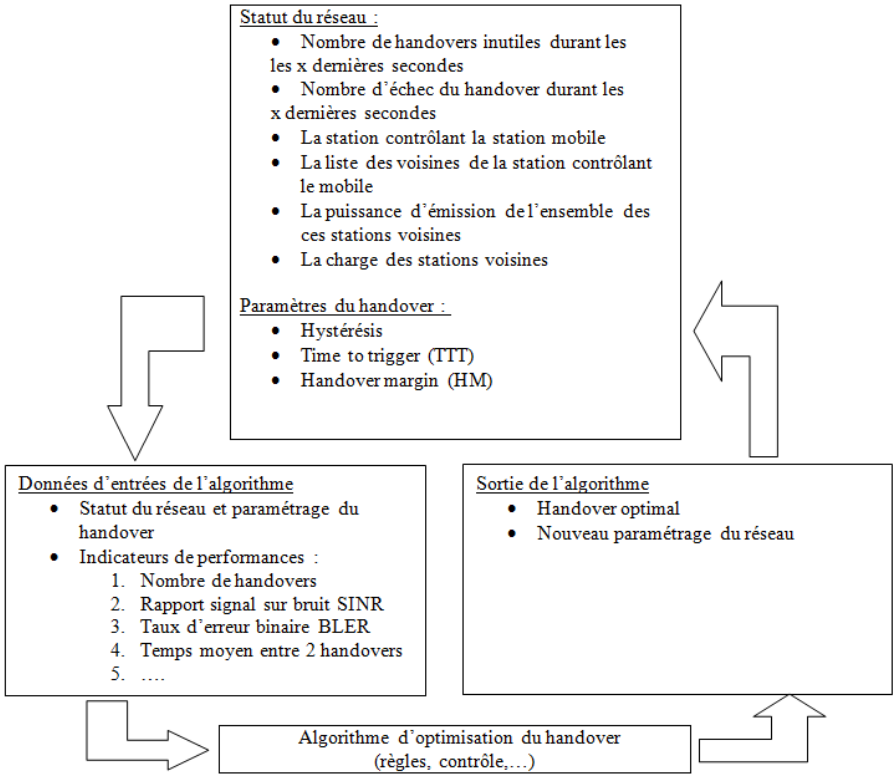


Figure 1.19 – Optimisation online du Handover.

Un algorithme de self-optimisation du handover doit être capable de trouver le meilleur paramétrage possible dans le meilleur délai. Le schéma suivant résume le principe du mode opérationnel d'un algorithme de self- optimisation du handover avec les paramètres à prendre en compte et les KPI plausibles [Nas *et al.*, 2007]. On considère que la vision est au niveau de chaque station de base, chacune disposant de mesures, KPI et paramètres individuels.

A noter que le cœur du réseau LTE n'a aucun contrôle sur le handover ; dans les spécifications actuelles la gestion se déroule sur la base des mesures de l'UE et au niveau de l'interface X2 entre une paire d'eNB [Holma *et al.*, 2009]. La table ci-dessous dresse un panorama des possibilités de contrôle offertes en LTE en l'état actuel des connaissances (NB : les tables suivantes se lisent par colonne).

Contrôle du Handover		
Remontées de données	**Paramètres**	**Indicateurs de performance**
-Nombre de HO ping-pong durant les t dernières secondes -Nombre d'échec du Handover durant les t dernières secondes par cause de l'échec -Station controlant le mobile Couple de stations pour le HO -Puissance reçue de l'ensemble des stations voisines -Charge des stations voisines -Location de l'UE et estimation de sa vitesse	-Hystérésis -Time To Trigger (TTT) -Handover Margin(HM) -Timing	-Nombre de HO -Nombre de ping-pong -SINR -RSSI (Received Signal Strength Strength Indicator) -RSCP (Received Signal) Code power en UMTS -Temps moyen entre 2 HO -BER -PER (Packet Error Rate) -FER (Frame Error Rate)

TABLE 1.2 – Différents paramètres nécessaires pour le contrôle du Handover.

Contrôle des interférences : Dans le système LTE, la bande de fréquence utilisée est la même pour les eNB. Ce procédé génèrera des interférences inter cellules apportant des limitations de performance du système. L'interférence dépendra de la position des stations mobiles vis-à-vis des émetteurs relativement à la puissance reçue, des fréquences utilisées selon les découpages OFDM ainsi que des charges des cellules considérées. Nous citons ici les facteurs qui influent sur les interférences et les KPI qui permettent de mesurer la dégradation du réseau due aux interférences.

Contrôle des interférences		
Remontées de données	**Paramètres**	**Indicateurs de performance**
-Matrice d'interférence (cellules en co-canal ou canaux adjacents) -Liste des cellules voisines -Charge des cellules voisines -Puissance reçues des voisines -Puissnce de réception de l'UE par les cellules voisines -Bande de frquences utilisées dans les cellules voisines en uplink et en downlink	-Puissance en uplink et en downlink -Restriction sur l'utilisation de le bande de fréquence en downlink -Seuil d'interférence acceptable -Tilt d'antenne -Azimut de l'antenne -Affectation des PRB (Physical Resource Block)	-SINR -BER -FER (Frame Error Rate) -DCR (Dropped Error Rate) -Echec du handover

Table 1.3 – Différents paramètres nécessaires pour le contrôle des interférences.

Contrôle de capacité et de couverture : La couverture et la capacité des systèmes de radiocommunication dépendent essentiellement des paramètres des antennes comme cité dans le tableau ci-dessus.

Contrôle de capacité et de couverture		
Remontées de données	**Paramètres**	**Indicateurs de performance**
-Puissance reçue par mobile -Niveau d'interférences -Nombre de coupures d'appels durant les t dernières secondes -Trafic écoulé -Trafic rejeté	-Paramètres antennaires -Puissance d'émission -Tilt -Azimut -Diagramme de rayonnement -Type d'antenne -Affectation des PRB (Physical Resource Block) -Seuil d'admission	-Echec du handover -SINR -Path loss -E_0/N_0 (Ratio of cheap energy) to interference -Analyse de la zone du soft handoff (UMTS) -Taux de couverture et qualité -Taux de trafic écoulé

TABLE 1.4 – Différents paramètres nécessaires pour le contrôle de capacité et de couverture.

La capacité dépend aussi en particulier des paramètres au niveau RRM sur les procédures d'admission. Les critères de couverture et capacité doivent être traités simultanément.

Contrôle des voisines : La définition des voisines par cellule est primordiale pour une meilleure gestion de la mobilité et pour une meilleure gestion de l'accès radio au réseau. Pour LTE, 3GPP n'a pas encore défini exactement quelles données devront être enregistrées dans l'UE pour la sélection d'une cellule de contrôle [Holma *et al.*, 2009]. Dans E-UTRAN, l'UE pourrait détecter les voisines intra- fréquence sans même faire appel à une liste de voisines, ainsi le système E-UTRAN pourrait être opérationnel sans prédéfinir de listes [Holma *et al.*, 2009]. Cependant la détection de PCI (Physical Cell Identity) n'est peut être pas suffisante pour identifier une nouvelle cellule étant donné que le nombre de PCI existant n'est que 504 alors que le réseau peut contenir une dizaine de milliers de cellules, cela dépendra de la qualité de l'ingénierie.

Contrôle des voisines		
Remontées de données	**Paramètres**	**Indicateurs performance**
-Cellules contrôlant le mobile -Voisines remontées par le mobile -GSM : BSC -UMTS : RNC -LTE : eNB et OMC -Pour chacune des voisines -$S_{rxlevel}$, ID_cell, global cell ID(BSIC base station identity code pour GSM) -Type de voisinage (intra-fréquences, inter-fréquences, inter-systèmes -Type RRC (Radio Resources Control, mobile connecté ou non connecté) dans MME (Mobility Managment Entity) -La vitesse du mobile si possible (estimation)	-Paramètres antennaires (puissance, azimuth, tilt, diagramme) -Liste des voisines déclarées -Nombre de cellules candidates -Tming et ajustement des paramètres en cas de vitesse inattendues -Nombre de cellules resélectionnées N_{RC} - Modifier le timing T_{RCmax} -Différents seuils min et max des cellules pour éviter les ping-pongs et les resélections inutiles	-Voisines d'une cellules - Distance Euclédienne entre cellules et voisines - SINR - Path loss RSRP (Received Signal) Reference Power)

Table 1.5 – Différents paramètres nécessaires pour le contrôle des interférences.

1.5 Synthèse

La première partie de ce rapport décrit en premier lieu une vue d'ensemble des systèmes de radiocommunication les plus récents depuis la 2G (GSM, UMTS, LTE), et de techniques et méthodes envisagées pour leur configuration. La chose est complexe, on s'aperçoit que les systèmes les plus avancées en termes d'auto-configuration ne sont probablement pas les systèmes cellulaires mais plutôt les systèmes à accès radio sans fil. La raison est que ces systèmes au contrôle non centralisé ont dès leur mise au point intégré des fonctions d'analyse de l'environnement et de prise de décision sur leurs paramètres. On s'attend à ce que la future norme LTE intègre des principes déjà validés ou tout au moins expérimentés sur ces autres systèmes non cellulaires et non centralisés.

En tout cas nous avons constaté que le fonctionnement de la partie SON du réseau LTE est actuellement très ouvert. Sur le fond on cherche à optimiser l'utilisation de toutes

les ressources disponibles dans un processus de décision automatique, embarqué dans les équipements du réseau d'accès, pour augmenter le débit et la qualité. Sur la forme, il n'y a pas encore de réponse arrêtée sur les mesures à utiliser ou pas, les moyens de faire l'analyse de ces mesures et la façon de prendre les décisions. Le champ de la recherche est donc ouvert et une solution via l'optimisation combinatoire est tout à fait envisageable au niveau de la correction automatique des paramètres des réseaux en fonctionnement en dehors des ressources contrôlées par le RRM. Le problème est alors de prendre des bonnes décisions au bon moment en évitant des effets de bord conduisant à des détériorations ultérieures ou même à des retours aux paramétrages précédents, dans un contexte où les données varient vite, soudainement même, et où les mesures sont plus ou moins certaines sur le fond. On est bien dans le domaine de l'optimisation robuste.

Chapitre 2

Etat de l'art sur l'optimisation robuste

Ce chapitre porte sur l'optimisation robuste. Celle-ci fait référence à un ensemble de procédés pour proposer des solutions à des problèmes combinatoires dans un contexte de données incertaines et de scénarios variables dans le temps. Une première section présente des définitions sur l'optimisation robuste, ensuite vient une réflexion sur les points de fragilité sur la façon de construire des modèles. Puis la section principale de ce chapitre est dédiée aux méthodes existantes pour traiter ce type de problème. Les principales approches sont étudiées et comparées. Les méthodes sont cataloguées selon que l'aléa concerne les données, les objectifs ou les contraintes du problème. Enfin la troisième section présente une synthèse sur la robustesse dans le contexte qui nous concerne ; le problème principal auquel nous faisons face est la variation de la demande.

Sommaire

2.1 Définitions **42**
2.2 Points de fragilité **43**
2.3 Approches **45**
2.4 Synthèse **59**

2.1 Définitions

Depuis de nombreuses années la recherche opérationnelle et l'aide à la décision se sont intéressées aux problèmes de tolérance aux pannes, de gestion des aléas ou de données manquantes ou incertaines [Dantzig., 1955, Charnes *et al.*, 1958]. Cependant ce n'est que dans les dernières décennies qu'un cadre général d'étude et d'analyse a émergé autour de la notion de robustesse. Ce cadre commun permet une mutualisation des méthodes et techniques utilisées dans des domaines applicatifs très variés.

Une bonne définition de la robustesse est donnée par Bernard Roy dans [Roy., 2005] : Aptitude à résister à des « à peu près » ou à des « zones d'ignorances » afin de se protéger d'impacts jugés regrettables, notamment la dégradation de propriétés à préserver.
De nombreux domaines se préoccupent de robustesse, comme l'optimisation sous données incertaines, ou résistante aux aléas, l'optimisation stochastique [Prekopa.,1995], l'optimisation robuste [Ben-Tal *et al.*, 2009], l'optimisation sous contraintes probabilistes [Charnes *et al.*, 1958], l'optimisation floue [Luhandjula *et al.*, 1996], l'analyse de sensibilité [Saltelli *et al.*, 2000]... Cependant il n'y a pas de méthodologies qui se soient imposées pour définir l'approche robuste.
Dans la suite du document on se réfèrera au problème d'optimisation générale suivant :

$$(P)\begin{cases}\text{Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } f(x)\\ \text{Sous la contrainte } g(x) \leq 0\end{cases}. \tag{2.1}$$

$x \in R^n$ est un vecteur-solution du problème à n dimensions. Dans le problème d'optimisation classique les données du problème, c'est-à-dire les fonctions $f(.)$ et $g(.)$, sont considérées comme certaines. En pratique cela est rarement le cas, donc pour exprimer l'incertitude des données, il est utile de représenter les données incertaines par un vecteur $\xi \in \Omega$, Ω étant le domaine de variation des données. Les fonctions dépendent alors de ce paramètre : $f(.,\xi)$ et $g(.,\xi)$. Le problème d'optimisation sous données incertaines est alors le suivant :

$$(P')\begin{cases}\text{Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } \forall \xi \in \Omega, f(x,\xi)\\ \text{Sous la contrainte } g(x,\xi) \leq 0\end{cases}. \tag{2.2}$$

Cette formulation du problème n'est pas formelle puisqu'il y a plusieurs façons d'interpréter le minimum d'une fonction à plusieurs variables et que le choix de ξ n'est pas connu au moment de la prise de décision. Toutefois de façon informelle, une solution d'un problème d'optimisation sera dite robuste par rapport à un paramètre A si la qualité de la solution varie peu lorsqu'il y a une petite variation de A. L'incertitude des données

peut également porter sur les variables de décision du problème, cependant cette éventualité peut être vue comme un cas particulier du cadre précédent et n'est pas traitée spécifiquement dans ce document.

Toujours selon [Roy., 2005], les raisons d'être de la préoccupation de la robustesse résultent toujours de l'écart entre la représentation formelle d'un problème et sa réalité « réelle » ou la réalité vécue. Par représentation formelle on entend la modélisation faite du problème ou les méthodes de résolution du problème. En effet une modélisation a pour objectif de représenter de façon simplifiée un système en dégageant les principaux paramètres. Une simplification abusive ou incomplète du système risque d'engendrer une solution approximative ; la qualité de la solution dans ce modèle peut être optimale mais en décalage avec sa qualité réelle c'est- à-dire la qualité de la solution lorsqu'elle est réellement mise en œuvre.

2.2 Points de fragilité

Lorsque l'on s'intéresse à la robustesse, la première étape consiste à identifier les points de fragilité de la modélisation. En effet évaluer la pertinence d'un modèle permet alors de mettre en œuvre des mécanismes pour y remédier. Ces points de fragilité concernent soit les données du problème, soit la formulation du modèle à proprement parlé, soit les méthodes de traitement utilisés.

Données du problème : Les points de fragilité les plus souvent identifiés concernent les données du problème. En effet les données sont souvent incertaines (achat, vente) ou issues d'une prévision plus ou moins aléatoire (météo), cependant un modèle déterministe les considèrent comme certaines. La signification que le modèle attribue à certaines données, comme les seuils de valeurs, peut se révéler être discutable, arbitraires voir abusive. Une étude doit être réalisée sur la façon dont le modèle traite une mauvaise connaissance.

Modèles : Les points de fragilité concernent aussi les choix pris au cours de la modélisation du problème. Lors de la définition de la fonction objectif de nombreuses simplifications ont été nécessaires et mises en œuvre. Deux experts ne vont certainement pas modéliser le même problème de la même manière. Le degré de détail du modèle influence grandement le choix des paramètres retenus. Lors de la modélisation, un compromis est toujours à trouver entre simplicité (et donc rapidité dans les calculs) et précision.

Traitement : Enfin le mode de résolution du problème peut être son point de fragilité. Cette caractéristique est essentiellement technique et n'a pas ou peu de signification concrète avec le problème en soi. Par exemple le choix d'une métaheuristique

par rapport à une autre ou les paramètres intervenant dans le déroulement d'une métaheuristique.

Les solutions pour se prémunir des points de fragilité du modèle différent selon les trois types de points de fragilité présentés précédemment.

Données du problème : Les données incertaines peuvent être représentées dans le modèle par un intervalle de valeurs possibles ou par une distribution de probabilité. La représentation par un intervalle peut être vue comme un cas particulier d'une distribution de probabilité uniforme entre deux valeurs. ξ est alors une variable aléatoire et Ω l'espace de probabilité. Enfin une troisième façon de représenter l'incertitude est d'utiliser un ensemble de scénarios caractérisant les variations de données. ξ est alors un scénario et Ω l'ensemble des scénarios. Il est possible d'associer un poids ou une probabilité à chaque scénario et on retombe alors dans le cas des variables aléatoires discrètes. Selon le type d'incertitude, l'expert peut facilement déterminer la façon la plus juste de représenter l'aléa. L'intérêt de l'usage des intervalles ou des distributions de probabilité sur l'usage de scénarios réside dans sa capacité à représenter plus finement le problème. Inversement l'avantage d'utiliser des scénarios est de permettre facilement de corréler des aléas entre eux, ce qui n'est pas permis si l'on considère que les donnés incertaines suivent des distributions indépendantes les unes des autres. Il faudrait dans ce cas utiliser des probabilités conditionnelles.

Il est également envisageable de cumuler ses représentations en utilisant des scénarios de données avec intervalles ou distributions et ainsi cumuler les avantages, corrélation des aléas et précision des incertitudes.

Modèles : Les choix réalisés lors de la phase d'optimisation relèvent toujours d'un compromis entre optimisation et robustesse. La validité du modèle en dépend. Un exemple simple illustre ce propos : il est difficile d'intégrer à la phase d'optimisation un simulateur, bien plus précis qu'une évaluation statique mais également bien plus gourmand en temps de calcul. Toute l'expérience de l'expert est nécessaire pour se prémunir d'une modélisation mal-équilibrée. Notons cependant qu'il est tout à fait envisageable d'utiliser plusieurs modélisations différentes pour un même problème, c'est l'une des raisons de l'optimisation multi objectif. L'utilisation de modèles probabilistes, moyennés, intégrant un maximum possible de métriques sont autant de solutions pour se prémunir à ce stade de variations importantes. L'optimisation robuste propose des reformulations du problème à partir d'une série de scénarios ou d'intervalles de valeurs. La programmation stochastique propose elle aussi des reformulations du problème mais à partir de distributions de probabilité de données.

Traitement : Il y a des algorithmes qui grâce à leur méthode de recherche sont plus aptes à se protéger de certains aléas. Les métaheuristiques à base de population présen-

tent un avantage car elles travaillent sur un vivier de bonnes solutions voisines des optimums. De plus lorsque le problème se transforme dynamiquement au cours du temps [Meignan., 2008], certains algorithmes sont aptes à prendre en compte les modifications de l'environnement. L'exemple des algorithmes de colonies de fourmis s'adaptant dynamiquement à la suppression d'arêtes dans un graphe pour un problème de plus court chemin donne une image de cette capacité de résister à un aléa donné et à se reconfigurer dynamiquement. L'optimisation et le calcul parallèle sont également très intéressants vis-à-vis de la robustesse, non seulement pour leur faculté intrinsèque de tolérance aux pannes, mais également pour mener parallèlement plusieurs optimisations avec des méthodes différentes. Les propriétés de chacune des méthodes sont alors utilisées. C'est souvent le cas pour les problèmes temps-réels et méthodes proactives où l'architecture logicielle est primordiale [Huang *et al.*, 2009].

2.3 Approches

Il y a plusieurs façons de classer les approches de la littérature. Trois principales approches sont souvent présentées dans la littérature et rappelées dans le paragraphe suivant [Le Maître., 2008]. De bons états de l'art peuvent également se trouver dans [Kolomvos., 2007, Klopfenstein., 2008, Liefooghe., 2009]. Cette classification met l'accent sur le fait que les données incertaines sont sous forme de scénarios, d'intervalles de valeurs ou de distributions de probabilité. Ensuite l'importance de l'équilibre entre optimisation et robustesse est rappelée afin de saisir la subtilité du traitement des aléas. Enfin les approches sont présentées selon qu'elles traitent de l'objectif du problème ou des contraintes.

L'analyse de sensibilité : étudie la stabilité de la qualité d'une solution lorsque l'on modifie les données d'entrée du problème. C'est une analyse a posteriori de la robustesse. Elle permet notamment d'identifier les points de fragilité d'un modèle. L'analyse de sensibilité évalue les variations de la fonction objectif et la réalisabilité des contraintes d'une solution lorsque les données du problème sont légèrement modifiées. On peut considérer qu'étudier des solutions dans un simulateur est aussi de l'analyse de sensibilité sur les variations dynamiques de l'environnement. En général un ensemble de mesures de sensibilité est défini pour évaluer a posteriori la ou les solutions.

L'optimisation robuste : propose des reformulations du problème à optimiser pour tenir compte des données incertaines. La fonction objectif est réécrite ainsi que les contraintes. L'optimisation robuste intègre au cours de l'optimisation les mesures développées en analyse de sensibilité. Ce domaine est souvent restreint aux aléas non représentés par des distributions de probabilité. En effet lorsque les aléas peuvent être décrits par des distributions, le terme de programmation stochastique est préféré.

La programmation stochastique : est le domaine de l'optimisation dont les données incertaines sont décrites par des distributions de probabilité [Kall *et al.*, 1994, Birge *et al.*, 1997, Ruszczynski *et al.*, 2003]. Des reformulations déterministes du problème stochastique sont possibles lorsque les distributions de probabilité sont connues.

La Figure 2.1 résume les principales approches et la Figure 2.2 rappelle le nombre de publications dans le domaine depuis les années 50.

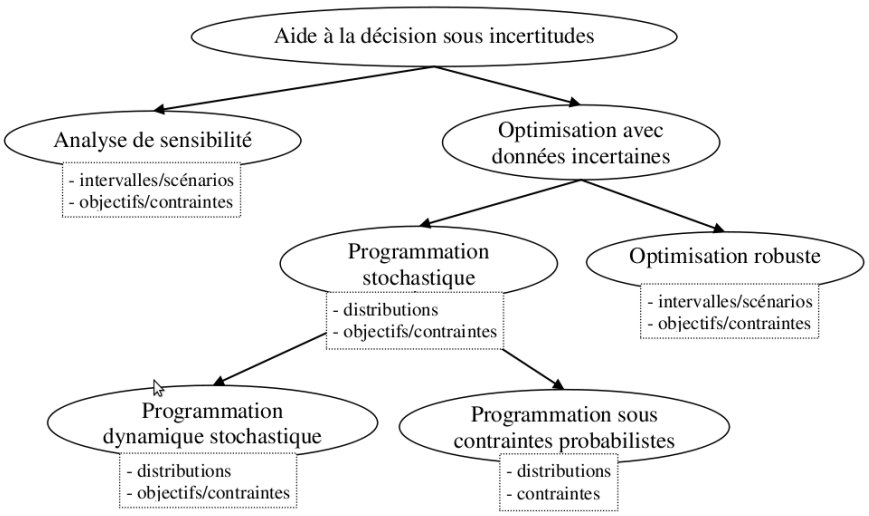


FIGURE 2.1 – Principales approches de la préoccupation de robustesse [Klopfenstein., 2008].

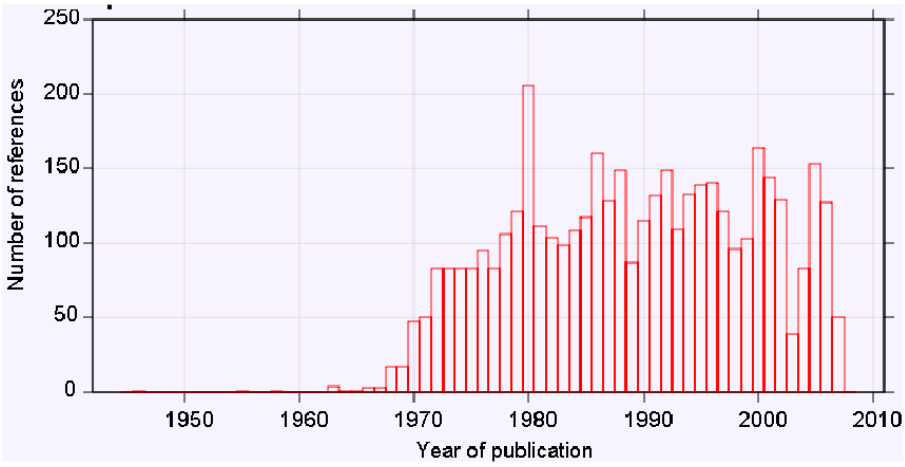


FIGURE 2.2 – Nombre de publications annuelles des années 50 à 2007 en aide à la décision sous incertitudes (analyse de sensibilité, optimisation robuste, programmation stochastique) d'après [van der Vlerk., 2007]. Total de publications en anglais : 4791.

2.3.1 Compromis entre optimisation et robustesse

Pour les problèmes d'optimisation difficiles, c'est-à-dire non convexes, pour lesquels il existe de nombreux optimums locaux et dont le paysage des solutions est très bruité, une remarque peut être avancée : **une solution optimale n'est pas souvent une solution robuste** puisqu'une légère variation des données risque de dégrader l'optimum de façon importante. La remarque inverse est également correcte : **une solution robuste n'est pas souvent une très bonne solution**. Il y a un compromis à trouver entre optimisation et robustesse. Bertsimas et Sim dans [Bertsimas *et al.*, 2004] parlent du « prix » de la robustesse.

Pour faire sentir ce constat important, l'exemple de la recherche de l'optimum par l'algorithme du Simplex est présenté. Le principe de recherche est le suivant : l'ensemble des contraintes du problème étant linéaires, les solutions admissibles sont contenues dans le polyèdre défini par les contraintes (cf. Figure 2.3). Etant donné que la fonction à optimiser

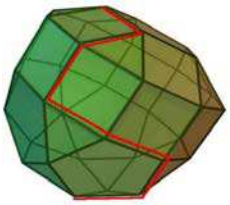


Figure 2.3 – Polyèdre à 3 dimensions représentant les contraintes du problème. Le tracé rouge représente l'exploration par l'algorithme du Simplex des solutions situées aux sommets.

est également linéaire, la solution optimale se situe alors sur un des sommets du polyèdre. L'algorithme du Simplex parcourt les sommets du polyèdre en longeant les arêtes et s'arrête une fois qu'il a trouvé le sommet optimal. Un aléa sur les contraintes du problème déforme le polyèdre (les facettes se décalent ou pivotent légèrement) et risque de rendre le sommet optimal non admissible. La méthode du Simplex comme beaucoup d'heuristiques s'appuient sur le domaine de réalisabilité des solutions, ce qui signifie que la moindre variation de celles-ci modifie grandement la recherche et la qualité des solutions obtenues.

Pour mieux estimer l'impact des aléas sur une solution, **il est important de distinguer les aléas selon qu'ils concernent la fonction objectif à optimiser ou les contraintes à respecter**. En effet les approches seront totalement différentes selon ces deux cas. Si seule la fonction objectif est concernée par les aléas alors le risque encouru de ne pas prendre en compte ces aléas n'est qu'une dégradation possible de la solution dans l'environnement réel. Par contre si les contraintes du problème sont concernées par les aléas alors le risque encouru de ne pas prendre en compte ces aléas est que la solution ne soit pas réalisable dans l'environnement réel. En d'autres termes une solution optimale pour un scénario de données est souvent une solution non réalisable pour un autre scénario

de données.
Beaucoup de travaux que l'on présente par la suite tentent de gérer ce compromis entre qualité de l'optimisation et qualité de la robustesse. Les auteurs développent un ensemble d'outils pour mesurer ce compromis : Γ-*optimisation* [Bertsimas *et al.*, 2004], (b, w)-*robustesse* [Roy., 2007]...
La distinction entre aléas sur l'objectif et aléas sur les contraintes est pertinente et les travaux de la littérature sont donc présentés selon ces axes. Commençons cependant par présenter dans le paragraphe suivant l'analyse de la sensibilité.

2.3.2 Analyse de sensibilité

Avant de présenter les différentes façons de reformuler un problème pour tenir compte des données incertaines, des outils développés en analyse de sensibilité sont décrits. L'analyse de sensibilité évalue la stabilité d'une solution d'un problème vis-à-vis de ses données d'entrée [Saltelli *et al.*, 2008]. Elle est également utilisée pour identifier les points de fragilité d'une modélisation. Comme dans le reste du document, il faut distinguer l'analyse de sensibilité concernant la stabilité de la fonction objectif de celle concernant la stabilité vis-à-vis du respect des contraintes.

L'analyse de sensibilité étudie le comportement de la solution optimale d'un problème dont on a légèrement perturbé les données d'entrée (analyse quantitative [Sochas., 1991]). Un des autres objectifs est d'identifier les points de fragilité du modèle mathématique. Il est alors possible de classer les données d'entrée selon des catégories correspondant au degré d'influence qu'elles ont sur la variation du coût de la fonction objectif (analyse qualitative [Saltelli *et al.*, 2004]). L'influence individuelle ou collective de l'impact des données incertaines peut également être prise en compte. De nombreux travaux sur ces sujets existent [Saltelli *et al.*, 2000] ainsi que des méthodes statistiques d'évaluation systématiques des solutions.

L'un des intérêts majeurs de l'analyse de sensibilité pour l'optimisation utilisant des méthodes approchées est de pouvoir comparer des solutions sur des aspects de robustesse. Considérons par exemple la fonction objectif $f(.)$ que l'on souhaite minimiser. Soit x une solution obtenue après optimisation. L'incertitude des données est caractérisée par un ensemble de S scénarios différents que l'on représente par S fonctions $f_s(.)$ plus ou moins voisines de $f(.)$. Les principales mesures de robustesse, notées $r(x)$, sont les suivantes :

- **La moyenne** :

$$r_1 = \frac{1}{S} \sum_{s \in S} f_s(x) \tag{2.3}$$

  Il est aussi possible d'exprimer la moyenne avec la formulation utilisée précédemment :

$$r_1 = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\xi \in \Omega} f(x, \xi) \tag{2.4}$$

où Ω est l'ensemble des scénarios et ξ un scénario de Ω.

- **L'écart type** :

$$r_2(x) = \sqrt{r_1 = \frac{1}{S} \sum_{s \in S} (r_1(x) - f_s(x))^2} \tag{2.5}$$

- **La robustesse absolue** :

$$r_3(x) = \max_{s \in S} f_s(x) \tag{2.6}$$

La robustesse absolue évalue la qualité de la solution x sur le pire des scénarios.

- **La déviation absolue** :

$$r_4(x) = \max_{s \in S} (f_s(x_s^*) - f_s(x)) \tag{2.7}$$

où x_s^* est la solution optimale trouvée pour l'optimisation de la fonction f_s. Cette mesure nécessite donc de résoudre préalablement S problèmes d'optimisation. La déviation absolue évalue la qualité de la solution x par rapport à l'optimum de chaque scénario et retourne le plus mauvais écart.

- **La déviation relative** :

$$r_5(x) = \max_{s \in S} [\frac{f_s(x_s^*) - f_s(x)}{f_s(x_s^*)}] \tag{2.8}$$

La déviation relative normalise l'écart de la déviation absolue et retourne le plus mauvais écart normalisé.

L'autre versant de l'analyse de sensibilité est la définition du domaine de validité (ou d'admissibilité) d'une solution. On mesure pour une solution donnée la variation maximale des données incertaines qui respectent les contraintes. Par exemple le domaine de réalisabilité de la solution x par rapport à la contrainte du problème (P') peut être formulé comme suit : $D = \{\xi \in \Omega, g(x, \xi) \leq 0\}$. L'étude de [Ben-Tal *et al.*, 2000] a montré que le domaine de validité d'un programme linéaire peut être très réduit ; c'est-à-dire que de très faibles perturbations des données rendent la solution non réalisable.

[Roy., 2007] approfondit les mesures de robustesse absolue, de déviation absolue et de déviation relative précédemment présentées en définissant la (b, w)-*robustesse*. L'auteur introduit deux réels $0 \leq b < w$ pour une fonction objectif $f(.)$ à minimiser.

- w est la valeur de la fonction objectif au dessus de laquelle le décideur refuse de descendre quel que soit le scénario. w correspond à la valeur garantie et cela revient à introduire une contrainte du problème.
- b est la valeur de la fonction objectif au dessous de laquelle le décideur considère la solution bonne.

Pour comparer plusieurs solutions par rapport à un certain nombre de scénarios $f_s(.)$, l'auteur définit le critère de (b, w)-*robustesse* absolue r_{bw} :

$$r_{bw}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } \exists s \in S, f_s(x) > w \\ \text{nombre de scénarios tel que } f_s(x) \leq b & \text{sinon} \end{cases} \tag{2.9}$$

En adoptant la notation suivante : $\delta(A) = 1$ si A est vrai et $\delta(A) = 0$ sinon, r_{bw} se réecrit :

$$r_{bw}(x) = (\prod_{s \in S} \delta(f_s(x) \leq w))(\sum_{s \in S} \delta(f_s(x) \leq b) \tag{2.10}$$

La Figure 2.4 donne un exemple du calcul de la mesure de la (b, w)-*robustesse* absolue. L'auteur étend la définition de la (b, w)-*robustesse* absolue à la (b, w)-*deviation* absolue et à la (b, w)-*deviation* relative respectivement par rapport aux définitions de déviation absolue et de déviation relative.

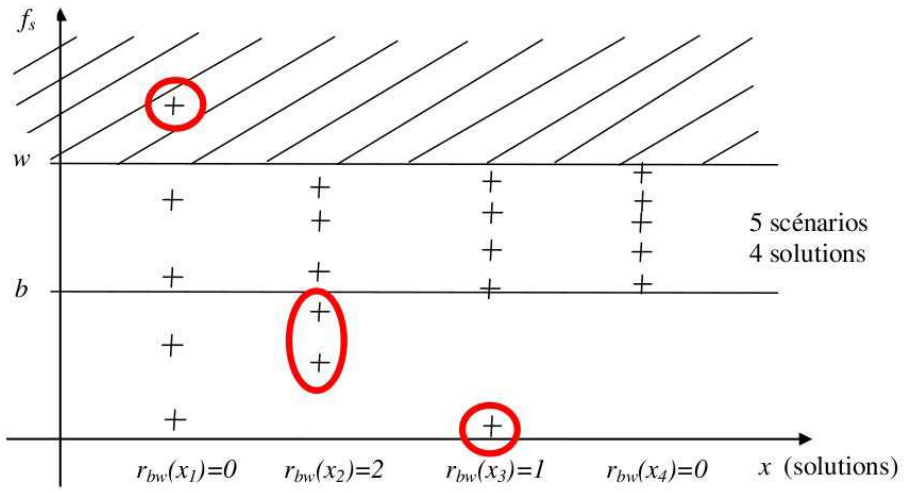


FIGURE 2.4 – Exemple de calcul de la (b, w)-*robustesse* absolue r_{bw} sur 5 scénarios (les croix représentent l'évaluation des scénarios) et pour 4 solutions x_1, x_2, x_3 et x_4. La solution x_2 est la meilleure solution dans ce cas.

L'analyse de sensibilité est une étude complémentaire de post-optimisation. Tout d'abord elle permet de savoir s'il est nécessaire de reformuler le problème pour le rendre plus robuste ou si la modélisation actuelle est suffisante. Ensuite si une reformulation robuste est nécessaire, elle permet d'évaluer le « gain » de la reformulation, c'est-à-dire l'écart entre les résultats de l'analyse de sensibilité faite avant la reformulation robuste et après. Cela permet de valider l'approche robuste. Si un objectif en termes d'analyse de sensibilité est fixé, il est possible de définir une succession de reformulations de plus en plus robustes.

Dans ce cas, tant que la solution trouvée n'est pas assez robuste au sens de l'analyse de sensibilité, une reformulation du problème plus robuste est proposée et une solution à ce nouveau problème est recherchée.
Les mesures de robustesse présentées dans cette section peuvent être utilisées pour reformuler le problème ; il suffit de les intégrer dans la fonction objectif. La section suivante présente ces approches.

2.3.3 Traitement des aléas sur l'objectif

Le traitement des aléas sur l'objectif de la fonction à optimiser est historiquement le premier à avoir été étudié [Dantzig., 1955]. Les cas des aléas formulés sous forme de scénarios et d'intervalles/distributions sont présentés.

Scénarios : Kouvelis et Yu définissent dans [Kouvelis *et al.*, 1997] l'optimisation robuste à l'aide des mesures suivantes :

- **La robustesse absolue** :

$$(P'_3) : \text{ Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } \max_{\xi \in \Omega} f(x, \xi) \tag{2.11}$$

  Cela revient à minimiser le pire cas. Cette définition a été formulée pour des aléas représentés par des scénarios $\xi \in \Omega$, Ω étant l'ensemble des scénarios, mais elle s'applique tout aussi bien pour des intervalles de valeurs avec $\Omega = [a, b]$ dans le cas le plus simple et $\Omega = \prod_i [a_i, b_i]$ dans le cas plus général.
- **La déviation absolue** :

$$(P'_4) : Trouver x \in R^n \text{ qui minimise } \max_{\xi \in \Omega}(f(x^*_\xi, \xi) - f(x, \xi)) \tag{2.12}$$

  avec x^*_ξ la solution optimale pour le scénario ξ c'est-à-dire : $f(x^*_\xi, \xi) = \min_x f(x, \xi)$. La déviation absolue consiste à trouver une solution qui minimise l'écart maximal avec les solutions optimales de chaque scénario.
- **La dérivation relative** :

$$(P'_5) : \text{Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } \max_{\xi \in \Omega}\left(\frac{f(x^*_\xi, \xi) - f(x, \xi)}{f(x^*_\xi, \xi)}\right) \tag{2.13}$$

  La déviation relative est identique à la déviation absolue sauf que l'on considère ici l'écart maximal relatif.

[Mulvey *et al.*, 1995] définissent dans une solution-robuste comme une solution respectant une distance donnée par rapport à l'optimum connu de chaque scénario $\xi \in \Omega$. Cette

distance est définie par un pourcentage ou un coefficient par rapport à la solution optimale, il est noté dans la suite $\alpha > 1$:

$$x \text{ est une } \alpha \text{ solution-robuste si } \forall \xi \in \Omega, f(x,\xi) \leq \alpha f(x^*_\xi, \xi) \tag{2.14}$$

Cette approche est à mettre en relation avec la déviation robuste présentée précédemment puisque la définition peut se réécrire :

$$\max_{\xi \in \Omega}(f(x^*_\xi, \xi) - f(x,\xi)) \geq (1-\alpha) f(x^*_\xi, \xi) \tag{2.15}$$

En extrapolant la définition de (b,w)-*robustesse* absolue de [Roy., 2007], le problème peut être reformulé ainsi :

$$(P'_6) : \begin{cases} \text{Trouver } x \in R^n \text{ qui maximise } \sum_{s \in S} \delta(f_s(x) \leq b) \\ \text{Sous les contraintes : } \forall s \in S, f_s(x) \leq w \end{cases} \tag{2.16}$$

La thèse de d'Arnaud Liefooghe [Liefooghe., 2009] aborde le traitement des aléas pour l'optimisation multiobjectif. Cette catégorie de problème fait l'objet de recherches attentives depuis quelques temps notamment via une demande venant de problèmes réels. L'auteur présente tout d'abord un état de l'art avec une classification des problèmes de robustesse et des métaheuristiques dans le contexte multiobjectif. Il s'intéresse à la recherche de solutions robustes c'est-à-dire capables de résister favorablement à des variations sur la réalisation des données incertaines. Il montre bien en examinant plusieurs modèles de représentation de l'information incertaine à quel point il n'y a pas actuellement de méthode qui se soit imposée pour traiter ces problèmes.

L'auteur introduit plusieurs indicateurs de qualité utilisables dans les métaheuristiques multiobjectif pour gérer l'incertitude au niveau des objectifs. Expérimentalement, l'incertitude est abordée via des durées d'exécutions stochastiques pour le problème *flow shop* biobjectif. Deux approches sont proposées, l'une calculant un vecteur objectif unique déterministe reflétant des préférences vis-à-vis de l'incertitude (meilleur cas, pire cas, cas moyen, cas médian), l'autre se basant sur des I-valeurs calculées à partir d'échantillons de vecteurs objectifs issus de plusieurs solutions, aussi selon les quatre préférences. Plusieurs scénarios correspondant à plusieurs réalisations des paramètres sont générés selon plusieurs lois de distribution des durées d'exécutions. L'algorithme IBEA est utilisé comme support de recherche. Les expérimentations sont nombreuses et l'analyse assez détaillée.

Dans le cas des évaluations représentatives, l'auteur fait ressortir que les approches I-valeurs semblent meilleures pour les faibles taux d'incertitude (10%) mais au-delà on ne peut pas conclure. Dans le cas des évaluations I-valeurs, les approches I-valeurs sont meilleures pour les forts taux d'incertitude (20%) mais en-deçà les deux méthodes se valent. La seule conclusion que l'auteur peut véritablement tirer de l'expérimentation est que

globalement, pour toutes les instances, **les méthodes qui prennent en compte l'incertitude sont meilleures qu'une méthode déterministe considérant un scénario unique**, sauf éventuellement si on observe uniquement le meilleur des cas (le cas le plus favorable). Ce qui est a priori très dangereux, car on est exposé au risque maximum de déviation par rapport à la réalisation des scénarios, donc c'est un cas à éviter absolument en pratique.

Intervalles et distributions : La façon la plus simple de traiter l'aléa sur la fonction objectif est de considérer l'espérance mathématique de la fonction objectif comme suit :

$$(P'_7) : \text{ Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } E(f(x,\xi)) \tag{2.17}$$

Cela correspond à remplacer les variables aléatoires par leurs espérances mathématiques, ou par la moyenne dans le cas des intervalles. Cependant cette modélisation donne souvent de mauvais résultats car les écarts à la moyenne peuvent être importants. Le modèle du type Markowitz [Markowitz., 1952] repris depuis par [Ruszczynski *et al.*, 2006] utilise une modélisation qui corrige cet inconvénient en tenant compte de l'écart type. Une formalisation possible serait par exemple en introduisant deux réels positifs α et β :

$$(P'_8) : \text{ Trouver } \in R^n \text{ qui minimise } \alpha E(f(x,\xi) + \beta \text{ ecart-type}(f(x,\xi))) \tag{2.18}$$

Une autre méthode est de transformer la fonction objectif en la contrainte probabiliste suivante en introduisant la probabilité p :

$$(P'_9) : \begin{cases} \text{Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } d \\ \text{Sous la contrainte : } P(f(x,\xi) \leq d) \geq p \end{cases} \tag{2.19}$$

Cette formulation est celle des problèmes d'optimisation sous contraintes probabilistes présentés dans la section suivante.
En programmation stochastique, **un modèle à deux étapes** est souvent utilisé. Il distingue deux types de variables de décision selon que les décisions doivent être prises immédiatement (décisions de première étape) ou plus tard (décisions de seconde étape). Cette hiérarchisation temporelle de prise de décision est habituelle dans les situations industrielles réelles où on est obligé de déterminer un certain nombre de variables qui ne peuvent plus être changées dans la suite quels que soient les aléas futurs. L'objectif est d'optimiser immédiatement ces premières décisions en tenant compte de leurs conséquences pour toutes réalisations des aléas qui pourraient se produire ultérieurement.

Dans le cas d'une distribution discrète et finie, les événements sont des scénarios s caractérisés par la fonction $f_s(.)$ et la probabilité p_s :

$$(P'_{10}) : \text{ Trouver } x \in R^{n_1} \text{ et les } y_s \in R^{n_2} \text{ qui minimise } \sum_{s \in S} p\ (f_s(x, y_s))) \tag{2.20}$$

avec $n = n_1 + n_2$ pour garder le même formalisme que précédemment et y_s est la meilleure décision pour le scénario s sachant que l'on a pris la décision x : $f_s(x, y_s) = \min_y f_s(x, y)$. Il y a donc S vecteurs $y_s \in R^{n_2}$, un pour chaque scénario. En effet, dans ce cas le nombre de variables de décision de seconde étape y a été multiplié par le nombre de scénarios envisagés. Cette approche peut être étendue à plusieurs étapes suivant l'horizon de l'étude et elle est utilisée dans les modèles dits à recours [Kolomvos., 2007].

2.3.4 Traitement des aléas sur des contraintes

Scénarios : Kouvelis et Yu, lorsqu'ils définissent l'optimisation robuste dans [Kouvelis *et al.*, 1997], se placent dans le pire cas pour le traitement des contraintes ; c'est-à-dire que la solution x doit être une solution réalisable pour tous les scénarios :

$$(P'_{11}) : \begin{cases} \text{Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } r(x) \\ \text{Sous la contrainte : } \forall \xi \in \Omega, g(x, \xi) \geq 0 \end{cases} \tag{2.21}$$

Cette condition dite du pire cas est très stricte car elle risque de ne pas considérer de très bonnes solutions en termes de fonction objectif car non réalisables pour des scénarios extrêmes. [Le Maître., 2008] rappelle que le degré de conservatisme est la façon dont la solution robuste respecte l'ensemble des contraintes possibles. Le sur-conservatisme est un des problèmes majeurs de la robustesse dans le cas où le respect de toutes les contraintes n'est pas possible ou détériore trop l'objectif. La méthode précédente est sur-conservatiste car elle a un degré de conservatisme maximal. Or il existe généralement deux types de contraintes : les contraintes qu'il est impossible de violer, c'est-à-dire que leurs non respects impliquent que la solution n'a plus de sens, ces contraintes sont dites physiques ou dures ; les autres contraintes expriment plutôt un niveau de qualité souhaitable. Ces contraintes, dites molles, doivent être respectées dans la majorité des cas. Le degré de conservatisme doit être total pour les contraintes physiques mais il peut être plus souple vis-à-vis des contraintes molles. [Mulvey *et al.*, 1995] définit alors le nombre de scénarios $N < |\Omega|$ que doit respecter chaque solution. Il appelle cela le *modèle-robuste* :

$$(P'_{12}) : \begin{cases} \text{Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } r(x) \\ \text{Sous la contrainte : } \sum_{\xi \in \Omega} \delta(g(x, \xi) \geq 0) \geq N \end{cases} \tag{2.22}$$

avec $\delta(A) = 1$ si A est vrai et $\delta(A) = 0$ sinon

Intervalles : Concernant la représentation des aléas par des intervalles de valeurs, différents cas sont présentés dans la littérature mais essentiellement pour des contraintes linéaires, c'est pourquoi dans ce paragraphe, les contraintes sont réécrites comme suit : $\forall i \in I, \sum_{j \in J} \tilde{a}_{ij} x_j \leq b_j$ avec I et J des ensembles finis d'entiers.

Les données incertaines portent sur les $\tilde{a}_{ij}$: $\forall (i,j) \in I \times J, \tilde{a}_{ij} \in \lfloor \underline{a}_{ij}; \bar{a}_{ij} \rfloor$.

Plusieurs reformulations sont envisageables :

- **Le pire cas pessimiste** ([Soyster., 1973]) :

$$\forall i \in I, \sum_{j \in J} \bar{a}_{ij} x_j \leq b_i \tag{2.23}$$

- **Le meilleur cas (optimiste)** :

$$\forall i \in I, \sum_{j \in J} \underline{a}_{ij} x_j \leq b_i \tag{2.24}$$

- **Le cas moyen** :

$$\forall i \in I, \sum_{j \in J} \frac{\bar{a}_{ij} - \underline{a}_{ij}}{2} x_j \leq b_i \tag{2.25}$$

- **Le cas avec protection constante** :

$$\forall i \in I, \sum_{j \in J} \underline{a}_{ij} x_j + constante \leq b_i \tag{2.26}$$

Plus récemment Ben-Tal et Nemirovski [Ben-Tal *et al.*, 1999, Ben-Tal *et al.*, 2000] puis Bertsimas et Sim [Bertsimas *et al.*, 2004] ont développé des outils de contrôle de la violation des contraintes plus souples : les intervalles elliptiques pour [Ben-Tal *et al.*, 2000] et l'introduction du paramètre Γ pour [Bertsimas *et al.*, 2004] que l'on nommera par la suite Γ-*robustesse*. Le principe de base de ces deux méthodes est le même : considérer le pire cas pour tous les intervalles est trop strict et souvent faux car la probabilité d'être simultanément dans le pire cas pour tous est quasi nulle. Par conséquent si certaines données sont dans le pire cas les autres ne le sont pas.

Pour quantifier cette approche, Bertsimas et al. introduisissent le paramètre Γ. Il indique le nombre de données incertaines dans le pire cas ($\tilde{a}_{ij} = \bar{a}_{ij}$). Cette définition généralise les approches précédentes puisque lorsque $\Gamma = 0$ alors aucune variable n'est dans le pire cas, on retrouve le cas optimiste : $\forall (i,j) \in I \times J, \tilde{a}_{ij} = \underline{a}_{ij}$. Au contraire lorsque $\Gamma = J$ c'est-à-dire le nombre total de variables, alors toutes les variables sont dans

le pire cas, on retrouve le cas pessimiste : $\forall(i,j) \in I \times J, \tilde{a}_{ij} = \bar{a}_{ij}$. Entre ces deux extrêmes, il existe toute une famille de possibilités. Plus Γ est élevé, plus la réalisabilité sera importante mais moins le coût de la solution sera bon. La Figure 2.5 représente sur un petit exemple les conséquences de la variation du paramètre Γ. Le formalisme général est le suivant :
La Γ-*robustesse* :

$$\forall i \in I, \sum_{j \in J} \underline{a}_{ij} x_j + \max_{K \subset J, |K| = \Gamma} \sum_{k \in K} (\bar{a}_{ik} - \underline{a}_{ik}) x_k \leq b_i \tag{2.27}$$

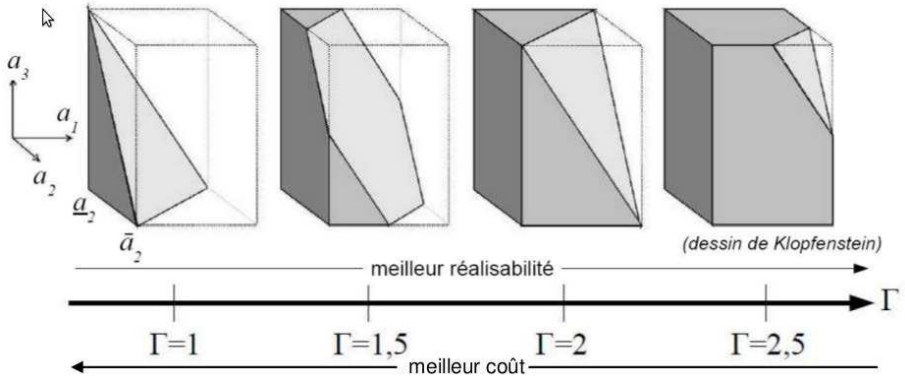


FIGURE 2.5 – Variation du domaine sur lequel on réalise l'optimisation pour un problème à trois données incertaines a_1, a_2 et a_3 variant sur des intervalles. La zone non grisée du cube indique la zone d'optimisation en fonction du paramètre *Gamma* . Plus Γ est élevé plus la zone de recherche est petite et donc plus la solution aura un moins bon coût, par contre sa réalisabilité sera plus importante. Dessin d'après [Klopfenstein., 2008].

Dans sa thèse de doctorat Aurélie Le Maître [Le Maître., 2008] a mené une étude complète sur la résolution robuste d'un problème industriel réel et apporte un regard très intéressant aussi bien en théorie qu'en pratique. L'auteur applique la Γ-*robustesse* et la compare avec les approches plus classiques d'optimisation robuste basée sur des scénarios. Le problème étudié concerne la réalisation à moindre coût d'une migration technologique d'équipements de télécommunications sur plusieurs périodes. L'auteur rappelle que de nombreuses données du programme sont prévisionnelles donc incertaines : nombre de clients n par site i et par année t, prix des cartes, coût d'installation et de réutilisation des cartes, et taux de taxe professionnelle. Le problème principal provient des $n_{i,t}$ qui pilotent l'ensemble des décisions. Une analyse de la sensibilité du modèle à ces données est réalisée ; le modèle s'avère très sensible ce qui produit des changements importants de date de migration en fonction de $n_{i,t}$. Le problème justifie d'étudier l'optimisation robuste.

Dans un premier temps l'auteur examine l'approche par les scénarios qui est la plus utilisée pour l'optimisation robuste. Les trois critères de robustesse à optimiser que l'on a déjà présentés sont étudiés : robustesse absolue, déviation robuste et déviation relative.

La résolution exacte via CPLEX montre des limites de calcul pour les scénarios à 1000 sites. L'auteur présente une heuristique robuste basée sur la relaxation continue qui donne des résultats très satisfaisants par rapport à un ensemble de problèmes dont on connaît les résultats optimaux. En conclusion de la méthode, **les heuristiques minimisent mieux le pire des cas que la meilleure des solutions déterministes**.

Dans l'approche par Γ-*robustesse* l'auteur travaille sur un nombre de clients ni,t par site et par année qui est borné dans un intervalle, et on définit une valeur nominale (n barre). Des résultats sont présentés pour plusieurs solutions robustes x correspondant aux dates de migration, pour plusieurs valeurs de Γ et pour une série de 10 instances aléatoires de données incertaines n. L'auteur compare ces solutions à la *solution nominale* (obtenue avec la valeur nominale, n barre) pour laquelle les données d'entrée sont fixées et observe qu'en moyenne la qualité de la *solution nominale* est compétitive pour un effort algorithmique moindre, ce qui est finalement un peu décevant. L'auteur s'engage alors sur la recommandation de la méthode des scénarios pour ce type de problème.

Distributions : En programmation stochastique, il existe de nombreuses reformulations possibles, par exemple à l'aide des *modèles de recours à étapes* [Kolomvos., 2007]. Le principe général de ces approches est de pénaliser la fonction objectif par l'espérance de la violation de la contrainte. Par exemple :

$$(P'_{13}) : \text{Trouver } x \in R^n \text{ qui minimise } (r(x) + coeff\text{-}pénalité\ E(g(x,\xi) < 0)) \qquad (2.28)$$

Il existe également des méthodes spécifiques qui ont été adaptées pour tenir compte des aléas ; c'est le cas de la programmation dynamique stochastique [Puterman., 1994] qui est une extension de l'outil classique de programmation dynamique et qui intègre un processus de décision markovien à chaque transition d'état.

La programmation par contraintes probabilistes est une branche intéressante de la programmation stochastique. Pour cette méthode [Klopfenstein., 2008], il faut satisfaire les contraintes avec une certaine probabilité p ; par exemple $p = 0,95$. Ce type d'approche est très utile en pratique car elle est facilement exprimable par un industriel ou un décideur, notamment en gestion de risques. Une formulation peut être la suivante :

$$(P'_{14}) : \begin{cases} \text{Trouver } x \in R^n \text{qui minimiser}(x) \\ \text{Sous la contrainte : } P(g(x,\xi) \geq 0) \geq p \end{cases} \qquad (2.29)$$

Cette formulation implique qu'il faut satisfaire toutes les contraintes ensemble à la probabilité p. D'autres approches sont envisageables comme satisfaire chaque contrainte avec une probabilité p_i. Ce type de contraintes s'appelle *contraintes point à point*. Si on pose $g(.) = \{g_1(.); g_2(.); ...g_{|I|}(.)\}$ alors la formulation est la suivante :

$$(P'_{15}) : \begin{cases} \text{Trouver } x \in R^n quiminimiser(x) \\ \text{Sous la contrainte } \forall i \in I, P(g_i(x,\xi) \geq 0) \geq p_i \end{cases} \tag{2.30}$$

2.3.5 Les avantages et les inconvénients de ces approches

Le tableau ci-dessous récapitule les avantages et inconvénients des trois principales approches : analyse de sensibilité, optimisation robuste et programmation stochastique.

	Avantages	**Inconvénients**
Analyse de sensibilité	-Simple à mettre en place -Identifie les points de fragilité du modèle -Valide l'approche robuste	Post-optimisation
Optimisation robuste	Facile à mettre en œuvre (méthode la plus utilisée)	-Sur-conservatisme -Nécessite parfois de calculer la solution optimale de chaque scénario
Programmation stochastique (programmation sous contraintes probabilistes)	-Très pertinent en pratique : gestion de risques -Facile à formuler	Souvent difficile à résoudre

TABLE 2.1 – Avantages et inconvénients des trois principales approches : analyse de sensibilité, optimisation robuste et programmation stochastique.

Le tableau ci-dessous récapitule les avantages et inconvénients des approches selon que les données incertaines soint représentées par des distributions de probabilités, des intervalles de valeurs ou des scénarios.

La **corrélation des aléas** est un aspect important à prendre en compte car on rencontre souvent ce cas en pratique. Il est plus simple d'utiliser des variables aléatoires *indépendantes* (approche classique en programmation stochastique) ou des variations indépendantes sur des intervalles que d'utiliser des probabilités conditionnelles. Cependant beaucoup d'informations sont perdues en utilisant des variables aléatoires indépendantes, comme la corrélation entre les variables. L'introduction du paramètre Γ (en Γ-*robustesse*) rétablie implicitement une certaine corrélation entre les aléas sur les intervalles. Utiliser des scénarios de données est une façon simple de conserver la corrélation entre les aléas.
Prenons l'exemple de la variation de la demande en trafic dans un réseau cellulaire, une cellule (A) d'un réseau a un trafic plutôt bas en matinée et plutôt élevé l'après midi tandis qu'une autre cellule (B) a un trafic élevé en matinée et bas l'après midi. Si on

	Avantages	**Inconvénients**
Méthodes basées sur des distributions (continues) de **probabilités**	-Modélisation fine des incertitudes (correspondant plus à la réalité	-Non corrélation des évènements -Difficile à évaluer
Méthodes basées sur des intervalles de valeurs	-Modélisation fine des incertitudes -simple à générer	-Non corrélation des évènements
Méthodes basées sur des scénarios	-Corrélation des évènement -Simple à générer	-Limité par le nombre de scénarios

Table 2.2 – Avantages et inconvénients des approches selon que les données incertaines soint représentées par des distributions de probabilités, des intervalles de valeurs ou des scénarios.

modélise le trafic journalier de ces deux cellules par un intervalle ou par une distribution de probabilités, alors ces deux cellules peuvent avoir le même intervalle [trafic minimum ; trafic maximum] ou la même distribution. On a perdu la corrélation entre ces deux aléas. Par contre si on modélise le trafic journalier par deux scénarios (1) 'trafic_bas_celluleA-trafic_élevé_celluleB' et (2) 'trafic_élevé_celluleA-trafic_bas_cellule_B' alors on conserve la corrélation. Remarquons cependant que pour une distribution de probabilité discrète et finie, les événements peuvent être vus comme des scénarios.

2.4 Synthèse

Cette partie s'intéresse à la façon d'intégrer la préoccupation de robustesse au problème de self-optimisation dans les réseaux de radiocommunications. Un survol des méthodes a été présenté dans les parties précédentes et de nombreuses approches sont possibles. Les conditions particulières de l'optimisation en ligne permettent de répondre à certaines questions soulevées concernant la robustesse : *Quelles sont les points de fragilité du modèle ? Comment représenter les données incertaines ? Comment construire les séries de scénarios, les intervalles de valeurs ou les distributions de probabilités ? Comment valider l'approche robuste ?* Les points de fragilité en radiocommunications sont présentés dans un premier temps puis des solutions possibles et des premières recommandations sont proposées.

Il existe toute une série de points de fragilité bien connus dans les modèles d'optimisation de réseaux radio. En effet les données incertaines proviennent essentiellement de prévisions plus ou moins fiables : prévisions sur la demande de trafic, prévision sur les puissances des signaux reçus, prévisions sur le coût du matériel, d'installation et de maintenance... Nombreux travaux récents d'optimisation robuste ont porté sur des problèmes de télécommunications [Ouorou., 2008,Klopfenstein., 2008,Le Maître., 2008]. Les données

incertaines peuvent être réparties en trois catégories :

- **La demande** : Comme dans la plupart des domaines économiques, la demande est une variable déterminante mais difficile à prévoir. Dans les réseaux radio, la demande en trafic pour les cellules est une donnée primordiale mais il y a une multitude de caractéristiques concernant le trafic : nombre de connexions, type de connexion (voix, données), la capacité demandée, localisation précise de la demande... Pour choisir la façon de représenter ces données, une analyse des données réelles est nécessaire. Construire une série de scénarios avec des probabilités différentes paraît une bonne approche. Il est également envisageable que les valeurs définissant les scénarios soient des intervalles de données plutôt que des données fixes.
- **La propagation du signal** : Les modèles de propagation du signal ne peuvent pas tenir compte des changements permanents de l'environnement réel : circulation de personnes ou de véhicules, construction de bâtiments, changement de température, d'humidité... Les phénomènes de propagation sont également complexes et difficiles à modéliser correctement lorsque l'on souhaite obtenir des calculs rapidement. Les estimations ne sont donc pas très fiables, de l'ordre de $\pm 8 dBm$ pour de bons modèles en Wi-Fi indoor par exemple. Des intervalles ou des distributions de probabilité semblent assez réalistes pour représenter ces effets aléatoires.
- **Les coûts** De même que la demande, les coûts financiers sont des données fluctuantes de première importance et difficiles à prévoir. L'importance des variations des coûts sur des problèmes réels doit être étudiée pour savoir s'il s'agit d'un point de fragilité du système ou pas et si les coûts doivent être considérés comme des données certaines ou incertaines.

Une analyse approfondie des données permettrait d'identifier les points de fragilité du modèle et notamment valider certaines approches comme le modèle d'association client/serveur.

L'étude de l'état de l'art a montré qu'il y a trois axes de lecture d'une approche robuste :

- **Axe données/modèles/traitements** : Cet axe permet de classifier les points de fragilité d'un système. Dans la majorité des cas rencontrés, les points de fragilité concernent les données du problème mais la fragilité peut également provenir de la modélisation faite du problème à optimiser. La non stabilité du système peut également avoir pour origine le traitement utilisé c'est-à-dire qu'elle est liée aux méthodes de résolution mise en œuvre.
- **Axe scénarios/intervalles/distributions** : Dans la majorité des cas l'incertitude des données est modélisée à l'aide d'une série de scénarios, d'intervalles de valeurs ou de distributions de probabilités.

- **Axe objectif/contraintes** : Une reformulation robuste d'un problème stochastique consiste à transformer les objectifs et les contraintes du problème pour rendre le problème déterministe et donc solvable par un algorithme d'optimisation classique. La façon de reformuler le problème selon qu'il s'agisse des objectifs ou des contraintes du problème nous a paru intéressante.

Après étude de la littérature, il apparaît qu'il n'y a pas de méthodologie qui s'impose en optimisation avec données incertaines, cependant quelques remarques et règles sont à souligner :

- L'intérêt de mettre en place une approche robuste se révèle nécessaire. L'optimisation dans le pire cas ou dans le cas moyen, souvent utilisée avec une optimisation déterministe, s'avère donner des résultats non satisfaisants et une intégration plus fine de la robustesse est toujours payante. Les méthodes de résolution exactes sont alors bien moins intéressantes car dans ce nouveau contexte il faut trouver un compromis entre une solution optimale et une solution robuste.
- Pour évaluer la robustesse d'une solution de nombreux outils ont été développés. Plus le nombre de ces mesures est important plus la notion de robustesse est cernée. Il est fortement conseillé de construire le maximum d'indicateurs de robustesse. L'analyse de sensibilité apparaît alors comme un outil primordial.
- Pour modéliser les incertitudes des données, l'utilisation de scénarios avec probabilité s'avère une solution performante. C'est la solution que nous aborderons dans les chapitres 4 et 5.

Chapitre 3

Modélisation mathématique du problème

L'objectif de ce chapitre est de proposer une modélisation pour l'optimisation combinatoire des paramètres antennaires (fréquences, puissance d'émission, tilt électrique et mécanique, etc.) afin que le réseau s'adapte aux variations inopinés de la demande en trafic. On présentera en premier lieu l'importance de l'analyse de sensibilité et le processus global ; vient ensuite le découpage fonctionnel du processus d'optimisation en différents sous systèmes ou chaque sous système est modélisé séparément. Puis, prenant en compte les interactions entre ces différentes entités, nous modélisons le problème global d'optimisation avec les fonctions objectif, les contraintes et les variables de décision.

Sommaire

3.1 Comment gérer les principes de robustesse 64
3.2 Processus global d'optimisation online 66
3.3 Le modèle de trafic 69
3.4 Modèle de paramétrage des stations de base 71
3.5 Modèle d'allocation des ressources radio 74
3.6 Modèle de propagation Hata 79
3.7 Modèle de débit 82
3.8 Modèle de Handover et liste de voisines 89
3.9 Formulation du problème à optimiser 91
3.10 Synthèse 94

3.1 Comment gérer les principes de robustesse

La robustesse en optimisation préoccupe de plus en plus les décideurs et industriels qui n'ont pas seulement besoin de bonnes solutions mais aussi de solutions résistantes aux incertitudes et aux prévisions plus ou moins fiables. De nombreuses approches ont émergé, de l'optimisation robuste à la programmation stochastique, sans qu'aucune méthodologie ne se soit imposée parmi les autres. En effet les décideurs doivent consentir un compromis entre l'optimisation et la robustesse des solutions. Ce compromis reste difficile à appréhender, malgré des outils comme la Γ-*robustesse* ou la (b, w)-*robustesse* qui tentent de le quantifier. Le recours à des méthodes issues de l'analyse de sensibilité est alors primordial. Non seulement l'analyse de sensibilité permet, en amont de l'optimisation, d'identifier les points de fragilité d'un modèle mathématique, mais elle est aussi la seule à pouvoir valider l'approche robuste en évaluant la stabilité des solutions trouvées. Par conséquent, sachant qu'il n'y a pas de méthodes qui sortent du lot, plusieurs approches et optimisations devront être mises en œuvre, l'analyse de sensibilité permettant d'identifier la plus pertinente. Les points ci-dessous relèvent les éléments de réflexion les plus importants à notre avis pour étudier les méthodes algorithmiques de paramétrage en ligne des réseaux LTE.

Validation du modèle de fonctionnement du réseau : Un intérêt majeur de travailler sur un réseau réel en ligne est qu'il permet de valider le modèle de fonctionnement du réseau et de le corriger pour que le modèle corresponde au plus près à la réalité.

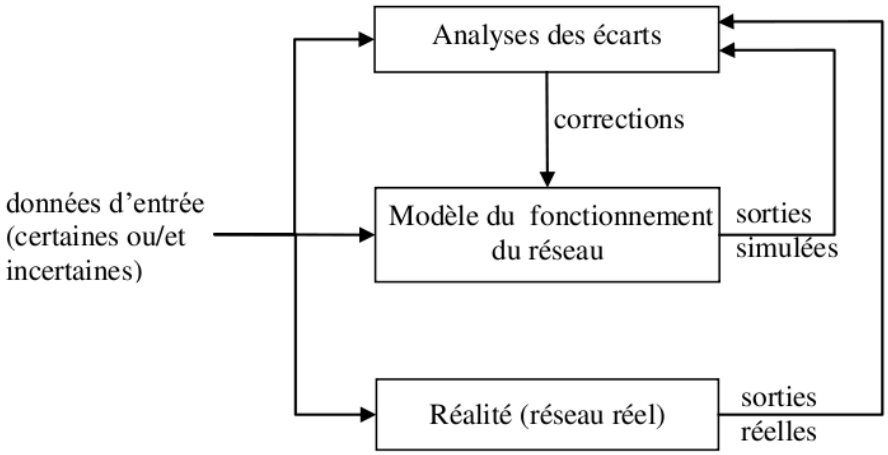


FIGURE 3.1 – Méthodologie pour corriger le modèle de fonctionnement du système lors d'un processus en ligne.

Pour une optimisation déterministe ou stochastique, trois modules sont identifiables :

– le modèle de fonctionnement du réseau : il décrit le fonctionnement du réseau et définit les fonctions utilisées par le problème (fonctions $f(.)$ et $g(.)$ du problème

(P').

- la formulation du problème à optimiser : elle définit les objectifs et contraintes du problème à optimiser.
- l'algorithme d'optimisation : il trouve une ou plusieurs solutions au problème à optimiser.

La Figure 3.2 présente les interactions de ces trois modules.

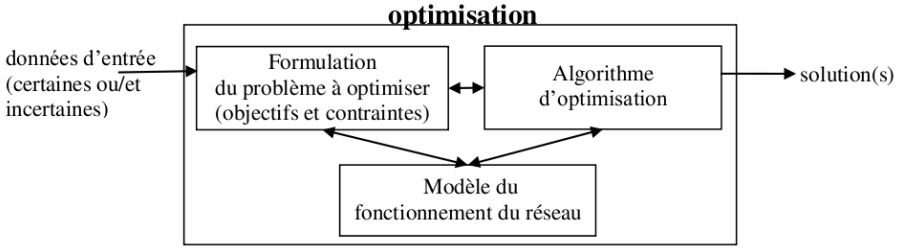


Figure 3.2 – Les trois modules d'une optimisation sont : le modèle de fonctionnement du système, la formulation du problème à optimiser et l'algorithme d'optimisation.

Optimisation et reformulation multiple des objectifs et contraintes Étant donné qu'aucune approche d'optimisation ne s'impose en préoccupation robuste, il est impossible de définir a priori à ce stade quelle formulation du problème (objectifs et contraintes) est la plus adaptée, il est nécessaire de proposer et d'évaluer plusieurs reformulations possibles. Une analyse de sensibilité systématique permet alors de comparer les approches.

Algorithmes et robustesse Il n'y a pas d'algorithmes spécifiquement dédiés à l'optimisation robuste, cependant le compromis entre l'optimisation et la robustesse des solutions suggère une approche en deux étapes. La première, axée sur l'optimisation, serait en charge de générer un faisceau de bonnes solutions autour des contraintes. La seconde, axée sur la robustesse, serait en charge de sélectionner les solutions les plus robustes selon des critères plus spécifiques. Une approche à base de famille de solutions paraît alors plus adaptée.

Analyse de sensibilité pilote de l'optimisation L'analyse de sensibilité est utilisable avant l'optimisation pour identifier les points de fragilité du modèle et après l'optimisation pour valider la robustesse d'une solution. C'est un moyen puissant d'évaluer des solutions sur des aspects de robustesse. Elle a donc l'avantage de pouvoir comparer différentes approches robustes. La Figure 3.3 montre par exemple comment il est possible d'utiliser l'analyse de sensibilité dans un cycle d'optimisation robuste. Après chaque optimisation, selon une formulation robuste donnée, on analyse la sensibilité des solutions trouvées. Si ces

solutions répondent aux objectifs fixés alors la meilleure solution est implémentée dans le réseau, sinon une nouvelle reformulation robuste du problème est proposée, jusqu'à obtenir des solutions qui répondent aux objectifs de robustesse.

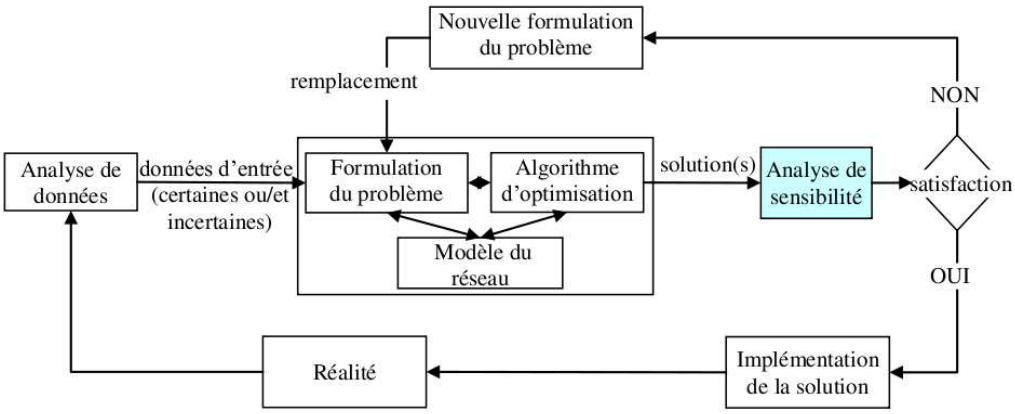


FIGURE 3.3 – Exemple d'utilisation de l'analyse de sensibilité pour piloter les reformulations robustes du problème jusqu'à obtenir un niveau de sensibilité satisfaisant.

3.2 Processus global d'optimisation online

Dans le schéma de la Figure 3.4, la procédure globale de l'optimisation que nous avons conçue est présenté. Le réseau est modélisé par divers sous-modèles (modèle de trafic, modèle de propagation, modèle d'allocation de ressources, modèle de débit, etc.). Le gestionnaire du réseau agit sur celui-ci via les paramètres antennaires (puissance d'émission des stations de base, tilt mécanique, tilt électrique...). Ces paramètres sont appelés variables de décision de 1er niveau du problème. A partir de ces données le modèle du réseau fournit une évaluation de la qualité de service à l'aide de paramètres d'évaluation comme le niveau d'interférence, la bande passante nécessaire pour écouler le débit demandé par les clients, etc. A ce niveau, les calculs nécessitent de connaître l'état réel du trafic. Les variables de décision de ce niveau dépendent alors du scénario de trafic considéré ; nous les appellerons donc variables de décision de 2ème niveau. Par exemple pour les réseaux LTE qui utilisent l'OFDMA, l'allocation des porteuses aux clients est nécessaire pour évaluer le SINR, c'est donc une variable de décision, mais cette allocation est réalisée automatiquement par les stations de base et dépend de la charge réelle en trafic, c'est donc une variable de décision du 2ème niveau.

Dans ce processus, l'allocation des fréquences est un point particulièrement sensible. Plusieurs schémas de réutilisation des fréquences ont été proposés dans la littérature. Un secteur ou une cellule peut utiliser une sous bande ou la bande totale disponible ; l'objectif

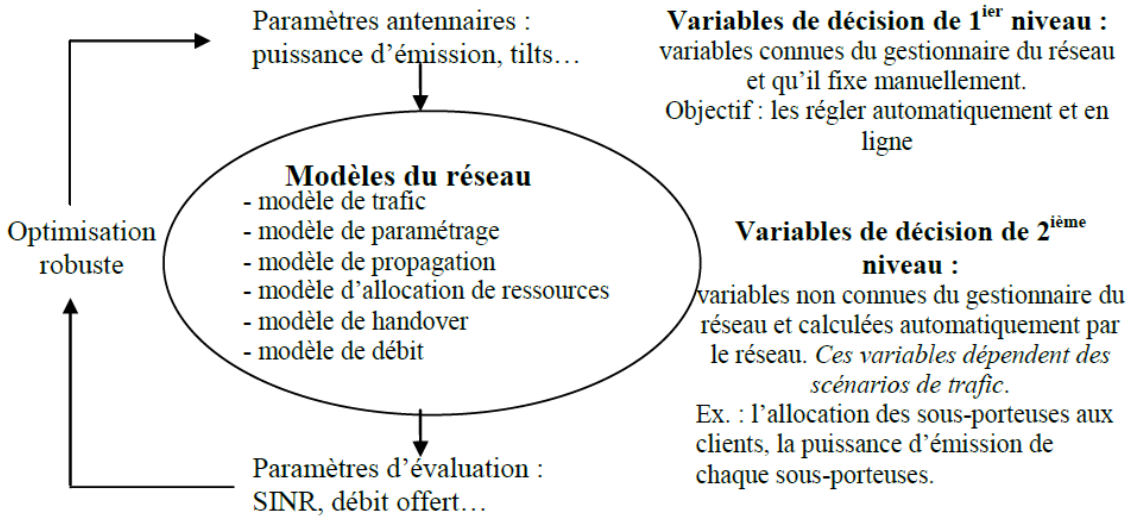


Figure 3.4 – Processus de l'optimisation online.

de la réutilisation des fréquences est l'augmentation de la capacité du réseau. L'utilisation totale de la bande de fréquence peut améliorer considérablement la capacité du réseau mais celui-ci est soumis à des contraintes d'interférence engendrées par l'utilisation du même bloc de ressources entre des cellules adjacentes (interférence inter cellules).

Compte tenu de l'indisponibilité de données de trafic réel compatibles avec le système LTE, nous travaillerons sur la bande de fréquence 900MHz de GSM et en utilisant trois sous bandes au niveau des cellules sectorielles, c'est-à-dire le schéma 1x3x3 de la Figure 3.5.

En regardant le développement récent des réseaux d'accès radio mobile, il apparaît que la taille et la complexité des réseaux cellulaires s'accroît d'une manière vertigineuse. L'optimisation manuelle du paramétrage devient un processus de plus en plus compliqué et très coûteux (coûts CAPEX et OPEX). Pour palier ces difficultés, l'introduction de l'ingénierie agile, par le logiciel, dans LTE est une vraie opportunité mais aussi un nouveau défi qu'il s'agit de maîtriser grace à des modèles et des algorithmes d'optimisation combinatoire.

L'objectif de ce chapitre est de définir le modèle mathématique du problème à optimiser après avoir rappelé le découpage du processus global. Il s'agit de construire un modèle qui soit exploitable par des algorithmes en temps de calcul raisonnable pour être opérationnel. En partant des données de base (topologie des sites, nombre de stations de base, etc.) et des données liées au trafic des clients (nombre de clients, débit souhaité, etc.), on propose un modèle qui puisse fournir des indicateurs de performances permettant l'évaluation du fonctionnement du réseau vis-à-vis de la demande des clients. Ce modèle est piloté en agissant sur les paramètres de configuration, en l'occurrence (puissance d'émission, tilt électrique, tilt mécanique, fréquence de transmission, diagramme de rayonnement). La

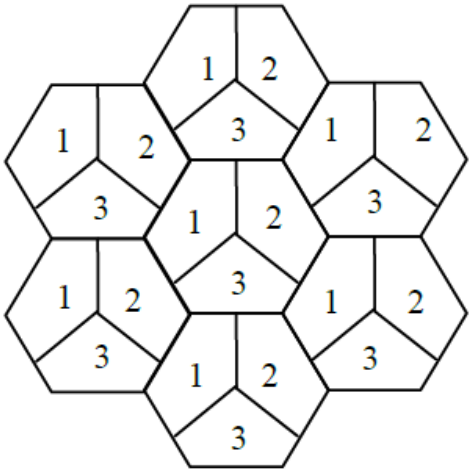


FIGURE 3.5 – Schéma théorique d'allocation de fréquence 1x3x3 avec des cellules hexagonales. La bande de fréquence totale a été découpée en 3 sous-canaux numérotés 1, 2 et 3. Chacune des eNB peux utiliser l'un de ces sous-canaux.

Figure 3.6 récapitule le processus global dans lequel s'insère le modèle du problème à optimiser.

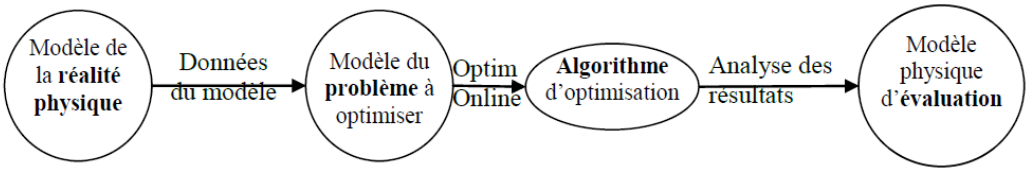


FIGURE 3.6 – Décomposition du processus global.

On présente à la Figure 3.7 la décomposition fonctionnelle du processus. Le modèle global est découpé en plusieurs sous modules décrivant les aspects essentiels pour l'optimisation du fonctionnement d'un réseau mobile de type LTE :

- **modèle de trafic** (ou modèle de demande) qui décrit l'expression de la demande en charge dans le réseau.
- **Le modèle de paramétrage** des secteurs qui définit les différents paramètres antennaires sur lesquels on agit.
- **Le modèle d'allocation de ressources** des réseaux OFDMA qui décrit la façon dont les porteuses sont allouées aux clients et comment est réalisée l'affectation des puissances d'émission des porteuses.
- **Le modèle de propagation** qui définit les règles de propagation du signal dans la zone de couverture.
- **Le modèle de débit** qui définit comment est déterminé le débit dans le réseau ainsi que les règles d'association client/serveur.

– **Le modèle de handover** qui explique la définition d'une cellule voisine.

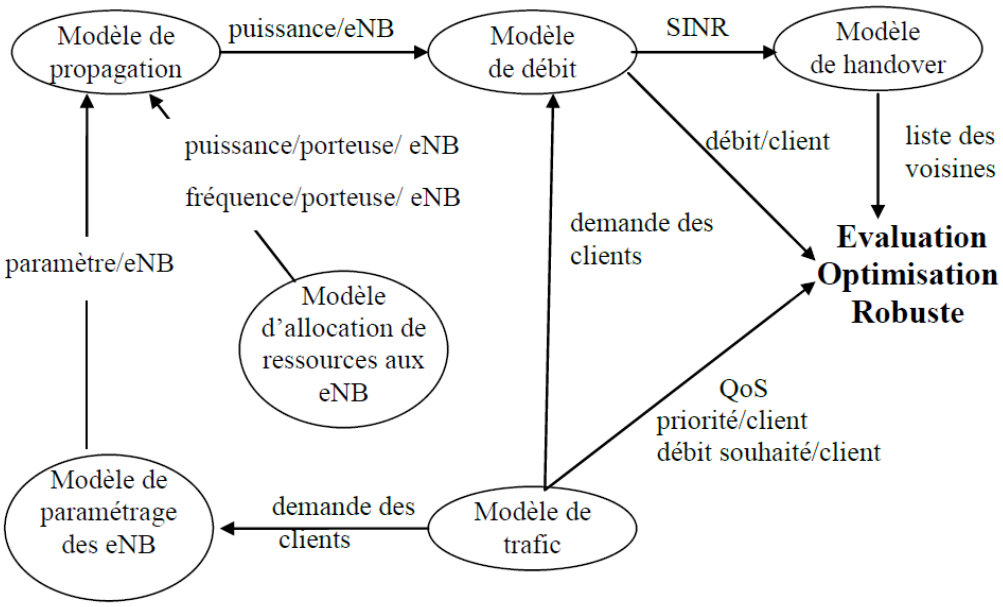


Figure 3.7 – Décomposition fonctionnelle pour l'optimisation d'un réseau LTE.

Chacun de ces sous-modèles interagit avec les autres comme le représente la Figure 3.7. En outre, les choix faits pour certains modèles impliqueront des contraintes pour d'autres modèles. Dans les sections suivantes, nous présentons six sous modèles du réseau. La dernière partie présente la formulation du problème à optimiser.

Concernant les notations, les règles suivantes ont été adoptées en général :

– Les ensembles sont décrits par une lettre majuscule.
– Les paramètres, variables et éléments d'ensemble sont définis par une lettre minuscule.
– Une lettre en exposant d'un paramètre est utilisée uniquement pour clarifier la signification de ce paramètre ; elle fait partie de la définition du paramètre, en aucun cas elle ne peut varier.
– Une lettre en indice d'un paramètre fait toujours référence à un élément d'un ensemble ; cet indice aura toujours pour valeur un entier naturel. Cela implique que le paramètre concerné est un vecteur ou une matrice.

3.3 Le modèle de trafic

Le modèle de trafic présente la façon dont les clients sont répartis dans le réseau. Il définit l'ensemble des clients du réseau, avec le débit souhaité pour chacun d'eux et les

types de service qu'ils demandent. Il existe plusieurs modèles dans la littérature (continus ou discrets, dynamiques ou statiques). On revient sur chaque de type de modèle dans ce qui suit en évoquant les avantages et les inconvénients de chaque modèle. Le choix du modèle se portera sur celui qui est mieux adapté à notre problème en tenant compte de la complexité vis-à-vis de la combinatoire et le temps de réponse.

Continu ou discret ? Un modèle de trafic continu revient à découper le réseau en vastes zones sous forme de polygones et à associer un volume de client à chacun d'eux. Un modèle de trafic discret revient à représenter chaque client de la zone de service qui nous intéresse par un point précis sur celle-ci. Un modèle discret découpe la zone de service en un ensemble de mailles où chaque maille est appelée point test. Chaque point test à un instant donné est caractérisé par : le nombre de clients qu'il représente, les services qu'ils demandent ainsi que le débit souhaité par chacun d'eux. Nous avons opté pour le modèle discret car celui-ci est plus précis. Dans notre modèle, nous considérons que tous les clients communiquent en même temps (réseau saturé à un instant t), bien qu'en réalité, une station mobile alterne entre deux états (activité et sommeil).

Dynamique ou statique ? Une manière réaliste de représenter un client dans la zone de service est de considérer l'aspect dynamique, en d'autres termes, un client en mouvement sur la zone, dont l'état de l'UE peut être soit en fonctionnement (émission ou réception du signal) soit en sommeil. Cependant nous ne souhaitons pas réaliser un simulateur. Une autre manière de faire est de considérer des clients statiques dans la zone de service. L'intérêt de cette dernière est qu'elle simplifie la mise en œuvre du modèle mathématique d'optimisation pour l'évaluation des configurations possibles. Par ailleurs, cette approche correspond aux données disponibles pour notre travail (données issues du projet « Territoire mobile » qui peut fournir des cartes discrètes de trafic [Moalic., 2013]).

Nous optons donc pour un modèle discret et statique. La zone géographique couverte par le réseau sera discrétisée en mailles régulières carrées de 25 mètres par 25 mètres nommées *point de test*.

Le trafic lui même sera décrit par des scénarios de charge. Un scénario donnera la répartition de la demande saturée à un instant donnée. On pourra considérer un ou plusieurs scénarios périodiquement toutes les 15 minutes par exemple. Ainsi, nous pourrons évaluer la robustesse d'un réseau face à la variation temporelle et spatiale du trafic. Le tableau 3.1) introduit l'ensemble des éléments relatifs à la description du trafic, soit dans le repère spatial, avec une association aux points test, soit dans le repère temporel, avec une association aux scénarios.

Notations	***Signification***
T	ensemble des points de test sur la zone géographique étudiée.
n^{TP}	nombre total de points de test : $n^{TP} = \|T\|$
t	indice d'un point test
(x_t, y_t, z_t)	coordonnées du centre du point test t
S	ensemble des scénarios
s	indice du s-ème scénario
n^S	nombre de scénarios : $n^S = \|S\|$
p_s	probabilité ou poids du scénario s
$C_{t,s}$	ensemble des clients localisés sur le point de test t dans le scénario s
$n^C_{t,s}$	nombre de clients localisés sur le point de test t dans le scénario s : $n^C_{t,s} = \|C_{t,s}\|$
C_s	ensemble de tous les clients sur la zone géographique étudiée dans le scénario s : $C_s = \cup_{t \in T} C_{t,s}$
n^C_s	nombre de clients localisés sur la zone géographique étudiée dans le scénario s : $n^C_s = \|C_s\|$
$r_{c,s}$	débit souhaité (en kbit/s) par le client c dans le scénario s
$r_{t,s}$	débit souhaité (en kbit/s) au point de test t dans le scénario s : $r_{t,s} = \sum_{c \in C_{t,s}} r_{c,s}$
$n^H_{b,b'}$	matrice du handover de dimension (nombre d'eNB x nombre d'eNB) représentant le nombre de handover sortant de l'eNB b et entrant à l'eNB b' (non symétrique)

Table 3.1 – Données du réseau et notations.

3.4 Modèle de paramétrage des stations de base

Le problème de placement des stations de base n'est pas abordé dans cette étude. Les positions des stations eNB sont considérées fixes dans le réseau. De même, le type d'antenne installée (diagramme de rayonnement) et l'azimut sont considérés comme des données du problème. En effet, ces facteurs interviennent plutôt dans la phase de planification du réseau et non de l'optimisation en ligne. Les paramètres des eNB que l'on considère comme variables de décision du problème sont la puissance d'émission, les tilts électriques et mécaniques et l'allocation des fréquences. Ces données et variables sont présentées dans les paragraphes suivants.

3.4.1 Stations de base : eNB

Un site est défini par ses coordonnées (x, y, z) dans l'espace. Sur un site sont installés un, deux ou trois secteurs appelés aussi eNB.

On définit les données d'entrée associées aux eNB :

B	ensemble des stations de base installées sur la zone de couverture
n^B	nombre de stations de base : $n^B = \|B\|$
b	l'eNB b avec $b \in [1, ..., n^B]$
(x_b, y_b, z_b)	coordonnées du site sur lequel est installé l'eNB b

Chaque station eNB installée utilise un type d'antenne. Les antennes des stations de base eNB positionnées sur les différents sites de la zone de couverture ne sont pas forcément de même type, les antennes peuvent être non seulement de différentes marques mais peuvent aussi avoir des diagrammes de rayonnement distincts (directionnel ou omnidirectionnel). Les stations peuvent aussi émettre à des puissances variées inférieures à une puissance maximale autorisée par type.

Pour chaque type d'antenne, nous définissons un ensemble de paramètres permettant la configuration du réseau : la puissance d'émission, l'azimut, le tilt et le diagramme de rayonnement.

3.4.2 Puissance d'émission

P_b	ensemble des puissances d'émission que l'eNB b peut prendre. Les puissances en radio s'expriment en décibels (dB)
n_b^P	nombre de puissances d'émission possibles pour l'eNB b : $n_b^P = \|P_b\|$

On définit la première variable de décision de premier niveau :

p_b^E	puissance totale émise par l'eNB b : $p_b^E \in P_b$

Pour décrire la configuration courante en puissance du réseau, nous définissons :

$\forall b \in B, \forall k \in P_b$

$$\alpha_{b,k} = \begin{cases} 1 \text{ si la puissance } k \text{ est affectée à l'eNB } b \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} \tag{3.1}$$

avec, une seule puissance par station, soit :

$$\sum_{k \in P_b} \alpha_{b,k} = 1, \forall b \in B \tag{3.2}$$

3.4.3 Azimut

L'azimut est la direction principale de l'antenne par rapport au nord géographique. Sa prise en compte est nécessaire pour calculer la puissance émise en sortie d'antenne dans toutes les directions dans le cas où l'antenne n'est pas omnidirectionnelle.

a_b azimut de l'eNB b

L'azimut s'exprime en degrés ($^\circ$). Dans notre travail, nous considérons que l'azimut des eNB est fixe, c'est donc une donnée d'entrée.

3.4.4 Tilt

Le tilt de l'antenne est l'angle formé par le faisceau principal par rapport au plan horizontal. Ce paramètre est très important dans la mesure où il influe considérablement sur les caractéristiques du réseau (couverture, interférence...). Le tilt de l'antenne peut être ajusté de deux façons différentes : électriquement ou mécaniquement.
Le tilt mécanique permet d'ajuster l'angle physique par rapport au plan horizontal, tandis que le tilt électrique ajuste la radiation de l'antenne en modifiant le diagramme de rayonnement. On a les notations suivantes :

T_b^E ensemble des tilts électriques que peut prendre l'eNB b
n_b^E nombre de valeurs possibles de tilt électrique pour l'eNB b : $n_b^E = |T_b^E|$
T_b^M ensemble des tilts mécaniques que peut prendre l'eNB b
n_b^M nombre de valeurs possibles de tilt mécanique pour l'eNB b : $n_b^M = |T_b^M|$

On définit les variables de décision de premier niveau pour le tilt mécanique et électrique :

t_b^E tilt électrique à affecter à l'eNB b : $t_b^E \in T_b^E$
t_b^M tilt mécanique à affecter à l'eNB b : $t_b^M \in T_b^M$

Pour décrire la configuration l courante du réseau en tilt électrique et m en tilt mécanique, nous définissons les deux ensembles de variables binaires :

$\Delta = \{\delta_{b,l}, b \in B, l \in T_b^E\}$ avec :

$$\delta_{b,l} = \begin{cases} 1 \text{ si l'antenne } b \text{ utilise la configuration } l \text{ en tilt électrique} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} . \tag{3.3}$$

et $\Lambda = \{\lambda_{b,m}, b \in B, m \in T_b^M\}$ avec :

$$\lambda_{b,m} = \begin{cases} 1 \text{ si l'antenne } b \text{ utilise la configuration } m \text{ en tilt mécanique} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} . \tag{3.4}$$

Notons que pour chacune des cellules, une antenne possède seulement une et une seule configuration de tilt antennaire, d'où :

$$\sum_{l \in T_b^E} \delta_{b,l} = 1, \forall b \in B \tag{3.5}$$

pour le tilt électrique et

$$\sum_{m \in T_b^M} \lambda_{b,m} = 1, \forall b \in B \tag{3.6}$$

pour le tilt mécanique.

3.4.5 Diagramme de rayonnement

A chaque type d'antenne correspond un diagramme de rayonnement. Les notations sont les suivantes :

g_b^{MAX}	gain maximum de l'eNB b par rapport à la direction principale exprimé en dBi. Le diagramme de rayonnement d'une antenne est caractérisé par deux fonctions que sont les pertes verticales et horizontales :
$a_b^{VER}(\theta, t_b^E)$	perte verticale en puissance (dB) de l'eNB b ; elle est fonction de :
$\theta \in [0; 2\pi[$	l'angle vertical par rapport à la direction principale
t_b^E	le tilt électrique de l'eNB b
$a_b^{HOR}(\varphi)$	perte horizontale en puissance (dB) de l'eNB b ; elle est fonction de $\varphi \in [0; 2\pi[$, l'angle horizontal par rapport à la direction principale.

3.5 Modèle d'allocation des ressources radio

Nous allons en premier lieu citer quelques problèmes d'optimisation qui peuvent se présenter pour l'allocation des ressources en OFDMA. La recherche bibliographique mon-

tre un grand intérêt pour les problèmes d'allocation des ressources radio sur la voie descendante, c'est-à-dire de l'eNB vers UE (User Equipment pour la station mobile). On considère uniquement dans ce travail le cas de transmission sur la voie descendante afin de modéliser l'allocation en OFDMA car la combinatoire est déja immense. Par la suite, en fonction de la difficulté du problème, la voie montante qui utilise le SC-OFDMA pourrait être ajoutée (Figure 3.8).

Dans les système LTE, l'allocation des fréquences aux communications est très compliquée dans la mesure où chaque lien peut utiliser tout le spectre d'émission de la bande passante. Les principales propriétés sont :

- utilisation totale ou partielle de la bande de fréquence
- subdivision de la bande passante en sous porteuses orthogonales
- sous canal constitué d'un ensemble de sous porteuses adjacentes ou non
- sous canal attribué à un utilisateur à chaque slot de temps
- ressource radio élémentaire appelée un bloc physique et constituée d'un ensemble de sous porteuses pour un slot donné (généralement 1ms)

3.5.1 Fréquences d'émission : affection des porteuses aux clients

Comme nous l'avons déjà mentionné, les systèmes LTE utilisent la technologie OFDMA pour la transmission en lien descendant et montant. L'allocation des fréquences est faite sur un spectre flexible allant de 1,4 MHz à 20MHz. En fonction de la bande passante utilisée, le spectre d'émission est divisé en sous porteuses orthogonales de 15KHz organisées de manière à éviter les interférences intra cellules Les sous-porteuses peuvent être réallouées à chaque slot de temps de 0,5ms.

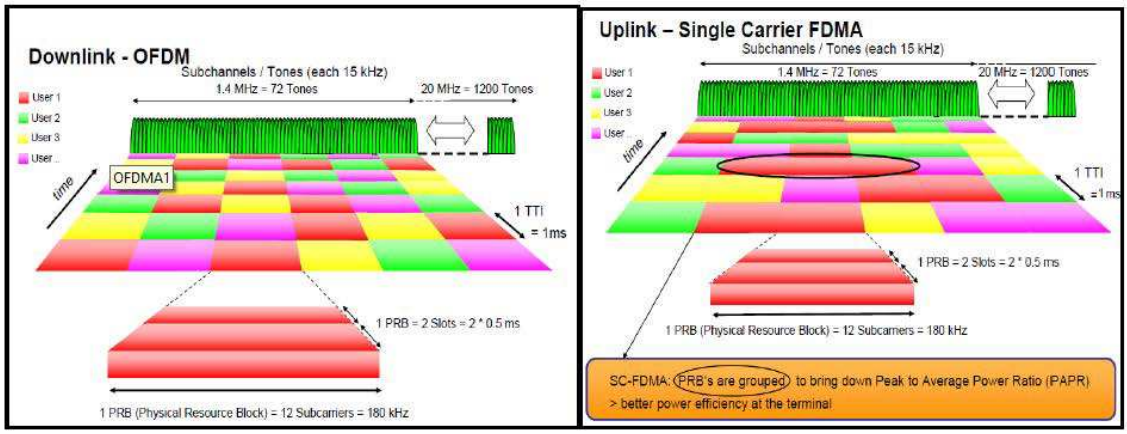


Figure 3.8 – Schémas d'allocation des sous-porteuses aux clients dans le cas du lien descendant (Figure de gauche) et montant (Figure de droite).

En LTE, les sous-porteuses sont regroupées par blocs de 12 sous-porteuses adjacentes

appelés PRB (Physical Resource Block). C'est la station de base qui effectue la répartition des PRB aux clients selon la qualité du signal tous les 2 slots. Dans une modélisation statique sans faire de simulation, il n'est pas nécessaire de prendre en considération les slots de temps au sein du modèle. L'allocation de fréquence consiste alors à allouer à chaque eNB un sous-canal que l'on appellera porteuse comme sur la Figure 3.9-b où la bande a été découpée en 3 sous-canaux. Le sous-canal est un groupe fixe de PRB qui est allouée aux communications de la cellule.

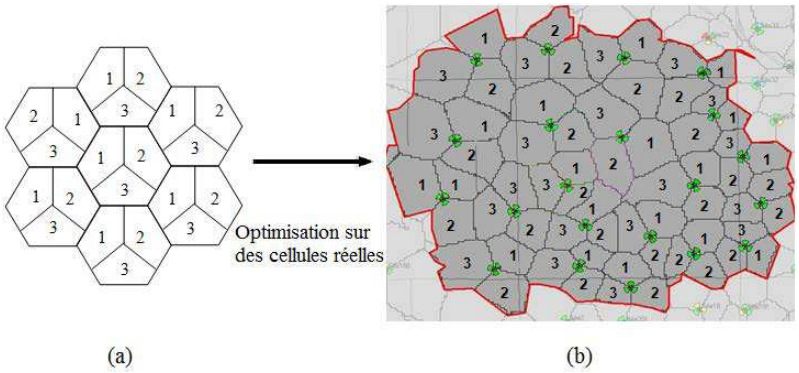


FIGURE 3.9 – (a) Schéma théorique (cellules hexagonales) d'allocation de fréquence 1x3x3 et (b) exemple d'allocation réelle de fréquences (cellules réelles). La bande de fréquence totale a été découpée en 3 sous-canaux numérotés 1, 2 et 3. Chacune des eNB peut utiliser l'un de ces sous-canaux.

Dans ce cadre, les notations suivantes sont considérées :

w_0 largeur totale de bande de fréquence disponible en MHz

n^N nombre de porteuses sur la bande de fréquence utilisée : si $n^N = 1$ alors toutes les eNB utilisent la bande de fréquence totale w_0

w largeur de la porteuse en MHz : $w = \frac{w_0}{n^N} = w_0$

n_b^N nombre de porteuse utilisé par l'eNB b : $n_b^N = 1$

N ensemble des porteuses

n indice d'une porteuse

	sous-porteuse	block PRB	sous-canal
Nombre de sous-porteuses	1	12	12x6 = 72
Largeur	15 kHz	180kHz	1.08 mHz

TABLE 3.2 – Exemple de sous-canaux à 6 PRB

La variable de décision de premier niveau concernant l'allocation de fréquence est la suivante :

$f_{b,n}$ variable d'allocation de la porteuse n à l'eNB b.

$$f_{b,n} = \begin{cases} 1 & \text{si l'eNB } b \text{ utilise la porteuse } n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.7}$$

avec une seule porteuse par station, soit : $\forall b \in B, \sum_{n \in N} f_{b,n} = 1$

Remarque : *Il est possible de généraliser les « patterns » de fréquence et de permettre d'allouer plusieurs porteuses (i.e. sous-canaux) à une eNB. Un exemple est donné en Figure 3.10. Dans cette généralisation (allocation multi-porteuses), il est alors possible de mixer les schémas de réutilisation de fréquence. Dans cette étude, nous ne considérons que les 2 motifs de réutilisation, 1x3x1 et 1x3x3, correspondant à un cas de figure moins complexe.*

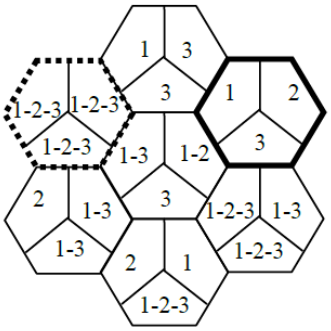


FIGURE 3.10 – Exemple d'allocations multi-porteuses pour des cellules hexagonales tri-sectorielles. La bande de fréquence totale a été découpée en 3 sous-canaux numérotés 1, 2 et 3. Les 3 eNB de la cellule en gras utilisent respectivement les sous-canaux 1, 2 et 3, tandis que les eNB de la cellule en pointillée utilisent les 3 sous-canaux simultanément c'est-à-dire la totalité de la bande de fréquence, et tous les cas intermédiaires sont possibles.

3.5.2 Puissances d'émission : affection des puissances des sous-porteuses

La puissance d'émission du signal est l'un des paramètres les plus importants pour la gestion des ressources au niveau de l'interface radio. Utiliser la puissance maximale pour une eNB assure une bonne couverture du réseau mais engendre des chevauchements inter cellules et donc des interférences importantes entre les cellules adjacentes, mais aussi, une consommation importante en énergie des stations de base. La puissance d'émission est l'une des variables de décision du problème. En OFDMA, l'eNB répartit la puissance totale d'émission entre un ensemble de sous-canaux.

On notera :

$p_{b,n}^E$ puissance d'émission affectée à la porteuse n par l'eNB b

Globalement, la puissance totale d'une station à plusieurs porteuses est :

$$p_b^E = \sum_{n=1}^{n_b^N} p_{b,n}^E \tag{3.8}$$

Plusieurs approches ont été proposées pour l'affection des sous porteuses (séparation et regroupement des sous porteuses et affectation aux clients) ainsi que l'allocation de leurs puissances correspondantes. La thèse de Lengoumbi [Lengoumbi., 2008] résume les principales approches que l'on rappelle ci-dessous et sur la Figure 3.11. L'approche la plus classique considère séparément l'étape d'attribution des porteuses et l'étape d'allocation des puissances. L'autre approche réalise d'une façon conjointe l'attribution des fréquences et l'allocation des puissances ; on alloue conjointement les fréquences aux clients et les puissances et ensuite on essaie d'améliorer les critères d'optimisation en faisant des échanges entre utilisateurs. Le schéma suivant résume les deux approches.

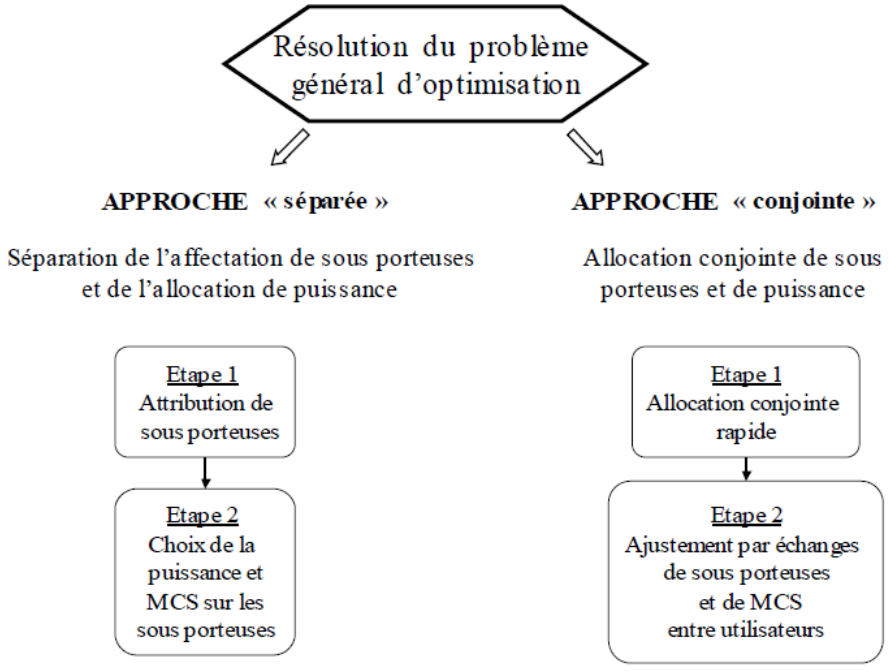


FIGURE 3.11 – Structures des algorithmes d'allocation de ressources (extrait de [Lengoumbi., 2008]).

Dans les deux approches, il y a deux options pour l'étape 1. Dans la première option, on connait a priori le nombre de sous porteuses à allouer par utilisateur (la bande du sous canal), tandis que pour la seconde option, il est nécessaire d'évaluer d'abord la bande à

allouer par utilisateur (nombre de sous porteuses à allouer). Pour cette seconde option, le problème d'attribution des sous porteuses est constitué en premier lieu d'allocation de bande puis ensuite d'affectation des sous porteuses.

L'allocation de ressources dans l'étape 2 se traduit par l'affectation des puissances aux sous porteuses (et/ou MCS pour Modulation and Coding Scheme). L'étape 2 est différente selon que l'on se place sur l'approche séparée ou conjointe ; dans l'approche séparée elle est obligatoire alors que dans l'approche conjointe l'étape 1 peut être ignorée dans la mesure ou les puissances ont déjà été affectées aux sous porteuse, elle sert juste à améliorer l'affection faite dans l'étape 1. Dans tous les cas, il s'agit d'un choix algorithmique lié à la complexité du problème, la taille du réseau et le temps de calcul. Nous revenons sur ce point dans le chapitre sur l'algorithmique.

3.6 Modèle de propagation Hata

Le modèle de propagation est un modèle utilisé dans les réseaux de radiocommunication afin de permettre l'estimation de la propagation des ondes radio. La mesure des puissances reçues au niveau des récepteurs nous permet d'avoir une idée sur la nature du canal de propagation ainsi que la zone de couverture qu'offre l'ensemble des stations de base.
Le schéma de la Figure 3.12 présente un modèle de propagation avec comme entrée un ensemble de paramètres qui peuvent influer sur la qualité de la puissance reçue par le récepteur.

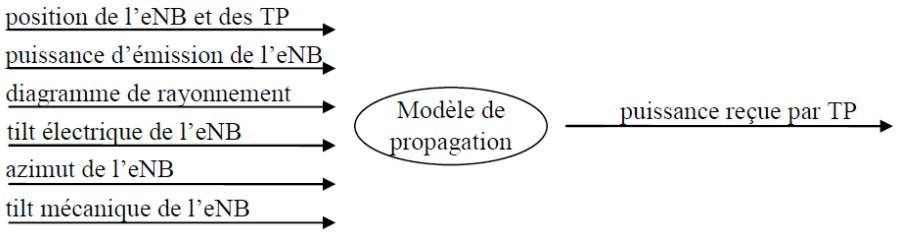


Figure 3.12 – Modèle de propagation avec les paramètres de l'eNB

Comme montré sur le schéma ci-dessus, la puissance reçue à la sortie au niveau des stations mobiles dépend de plusieurs facteurs fixes liés à l'eNB (position de l'eNB, hauteur de l'eNB, etc.), et variables liés à l'eNB (tilts électrique et mécanique, azimut, puissance émise, etc.), mais aussi de la distance entre la station mobile et l'eNB, de différents facteurs environnementaux et d'obstacles imprévus. D'où la complexité du modèle de propagation. Nous travaillerons sur un réseau LTE mais étant donné que les données réelles de trafic proviennent d'un réseau GSM/UMTS et que les positions des stations de base restent inchangées, nous considèrerons que la bande de fréquences utilisée est 900 MHz.

f_0 bande de fréquence utilisée par le réseau. Elle est utilisée pour le modèle de propagation. $f_0 = 900MHz$.

Le modèle Hata-Okumura ([Hata., 1980]) est un modèle très adapté pour des cellules de large couverture (distances à plus de 100m) et peut extrapoler des prédictions jusqu'à 2 Ghz. Ce modèle est très utilisé dans la littérature et a donné de bon résultat dans plusieurs outils de simulation. L'approche analytique du modèle Hata-Okumura donne l'affaiblissement du signal entre deux points pour des villes petites et moyennes :

$$\begin{aligned} PL_{b,t} = 69.55 + 26.16\ log_{10}(f_0) - 13.82\ log_{10}(z_b) - a(z_t) \\ +(44.9 - 6.55\ log_{10}(z_b))\ log_{10}(d_{b,t}) \end{aligned} \tag{3.9}$$

avec :

$$a(z_t) = 0.8 + (1.1\ log_{10}(f_0) - 0.7)z_t - 1.56\ log_{10}(f_0) \tag{3.10}$$

Où :

$PL_{b,t}$ affaiblissement du signal (PathLoss) entre l'eNB b et le point test t en dB

f_0 bande de fréquence utilisée par l'eNB b en MHz. Dans notre cas, $f_0 = 900MHz$

$a(z_t)$ facteur de correction de la hauteur de la station mobile en dB

$d_{b,t}$ distance entre l'eNB b et le point test t en kilomètre (km)

z_b et z_t sont respectivement les hauteurs de l'eNB b et du point test t en mètre (m)

En utilisant les paramètres suivants : $f = 900MHz$, $z_b = 40m$, $z_t = 1.5m$, les prédictions pour le pathloss dans ce modèle sont montrées graphiquement sur la Figure 3.13

Compte tenu du temps d'exécution de l'optimisation, le calcul de la propagation peut se faire de deux manières différentes : soit intégrée à l'algorithme d'optimisation, ce qui veut dire que le modèle sera exécuté à chaque itération de l'algorithme, soit préalable à l'optimisation c'est-à-dire que les calculs de propagation sont réalisés au préalable avant de les intégrer à l'algorithme.

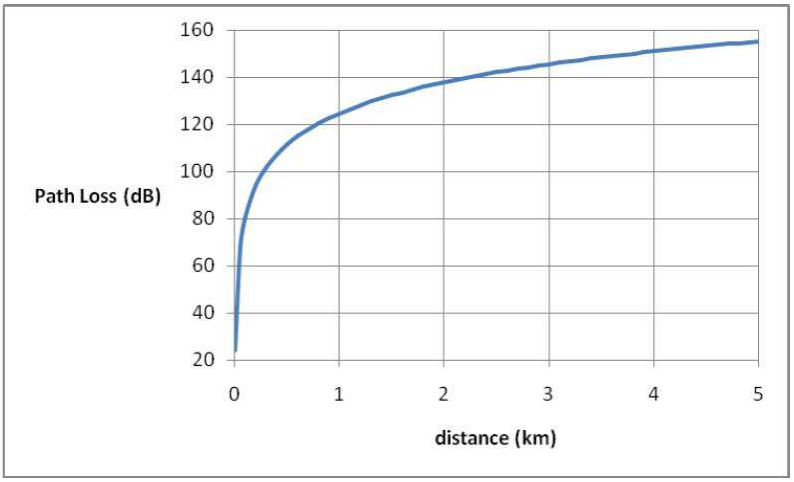


Figure 3.13 – Le modèle Hata-Okumura

Le modèle intégré demande donc un temps d'exécution beaucoup plus important que le modèle préalable. Comme nous travaillons sur le paramétrage des antennes, et qu'il paraît difficile de calculer préalablement toutes les configurations d'antenne possibles, nous avons jugé utile de considérer un modèle de propagation intégré malgré l'inconvénient de temps d'exécution engendré. Cependant les affaiblissements entre les eNB et les points test pourront être calculés préalablement.

Nous avons les notations suivantes :

$p^R_{b,t}$ puissance reçue par le point test t provenant de l'eNB b. L'estimation de cette puissance est calculée par le modèle Hata-Okumura [Hata., 1980] :

$$p^R_{b,t}(dBm) = p^E_b - PL_{b,t} + g^{MAX}_b - a^{VER}_b(\theta_{b,t} - t^M_b, t^E_b) - a^{HOR}_b(\varphi_{b,t} - a_b) \tag{3.11}$$

avec les angles :

$\theta_{b,t}$ et $\varphi_{b,t}$ décrits aux Figures 3.14 et 3.15

$\theta_{b,t}$ angle vertical entre l'eNB b et le point test t

$\varphi_{b,t}$ angle horizontal entre l'eNB b et le point test t

$p^R_{b,t,n}$ puissance reçue par le point test t provenant de l'eNB b

$$p^R_{b,t,n} = \frac{p^R_{b,t}}{n^N_b} f_{b,n} = p^R_{b,t} f_{b,n}, \text{ car } n^N_b = 1 \tag{3.12}$$

En LTE [TR36.814], les deux équations suivantes sont appliquées pour calculer les pertes horizontales et verticales en puissance.

$$a_b^{VER}(\theta_{b,t} - t_b^M, t_b^E) = -min[12(\frac{a_b^{VER}(\theta_{b,t} - t_b^M, t_b^E)}{\theta_{3dB}}), SLA_v], SLA_v = 20dB \quad (3.13)$$

$$a_b^{HOR}(\varphi_{b,t} - a_b) = -min[12(\frac{a_b^{HOR}(\varphi_{b,t} - a_b)}{\varphi_{3dB}}), A_m], A_m = 25dB \quad (3.14)$$

$$a_b^{TOT}((\theta_{b,t} - t_b^M, t_b^E), (\varphi_{b,t} - a_b)) = min[a_b^{VER}(\theta_{b,t} - t_b^M - t_b^E), a_b^{HOR}(\varphi_{b,t} - a_b), A_m] \quad (3.15)$$

On schématise ci-dessous les différents angles (verticaux et horizontaux) par rapport à la puissance d'émission dans la direction principale.

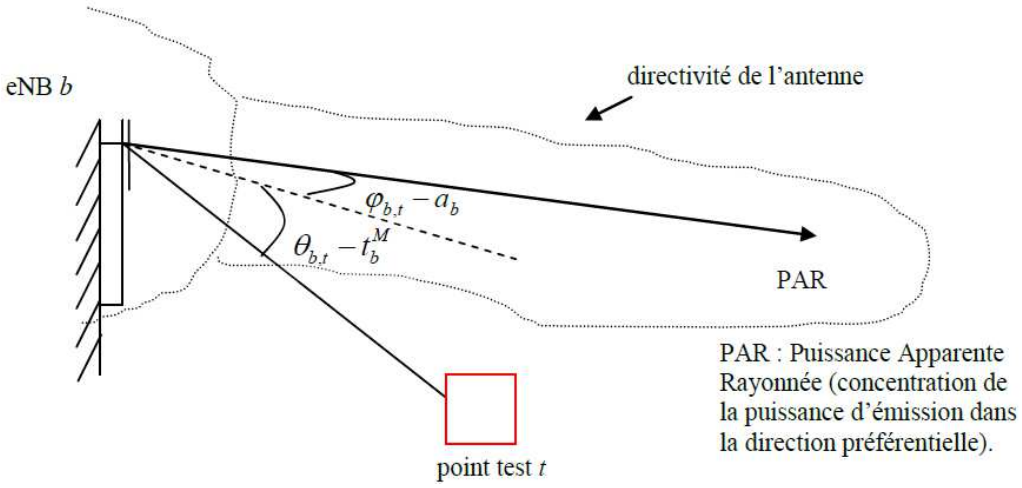


FIGURE 3.14 – Exposition du point test par rapport à la puissance apparente rayonnée

3.7 Modèle de débit

Le modèle de débit traduit les puissances reçues au niveau des terminaux en termes de services offert par le réseau. Avant de présenter le modèle de débit à proprement parler, nous présentons le modèle d'association qui détermine le mode d'association d'un terminal à une eNB (puissance maximale, SINR maximal...) dans le cas d'utilisation de la technique OFDMA en LTE. Nous présentons dans ce qui suit ces deux modèles dans le but de calculer les bandes de fréquence nécessaires pour écouler les débits demandés par les clients.

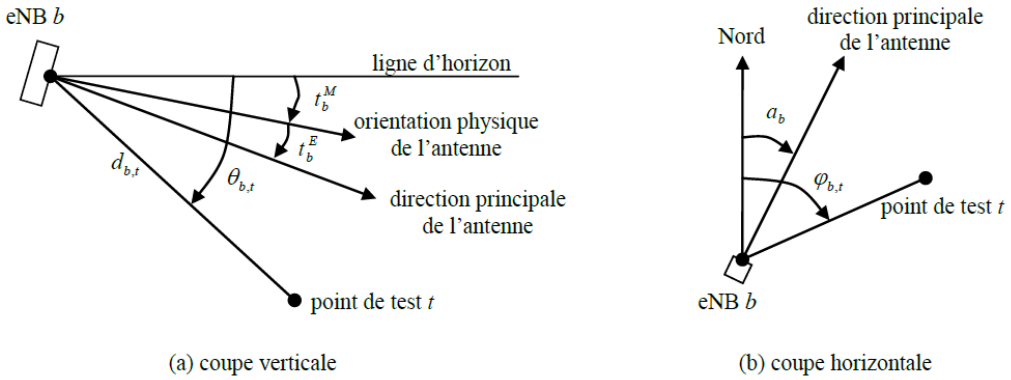


FIGURE 3.15 – Coupe verticale (a) et horizontale (b) de la liaison eNB/point de test. Explication des différents angles.

Plusieurs approches sont proposées dans la littérature [Lengoumbi., 2008]. La classification de ces approches est faite selon que l'objectif du problème est de minimiser la puissance transmise, de maximiser le débit total des utilisateurs, d'optimiser une équité (maximiser le débit minimum parmi les utilisateurs) ou de minimiser le nombre d'utilisateurs qui n'atteignent pas le débit minimal. Les contraintes du problème s'expriment plus souvent en termes de débit minimal à satisfaire pour chaque utilisateur. Pour cela, on est amené à calculer le paramètre signal sur interférence plus bruit (SINR pour Signal to Interférence and Noise Ratio) pour mesurer la qualité radio. Ce paramètre dépend essentiellement de l'attribution des sous porteuses et de l'allocation des puissances pour chaque porteuse.

3.7.1 Modèle d'association

Dans cette partie, nous allons citer en premier lieu les différents modèles de charge qui existent dans la littérature afin d'associer les clients à des secteurs dans le but d'établir une connexion. Nous nous intéressons par la suite à la modélisation du problème d'association dans le cas de systèmes LTE qui est l'objet de notre travail.

L'un des modes d'association des plus simples consiste à associer un client (ou point test) à la station offrant le plus fort signal. Il s'agit d'estimer la puissance reçue par le point test t pour tous les eNBs, et ensuite à associer ce point test à la station offrant le meilleur signal. L'inconvénient de ce mode d'association est que le débit dépend non seulement de la qualité du signal reçu, mais aussi des interférences provenant des stations adjacentes, d'où un autre mode d'association dit à meilleur SINR dit aussi à meilleur débit nominal.

Le SINR est proportionnel au débit offert par la cellule et tient compte des interférences. La méthodologie consiste à calculer les SINR d'un point de test pour tous les eNBs et de l'associer à l'eNB offrant le plus fort SINR si celui-ci est supérieur à un niveau minimal.

Ce mode d'association a également ces limites car il ne tient pas compte de la charge de la cellule en nombre de clients. En effet la bande passante de la cellule est à partager par tous les clients. Un mode d'association qui tient compte de l'équilibre de charge améliore les performances d'un réseau. Par exemple une association dit à meilleur débit commence par calculer les débits potentiels des clients selon qu'ils soient associés à tel ou tel secteur et choisissent ensuite la meilleure solution pour l'ensemble des clients. C'est intéressant du point du vue du débit offert mais complexe à mettre en œuvre car fortement sensible à l'évolution temporelle de la demande et très long à calculer.

Dans notre étude, nous considérerons le modèle d'association au meilleur SINR. Cependant il y a plusieurs façons de calculer le SINR. La formule du SINR est définie comme étant le rapport de la puissance du signal porteur de l'information sur les interférences plus le bruit thermique. On peut calculer le SINR sur chaque sous-porteuse mais nous le calculerons sur chaque sous-canal ou porteuse n.

Le calcul du SINR dans le pire cas c'est-à-dire lorsque le réseau est saturé, permet de calculer la plus petite valeur possible du SINR. Ce calcul est le suivant :

$\gamma_{b,t,n}^{MIN}$ SINR minimum de la porteuse n émise par l'eNB b au point test t :

$$\gamma_{b,t,n}^{MIN} = \frac{p_{b,t}^{R} f_{b,n}}{\sum\limits_{b' \neq b, f_{b,n}=f_{b',n}} p_{b',t}^{R} f_{b',n} + n_0 w} \tag{3.16}$$

Où

n_0 la densité du bruit thermique.

$\gamma_{b,t,n}^{MIN}$ est dit minimum car il est considéré au pire cas, il ne dépend pas de la charge du réseau. En effet, si le trafic est faible, il y aura très peu de collisions alors le calcul du SINR est une sur-estimation.

Pour tenir compte de l'occupation réelle de la porteuse par des clients, on considère :

$\delta_{b,n,s}$ le taux d'occupation de la porteuse n dans le scénario s pour l'eNB b. La formule du SINR est alors :

$$\gamma_{b,t,n,s} = \frac{p_{b,t}^{R} f_{b,n}}{\sum\limits_{b' \neq b, f_{b,n}=f_{b',n}} p_{b',t}^{R} f_{b',n} \delta_{b,n,s} \delta_{b',n,s} + n_0 w} \tag{3.17}$$

Le point de test t s'associe avec l'eNB b si et seulement si $\gamma_{b,t,n}^{MIN}$ est supérieur à un seuil

donné et qu'il est le plus élevé des SINR maximums.

Remarque :
$\gamma_{b,t,n}^{MIN} < \gamma_{b,t,n,s}$ quel que soit le scénario considéré, d'où la sur-estimation.
On a les notations suivantes :

γ^C seuil minimal pour établir une communication à débit minimal pour les clients des points tests de toute la zone de service.

$u_{b,t,n}$ variable d'association du point test t avec l'eNB b sur la porteuse n. Le point test t s'associe avec l'eNB b si et seulement si $\gamma_{b,t,n}^{MIN}$ est plus grand qu'un seuil donné et qu'il est le plus élevé des SINR minimums, c'est-à-dire :

$$u_{b,t,n} = \begin{cases} 1 & \text{si } \gamma_{b,t,n}^{MIN} = \max\limits_{b' \in B}(\gamma_{b',t,n}^{MIN}) \text{ et } \gamma_{b,t,n}^{MIN} \geq \gamma^C \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.18}$$

Remarque :
Le modèle d'association présenté ci-dessus ne dépend pas du trafic réel donc quel que soit le scénario de demande, un point de test est toujours associé au même eNB. En réalité l'association se fait selon le trafic et donc plutôt au meilleur SINR qu'au meilleur SINR minimum. On utilise alors la variable de décision de deuxième niveau :

$u_{b,t,n,s}$ variable d'allocation des porteuses aux points tests et aux eNB en fonction du scénario s

$$u_{b,t,n,s} = \begin{cases} 1 & \text{si l'eNB } b \text{ attribue la porteuse } n \text{ au point test } t \text{ pour le scénario } s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

En d'autres termes :

$$u_{b,t,n,s} = \begin{cases} 1 & \text{si } \gamma_{b,t,n,s} = \max\limits_{b' \in B}(\gamma_{b',t,n,s}^{MIN}) \text{ et } \gamma_{b,t,n,s} \geq \gamma^C \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.19}$$

Toutes les définitions qui suivent peuvent être étendues avec cette définition. Remarquons cependant que le calcul de $\gamma_{b,t,n,s}$ nécessite de connaitre le taux d'occupation des canaux de toutes les eNB et donc les associations des clients aux eNB. Il y a donc une boucle entre le calcul du SINR et celui de l'association. La variable d'allocation des porteuses dépend essentiellement du taux d'occupation que l'on calcule grâce au SINR.

On a alors la contrainte suivante :

$\forall t \in T, \sum_{b \in B} u_{b,t,n} \leq 1$ un point test est associé à au plus une eNB

si $\sum_{b \in B} u_{b,t,n} = 0$ alors, le point test t n'est associé à aucune eNB

Il n'est pas couvert car pour toutes les eNB :$\forall b \in B, \gamma_{b,t,n}^{Min} < \gamma^C$

Les notations des stations eNB serveuses et des cellules dérivent de l'association des points tests à celles-ci.

b_t eNB serveuse du point test t. Ceci revient à dire que l'eNB b couvre le point test t ou t est associé à b.

$b_t = b$ si et seulement si $u_{b,t,n} = 1$

$b_t = 0$ si et seulement si le point test t n'est associé à aucune eNB. Ceci donne la formule suivante : $b_t = \sum_{b \in B} u_{b,t,n}$

T_b^C cellule de l'eNB b, elle correspond à l'ensemble des points test associés à l'eNB b : $T_b^C = \{t \in T / u_{b,t,n} = 1 \text{ pour tout } n = [1, ..., n^N]\}$

T_0^C ensemble des points test qui ne sont associés à aucune eNB : $T_0^C = \{t \in T / \forall b \in B, u_{b,t,n} = 0 \text{ pour tout } n = [1, ..., n^N]\}$, elle correspond à la cellule des points test non couverts.

$n_{b,n}^T$ nombre de points test de l'eNB b sur la porteuse n : $n_{b,n}^T = \sum_{t \in T} u_{b,t,n} = |T_b^C|$

$n_{b,n,s}^C$ nombre de clients de la cellule b sur la porteuse n dans le scénario s : $n_{b,n,s}^C = \sum_{t \in T} u_{b,t,n} n_{t,s}^C$

$r_{b,s}$ débit à écouler (en Kbits/s) par l'eNB b dans le scénarios s : $r_{b,s} = \sum_{t \in T_b^C} r_{t,s}$

$n_{0,s}^C$ nombre de clients du scénario s non couverts par le réseau : $n_{0,s}^C = \sum_{t \in T_0^C} n_{t,s}^C$

n_0^C le nombre de clients non couverts autorisés par le réseau. Les contraintes sont que pour tous les scénarios, le nombre de clients non couverts ne dépasse pas un seuil donné. On a donc : $\forall s \in S, n_{0,s}^C \leq n_0^C$

Remarque :

$\forall b \in B, u_{b,t,n} \leq f_{b,n}$ *car si l'eNB b n'utilise pas la porteuse n alors quel que soit le scénario,*

il ne peut pas l'attribuer à un client
On a aussi : $f_{b,n} = \max_{t \in T} u_{b,t,n}$

n^{CMAX} nombre maximum de clients pouvant utiliser une porteuse

$\delta_{b,n,s}$ taux d'occupation de la porteuse n dans le scénario s pour l'eNB b, Il correspond au rapport du nombre de clients de b utilisant réellement la porteuse n dans le scénario s et du nombre maximum de clients pouvant utiliser la porteuse : $\delta_{b,n,s} = \frac{n^C_{b,n,s}}{n^{CMAX}}$. Sa valeur varie de 0 à 1. Si la porteuse est totalement occupée alors $\delta_{b,n,s} = 1$ et les collisions sont plus fréquentes.

On a la contrainte suivante :

$n^C_{b,n,s} \leq n^{CMAX}$ une eNB ne peut pas attribuer un nombre de clients supérieur à un seuil

3.7.2 Modèle de débit

Pour déterminer le débit fournit par l'eNB à un point test, il faut considérer le SINR. Plus le SINR est important, plus le canal est de bonne qualité et plus une modulation sophistiquée peut être mise en place. Le Tableau 3.3 reprend les différents types de modulation MCS (Modulation and Coding Scheme) et codages ainsi que le seuil de SINR nécessaire pour le mettre en place. On dit qu'un client est en outage si son SINR est inférieur au seuil SINR utilisant le MSC le plus robuste.

Indice : m	*Modulation (MCS) et codage*	*Débit[Bits/s/Hz]*	$SINR_{min}$*[dB]*
0	Outage	0	<0.9
1	QPSK 1/3	0.75	0.9
2	QPSK 1/2	1	2.1
3	QPSK 2/3	1.25	3.8
4	16QAM 1/2	2	7.7
5	16QAM 2/3	2.75	9.8
6	16QAM 5/6	3.25	12.6
7	64QAM 2/3	4	15.0
8	64QAM 5/6	5	18.2

Table 3.3 – Les modulations et codages et les valeurs de SINR requis et débit associé [Schoenen *et al.*, 2008].

On raisonne en bande de fréquence nécessaire pour écouler un débit. On a les notations suivantes :

$w_{t,s}$ bande de fréquence en Hertz nécessaire au point de test t dans le scénario s pour que son eNB serveur b satisfasse son débit souhaité : $w_{t,s} = \frac{r_{t,s}}{r(\gamma_{b,t,n,s})}$. La fonction $r(.)$ est donnée par le Tableau 3.3 où l'argument correspond à la colonne $SINR_{min}$ via l'analyse de Schoenen [Schoenen *et al.*, 2008].

$w_{b,s}$ bande de fréquence en Hertz nécessaire à l'eNB b pour satisfaire les clients de sa cellule dans le scénario s : $w_{b,s} = \sum_{t \in T_b^C} w_{t,s}$

De cette formulation, on peut redéfinir le taux d'occupation de la porteuse n de l'eNB b pour le scénario s par : $\delta_{b,n,s} = min(1, \frac{w_{b,s}^S}{w})$.

On en déduit l'écart entre les bandes de fréquence nécessaires à écouler un débit et celles réellement utilisées par le réseau. Cet écart sera considéré par la suite comme un indicateur fondamental de la qualité du réseau à concevoir.

$\Delta_{b,s}$ écart entre la bande de fréquence nécessaire pour écouler le débit demandé à l'eNB b dans le scénario s et la bande de fréquence utilisable par l'eNB b :

$$\Delta_{b,s} = w_{b,s} - w \tag{3.20}$$

Si $\Delta_{b,s} \leq 0$, alors les clients de l'eNB b sont satisfaits.

Si $\Delta_{b,s} > 0$, ils ne le sont pas.

Un point de test est satisfait si et seulement si il est associé à une eNB qui lui offre suffisamment de bande passante.

Δ_s manque en bande passante exprimé en Hz pour que le réseau écoule tout le trafic demandé au scénario s

$$\Delta_s = \max_{b \in B}(max(0, \Delta_{b,s})) \tag{3.21}$$

3.8 Modèle de Handover et liste de voisines

Pour gérer les handovers, LTE a défini une liste de voisines pour chaque station de base eNB comme en GSM et UMTS. Une voisine est une cellule susceptible d'accueillir un mobile en handover entrant vers elle. Afin qu'un handover se déroule correctement, il est nécessaire que le nombre de eNB voisines soit suffisamment élevé. Selon qu'une eNB nécessite beaucoup de handover ou non, on définit pour chaque eNB un intervalle [min ; max] du nombre de voisines nécessaires. L'intérêt d'une liste d'eNB voisines est par exemple de permettre à un client de changer d'eNB serveuse au cas où le SINR serait inférieur à une valeur minimale souhaitée.

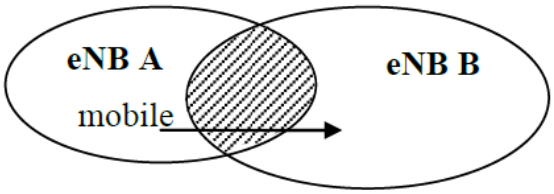


Figure 3.16 – eNB B voisine de l'eNB A car la zone hachurée représente plus de 20% de la cellule A pour une marge de puissance supérieure à un seuil

Une eNB A a comme voisine une eNB B si et seulement si sur un pourcentage donné de sa cellule il est possible d'effectuer un handover vers l'eNB B comme représenté à la Figure 3.16. Pour effectuer un handover de A vers B il est nécessaire que le SINR sur l'eNB B soit supérieur au seuil minimal de connexion et que l'écart de puissance entre les deux eNB soit supérieur à une valeur, appelé marge de handover (Handover Margin, HM). Cette valeur est une variable de décision de premier niveau de notre problème :

$m_{b,b'}$ écart de puissance minimum (Handover Margin, HM) nécessaire au handover de l'eNB b vers l'eNB b'. Le handover sera possible si : $p^R_{b',t} - p^R_{b,t} \geq m_{b,b'}, \forall t$

M ensemble de valeurs possibles de $m_{b,b'}$: $m_{b,b'} \in M$, par exemple :

$$M = \{6, 8, 10, 12\}$$

Les autres notations sont les suivantes :

$h_{b,b'}$ taux de recouvrement minimum en surface de b par b' necessaire nécessaire au handover de l'eNB b vers l'eNB b'

$R_{b,b',s}$ zone de recouvrement de l'eNB b' sur l'eNB b pour le scénario s :

$$R_{b,b',s} = \{t \in T^C_{b,s}, \exists n \in N, p^R_{b',t,n,s}[dBm] - p^R_{b,t,n,s}[dBm] \geq m_{b,b'}$$

$$\text{et } \gamma^{MIN}_{b',t,n,s} \geq \gamma^C\} \tag{3.22}$$

V_b liste des stations voisines de l'eNB b. On a :

$$V_b \subset B \text{ et } V_b = \{b' \in B \backslash b, \forall s \in S, |R_{b,b',s}| \geq h_{b,b'}|T^C_{b,s}|\} \tag{3.23}$$

v^{MIN}_b nombre minimum de stations voisines de l'eNB b. En général $v^{MIN}_b = 6$ c'est-à-dire le nombre de voisines de la première couronne dans un réseau hexagonal

v^{MAX}_b nombre maximum de stations voisines de l'eNB b. En général $v^{MAX}_b = 18$ c'est-à-dire le nombre de voisines de la première et de la seconde couronne dans un réseau hexagonal

Dans un premier temps V_b n'est pas une variable de décision et les matrices $h_{b,b'}$ et $m_{b,b'}$ sont des données d'entrée. Par la suite on pourra faire varier ces matrices et étudier comment évolue les listes de voisines et vérifier si $v^{MIN}_b \leq |V_b| \leq v^{MAX}_b$. Il est difficile d'évaluer a priori si une liste de voisines est bonne ou mauvaise sans étudier l'impact sur les coupures d'appel. Cependant a priori plus le taux de recouvrement est important plus le handover se fera facilement. L'intérêt à terme de déterminer une liste de stations voisines par eNB est de les faire évoluer selon les conditions de trafic. Il peut donc être intéressant de connaître le nombre de handover raté et leur cause (marge de handover trop forte par exemple) pour évaluer la gestion des handovers avec un nouvel indicateur tel que :

$n^{HE}_{b,b'}$ nombre de handover sortant de l'eNB b et entrant à l'eNB b' qui ont échoué

3.9 Formulation du problème à optimiser

L'objectif proposé de l'optimisation robuste est d'affecter les ressources du réseau en minimisant le manque de bande passante Δ_s pour que le réseau écoule tout le trafic demandé. Cette fonction objectif est exprimée en Hertz. Les principales contraintes sont que le nombre de clients non couverts ne dépasse pas un seuil et que les listes de cellules voisines ne soient ni trop courte, ni trop longue.

3.9.1 Variable de décision

Paramétrer le réseau c'est déterminer les valeurs des variables suivantes :

p_b^E puissance totale émise par l'eNB b : $p_b^E \in P_b$

t_b^E tilt électrique affecté à l'eNB b : $t_b^E \in T_b^E$

t_b^M tilt mécanique affecté à l'eNB b : $t_b^M \in T_b^M$

$f_{b,n}$ variable d'allocation des porteuses n à l'eNB b : $f_{b,n} \in \{0;1\}$

$m_{b,b'}$ écart de puissance minimum nécessaire au handover de l'eNB b vers l'eNB b' : $m_{b,b'} \in M$

3.9.2 Formulation robuste

L'algorithme devra déterminer les variables de décision afin de minimiser l'une des formulations robustes suivantes :

La moyenne :

$$\sum_{s \in S} (p_s \ \Delta_s) \tag{3.24}$$

L'écart type :

$$\sum_{s \in S} p_s (\frac{(\sum_{s' \in S} \Delta_{s'})}{n^s} - \Delta_s)^2 \tag{3.25}$$

Le pire cas :

$$\max_{s \in S} (p_s \ \Delta_s) \tag{3.26}$$

La déviation absolue :

$$\max_{s \in S} (p_s \ (\Delta^*_{s'} - \Delta_s)) \tag{3.27}$$

Avec Δ^*_s l'optimum de Δ_s obtenu lorsque l'on a optimisé uniquement sur ce scénario. Cette mesure nécessite donc de résoudre au préalable n^S problèmes.

La déviation relative :

$$\max_{s \in S} (p_s \ \frac{\Delta^*_s - \Delta_s}{\Delta^*_s}) \tag{3.28}$$

Sous les contraintes :

Une eNB utilise une seule configuration de tilt électrique :

$$\forall b \in B \sum_{l \in T_b^E} \delta_{b,l} = 1 \tag{3.29}$$

Une eNB utilise une seule configuration de tilt mécanique :

$$\forall b \in B \sum_{m \in T_b^M} \lambda_{b,m} = 1 \tag{3.30}$$

Une eNB utilise une seule configuration de puissance :

$$\forall b \in B, \sum_{k \in P_b} \alpha_{b,k} = 1 \tag{3.31}$$

Une eNB utilise obligatoirement une et une seule porteuse :

$$\forall b \in B, \forall n \in N \sum_{b \in B} f_{b,n} = 1 \tag{3.32}$$

Un point test est associé à au plus une eNB :

$$\forall t \in T, \sum_{b \in B} u_{b,t,n} \leq 1 \tag{3.33}$$

Le nombre de clients non couverts ne dépasse pas un seuil :

$$\forall s \in S, n_{0,s}^S \leq n_0^C \tag{3.34}$$

Le nombre de cellules voisines minimum et maximum :

$$\forall b \in B, v_b^{MIN} \leq |V_b| \leq v_b^{MAX} \tag{3.35}$$

Le niveau minimum de marge de handover :

$$\forall b, b' \in B, m_{b,b'} \geq 6 \tag{3.36}$$

3.10 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons présenté la formalisation complète du problème que nous avons traité. Cette formalisation s'appuie sur des modèles de composantes physiques du réseau cellulaire et sur des modèles décisionnels pour paramétrer le réseau. Les modèles décisionnels ont pour objet de définir le problème d'optimisation combinatoire à résoudre alors que les modèles de composantes physique ont pour objet de simuler certaines fonctions du réseau telles que la simulation de la demande en trafic ou la simulation des interférences par exemple.

Dans une première section nous avons proposé une méthode de gestion de la robustesse. Les données d'entrée issues des remontées du réseau sont introduites dans un modèle puis sont soumises à un algorithme d'optimisation. Celui-ci génère une solution au problème d'optimisation puis la solution est soumise à une analyse de sensibilité par rapport à l'incertitude sur les données d'entrée, ensuite une décision d'implémentation ou pas de la solution est prise. L'incertitude est analysée dans le contexte de scénarios de trafic non pris en compte pendant la phase d'optimisation, il s'agit typiquement d'une estimation du trafic à venir.

La section suivante introduit le processus global d'optimisation en ligne pour le SON. Les modèles de composantes physiques sont positionnés les uns par rapport aux autres pour voir à quel moment ils interviennent dans les calculs, puis ces modèles sont décrit un à un dans les autres sections. Pour le modèle de trafic, nous avons opté pour une formulation discrète basée sur la notion de point de test ; à chaque point de test est associée une demande en volume de trafic par service. Pour le modèle de paramétrage des stations de base, nous avons décrit les variables associées aux eNB, aux puissances d'émission, à l'azimut et aux tilts, au diagramme de rayonnement des antennes et aux fréquences d'émission. Vient ensuite la description du modèle de propagation des ondes ; nous avons repris le modèle général d'Okumura-Hata car il est simple à utiliser et n'est pas trop gourmand en temps de calcul.

Le modèle le plus complexe est le modèle de débit qui est décrit en section 3.7 . Il intègre les sorties des modèles précédents à savoir la demande en trafic, les paramètres des stations de base et la propagation des ondes radio. Le modèle de débit fait la mesure

de la qualité radio downlink perçue par les UE à travers le SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*). Le SINR est calculé en pire cas dans un contexte de trafic saturé i.e. les UE présents sont tous actifs en même temps au scénario de trafic considéré. Ceci présente comme avantage de ne pas nécessiter une simulation (trop longue à calculer) mais comme inconvénient de considérer un pire cas de fonctionnement du réseau en mode dit saturé. En associant le SINR aux tables de correspondance en débit, on peut calculer le débit offert à chaque UE et donc le débit offert à chaque station du réseau. Pour finir, nous avons aussi introduit un modèle pour définir la liste des voisines mais nous n'utiliserons pas celui-ci dans les chapitres suivants.

Ce chapitre se termine par la description de la formulation globale du problème à optimiser sous une forme robuste. Tous les éléments précédents y sont repris en distinguant les variables de décision, les objectifs et les contraintes du problème. Ce modèle sera utilisé par les algorithmes d'optimisation présentés en chapitres suivants.

Chapitre 4

Conception et tests de méthodes d'optimisation

Dans ce chapitre, nous rappelons tout d'abord les hypothèses de travail pour l'optimisation : la modélisation des interférences, le réseau à optimiser et ses paramètres, les principes de motif de fréquences et le modèle mathématique. Ensuite nous présentons l'optimisation des trois paramètres antennaires, les fréquences, les tilts et les puissances d'émission, avec un algorithme glouton, avec et sans fonction objectif robuste. Les résultats obtenus sont le point de départ d'une étape de conception et test de méthodes de Recherche Tabou basées sur la notion de voisinage. L'optimisation robuste émerge comme une méthode alternative efficace pour traiter notre problème où des données incertaines sont modélisées par un ensemble de scénarios. Les tests sont d'abord menés sur un nombre restreint de trois scénarios puis sur l'ensemble de la journée.

Sommaire

4.1 Hypothèses de travail 98
4.2 Optimisation avec et sans fonction robuste 105
4.3 Recherche Tabou robuste pour l'allocation de fréquence 113
4.4 Comparaison des méthodes TS et TMV sur l'optimisation robuste journalière 123
4.5 Synthèse 131

4.1 Hypothèses de travail

Nous rappelons dans cette section les principales hypothèses retenues pour l'étude présentée. L'ensemble des hypothèses, notamment sur les modèles (trafic, propagation, SINR, optimisation), les paramètres et les données d'entrée, ont été fournies dans le chapitre précédent.

4.1.1 Les hypothèses sur les interférences

Dans cette étude, nous ne considérons que la transmission descendante de l'eNB à l'UE. Nous illustrons en premier lieu les schémas d'interférence à l'aide d'un modèle théorique à sept cellules hexagonales comme le montre la Figure 4.1. Le centre de la cellule est appelé site, sur chaque site sont implantées trois antennes directionnelles. Un secteur est la zone couverte par une antenne. La Figure 4.1.a montre le schéma de réutilisation des fréquences 1x3x1, où les trois secteurs de la même cellule utilisent toute la bande passante (motif 1).

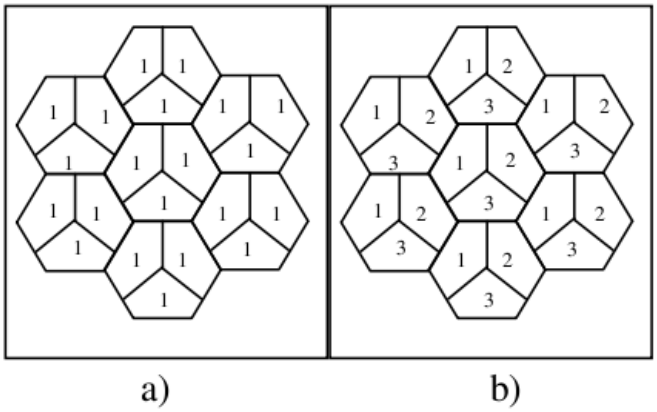


FIGURE 4.1 – Modèle de cellules hexagonales. a) motif 1x3x1 b) motif 1x3x3

La Figure 4.1.b montre le schéma 1x3x3 (motif 3), les trois secteurs utilisent un sous-ensemble de fréquences de telle sorte qu'il n'y ait pas d'interférences au niveau des secteurs appartenant à la même cellule, mais aussi, que les deux antennes opposées des sites adjacents n'émettent pas sur la même fréquence. Le schéma 1x3x3 a besoin d'un plan de fréquences, mais devrait éviter les interférences lorsque la charge du réseau devient trop élevée pour appliquer le schéma 1x3x1.

Les caractéristiques du modèle de calcul sont les suivantes :

1. Les interférences intra-secteur sont évitées grâce à l'utilisation de la technique de transmission descendante OFDMA. En LTE, l'orthogonalité entre les sous-porteuses assure que les interférences dans un secteur peuvent être ignorées.

2. L'élément de base dans les ressources OFDMA est le *Physical Ressource Block*(PRB), qui couvre à la fois les dimensions fréquence et temps. Dans cette étude, nous ne prenons pas en compte les PRB pour estimer les interférences inter-cellules ; nous considérons uniquement le schéma de réutilisation des fréquences en sous-bandes. Deux cellules adjacentes sont dites interférentes si elles utilisent la même sous-bande pour transmettre des données. Cette estimation permet un calcul rapide du SINR sans simulateur.
3. Des scénarios de trafic sont utilisés pour représenter la répartition et l'évolution de la charge sur le réseau. Le modèle d'interférence est basé sur le SINR qui dépend, non seulement des paramètres de l'antenne (fréquence, puissance, tilt, azimut...) mais aussi de la charge en trafic à tout moment de la journée. Nous considérons qu'une charge présente est en mode saturé c'est-à-dire que tous les UE (User Equipment) présents sont actifs.

La formulation du modèle d'interférence est la suivante :
Soit,

$B = \{1, ..., n^B\}$	l'ensemble de n^B stations de base du réseau
$T = \{1, ..., n^{TP}\}$	l'ensemble des points tests de la zone étudiée
$C_{t,s}$	le nombre d'UE localisés sur le point test t dans le scenario s

Le modèle d'interférence (SINR) est défini par :

$$\gamma_{b,t,s}^{MIN} = \frac{p_{b,t}^R f_b}{\sum\limits_{b' \neq b, f_b = f_{b'}} p_{b',t}^R f_{b'} \delta_{b,s} \delta_{b',s} + n_0 w} \tag{4.1}$$

Où,

$\gamma_{b,t,s}^{MIN}$	est le SINR reçu au point test t associé à l'eNB b dans le scénario s
f_b et $f_{b'}$	sont les fréquences respectives d'émission de l'eNB b et b'
$\delta_{b,s}$ et $\delta_{b',s}$	sont les taux d'occupation respectifs des stations b et b' dans le scénario s

La station de base b est dite surchargée dans le scénario s si le taux d'occupation qui lui correspond $\delta_{b,s}$ est supérieur ou égal à 1.

w	représente la bande passante totale utilisée par l'eNB b
n_0	est le bruit thermal

4.1.2 Hypothèses sur le réseau

Le réseau considéré pour cette étude est le réseau Orange du Territoire de Belfort. La carte de la zone est montrée sur la Figure 4.2. C'est une zone de 40km par 20km avec une

population d'environ 200 000 personnes comprenant les résidents et les personnes venant de l'extérieur du territoire pour travailler. Pour les calculs de couverture, d'interférence et de charge, la zone est maillée en grille régulière.

Chaque maille de 25x25 mètres contient en son centre un *point test* utilisé pour tous les calculs. En raison de la petite taille des mailles, on suppose que les conditions de propagation du signal sont identiques pour toute une maille et ramené au niveau de son point test ; cela signifie que tous les UE situés à l'intérieur d'une maille ont le même signal et le même SINR. Un point test est caractérisé par un nombre d'UE et une catégorie de service requis pour chaque UE (voix, données...).

Concernant la charge, nous introduisons le concept de *scénario de trafic*. Un scénario est une distribution de la demande en trafic à un moment donné de la journée ; la demande est donc définie en chaque point test de la zone. Plusieurs scénarios nous permettent d'analyser différentes situations vis-à-vis des performances du réseau.

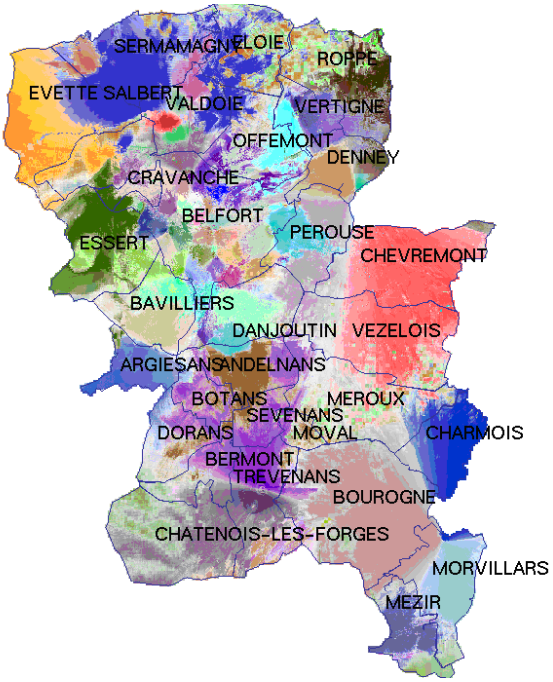


FIGURE 4.2 – Couverture par antenne dans le Territoire de Belfort.

Les données de trafic utilisées dans cette étude proviennent du réseau réel GSM/UMTS de l'opérateur Orange. Les tests ont été faits en considérant plusieurs scénarios différents qui proviennent d'une journée de trafic. La Figure 4.3 est un exemple avec 3 scénarios choisis à différents moments de la journée : un scénario de faible trafic à 8h du matin avec 482 clients, un scénario de trafic moyen à 15h avec 1019 clients et un scénario de trafic assez important à 18h avec 1471 clients. On considère que tous les utilisateurs accèdent au réseau au même temps (pire cas).

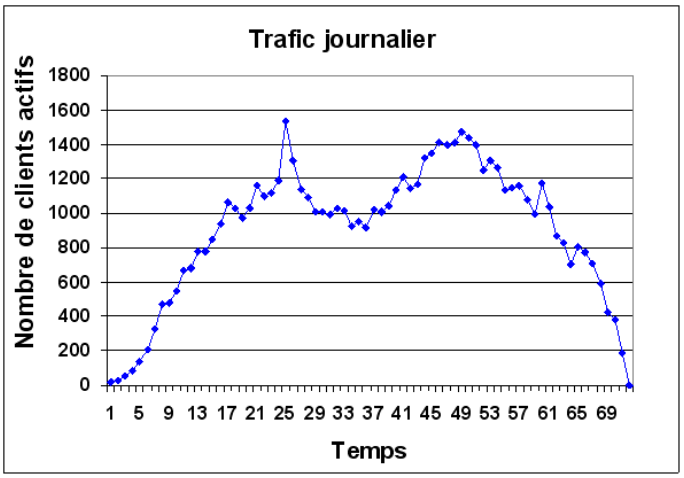


Figure 4.3 – Exemple d'évolution du trafic au cours d'une journée.

La Figure 4.4 montre la distribution du trafic sur le territoire à 18h. Le trafic est représenté par un dégradé de couleurs, de jaune à rouge pour passer du trafic faible au trafic élevé.

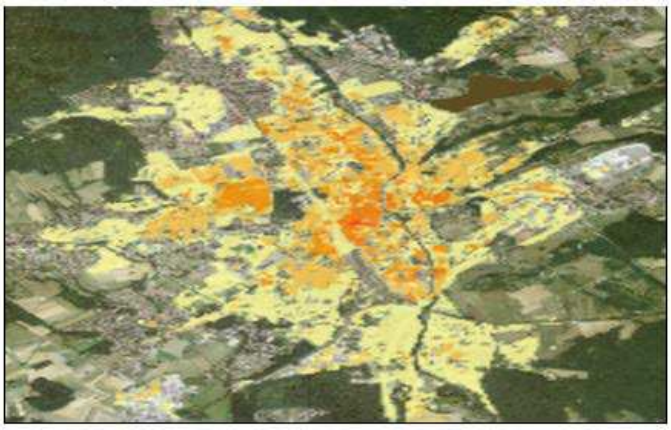


Figure 4.4 – Exemple de concentration de trafic à 18h.

4.1.3 Paramètres de simulation

Les principaux paramètres que nous avons utilisé sont ceux proposés par le 3GPP pour LTE comme indiqué dans le Tableau 4.1.

Paramètres	***Valeurs***
Réseau	36 sites and 88 secteurs
Fréquence	1800 Mhz
Bande passante	20 Mhz
Motif	1x3x1 et 1x3x3
Hauteur des eNB	[17m, 46m]
Hauteur des UE	1.5 m
Modèle de propagation	Modèle Hata
Puissance des eNB	[39 dBm, 46 dBm]
Valeurs du tilt mécanique	[0°, 6°]
Valeurs du tilt électrique	[0°, 10°]
Valeurs de l'azimut	[0°, 360°]
HPBW horizontal	+70°
HPBW vertical	+10°
Valeurs gains d'antenne	[14dBi , 18.9dBi]
Distribution du trafic	A partir d'un réseau GSM/UMTS existant

TABLE 4.1 – Paramètres du réseau LTE sur le lien descendant.

4.1.4 Evaluation des motifs de réutilisation de fréquences

Nous présentons la méthodologie d'évaluation du SINR dans le cas des motifs 1x3x1 et 1x3x3 en tenant compte des données de trafic du réseau. l'idée consiste à injecter des clients en proportion du réseau GSM/UMTS existant et d'évaluer pour chacun des motifs, le nombre de clients non couverts dans l'ensemble du réseau. Nous rappelons que le motif 1x3x1 affecte la bande de fréquences totale disponible à tous les secteurs du réseau, tandis que le motifs 1x3x3 subdivise celle-ci en 3 sous-groupes de même taille et affecte les 3 sous-bandes au seins des secteurs co-site. Avec ce procédé, les sous-bandes sont affectées en fonction de l'azimut des antennes (données d'entrée) associées au secteurs correspondants de telle sorte à éviter d'avoir 2 antennes opposées qui émettent sur la même fréquence et s'interfèrent mutuellement. L'azimut de chaque antenne est analysé individuellement : si l'azimut est compris dans l'intervalle [0°,120°] la sous-bande 1 est affectée au secteur, dans l'intervalle [120°,240°] la sous-bande 2 est affectée au secteur et la sous-bande 3 est affectée aux secteurs dans l'intervalle [240°,360°]. L'optimisation n'est pas appliquée à ce niveau d'étude, on souhaite juste avoir une comparaison des deux schémas vis-à-vis de la couverture.

Les UE sont associés aux eNB en fonction de la qualité du SINR en DL (DownLink). Un point test, et tous les UE qu'il contient, est associé à l'eNB qui présente le meilleur SINR ; l'ensemble des points tests associés à l'eNB forme le secteur de l'eNB.

La procédure suivie pour l'association consiste en deux étapes, dont la deuxième qui est répétée plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'une configuration stable du réseau. L'algorithme est développé en C++. L'exécution du programme est répétée une dizaine de fois pour vérifier la stabilité des résultats,

Dans un premier temps, le point test est associé à l'eNB sur la base du meilleur RSRP (Reference Signal Received Power). Ce calcul définit la couverture initiale pour chaque station. A partir de là, le nombre d'UE et la demande en trafic par station sont connus. Nous calculons ensuite le taux d'occupation de chaque station, puis le SINR qui est lié au RSRQ (Reference Signal Receive Quality).

Dans un deuxième temps, les points tests sont à nouveau associés aux eNB présentant cette fois le meilleur SINR. Nous calculons une deuxième fois le taux d'occupation pour ré-estimer le SINR selon le nouveau taux d'occupation. Puis on boucle sur l'association des points test aux eNB sur la base du SINR.

Nous avons comparé les deux motifs de réutilisation 1x3x1 et 1x3x3. Le nombre d'UE en outage (non couverts) est utilisé comme critère d'évaluation. Le SINR minimum requis pour établir une communication est fixé à 0,9 dB, soit la cible est :

$$\gamma_{b,t,s}^{MIN} \geq 0.9dB \tag{4.2}$$

La Figure 4.5 présente le nombre de clients en outage obtenus avec les deux modèles de réutilisation de fréquence. Le nombre de clients non couverts est plus important en 1x3x1 qu'en 1x3x3 pour l'ensemble des scénarios de trafic. Cependant la différence s'accentue avec l'augmentation de la demande.

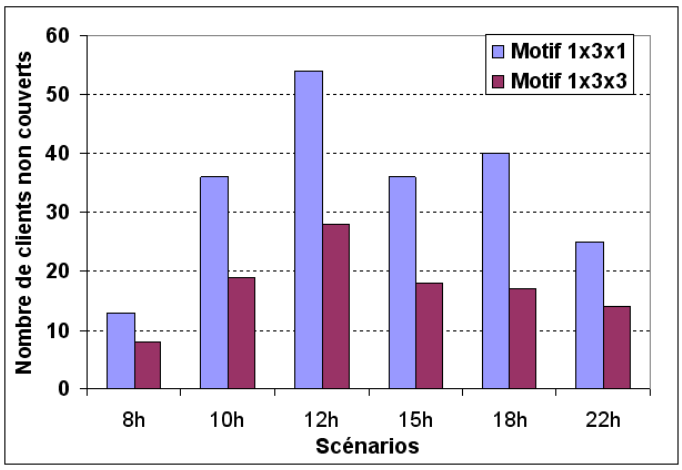


Figure 4.5 – Evaluation des motifs de réutilisation 1x3x1 et 1x3x3.

L'utilisation de la totalité de la bande passante dans le modèle 1x3x1 génère d'importantes interférences inter-cellules dues à la réutilisation des mêmes ressources au sein des

secteurs voisins, ce qui engendre, une dégradation au niveau de la qualité du SINR.

4.1.5 Problème à optimiser

Dans ce travail, nous considérons pour l'optimisation trois paramètres de l'antenne : la fréquence d'émission, l'inclinaison verticale de l'antenne (tilt) et la puissance d'émission. L'objectif de l'optimisation est de minimiser le nombre d'UE non couverts au niveau de service requis qui dépend du nombre de clients actifs sur le réseau et du service demandé par chacun des clients, dans la zone de service considérée. Plusieurs scénarios de la demande issue d'une journée de trafic sont utilisés. La formulation retenue pour la suite de ce document est :

Variables de décision (paramètres antennaires) $f_{b,n}$ variable d'allocation de la fréquence n à l'eNB b. $f_{b,n} \in \{0,1\}$

$$f_{b,n} = \begin{cases} 1 & \text{si la porteuse } n \text{ est affectée à l'eNB } b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{4.3}$$

t_b l'orientation verticale (tilt) de l'eNB b. $t_b \in T_b$, où T_b est l'ensemble des valeurs possibles du tilt en degré

p_b la puissance d'émission de l'eNB b. $p_b \in P_b$, où P_b est l'ensemble des valeurs possibles de la puissance en dBm

Contraintes :

C1) Le nombre de voisines de b est encadré.

$$\forall b \in B, v_b^{MIN} \leq |V_b| \leq v_b^{MAX} \tag{4.4}$$

C2) Un point test est associé à au plus un eNB.

$$\forall t \in T, \sum_{b \in B} u_{b,t} \leq 1 \tag{4.5}$$

Où,

$$u_{b,t} = \begin{cases} 1 & \text{si le point test } t \text{ est associé à l'eNB } b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{4.6}$$

C3) Un eNB utilise une et une seule porteuse n.

$$\forall b \in B, \sum_{n \in N} f_{b,n} = 1 \tag{4.7}$$

Fonctions objectifs : Nous considérons deux fonctions à minimiser : une fonction qui mesure le nombre d'UE non couverts sur un scénario de trafic unique et une fonction dite *robuste* qui mesure le nombre d'UE non couverts sur plusieurs scénarios de trafic simultanément sans agglomérer les données d'entrée. Ces deux fonctions seront comparées pour montrer l'intérêt de l'optimisation robuste pour le problème considéré.

Soit :

$n^C_{0,s}$ le nombre de clients non couverts dans le scénario s

Fonction non robuste :

$$n^C_{0,s} = \sum_{t \in T^C_0} n^C_{t,s} \tag{4.8}$$

Où $n^C_{t,s}$ est le nombre de clients non couverts au point test t pour le scenario s.

Fonction robuste :

$$f^{ROB} = \sum_{s \in S} n^C_{0,s} \tag{4.9}$$

Où f^{ROB} est la somme des clients non couverts sur tous les scénarios d'entrée.

4.2 Optimisation avec et sans fonction robuste

Afin de comparer l'optimisation avec et sans fonction de robustesse, dans cette section nous présentons différents tests avec un algorithme glouton capable de trouver rapidement une bonne solution. L'objectif n'est pas de trouver la meilleure solution mais de réduire le taux d'UE non couverts à partir d'une solution initiale de façon itérative en cherchant à chaque étape une amélioration locale dans le voisinage de la solution courante. L'algorithme est testé avec plusieurs variantes pour chaque paramètre étudié : l'allocation des fréquences, des tilts et des puissances d'émission. Les paramètres sont testés séparément pour voir l'impact de chacun sur la couverture globale du réseau. Les scénarios de trafic retenus pour ce travail sont 8h, 15h et 18h étant donnée leur distribution différente. Ils seront optimisés séparément sans la fonction robuste (Equation 4.8) ou simultanément avec la fonction robuste (Equation 4.9).

4.2.1 Optimisation des fréquences

Il peut être prouvé que le problème d'allocation de fréquences est NP-difficile car il s'agit d'un problème de coloration de graphe. Pour ce type de problèmes, garantir une solution optimale nécessite, dans le pire des cas, une énumération de toutes les configurations possibles. Le nombre de possibilités est énorme ; dans notre cas, pour 36 cellules, 88 antennes et 3 groupes de fréquences (schéma 1x3x3), le nombre de possibilités est de $6^{36} = 1,03 \times 10^{28}$. L'algorithme glouton cherche une configuration des fréquences sur les sites qui améliore la couverture du réseau. Pour chaque site étudié, nous évaluons les 6 ($3\,! = 6$) possibilités. L'algorithme évalue 6x88 permutations à chaque cycle. Si une permutation de fréquence améliore la fonction d'évaluation de la solution courante, l'algorithme conserve la modification. A noter que pour le cas robuste, la configuration de la fréquence considère tous les scénarios en même temps. Cela signifie que pour chaque plan de fréquence du réseau, nous évaluons les utilisateurs non couverts dans les trois scénarios.

Algorithm 1: Algorithme glouton d'optimisation des fréquences

Données :

Ensemble B de n^B stations de base.

Ensemble T de n^{TP} points tests.

Ensemble S de scénarios : $s_1 = 8h$, $s_2 = 15h$ et $s_3 = 18h$.

Schéma de réutilisation de fréquences 1x3x3 (3 groupes de fréquences à allouer aux stations de base)

Variables :

Allocation de fréquences aux stations

Fonctions fitness :

$Fitness(F)$ = Le nombre de clients non couverts par le plan de fréquence F

Dans s pour l'optimisation non robuste (Equation 4.8)

Dans s_1, s_2 et s_3 pour l'optimisation robuste (Equation 4.9)

Initialisation :

Initialiser F // F est le plan de fréquence initial

$F^* = F*$// F^* est le plan de fréquence initial

début

  répéter

    improve=False

    pour chaque *site b du réseau //Tester pour tous les sites*

    faire

      pour chaque *permutation* $j = 1 : 6$ *//Tester toutes les permutations de fréquences en b*

      faire

        Générer un nouveau plan de fréquence F à partir de F^*

        si $Fitness(F) < Fitness(F^*)$*//Evaluation de la solution courante*

        alors

          $F_* = F$// *Retenir la meilleure solution du plan de fréquence*

          improve =True

        fin

      fin

    fin

  jusqu'à *improve=False//Critère d'arrêt s'il n'y a pas d'amélioration*;

fin

L'algorithme glouton est exécuté plusieurs fois avec des conditions variables : sans ou avec la fonction robuste, avec plan de fréquences initial déterministe ou stochastique, avec choix de sites selon l'ordre d'apparition dans le fichier d'entrée ou au hasard pour tester la

permutation de fréquence sur les sites. Lorsque les sites sont pris au hasard l'algorithme est arrêté au bout de 20 mn. Dans le cas déterministe l'algorithme s'arrête si le dernier cycle n'apporte aucune amélioration. Les tilts et les puissances sont fixés aux valeurs en exploitation dans le réseau. Nous avons donc trois cas dont les résultats sont présentés dans les Figures 4.6, 4.7 et 4.8

- Test 1 (Figure 4.6) : plan de fréquences initial déterministe et sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée.
- Test 2 (Figure 4.7) : plan de fréquences initial déterministe et sites choisis au hasard.
- Test 3 (Figure 4.8) : plan de fréquence initial aléatoire et sites choisis au hasard.

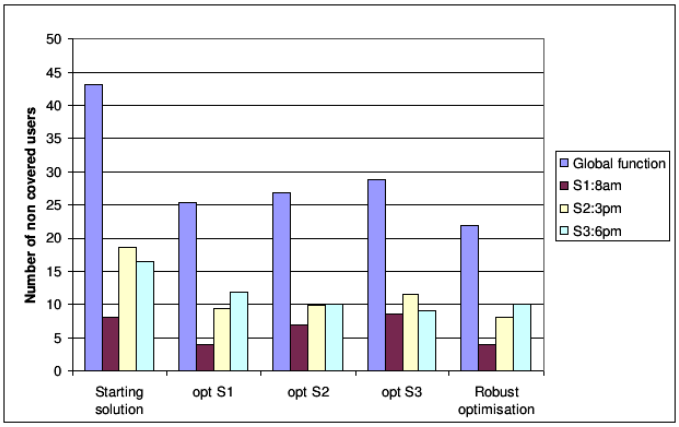


FIGURE 4.6 – Plan de fréquences initial déterministe et sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée.

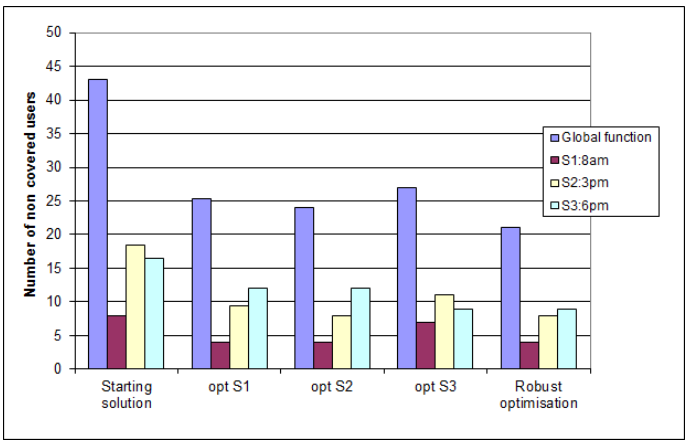


FIGURE 4.7 – Plan de fréquences initial déterministe et sites choisis au hasard.

Pour les 3 figures, l'axe des abscisses porte de gauche à droite la solution de départ, l'optimisation des scénarios s_1, s_2 et s_3 séparément, et l'optimisation robuste sur s_1, s_2 et s_3 ensemble. L'axe des ordonnées représente le nombre total de clients non couverts et le nombre de clients non couverts pour s_1, s_2 et s_3.

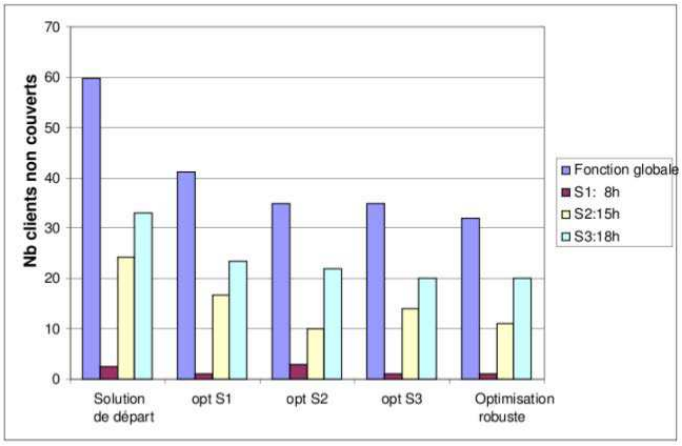


FIGURE 4.8 – Plan de fréquences initial aléatoire et sites choisis au hasard.

Les solutions avec plan de fréquences initial déterministes (Figures 4.6 et 4.7) sont très proches. Dans les trois cas, l'optimisation avec fonction robuste trouve une solution de compromis qui est globalement meilleure et qui est aussi la meilleure individuellement pour 2 scénarios sur 3. Notons que pour s_1 et s_3 les meilleurs résultats sont obtenus avec une optimisation non robuste dédiée à chacun d'eux mais ce n'est pas le cas pour s_2. Ce phénomène s'explique par l'utilisation de l'algorithme glouton qui ne donne aucune garantie sur la qualité des solutions trouvées à l'issue de l'exécution. Globalement les résultats sont cohérents et montre une certaine efficacité de la fonction robuste.

4.2.2 Optimisation des tilts

Le même algorithme est mis en œuvre afin d'optimiser le tilt i.e. l'inclinaison verticale des antennes. L'algorithme cherche une valeur entière pour l'orientation verticale des antennes dans l'intervalle $[0^\circ, 12^\circ]$. Pour 36 cellules, 88 antennes et 13 valeurs possibles de tilt, nous avons $13^{88} = 1.06 \times 10^{98}$ possibilités. Tout comme pour les fréquences, il est impossible de garantir la solution optimale, surtout avec un algorithme glouton.
L'algorithme glouton est exécuté plusieurs fois avec des conditions variables : sans ou avec la fonction robuste, avec choix de sites selon l'ordre d'apparition dans le fichier d'entrée ou au hasard pour tester les tilts sur les sites. Les tilts initiaux sont ceux du réseau GSM opérationnel. Les puissances affectées sont celles du réseau en exploitation, tandis que les fréquences sont affectées d'une manière déterministe en utilisant le motif 1x3x3 vu précédemment. Il n'y a donc que deux variantes de test selon le mode de choix des sites dont les résultats sont en Figures 4.9 et 4.10.

- Test 1 (Figure 4.9) : tilts initiaux déterministes et sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée.
- Test 2 (Figure 4.10) : tilts initiaux déterministes et sites choisis au hasard.

Algorithm 2: Algorithme glouton d'optimisation des tilts

Données :

Ensemble B de n^B stations de base.

Ensemble T de n^{TP} points tests.

Ensemble S de scénarios : $s_1 = 8h$, $s_2 = 15h$ et $s_3 = 18h$.

Ensemble T de 13 valeurs discrètes des tilts à affecter aux stations

Variables :

Configuration des tilts des stations

Fonctions fitness :

$Fitness(T)$ = Le nombre de clients non couverts qui correspond à la configuration T des tilts

Dans s pour l'optimisation non robuste (Equation 4.8)

Dans s_1, s_2 et s_3 pour l'optimisation robuste (Equation 4.9)

Initialisation :

Initialiser T // T est la configuration initiale des tilts

$T^* = T$// T^* est la meilleure configuration courante des tilts

début

  répéter

    improve=False

    pour chaque *site b du réseau //Tester pour tous les sites*

    faire

      pour chaque *configuration* $j = 0 : 12$ *//Tester toutes les configurations possibles des tilts*

      faire

        Générer une nouvelle configuration des tilts T à partir de T^*

        si $Fitness(T) < Fitness(T^*)$*//Evaluation de la solution courante*

        alors

          $T^* = T$// *Retenir la meilleure solution parmi l'ensemble des configurations*

          improve =True

        fin

      fin

    fin

  jusqu'à *improve=False//Critère d'arrêt s'il n'y a pas d'amélioration*;

fin

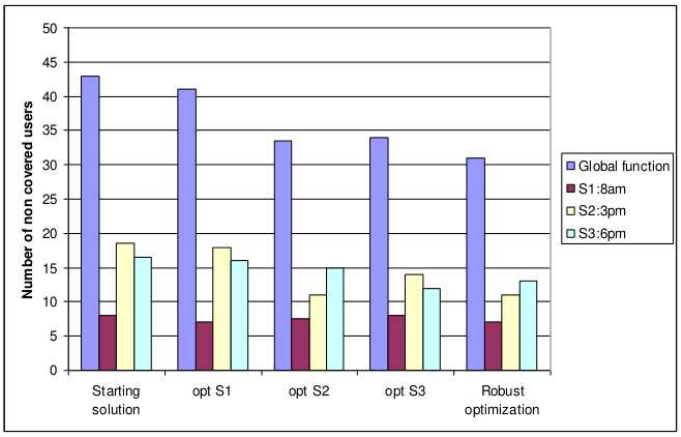


Figure 4.9 – Allocation des tilts initiaux déterministe et sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée.

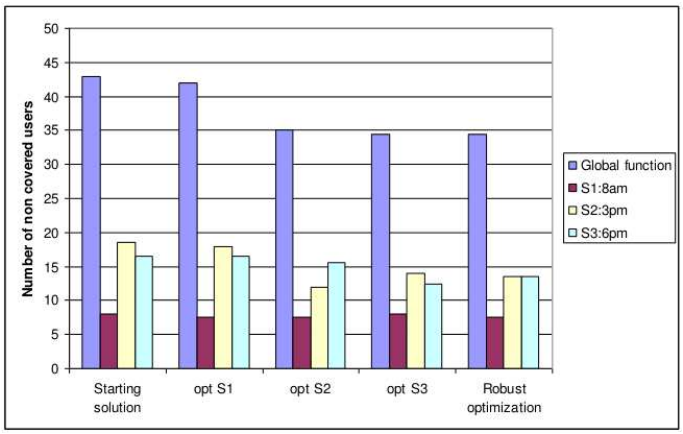


Figure 4.10 – Allocation des tilts initiaux déterministes et sites choisis au hasard.

Dans la première variante de l'algorithme, les sites sont traités dans l'ordre du fichier d'entrée et 13×88 configurations possibles sont testées à chaque cycle. Si la nouvelle configuration du tilt améliore la fonction d'évaluation de la solution courante, le nouveau tilt est conservé et on passe au site suivant. L'algorithme s'arrête si le dernier cycle n'apporte pas d'amélioration. Dans la variante où les sites sont traités de façon aléatoire, le critère d'arrêt est la durée d'exécution (20 mn). La première variante de l'algorithme est présentée ci- dessous. Les résultats sont présentés de la même façon que pour l'allocation de fréquences, de gauche à droite : la solution de départ, l'optimisation des scénarios s_1, s_2 et s_3 séparément et l'optimisation robuste. En Figure 4.9, l'évaluation du point de départ de l'algorithme donne les valeurs suivantes (43, 8, 18 et 17) qui représente le nombre de clients non couverts dans la fonction globale (Equation 4.9) ainsi que la fonction d'évaluation des différents scénarios (Equation 4.8) et ceci pour chaque scénario. L'optimisation de chaque scénario offre la meilleure valeur de la fitness lorsque chaque scénario est abordé séparé-

ment (7, 11, 12), respectivement, mais l'évaluation globale n'est pas la meilleure. Avec l'optimisation robuste, nous pouvons facilement constater que la configuration trouvée par l'algorithme est un bon compromis (fitness = 31) entre tous les scénarios, par rapport à la solution de départ et les optimisations non robustes (43, 41, 33 et 34). Les résultats sont cohérents et confirme que l'optimisation robuste peut améliorer la couverture du réseau.

4.2.3 Optimisation des puissances

D'autres tests de configurations ont été réalisés pour la puissance d'émission des antennes. Nous cherchons à trouver la puissance à affecter aux antennes parmi une gamme de 11 valeurs possibles au pas de 1dBm dans l'intervalle [36 dBm, 46 dBm]. Les puissances affectées à la solution initiale de l'algorithme sont celles en exploitation dans le réseau GSM/UMTS utilisé, de même que les valeurs de tilts. Les fréquences initiales sont affectées de manière déterministe selon les valeurs des azimuts (voir 3.2.5). Les deux figures ci-dessous indiquent les résultats obtenus selon le même protocole de test que pour les deux paramètres précédents. Comme dans le cas des fréquences et des tilts, l'optimisation robuste des puissances offre une solution qui est un bon compromis entre les trois scénarios de trafic (Figure 4.11 et 4.12). L'ordre de traitement des sites n'a pas vraiment d'importance sur ces tests. Ceci confirme les résultats déjà obtenues pour les deux autres paramètres.

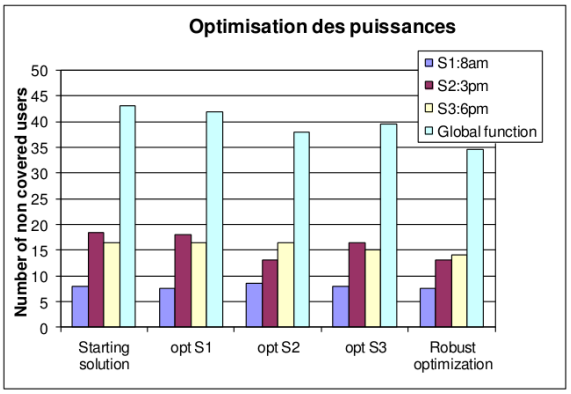


FIGURE 4.11 – Allocation des puissances initiales déterministes et sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée.

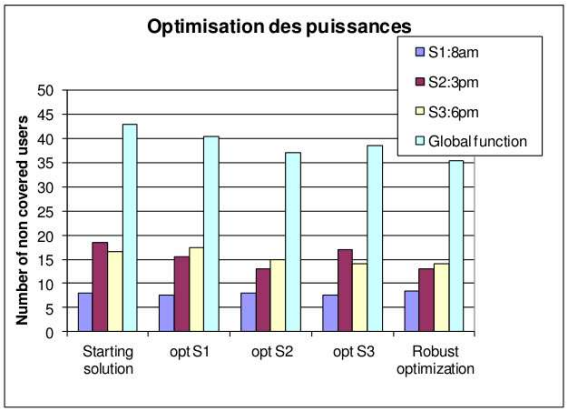


Figure 4.12 – Allocation des puissances initiales déterministes et sites choisis au hasard.

4.2.4 Synthèse des performances

Sur l'ensemble des tests présentés sur ce réseau, l'optimisation robuste donne toujours les meilleurs résultats quel que soit le paramètre à optimiser. Par ailleurs l'optimisation des fréquences donne toujours de meilleurs résultats que l'optimisation du tilt ou de la puissance. Enfin l'optimisation du tilt est toujours légèrement plus efficace que l'optimisation des puissances que ce soit en mode robuste ou pas et ce quel que soit le scénario optimisé, s_1, s_2 ou s_3.

Dans la suite du document, nous retenons la méthode d'optimisation avec la fonction robuste avec pour paramètre unique l'allocation des fréquences, les tilts et puissances étant affectés aux valeurs du réseau réel, et nous proposons de travailler sur la conception d'une Recherche Tabou.

4.3 Recherche Tabou robuste pour l'allocation de fréquence

Compte tenu de la complexité du problème, nous utilisons dorénavant la méthode de Recherche Tabou qui permet de proposer des solutions non optimales mais dont le potentiel de trouver rapidement des solutions de qualité a été prouvé sur plusieurs problèmes combinatoires difficiles. Dans cette partie, nous utilisons la méthode Tabou pour résoudre le problème d'allocation des fréquences. Le choix de ce paramètre est motivé par le fait que les tests précédents ont montré que ce paramètre domine le tilt et la puissance d'émission en termes d'impact sur la qualité du réseau basé sur le calcul du SINR et donc sur la couverture. Trois variantes de la méthode Tabou sont proposées : algorithme Tabou Simple (TS), algorithme Tabou dégradée Dernier Voisin (TDV) et algorithme Tabou dégradée Meilleur Voisin (TMV). Pour chacun des cas, une série de tests sera présentée.

4.3.1 Algorithme Tabou simple (TS)

Les étapes de l'algorithmes sont les suivantes :

Algorithm 3: Algorithme d'optimisation Tabou Simple sur les fréquences

Soit,

S : ensemble des sites.

R : ensemble des réseaux.

f : la fitness robuste.

Début :

1. Déployer le réseau initial r (association point test/eNB au meilleur SINR) avec les données de tilts et de puissances en exploitation, les fréquences initiales sont allouées différemment selon les tests, et $r^* = r$
2. Prendre un site au hasard, soit s
3. Enumérer les configurations de fréquence, affecter la meilleure à s et mettre r à jour
4. Mettre le site s dans la liste tabou
5. Identifier $V(s)$, les sites voisins de s. Les sites voisins sont les 5 sites les plus proches géographiquement du site s sur la base de leur distance en coordonnées polaires, et on retire de cette liste les voisins tabous. Le cardinal de $V(s)$ est donc entre 0 et 5. Le choix de 5 sites est dû au temps de calcul de cette opération et au fait que dans un réseau théorique on prévoit au maximum 6 voisins par site, 5 au maximum est donc suffisant.
6. Enumérer les configurations de fréquence de s' dans $V(s)$, affecter la meilleure à s'
7. $f' < f$?
   (a) Si oui, alors $s = s'$, ajouter s' à la liste tabou, mettre r à jour, $r^* = r$, et aller en 5
   (b) Sinon, choisir aléatoirement un site non tabou $s' \notin V(s)$, soit dans $S \backslash V(s)$ (l'algorithme change de zone d'exploration), puis $s = s'$ et aller en 3

Condition d'arrêt : le temps d'exécution

r^* est la meilleure configuration trouvée du réseau

Fin

Deux tests ont été réalisés selon l'allocation des fréquences initiales avec les conditions ci- dessous :

1. Trois scénarios de trafic (8h, 15h, 18h)

2. Fréquence de départ : déterministe et aléatoire
3. Algorithme de recherche tabou sur les fréquences, avec choix des sites par voisinage géographique.
4. Optimisation robuste avec comme critère de minimiser le nombre de clients avec un SINR insuffisant ($SINR < 0.9dB$)
5. Temps d'exécution = 1h
6. Durée tabou dans l'intervalle $[3, 9]$ calculée par $[0.5 \times \sqrt{n}, 1.5 \times \sqrt{n}]$ avec $n = 36$. Le nombre de sites étant 36 et la durée tabou maximale 9, tous les sites du réseau ne peuvent pas être tabous en même temps ; ainsi l'étape 7.(b) de l'algorithme permet toujours de trouver un site s' non tabou. Dans le cas contraire il faudrait mettre en place une condition d'arrêt supplémentaire lorsque tous les sites sont tabous ou ajouter un critère de poursuite de l'algorithme pour prendre pour s' le site tabou de meilleure qualité.
7. 5 exécutions sont réalisées par test. Sachant que les résultats sont très stables d'une exécution à une autre, les graphiques de la section 4.3 montrent le résultat d'une seule exécution prise au hasard parmi les 5 donc pas forcément la meilleure.

Dans ce graphique, le but est de comparer les deux méthodes Tabou Simple et Descente Simple de l'algorithme 1 (Algorithme 1 avec sites traités dans l'ordre d'apparition du fichier d'entrée pour tous les tests de la section 4.3) en partant des mêmes conditions initiales (même plan de fréquences, même scénarios et même objectif robuste).

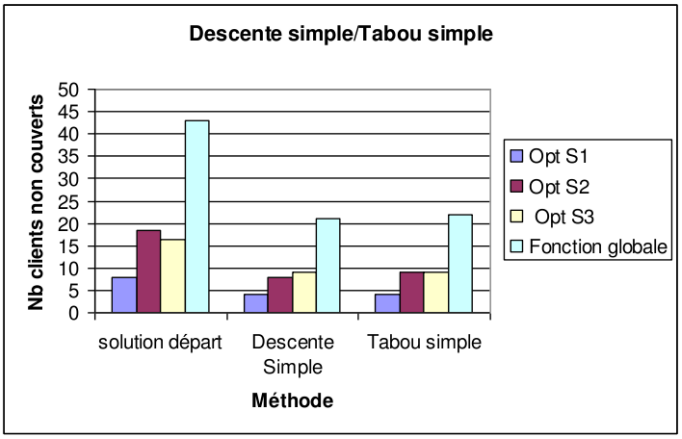


Figure 4.13 – Comparaison de la méthode DS et de TS avec fréquences initiales déterministes.

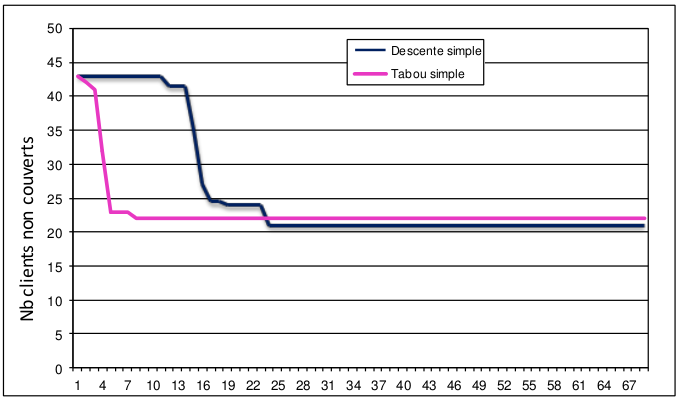


FIGURE 4.14 – Evolution de la fonction objectif des deux méthodes avec fréquences initiales déterministes.

Les résultats obtenus montrent une légère différence dans l'évaluation de la solution stable mais elle n'est pas significative : une différence d'un seul client au niveau du scénario s_2. La Figure 4.14 montre le comportement de la solution courante au fur à mesure des itérations. Les deux méthodes se stabilisent vite mais TS descend beaucoup plus vite en nombre d'itérations : 8 itérations pour TS et 25 pour DS. Cependant une itération pour DS traite un seul site à la fois contrairement à la méthode TS qui traite un site et son voisinage (5 sites voisins) par itération. Donc une itération TS est potentiellement équivalente à 6 itérations DS en nombre de sites explorés ; dans nos résultats TS aurait donc explorée 6x8, soit 48 sites avant de converger, soit environ 2 fois plus que DS. Ceci est le pire cas car il se rencontre seulement dans le cas où tous les sites voisins ne sont pas interdits à l'exploration (i.e. ils ne sont pas tabous).

Un avantage plus difficile à percevoir de la méthode TS est le fait qu'elle fait moins de modifications par rapport au réseau initial : TS a modifié seulement 5 sites contre 7 pour DS. Le nombre de modifications faites sur le réseau est primordial pour l'opérateur car il prend moins de risque en modifiant le réseau et la mise en exploitation est moins onéreuse. Ce critère est important, on le considère avec le nombre de clients couverts comme critère de choix de la solution à déployer.

Dans les Figures 4.15 et 4.16, nous présentons les résultats des deux méthodes avec les fréquences initiales aléatoires. La valeur fitness finale est meilleure pour les deux méthodes que dans le cas déterministe (19 clients non couverts). De la même manière que précédemment la méthode TS fait moins d'itération et parcours plus de sites, environ 120 contre 100 pour DS mais la différence est moins importante que précédemment. La solution finale de TS modifie moins de sites sur le réseau : 4 sites modifiés dans TS contre 9 pour DS ; cela confirme l'intérêt de la méthode Tabou sur ce problème.

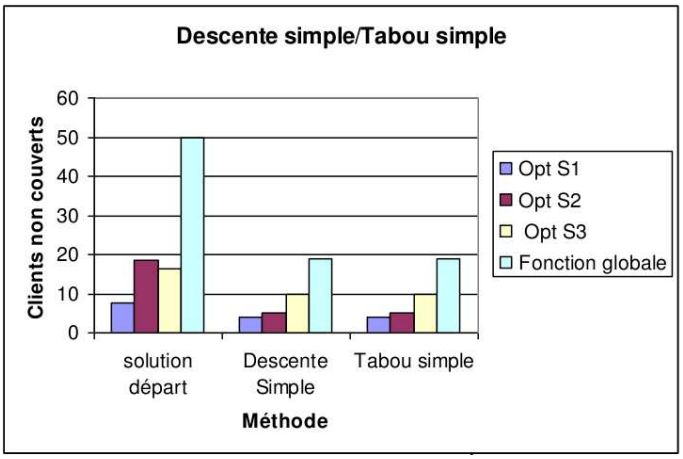


Figure 4.15 – Comparaison des méthodes DS et TS avec fréquences initiales aléatoires.

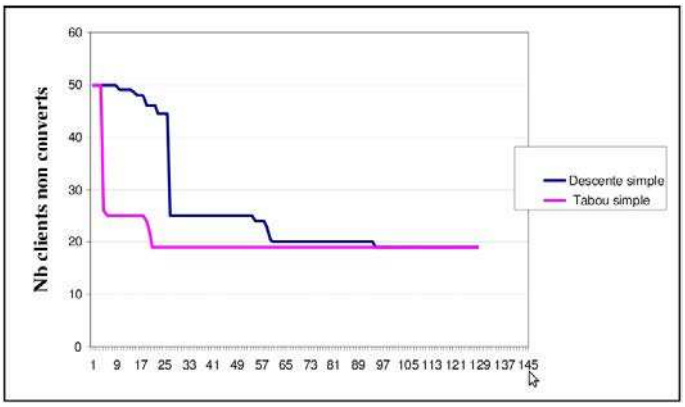


Figure 4.16 – Evolution de la fonction objectif des deux méthodes avec fréquences initiales aléatoires.

4.3.2 Algorithme Tabou dégradé Dernier Voisin (TDV)

La méthode Tabou dégradé Dernier Voisin (TDV) présente une variante par rapport à la méthode Tabou Simple. Dans l'étape 7 de l'algorithme 3, on ajoute l'heuristique suivante : si aucun site parmi les 5 voisins explorés n'apporte d'amélioration, on affecte s au dernier site voisin exploré. Le voisinage est donc modifié ; avec cette démarche, la méthode ne visite pas autant de zones dans le réseau que la méthode Tabou Simple, la recherche est plus locale. Un changement de zone n'est effectué que lorsque tous les sites voisins, du site en question, sont tabous (donc les 5 plus proches géographiquement sont tabous). Dans ce cas, on choisit aléatoirement un site dans une autre zone, de telle manière, que ce site ne figure pas parmi les sites voisins déjà visitées, ni parmi les sites tabous c'est-à-dire interdits à l'exploration.

Algorithm 4: Algorithme d'optimisation Tabou dégradé Dernier Voisin sur les fréquences

7. $f' < f$?

   (a) Si oui, alors $s = s'$, ajouter s' à la liste tabou, mettre r à jour, $r^* = r$, et aller en 5

   (b) Sinon, choisir le dernier site exploré non tabou $s' \in V(s)$, puis $s = s'$ et aller en 3 (l'algorithme reste dans la même zone d'exploration)

   (c) Sinon choisir aléatoirement un site non tabou $s' \notin V(s)$, puis $s = s'$ et aller en 3 (l'algorithme change de zone d'exploration)

Le graphe de la Figure 4.17 représente l'évolution de la solution courante et de la meilleure solution en utilisant la méthode TDV. Sur les 8 premières itérations, la solution est améliorée continûment, puis l'algorithme améliore progressivement la meilleure en passant par des phases d'amélioration et de dégradation.

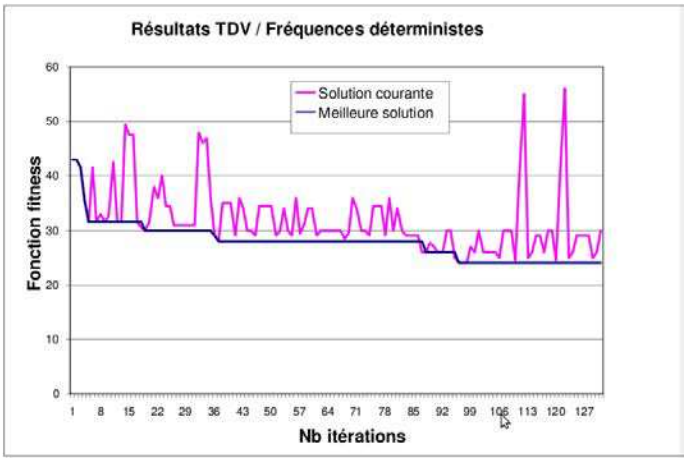


FIGURE 4.17 – Exemple d'évolution de la solution courante et de la meilleure solution avec la méthode TDV.

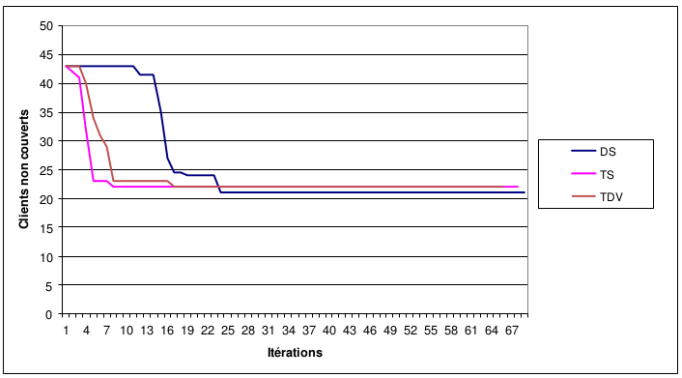


Figure 4.18 – Evolution de la fonction objectif des méthodes DS, TS et TDV avec fréquences initiales déterministes.

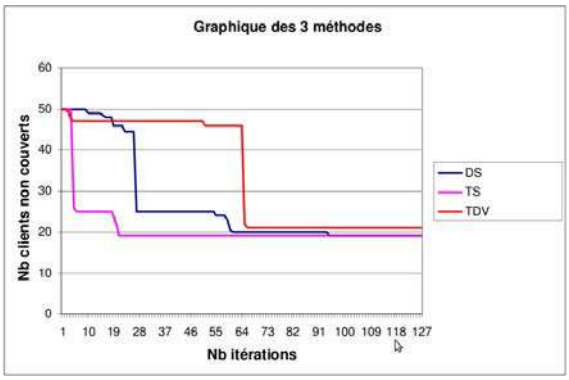


Figure 4.19 – Evolution de la fonction objectif des méthodes DS, TS et TDV avec fréquences initiales aléatoires.

En comparant les trois algorithmes en Figures 4.18 et 4.19, on ne constate pas de gain particulier avec la méthode TDV ; la convergence n'est pas plus rapide que TS et le résultat final n'est pas meilleur. Pour ce qui est du nombre de sites modifiés, TDV a modifié 10 sites sur le test (4 sites modifiés pour TS et 9 pour DS), donc cette méthode ne présente pas d'avantages particuliers. Cela laisse supposer que l'exploration locale dans le réseau n'est pas une alternative intéressante et qu'il vaut mieux que l'algorithme se déplace rapidement sur plusieurs zones à l'intérieur du réseau. Pour vérifier cette hypothèse, le paragraphe suivant présente une autre variante de l'exploration locale.

4.3.3 Algorithme Tabou dégradé Meilleur Voisin (TMV)

La méthode Tabou meilleur voisin (TMV) a le même principe que la méthode TDV sauf que le choix du site dégradant se porte sur celui qui présente la meilleure dégradation i.e. celui qui dégrade le moins la solution fitness. Cela se traduit par une modification de la phase 7.(b) par rapport à TDV :

Algorithm 5: Algorithme d'optimisation Tabou dégradé Meilleur Voisin sur les fréquences

7. $f' < f$?

   (a) Si oui, alors $s = s'$, ajouter s' à la liste tabou, mettre r à jour, $r^* = r$, et aller en 5

   (b) Sinon, choisir le site exploré non tabou $s' \in V(s)$ de meilleur qualité, puis $s = s'$ et aller en 3 (l'algorithme reste dans la même zone d'exploration)

   (c) Sinon choisir aléatoirement un site non tabou $s' \notin V(s)$, puis $s = s'$ et aller en 3 (l'algorithme change de zone d'exploration)

Dans la Figure 4.20, on représente un exemple d'évolution de la solution courante ainsi que la meilleure solution visitée au fur à mesure du déroulement de l'algorithme. On remarque que la solution courante peut toujours dégrader l'évolution, cependant dans un moindre intervalle par rapport à DTV. L'écart observé en ordonnée ne dépasse pas 5 UE alors qu'avec DTV l'algorithme pouvait aller jusqu'à doubler le nombre d'UE non couverts (Figure 4.17).

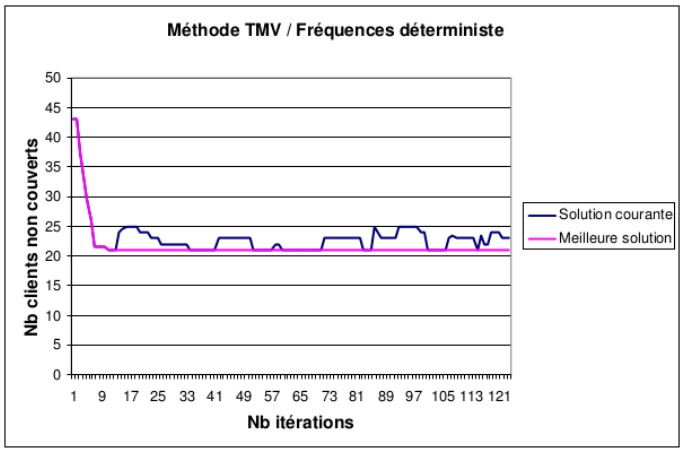


FIGURE 4.20 – Exemple d'évolution de la solution courante et de la solution optimale avec la méthode TMV.

Dans les deux graphiques suivants nous avons comparé l'évolution de la fonction fitness des quatre algorithmes en partant d'un plan de fréquences initial déterministe (Figure 4.21) et d'un plan de fréquences initial aléatoire (Figure 4.22). La méthode TDV est la moins performante en qualité finale et vitesse ; l'inconvénient de cette méthode est l'absence de contrôle de la dégradation qui fait que la solution courante peut s'éloigner énormément de

la meilleure solution en termes de qualité, et donc demande plus de temps pour revenir sur de bonnes solutions.

Les méthodes Descente Simple (DS), Tabou Simple (TS) et Tabou dégradée Meilleur Voisin (TMV) convergent vers des solutions finales de même qualité cependant avec des performances plus rapidement atteintes avec TS et TMV. Cela ne permet pas de conclure sur la stratégie de recherche en termes d'exploration ou d'exploitation de la solution courante : TS privilégie l'exploration globale du réseau alors que TMV privilégie l'exploitation locale du réseau. Les deux algorithmes fonctionnent différemment cependant ils trouvent des solutions de performance identique à peu près à la même vitesse.

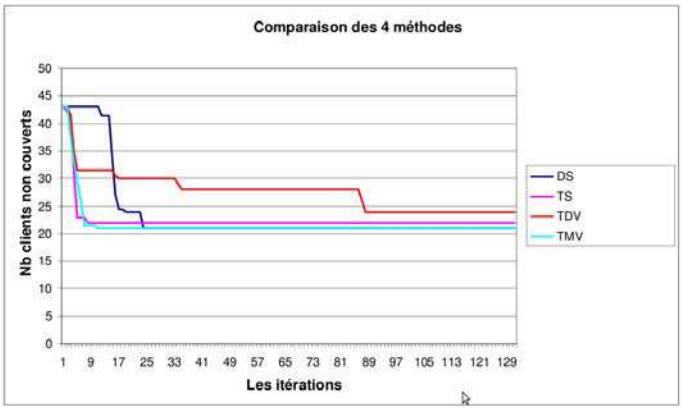


Figure 4.21 – Evolution de la fonction objectif des méthodes DS, TS, TDV et TMV avec fréquences initiales déterministes.

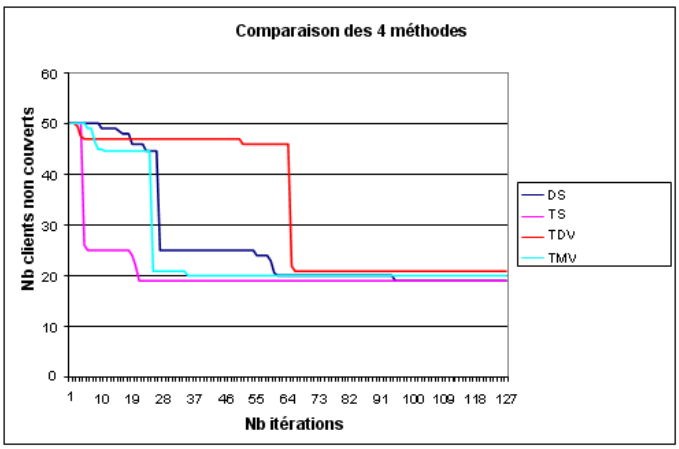


Figure 4.22 – Evolution de la fonction objectif des méthodes DS, TS, TDV et TMV avec fréquences initiales aléatoires.

4.3.4 Comparaison de Tabou Simple et Tabou dégradé Meilleur Voisin

Afin d'approfondir le niveau de performance des deux méthodes TS et TMV, les Figures 4.23 et 4.24 ci-dessous montrent les résultats pour 5 exécutions sous les mêmes conditions de départ. A noter que les fréquences initiales sont aléatoires avec une racine différente à chaque fois et sont aussi distinctes entre TS et TMV. La méthode TS atteint en moyenne 29 UE non couverts contre 22 pour la méthode TMV qui affiche de meilleure performance globale (bâtons de droite sur les deux figures). De même la dispersion est bien meilleure pour TMV puisque TS obtient 3 fois un nombre d'UE non couverts au moins égal à 30 alors que TMV n'atteint jamais ce nombre. La méthode TMV se montre donc plus robuste avec une meilleure moyenne et une dispersion plus faible mais avec un nombre de site modifiés en moyenne plus élevé que la méthode TS : 9,4 sites modifiés avec TS contre 12,6 avec TMV. Les mécanismes d'exploration de TMV lui permettent de trouver des solutions de meilleure qualité en impliquant plus de sites.

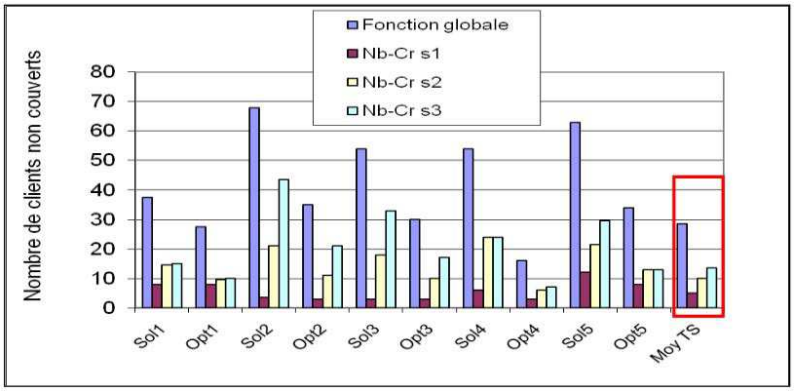


FIGURE 4.23 – Tabou Simple : fréquences initiales aléatoires et plusieurs racines aléatoires.

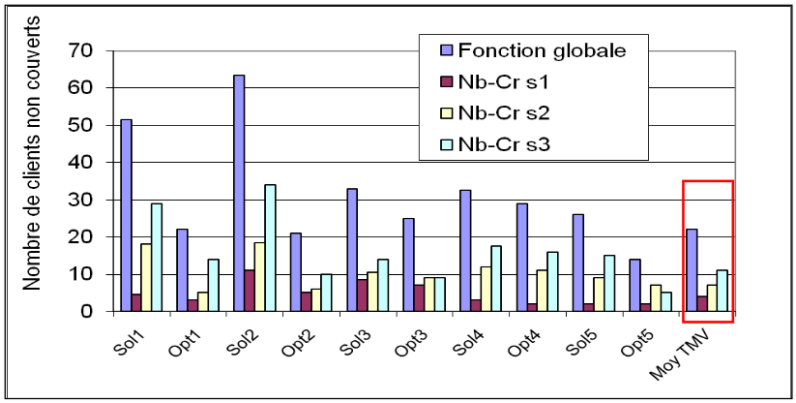


FIGURE 4.24 – Tabou dégradé Meilleur Voisin : fréquences initiales aléatoires et plusieurs racines aléatoires.

Au vu des performances précédentes, dans la section suivante de ce document nous retenons uniquement les méthodes TS et TMV en sachant que TMV est plus performante.

Nombre de sites modifiés sur 5 exécutions	1	2	3	4	5	**Moyenne**
Tabou Simple	7	10	8	10	12	9,4
Tabou Meilleur Voisin	13	14	12	10	14	12,6

Table 4.2 – Comparaison du nombre de sites modifiés entre TS et TMV.

L'objectif sera maintenant de vérifier ces performances dans le cadre d'une optimisation dirigée par l'analyse de données sur les rejets du réseau, et donc en pilotant le choix des créneaux horaires de trafic et des sites à optimiser par la phase d'analyse de données.

4.4 Comparaison des méthodes TS et TMV sur l'optimisation robuste journalière

Dans cette section, nous faisons le lien entre les indicateurs de qualité remontés par le réseau et les algorithmes d'optimisation des performances du réseau. Jusqu'alors les algorithmes étaient appliqués de manière aléatoire sur les antennes du réseau ; dorénavant pour se placer dans le contexte des réseaux de type SON, nous considérons une étape d'analyse sur les indicateurs, qui a pour objectif d'identifier les problèmes de performances à résoudre, et une étape d'optimisation, qui a pour but de résoudre ou résorber ces problèmes. Les algorithmes vont donc travailler sur les créneaux horaires (ou scénarios) et les stations, dits « critiques », remontés par l'étape d'analyse de données. Dans tous les cas de figure à venir, les algorithmes partent d'une solution initiale issue des paramètres en exploitation du réseau GSM/UMTS, puis les méthodes TS et TMV sont appliquées en contexte d'optimisation robuste basée sur les créneaux et sites critiques. Seule l'optimisation robuste est considérée au vu des performances de cette approche dans les paragraphes précédents.

L'étape d'analyse que nous avons retenue fait ressortir deux méthodes de sélection des couples stations/créneaux critiques pour l'optimisation. La Figure 4.25 correspond à la sélection basée sur une méthode de sélection des pics d'appels rejetés sur toutes les stations sur l'ensembre de la journée. Toutes les stations du réseau qui cumulent plus de 10 rejets d'appels par jour sont d'abord sélectionnées. Puis les pics de rejets retenus sont les créneaux horaires du cinquième quintile, c'est-à-dire ceux qui dépassent le seuil de 20 rejets. Les stations et les créneaux horaires à l'issue de cette étape d'analyse des indicateurs du réseau sont appelés les *stations et les créneaux critiques*. Ils doivent être optimisés dans le cadre des SON.

Nous utilisons les résultats de cette méthode de sélection dans cette section pour comparer les performances de l'optimisation Tabou Simple et Tabou dégradé Meilleur Voisin

dans un processus où le choix des stations à optimiser est guidé par cette sélection. Par contre, à l'issue de l'optimisation l'ensemble des créneaux horaires de la journée, c'est-à-dire les créneaux critiques (à problèmes) et non critiques (sans problème), sera utilisé pour mesurer l'impact global des modifications réalisées. L'objectif est de vérifier si les stations/créneaux critiques sur lesquels portent l'optimisation robuste dégrade ou ne dégrade pas les autres couples i.e. le fonctionnement du réseau pour tous les autres contextes de trafic.

A partir d'ici nous faisons une hypothèse forte sur l'évaluation des résultats dans la suite du document. A défaut de modèle de prévision de trafic, ou de données sur plusieurs jours et plusieurs semaines de trafic pour le réseau qui sert de cas d'études, nous supposerons que les données de trafic sur lesquelles nous travaillons sont stables et correspondent à un jour type, quelconque de la semaine, en semaine travaillée ou pas. On suppose que l'opérateur dispose d'un modèle de prévision de trafic qui lui permet d'établir des hypothèses réalistes. Donc l'évaluation des méthodes d'optimisation à venir se fera sur les mêmes conditions de trafic que les données d'entrée afin de n'introduire aucun biais, toujours discutables, sur la qualité de la prévision de trafic. On suppose ainsi que le SON se ré-optimise à bon escient. Il est bien entendu possible de modifier aléatoirement le trafic d'entrée pour la phase d'évaluation post-optimisation mais toutes les directions sont possibles, donc discutables, donc pas forcément concluantes. Pour être correct, la modification du trafic d'entrée devrait donner lieu à un travail à part entière.

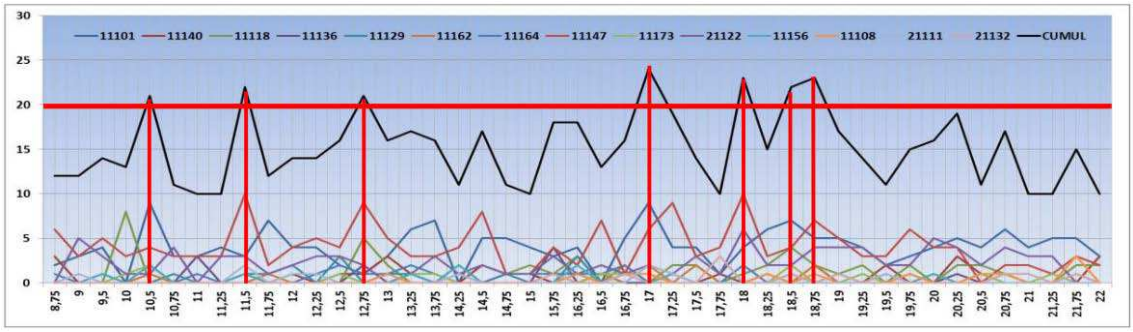


FIGURE 4.25 – Stations critiques et créneaux critiques au vue de l'analyse des données sur les pics de rejets d'appel sur une journée.

Pour résumer le processus :

- Les scénarios de trafic pris pour la fonction objectif robuste correspondent aux créneaux horaires critiques retenus par la méthode de sélection.
- Les stations utilisées par les algorithmes d'optimisation sont uniquement les stations critiques retenues par la méthode de sélection. Notre algorithme travaillant sur la base des sites et pas uniquement des stations, les sites utilisés sont ceux qui accueillent une station critique, soit 11 sites critiques pour 14 stations critiques.

– Après l'optimisation, l'évaluation de la meilleure solution finale trouvée sera faite sur l'ensemble des stations pour les créneaux critiques (périodes du réseau à réparer) et pour l'ensemble des créneaux (périodes de fonctionnement correct du réseau) pour mesurer l'impact global de l'optimisation.

Les sites et créneaux critiques retenus par l'analyse de données remontées du réseau illustré en Figure 4.25 sont :

Créneaux critiques (7) : 10h30, 11h30, 12h45, 17h00, 18h00, 18h30, 18h45.
Sites critiques (11) : 8, 12, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31.

Nous présentons donc les applications des méthodes Tabou Simple (TS) et Tabou dégradé Meilleur Voisin (TMV) sur ce nouveau contexte d'optimisation robuste. Le paramètre d'optimisation est l'allocation de fréquences (ce choix a été expliqué précédemment, il correspond au paramètre le plus impactant sur la qualité), les autres paramètres, que sont le tilt et la puissance d'émission, sont fixés aux valeurs en fonction dans le réseau réel utilisé. Les fréquences de la solution initiale sont toujours fixées de manière aléatoire et la racine de chaque test est aussi aléatoire. Dans les tests qui suivent, les algorithmes réalisent une optimisation robuste pour la journée de trafic ; ils génèrent donc une seule solution qui prend en compte lors de la phase d'analyse qui précède l'optimisation, le trafic complet de la journée. Cette solution unique devrait être appliquée en fin de journée pour la journée suivante dans le cadre des SON.

4.4.1 Algorithme Tabou TS pour l'optimisation robuste journalière

L'algorithme Tabou Simple (TS) noté en Algorithme 3 est adapté pour l'optimisation des sites et créneaux critiques de la façon suivante :

Algorithm 6: Algorithme d'optimisation Tabou Simple sur les fréquences

Soit,

S : ensemble des sites.

R : ensemble des réseaux.

f : la fitness robuste avec comme scénarios de trafic l'ensemble des *créneaux horaires critiques.*

Début :

1. Déployer le réseau initial r (association point test/eNB au meilleur SINR) avec les données de tilts et de puissances en exploitation, et $r^* = r$
2. Prendre un site au hasard, parmi la liste des *sites critiques* soit s
3. Enumérer les configurations de fréquence, affecter la meilleure à s et mettre r à jour
4. Mettre le site s dans la liste tabou
5. Identifier $V(s)$, les sites voisins de s. Les sites voisins sont les 5 sites les plus proches géographiquement du site s sur la base de leur distance en coordonnées polaires, et on retire de cette liste les voisins tabous. Le cardinal de $V(s)$ est donc entre 0 et 5. Le choix de 5 sites est dû au temps de calcul de cette opérations et au fait que dans un réseau théorique on prévoit au maximum 6 voisins par site, 5 au maximum est donc suffisant.
6. Enumérer les configurations de fréquence de s' dans $V(s)$, affecter la meilleure à s'
7. $f' < f$?
   (a) Si oui, alors $s = s'$, ajouter s' à la liste tabou, mettre r à jour, $r^* = r$, et aller en 5
   (b) Sinon, choisir aléatoirement un *site critique* non tabou $s' \notin V(s)$, soit dans $S \backslash V(s)$ (l'algorithme change de zone d'exploration), puis $s = s'$, et aller en 3

Condition d'arrêt : tous les sites critiques ont été visités une fois comme racine de la recherche (étapes 2 ou 7.(b)). Cette condition permet toutefois aux sites critiques d'être optimisés plusieurs fois lorsqu'ils sont eux-mêmes dans le voisinage d'un autre site améliorant (étape 7.(a)). Dans ce contexte cela signifie que la recherche combinatoire peut s'arrêter avant la convergence complète de l'algorithme, ce qui signifie qu'il peut encore y avoir amélioration de la meilleure solution trouvée, cependant TS et TMV sont soumis à la même règle.

r^* est la meilleure configuration trouvée du réseau

Fin

Le Tableau 4.3 et la Figure 4.26 ci-dessous donnent les résultats sur une exécution. Sur les lignes est représenté le nombre de clients non couverts pour chacun des scénarios critiques pour la solution de départ et pour la meilleure solution trouvée par TS en optimisation robuste sur l'ensemble des créneaux.

Créneaux critiques	**Nombre de clients non couverts Solution de départ**	**Nombre de clients non couverts TS**
10h30	21	8
11h30	23,5	11
12h45	19	7
17h00	27,5	11
18h00	40	19
18h30	38	19
18h45	24,5	12
TOUS	**193**	**87**

Table 4.3 – Optimisation robuste journalière par la méthode TS : résultats sur les créneaux critiques.

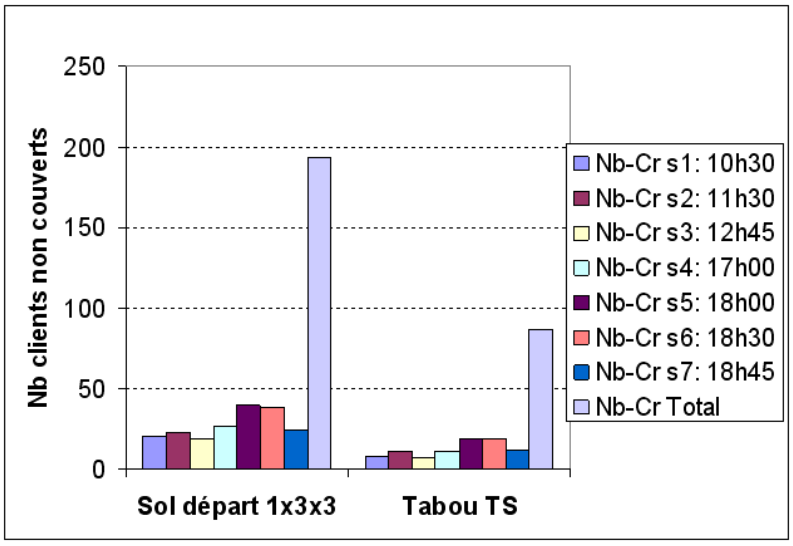


Figure 4.26 – Optimisation robuste journalière par la méthode TS : résultats sur les créneaux critiques.

Les résultats montrent que l'optimisation apporte des améliorations sur tous les créneaux critiques ; globalement le gain est de 55%. L'exécution s'est arrêtée au bout de 62 minutes. Il y a 9 sites modifiés dont 6 sites critiques.

Créneaux non critiques	**Nombre de clients non couverts Solution de départ**	**Nombre de clients non couverts : TS**
08h00	11,5	2
08h30	10	9
09h30	17,5	9
12h00	9	12
13h00	11	3
14h30	11,5	9
15h00	10,5	7,5
15h30	11,5	11
16h00	16	12
19h00	25	13
20h00	9	10
21h30	21	15,5
22h00	13	12
TOUS	**176,5**	**125**

TABLE 4.4 – Evaluation de la solution TS sur des créneaux pas pris en compte dans l'optimisation.

Afin d'évaluer l'impact de l'optimisation robuste basée sur les créneaux critiques sur l'ensemble des scénarios de trafic, le Tableau 4.4 présente l'évaluation du nombre de clients non couverts sur d'autres créneaux horaires pris aléatoirement parmi les créneaux qui ne sont pas utilisés pendant la phase d'optimisation. La solution fournie par l'algorithme TS apporte un gain global sur ces créneaux (29%), cependant certains créneaux peuvent être dégradés (12h et 20h sur cet exemple). Cette situation est tout à fait possible puisque ces créneaux de trafic sont ignorés de l'optimisation. On constate cependant que la démarche de sélection de créneaux basée sur l'optimisation des pics de rejets et l'optimisation robuste sur ces créneaux donne globalement de très bons résultats en limitant le nombre de cas à considérer et donc à la fois, le temps de calcul et, le nombre d'intervention à réaliser pour optimiser le réseau.

4.4.2 Algorithme Tabou TMV pour l'optimisation robuste jounalière

L'algorithme Tabou dégradé Meilleur Voisin (TMV) pour l'optimisation des sites et créneaux critiques s'obtient à partir de l'algorithme 6 avec une variante sur la phase 7 qui devient : Les tableaux ci-dessous donnent les résultats sur une exécution. Comme pour la méthode TS, sur les lignes est représenté le nombre de clients non couverts pour chacun

Algorithm 7: Algorithme d'optimisation Tabou dégradé Meilleur Voisin sur les fréquences

7. $f' < f$?

   (a) Si oui, alors $s = s'$, ajouter s' à la liste tabou, mettre r à jour, $r^* = r$, et aller en 5

   (b) Sinon, choisir le site exploré non tabou $s' \in V(s)$ de meilleure qualité, puis $s = s'$ et aller en 3 (l'algorithme reste dans la même zone d'exploration)

   (c) Sinon choisir aléatoirement un *site critique* non tabou $s' \notin V(s)$, puis $s = s'$ aller en 3 (l'algorithme change de zone d'exploration)

des scénarios critiques pour la solution de départ et pour la meilleure solution trouvée par TMV en optimisation robuste sur l'ensemble des créneaux. Les résultats du tableau 4.5 montrent que l'optimisation apporte des améliorations sur tous les créneaux critiques ; globalement le gain est de 64%. Le temps de calcul pour cette exécution est de 7h et le nombre de sites modifiés par rapport au réseau initial est de 20 dont 8 sites critiques (2 fois plus de sites modifiés que TS mais avec un gain supérieur). Le tableau 4.6 montre l'évaluation du nombre de clients non couverts sur les créneaux qui ne sont pas utilisés pendant la phase d'optimisation. La solution fournie par l'algorithme 7 apporte un gain global sur ces créneaux de 53% sans aucun créneau dégradé. Les performances sont donc globalement meilleures pour TMV.

Créneaux critiques	**Nombre de clients non couverts Solution de départ**	**Nombre de clients non couverts TMV**
10h30	9	3
11h30	13	6
12h45	39	5
17h00	28	12
18h00	45	12
18h30	30	13
18h45	174	12
TOUS	**174**	**63**

Table 4.5 – Optimisation robuste journalière par la méthode TMV : résultats sur les créneaux critiques.

Créneaux non critiques	**Nombre de clients non couverts Solution de départ**	**Nombre de clients non couverts TS**
08h00	8	5
08h30	22	7
09h30	21	13
12h00	37	15
13h00	19	13
14h30	19	6
15h00	22	13,5
15h30	29	9
16h00	19	13
19h00	23,5	5
20h00	18	11
21h30	0	0
22h00	0	0
TOUS	**237,5**	**110,5**

TABLE 4.6 – Evaluation de la solution TMV sur des créneaux pas pris en compte dans l'optimisation.

4.4.3 Synthèse des observations

En partant d'une solution initiale comparable (369,5 clients non couverts pour TS et 411,5 pour TMV), la méthode TMV donne un gain supérieur sur les créneaux critiques utilisés pour l'optimisation et sur les autres créneaux utilisés pour l'évaluation. Le nombre de sites modifiés par rapport à la solution initiale est environ 2 fois supérieur pour TMV, soit 20 sites modifiés contre 9 pour TS, l'exploration est donc meilleure avec TMV. Ce résultat se paie néanmoins au niveau du temps de calcul avec 1h pour TS et 7h pour TMV. Une question importante pour un opérateur est donc de savoir s'il privilégie la qualité globale, le nombre de sites modifiés ou un compromis entre les deux.

Ces résultats ont été observés en moyenne sur plusieurs exécutions confirmant les meilleures performances de cette méthode. TMV réalise un compromis entre les phases d'intensification de la recherche autour des inconnues (les fréquences à allouer) d'un site critique et de ses voisins, et les phases de diversification consistant à se déplacer dans l'espace des solutions vers un autre site critique et ses voisins. Les phases alternent successivement lorsque l'optimisation locale ne permet plus à l'algorithme d'améliorer la solution courante, l'algorithme repart alors dans une phase d'optimisation globale. Ce procédé ne nécessite pas de paramétrage particulier de l'algorithme. Cependant il serait possible de trouver d'autres compromis entre les phases locales et globales, par exemple en quittant plus vite les phases locales avec un processus d'apprentissage.

4.5 Synthèse

Après avoir expliqué les hypothèses principales de notre travail dans ce chapitre, nous avons conçu et testé différents algorithmes et différentes options robustes et non robustes pour l'optimisation des réseaux dans les SON. Ce travail nous a permis de progressivement sélectionner les éléments qui nous a semblé les plus importants.

En section 2, l'optimisation des paramètres fréquences, tilts et puissances du réseau avec une heuristique gloutonne nous a conduit à retenir l'optimisation des fréquences comme facteur principal d'amélioration du réseau (nombre de clients non couverts). En parallèle nous avons éprouvé l'optimisation robuste (3 scénarios de trafic en même temps) face à l'optimisation séparée des mêmes scénarios ; avec l'algorithme glouton l'optimisation robuste s'est montrée la plus performance quel que soit le paramètre de l'optimisation.

En section 3, nous avons introduit une Recherche Tabou pour l'algorithmique robuste avec trois options : Tabou Simple (qui favorise l'exploration), Tabou avec dégradé Dernier Voisin (qui alterne l'exploitation et l'exploration, si pas d'amélioration le dernier voisin est choisi) et Tabou avec dégradé Meilleur Voisin (qui alterne l'exploitation et l'exploration, si pas d'amélioration le meilleur voisin est choisi). Nous avons montré que TS et TMV améliorent les performances de l'heuristique gloutonne avec un avantage pour TMV sur la base d'une sélection de 3 scénarios de trafic utilisés à la fois pour l'optimisation et l'évaluation.

En section 4, nous avons approfondi les deux Recherche Tabou, TS et TMV, sur une optimisation robuste avec comme entrée l'ensemble des pics de la journée et en évaluation post-optimisation l'ensemble des créneaux de la journée. Nous faisions ici le premier lien avec l'analyse de données car l'optimisation portait sur l'ensemble des créneaux, i.e au moins 20 rejets d'appel sur l'ensemble des stations critiques, et des sites critiques, i.e au moins 10 rejets sur l'ensemble de la journée (7/72 créneaux et 11/36 sites). La méthode TMV donne de meilleur résultat sur le nombre de clients non couverts pour les créneaux critiques utilisés pour l'optimisation et pour les autres créneaux utilisés pour l'évaluation. Le nombre de sites modifiés pour TMV est environ 2 fois supérieur à celui de TS ce qui montre une meilleure recherche de TMV dans l'espace des solutions.

A ce stade nous avons retenu exclusivement la méthode TMV pour la dernière phase. Dans le chapitre suivant, nous présentons notre démarche pour comparer l'optimisation robuste (optimiser plusieurs créneaux ensemble) et non robuste (optimiser un seul créneau à la fois), toutes les deux combinées avec l'optimisation à la journée (vision globale des situations à problème) et l'optimisation en 3 périodes (vision échelonnée matin, après-midi et soir), soit 4 combinaisons au total.

Chapitre 5

Comparaison de différentes options d'auto-optimisation des SON

Dans cette section, nous n'utilisons plus que la méthode Tabou dégradé Meilleur Voisin (TMV) car elle a montré son efficacité sur l'ensemble des tests précédents. Il s'agit maintenant de se concentrer sur la recherche de la méthode de pilotage de l'optimisation des SON. Etant donné les résultats d'analyse sur les créneaux horaires et stations critiques du fonctionnement du réseau, la question qui se pose est la suivante : faut-il réaliser une optimisation journalière unique comme on l'a fait précédemment, qui correspond à une certaine logique en soit, ou faut-il procéder par étape en optimisant le réseau plusieurs fois dans une journée ? La première hypothèse coûte moins cher en coût d'exploitation du réseau. La deuxième hypothèse est peut-être plus performante.

Sommaire

5.1 Options d'auto-optimisation des SON 134
5.2 Optimisation robuste des pics sur la journée 136
5.3 Optimisation non robuste (séquentielle) des pics sur la journée 140
5.4 Optimisation robuste des dominances en 3 périodes successives 144
5.5 Optimisation non robuste des dominances en 3 périodes successives 154
5.6 Synthèse 165

5.1 Options d'auto-optimisation des SON

Du point de vue de l'optimisation dans un SON, se pose la question suivante : faut-il conserver une optimisation robuste qui a fait ses preuves dans nos tests précédents, ou faut-il réaliser une optimisation séquentielle où chaque créneau horaire posant des problèmes de performance est optimisé séparément et immédiatement ? La première hypothèse prend en compte les interactions de plusieurs créneaux critiques mais, du fait de ces interactions, est longue à calculer. La deuxième hypothèse consiste à ajuster les ressources au fur et à mesure, dans le cadre de chaque créneau critique, et non pas au niveau de leurs interactions ; dans ce mode, le réseau optimisé au créneau de temps t est pris en entrée pour le créneau à $t+x$, le temps de calcul est plus court, mais l'ajustement permanent n'est peut-être pas toujours utile.

Nous avons envisagé quatre cas de figure qui seront présentés successivement dans les 4 parties de cette section :

1. Optimisation robuste basée sur les pics de l'ensemble de la journée (un seul réseau produit pour tous les pics)
2. Optimisation non robuste (séquentielle) basée sur les pics de l'ensemble de la journée (un réseau produit par pic)
3. Optimisation robuste en 3 périodes (matin, après-midi, soir) basée sur la dominance au sens de Pareto des couples créneaux/stations (trois réseaux robustes produits successivement)
4. Optimisation non robuste en 3 périodes (matin, après-midi, soir) basée sur la dominance au sens de Pareto des couples créneaux/stations (trois réseaux non robustes produits successivement)

Dans cet ensemble nous devons rappeler une chose importante : la méthode de sélection des créneaux basée sur la dominance au sens de Pareto entre les couples créneaux/stations prend explicitement en compte les corrélations entre les créneaux vis-à-vis des stations qui rejettent des clients, alors que la méthode de sélection basée sur les pics, non ; cette dernière est purement dépendante de l'incertitude sur les paramètres du problème, la variabilité de la charge.

Les créneaux retenus pour l'optimisation basée sur les pics sont ceux issus de la méthode présentée au chapitre précédent. Les créneaux retenus pour l'optimisation basée sur la dominance au sens de Pareto sont obtenu de manière analytique.

La méthode de dominance au sens de Pareto fait référence à la façon dont on peut sélectionner des informations sur la base de plusieurs critères simultanés [Sen., 1970]. Cette méthode est très utilisée en optimisation multiobjectif dans laquelle plusieurs solutions à un problème sont comparées les unes aux autres selon un ensemble de critères. La méthode

permet de retenir les solutions de compromis les plus intéressantes au vu de l'ensemble des critères et des préférences du décideur. Une solution s Pareto-domine une solution s' si s est au moins aussi bonne que s' sur tous les critères et strictement meilleure pour au moins un d'entre eux. Ce qui revient à dire que, dans un ensemble de solutions, si s est Pareto-optimale, alors il est impossible d'améliorer s sur tous les critères sans en dégrader au moins un.

Dans notre étude, nous avons élaboré plusieurs méthodes pour appliquer cette notion de dominance afin de sélectionner les stations et les créneaux critiques à optimiser. Nous présentons ici la méthode que nous avons retenue ; elle utilise les 14 stations ayant un nombre de rejets cumulés sur la journée supérieur ou égal à 10 (stations critiques identifiées par la méthode des pics). Les créneaux horaires qui définissent les scénarios de trafic pour la robustesse sont séparés en 3 périodes : matin, après-midi et soir. Puis, prenant les périodes une à une, nous avons utilisé la dominance entre les créneaux de cette période (les créneaux sont donc les informations à sélectionner) pour les stations prises deux-à-deux (les stations sont donc les axes d'observations), soit 91 plans de 2 axes (14 stations x 13 stations /2). Sur chaque plan on observe donc les créneaux qui dominent les autres, et combien ils en dominent au sens de Pareto, pour le couple de stations considérées.

Ce critère nous parait intéressant pour l'optimisation ; si des stations du réseau sont optimisées pour un créneau horaire, les créneaux qu'il domine devraient aussi être améliorés en termes de trafic rejetés. Il s'agit donc de sélectionner les créneaux dominants pour l'optimisation. Les créneaux sont donc classés par ordre d'importance sur le critère de la dominance. A noter que pour ce critère, un créneau dominé peut l'être par plusieurs créneaux ; il sera donc compté plusieurs fois, ce qui peut donner un total supérieur à 91. Ce type d'analyse permet de connaître exactement la liste des créneaux dominés par chaque créneau et créer ainsi des sous-ensembles de créneaux avec une certaine cohérence pour l'optimisation.

Pour éviter d'avoir un trop grand nombre de créneaux à gérer, nous avons retenu les créneaux les plus critiques au niveau des rejets d'appel : les créneaux cumulant un nombre de rejets supérieur à la moyenne de l'ensemble des créneaux cumulant plus de 10 rejets pour les 14 stations (moyenne = 17 rejets). 15 créneaux critiques ont été retenus ; à noter qu'ils sont non-dominés entre eux dans un espace à 14 dimensions (observation des rejets sur les 14 stations critiques). Pour chacun de ces 15 créneaux, nous indiquons dans les tableaux suivants le nombre cumulé de créneaux de leur période qu'il domine sur les 91 plans ; les créneaux critiques sont classés par ordre décroissant du nombre de créneaux qu'ils dominent. Notons que le nombre total de créneaux est à peu près semblable sur les 3 périodes (28, 20 et 24) mais que le cumul des dominances pour les créneaux critiques est moins favorable le matin (143 dominances) que l'après-midi (530 dominations) et le soir

(372 dominations).

Matin[06h00,12h45] : 3 créneaux critiques - 28 créneaux en tout

Créneaux	**12h45**	**10h30**	**11h30**
Nb de créneaux dominés par ce créneau sur l'ensemble des plans	62	47	34

Après-midi[13h00,17h45] : 6 créneaux critiques - 20 créneaux en tout

Créneaux	**13h15**	**17h15**	**17h00**	**16h15**	**14h30**	**15h45**
Nb de créneaux dominés par ce créneau sur l'ensemble des plans	106	97	94	85	82	66

Soir[18h00,23h45] : 6 créneaux critiques - 24 créneaux en tout

Créneaux	**18h00**	**18h45**	**20h15**	**19h00**	**18h30**	**20h45**
Nb de créneaux dominés par ce créneau sur l'ensemble des plans	77	68	61	60	55	51

Table 5.1 – Dominance des créneaux critiques sur les 3 périodes retenues.

Comme lors de la comparaison des méthodes TS et TMV au chapitre précédent, dans les sections de ce chapitre le paramètre d'optimisation est toujours l'allocation de fréquences (ce choix a été expliqué précédemment, il correspond au paramètre le plus impactant sur la qualité), les autres paramètres, que sont le tilt et la puissance d'émission, sont fixés aux valeurs en fonction dans le réseau réel utilisé. Les fréquences de la solution initiale sont toujours fixées de manière aléatoire et la racine de chaque test est aussi aléatoire.

5.2 Optimisation robuste des pics sur la journée

Dans le Tableau 5.2 (dont les résultats sont présentés graphiquement en Figure 5.1) sont représentées 4 exécutions de l'algorithme TMV avec des racines de départ distinctes. On remarque d'après ces résultats qu'on peut atteindre des solutions finales de qualité très différentes (de 59,5 à 95 clients non couverts). Ces écarts sont dus essentiellement à l'aspect stochastique de l'algorithme (solutions de départ aléatoires, exploration des sites

dépendant du mécanisme d'évaluation, critère d'arrêt conditionné par la visite de tous les sites critiques comme racine de changement de zone. Nonobstant cette variabilité, l'optimisation robustesse apporte toujours un gain sur le nombre de clients non couverts pour les créneaux critiques, de 20% à 64% (44% en moyenne).

Créneaux critiques	Sol dép1	TMV1	Sol dép2	TMV2	Sol dép3	TMV3	Sol dép4	TMV4	Moy dép	Moy TMV
10h30	9	3	9	6,5	12,5	11	16,5	14,5		
11h30	13	6	11,5	3	12	11	21,5	14		
12h45	10	5	16	11	12,5	10	13	8		
17h00	39	12	29	11	14	10	24	14		
18h00	28	12	20	6	30	24	15	11		
18h30	45	13	23	11	20,5	17	11,5	8		
18h45	30	12	17	11	17	12	31	20		
Total	**174**	**63**	**125,5**	**59,5**	**118,5**	**95**	**132,5**	**89,5**	**137,6**	**76,6**
Gain		**64%**		**53%**		**20%**		**33%**		**44%**
Nb de sites modifiés		**20**		**18**		**17**		**18**		**18,3**
Dont critique		**8**		**9**		**9**		**9**		**8,8**
Temps		**7h**		**6h**		**7h**		**6h26**		**6h36**

Table 5.2 – Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation des créneaux critiques.

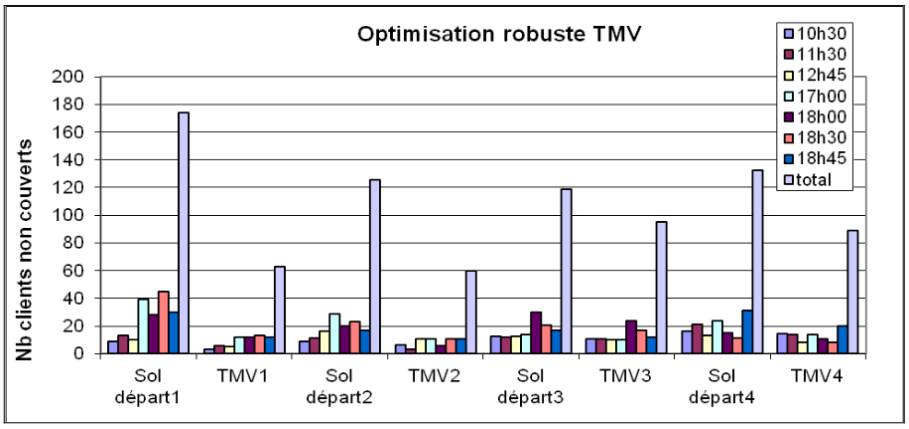


Figure 5.1 – Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation des créneaux critiques.

Le temps d'exécution est très stable de 6h à 7h, celui-ci dépendant du critère d'arrêt de l'algorithme, ainsi que le nombre de sites modifiés dans la meilleure solution trouvée (de 17

à 20 sites dont 8 à 9 critiques). En regardant la nature des modifications du réseau, 6 sites critiques modifiés sont communs aux 4 tests (8, 18, 23, 25, 26, 30), 3 sites apparaissent 3 fois (19, 24, 27), 1 site apparait 1 fois (31) et 1 site n'est jamais modifié (12). Il y a donc une grande stabilité dans les résultats malgré l'approche stochastique de TMV.

Le tableau 5.3 donne pour chaque exécution le nombre de clients non couverts et le nombre de créneaux dégradés sur l'ensemble de la journée. Les résultats de l'algorithme TMV sont très stables sur le critère des clients non couverts quel que soit la qualité du réseau initial ; le nombre de créneaux dégradé est quant à lui plus variable et dépendant de la qualité de la solution de départ. Le tableau 5.4 et le graphique en Figure 5.2 montrent l'évaluation complète de la solution initiale et de la solution optimisée par TMV pour l'exécution 4 sur l'ensemble des créneaux de trafic. On fait ici l'hypothèse que le plan robuste est appliqué sur l'ensemble des créneaux comme si ce trafic correspondait à la journée à optimiser (voir l'hypothèse sur le trafic en introduction du chapitre 4). Les créneaux critiques utilisés pour l'optimisation sont en rouge, les autres créneaux n'ont pas été utilisés pour l'optimisation. Le gain sur l'ensemble des créneaux est de 31% (33% pour les créneaux critiques). On remarque que certains créneaux se dégradent en termes de clients non couverts (7 cas repérés en rouges dans les colonnes Evaluation) pour 13,5 clients perdus au total, ce qui est relativement peu. Sur 72 créneaux, 90% d'entre eux sont donc améliorés en termes de performance alors que seulement 10% d'entre eux sont utilisés pour l'optimisation journalière du réseau. Globalement la méthode donne de bons résultats, mais la durée d'exécution de l'algorithme est lente et le nombre de sites à modifier est important (18 sur 36).

Evaluation sur l'ensemble des créneaux de la journée	**TMV1**	**TMV2**	**TMV3**	**TMV4**	**Moyenne**
Nb de clients non couverts par la solution optimisée	653	671	664,5	669	**664,5**
Nb de créneaux dégradés	0	9	6	7	**5,5**

Table 5.3 – Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation sur l'ensemble des créneaux de la journée.

Créneaux	**Eval** init/TMV	**Crén.**	**Eval** init/TMV	**Crén.**	**Eval** init/TMV	**Crén.**	**Eval** init/TMV
06h00	0, 0	10h30	12.5, 11	15h00	8, 6	19h30	13, 13
06h15	0, 0	10h45	13.5, 11	15h15	6, 2	19h45	12, 9
06h30	0, 0	11h00	17, 5, 12	15h30	8, 4.5	20h00	20, 14
06h45	1, 1	11h15	12, 8	15h45	8, 6	20h15	11, 5
07h00	2, 2	11h30	20.5, 14	16h00	13, 8	20h30	12, 9
07h15	1, 1	11h45	18, 12	16h15	18, 12	20h45	23, 18.5
07h30	8, 7	12h00	24, 14	16h30	20.5, 12	21h00	16.5, 15.5
07h45	5, 7	12h15	21, 11	16h45	17.5, 13	21h15	17.5, 13
08h00	6, 3	12h30	23.5, 19	17h00	20, 13	21h30	15, 12
08h15	5, 3	12h45	20, 11	17h15	28, 20	21h45	12, 13
08h30	12, 9	13h00	19.5, 15	17h30	18, 13	22h00	6, 6
08h45	8, 5	13h15	22, 15	17h45	14, 7	22h15	7, 10
09h00	7.5, 6	13h30	23, 10	18h00	21, 18	22h30	11, 4
09h15	7.5, 6	13h45	16, 13	18h15	24, 25	22h45	5, 7
09h30	11, 10	14h00	11, 6	18h30	26, 18	23h00	2, 4
09h45	13.5, 9	14h15	16, 13	18h45	11.5, 7	23h15	2.5, 5
10h00	20.5, 11	14h30	13, 9	19h00	14, 11	23h30	1, 0
10h15	19, 15	14h45	11, 10	19h15	13, 9	23h45	0, 0
Total	Total tous les scénarios : 917/669 - Total les scénarios critiques : 132.5/89.5						

Table 5.4 – Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV4 - Evaluation de tous les créneaux.

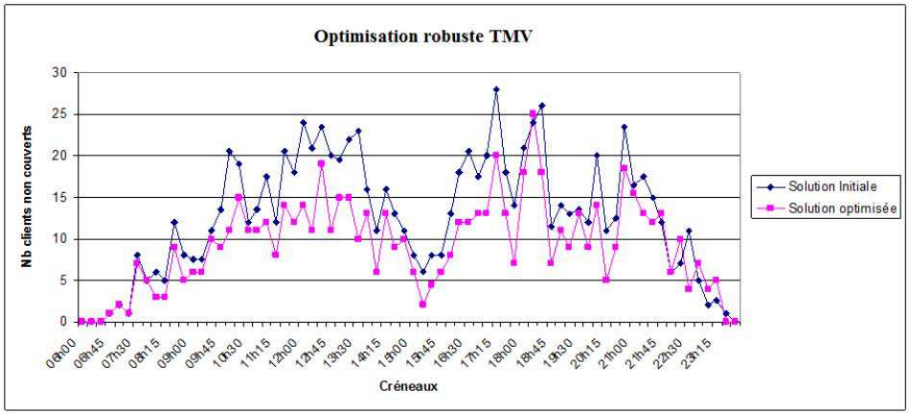


Figure 5.2 – Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou TMV4 - Evaluation de tous les créneaux.

5.3 Optimisation non robuste (séquentielle) des pics sur la journée

Dans cette section, l'optimisation séquentielle consiste à ajuster les ressources au fur et à mesure au niveau de chaque créneau critique retenu par la méthode de sélection basée sur les pics. Dans ce mode, le réseau optimisé au créneau de temps t est pris en entrée pour l'optimisation du créneau à $t+x$, ce n'est donc pas une optimisation robuste. L'optimisation par TMV est réalisée sur le premier scénario de trafic, puis la meilleure solution de réseau trouvée est appliquée sur le $2^{\text{ème}}$ scénario critique, i.e. le meilleur plan de fréquences trouvé au premier créneau est appliqué sur le réseau comme solution initiale à l'optimisation du $2^{\text{ème}}$ créneau. La procédure est répétée autant de fois que le nombre de scénarios critiques, donc ici TMV est appliquée 7 fois avec, à chaque fois, comme plan de fréquence initial le meilleur plan trouvé pour le créneau précédent, à l'exception du premier plan initial qui est aléatoire.

Le temps de calcul de chaque exécution est faible, de 300 à 600 secondes, étant donné qu'il n'y a qu'un seul scénario de trafic en optimisation. Pour une évaluation globale du temps de calcul, on retiendra 450 secondes en moyenne pour un scénario de trafic, soit $7 \times 450 = 53$ minutes d'optimisation en moyenne pour la journée.

Le tableau 5.5 montre les résultats sur une exécution (7 optimisations en séquence). Chaque colonne, notée $TMVS_1$ à $TMVS_7$, correspond à l'application de TMV sur le créneau correspondant. Dans chaque colonne, une fois l'optimisation faite, on indique le nombre de clients non couverts pour le créneau courant et les créneaux suivants (sauf pour $TMVS_7$) avec le plan de fréquences qui vient d'être généré ; par exemple, en colonne $TMVS_7$, le nombre de clients non couverts du créneau 3 est 8, et si on gardait ce plan pour le créneau 4, il y aurait 19 clients non couverts. A la fin de l'optimisation séquentielle, le nombre total de clients perdus, après l'application successive de 7 plans de fréquences sur le réseau, est 85 (colonne *Total* du tableau 5.5), soit un gain global de 41%.

On remarque que l'optimisation au créneau suivant n'apporte pas forcément un gain par rapport à un des plans précédents ; par exemple, l'optimisation sur le créneau 6 indique 8 clients perdus, soit le même nombre que le plan généré au créneau 4. Pourtant du créneau 4 au créneau 6, l'algorithme modifie 12 sites, l'impact sur la mise à jour du réseau est donc important. On identifie un biais de l'optimisation séquentielle : le résultat final est globalement bon avec 41% de gain (44% en moyenne pour l'optimisation robuste) mais le SON doit réaliser beaucoup plus de modifications, 43 au total (dont 15 critiques) contre 17 à 20 en optimisation robuste (dont 8 à 9 critiques).

Créneaux critiques	**Sol. initiale**	**TMV** S_1	**TMV** S_2	**TMV** S_3	**TMV** S_4	**TMV** S_5	**TMV** S_6	**TMV** S_7	**Total**
$10h30 - S_1$	17.5	13						16,5	13
$11h30 - S_2$	19	18	14					15,5	14
$12h45 - S_3$	13,5	14	9	8				8,5	8
$17h00 - S_4$	23	18	17,5	19	14			16	14
$18h00 - S_5$	22	16	12	17	15	10		11	10
$18h30 - S_6$	13,5	10,5	10	8,5	8	9	8	8	8
$18h45 - S_7$	35	23	22	24	21	18	20	18	18
Total	**143,5**							**93,5**	**85**
Gains/ Sol initiale									**41%**
Nb de sites modifiés		8	4	6	6	8	4	7	**43**
Dont critiques		4	1	3	2	3	0	2	**15**

Table 5.5 – Optimisation séquentielle des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation des créneaux critiques.

NB : concernant la colonne *Total*, ligne *Nb* de *sites modifiés*, le même site peut avoir été modifié sur chaque période et il est donc compté plusieurs fois, ce qui implique que le cumul peut être supérieur à 36 qui est le nombre de sites du réseau (idem pour la ligne *Dont critiques*). On compte donc le nombre de modifications à réaliser sur le réseau.

A titre d'exercice, en colonne TMV S_7 du tableau 5.6 , nous avons évalué la solution finale correspondant à TMV S_7 sur l'ensemble des créneaux critiques et fait le total. On obtient 93,5 clients non couverts. On s'aperçoit donc que l'algorithme converge progressivement vers une solution qui est globalement intéressante pour tous les créneaux critiques (la valeur n'est pas très éloignée de 85). Nous avons vérifié l'adéquation de ce plan final avec l'ensemble des créneaux critiques en appliquant une optimisation robuste, comme dans le cadre de la section précédente, avec pour plan de fréquence initial celui qui est issu de TMV S_7. L'algorithme s'est stabilisé au bout de 4h17 et a modifié 17 sites pour au final gagner 1 seul client en termes de couverture sur les créneaux critiques. Les résultats complets par créneau sont en 3ème colonne du tableau 5.6. Cela confirme la qualité globale de ce dernier plan. Cependant si on fait le même exercice d'évaluation pour tous les plans intermédiaires, on obtient les valeurs du tableau 5.7. On constate que l'algorithme ne convergence pas vers un plan globalement intéressant mais qu'en réalité les plans sont instables i.e. vraiment dédié à un créneau. Par ailleurs on n'atteint jamais le seuil de 60 comme l'obtient parfois l'optimisation robuste.

Créneaux critiques	**TMV** $S-7$	**TMV en optimisation robuste à partir de** S_7
10h30-S_1	16,5	15
11h30-S_2	15,5	16
12h45-S_3	8,5	8,5
17h00-S_4	16	16
18h00-S_5	11	11
18h30-S_6	8	8
18h45-S_7	18	18
TOTAL	**93,5**	**92,5**
Gain/Sol. initiale		**1%**
Nb de sites modifiés		**17**
Temps		**4h17**

Table 5.6 – Optimisation robuste à la suite d'une optimisation séquentielle par Tabou TMV - Méthode des pics.

Plan de fréquences des créneaux de la journée	**TMV** S_1	**TMV** S_2	**TMV** S_3	**TMV** S_4	**TMV** S_5	**TMV** S_6	**TMV** S_7
Nb de clients non couverts sur l'ensemble des créneaux antérieurs et postérieurs	112,5	98	110,5	97,5	90,5	100,5	93,5

Table 5.7 – Evaluation sur tous les plans intermédiaires.

Le tableau 5.8 et le graphique en Figure 5.3 montrent l'évaluation complète de la solution initiale et de la méthode séquentielle TMV sur le test ci-dessus. L'hypothèse que nous prenons pour la méthode séquentielle est que, à défaut de modèle de prévision de trafic comme mentionné en introduction de la section 4.4, les plans de fréquences séquentiels pour résorber les pics sont appliqués à bon escient. Le premier plan de fréquences optimisé est donc appliqué dès 6h00 en prévision du pic de 10h30 et ce jusqu'à 10h30 inclus. Puis le plan prévu pour résorber le pic de 11h30 s'applique de 10h45 à 11h30 inclus, etc. Le dernier plan de la journée, correspondant au pic de 18h45 s'applique donc dans notre cas de 18h45 jusqu'à 23h45 inclus, moment où le réseau passe en sous-charge. Globalement les résultats sont convaincants, le gain sur les créneaux est de 33% globalement et 39% sur les créneaux critiques. 10 créneaux (sur 72), tous non critiques, ont été dégradés dans leur performance pour une perte totale de 18 clients.

Créneaux	**Eval** *init/TMV*	**Crén.**	*Eval* *init/TMV*	**Crén.**	*Eval* *init/TMV*	**Crén.**	**Eval** *init/TMV*
06h00	0, 0	10h30	16.5, 11.5	15h00	20, 11.5	19h30	13.5, 10.5
06h15	0, 0	10h45	11, 10	15h15	11.5, 9	19h45	14, 8
06h30	0, 0	11h00	15, 9	15h30	10, 7	20h00	20, 14
06h45	1, 1	11h15	17.5, 12.5	15h45	14.5, 9.5	20h15	15.5, 12
07h00	2, 2	11h30	17, 10.5	16h00	13, 7	20h30	27, 6
07h15	1, 1	11h45	14, 13	16h15	20, 18	20h45	11, 12
07h30	6.5, 8	12h00	26.5, 18	16h30	20.5, 12	21h00	12, 14.5
07h45	8, 5	12h15	20.5, 17.5	16h45	11, 5	21h15	18, 8
08h00	3, 4	12h30	12.5, 8	17h00	28, 19	21h30	12, 10.5
08h15	4, 4	12h45	13.5, 8	17h15	22, 21	21h45	10.5, 14
08h30	12, 15	13h00	19.5, 13.5	17h30	24, 15	22h00	5.5, 3
08h45	12, 8	13h15	21, 9	17h45	15, 13	22h15	12, 3
09h00	12, 9.5	13h30	6, 2	18h00	21, 10	22h30	4.5, 3
09h15	9, 6.5	13h45	14.5, 11.5	18h15	19.5, 14	22h45	1, 5.5
09h30	18.5, 13	14h00	13, 7	18h30	16.5, 14.5	23h00	6, 5
09h45	11.5, 13.5	14h15	14, 9	18h45	23, 15	23h15	1, 3
10h00	17.5, 12	14h30	17.5, 10	19h00	20.5, 19	23h30	0, 0
10h15	19, 15	14h45	20, 13	19h15	12, 13	23h45	0, 0
Total	Total tous les scénarios : 985/664.5 - Total les scénarios critiques : 143.5/87.5						

Table 5.8 – Optimisation séquentielle des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation de tous les créneaux.

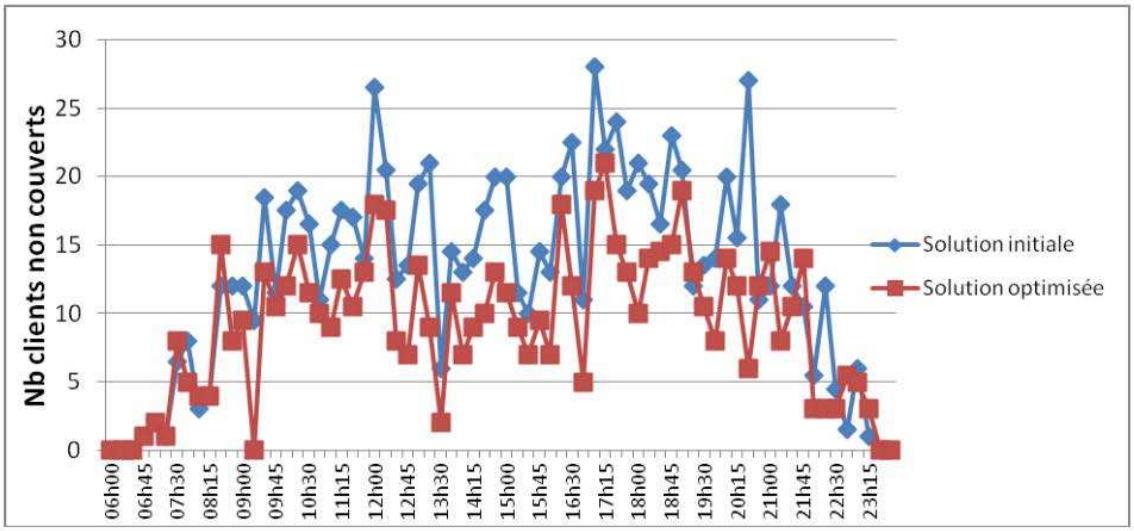


Figure 5.3 – Optimisation séquentielle des pics sur la journée par Tabou TMV - Evaluation de tous les créneaux.

5.4 Optimisation robuste des dominances en 3 périodes successives

Dans cette section nous présentons l'optimisation robuste en 3 étapes basée sur la méthode de la dominance pour la sélection des créneaux. Les 3 étapes correspondent à 3 intervalles de temps disjoints de la journée : le matin de 06h00 à 12h45, l'après-midi de 13h00 à 17h45 et le soir de 18h00 à 23h45. La période restant de 00h00 à 05h45 est considérée comme négligeable en termes de dysfonctionnement du réseau donc n'est pas inclue comme période de référence pour l'optimisation, le réseau de la période du soir reste actif.

L'optimisation robuste est donc appliquée avec 3 scénarios de trafic le matin, 6 scénarios de trafic l'après-midi et 6 scénarios de trafic le soir. Les 3 périodes sont optimisées séparément avec la méthode TMV. A chaque période un unique réseau est construit, puis nous évaluons ce réseau sur l'ensemble des créneaux de la période en question ; par exemple le réseau du matin est généré par une optimisation robuste appliquée sur le triplet (10h30, 11h30, 12h45) puis après l'optimisation, il est évalué sur l'ensemble des créneaux de 06h00 à 12h45 inclus. Ce réseau est ensuite utilisé comme réseau de départ pour l'optimisation robuste de la période suivante ; il est donc d'abord évalué sur la période suivante puis il est optimisé à son tour pour cette période-là, et le processus se répète. TMV a été testé pour 4 exécutions sur chaque période. L'ensemble des résultats est donné ci-après.

5.4.1 Optimisation robuste - Période du matin

A titre d'exemple visuel, la Figure 5.4 montre sur toute la période la comparaison entre l'évaluation du réseau initial et du réseau robuste pour une exécution prise au hasard. Tous les créneaux sont améliorés, mais on voit clairement que le gain le plus important n'est pasforcément sur les créneaux optimisés ; ici le gain le plus fort est à 12h00. Les tables suivantes donnent l'ensemble des évaluations sur les 4 exécutions avec tout d'abord une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes, puis le nombre de sites modifiés, dont les critiques, et ensuite les 4 évaluations séparément. Dans les 2 colonnes d'évaluation de la solution TMV, la valeur est indiquée en rouge si, après optimisation robuste, le nombre de clients non couverts est plus important pour ce créneau. Sur les 4 tests, cela se produit 3 fois (sur 112 cas au total) et uniquement pour des créneaux non critiques. Le temps de calcul moyen est de 43 minutes pour 3 créneaux utilisés.

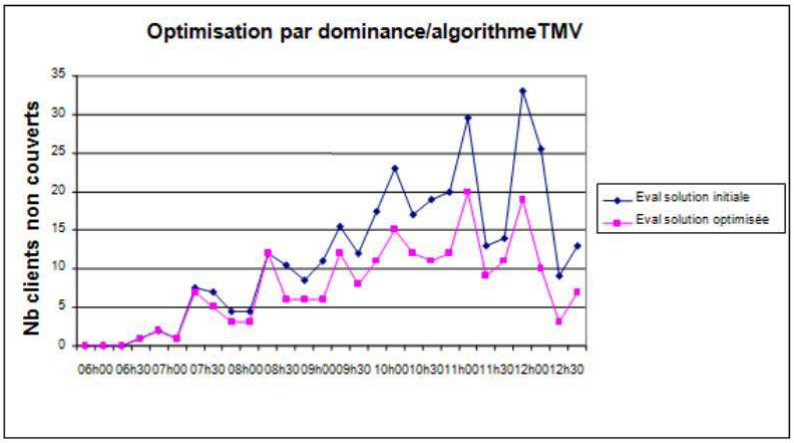


Figure 5.4 – Comparaison d'un réseau initial et d'un réseau robuste sur tous les créneaux de la période du matin.

Sur 4 exécutions	Evaluation initiale	Evaluation TMVp1	Gain
Minimum	262,5	216	18%
Maximum	534	247	54%
Moyenne	259,8	225,9	37%

Numéro d'exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
Nombre de sites modifiés (total, critique)	(8, 3)	(15, 6)	(10, 3)	(14, 6)	**(11.8, 4.5)**
Temps de calcul en minutes	37'	46'	38'	52'	**43'**

Créneaux	Evaluation Sol. initiale1/TMV1p1	Créneaux	Evaluation Sol. initiale1/TMV1p1
06h00	0, 0	09h30	16, 11
06h15	0, 0	09h45	15.5, 12
06h30	0, 0	10h00	18,11
06h45	1, 1	10h15	17, 15
07h00	2, 2	10h30	20, 11
07h15	1, 1	10h45	16, 13.5
07h30	7.5, 7	11h00	23.5, 12
07h45	7, 5	11h15	26.5, 20
08h00	3, 3	11h30	15, 8
08h15	7.5, 3	11h45	14, 9
08h30	16, 11	12h00	15, 22
08h45	9.5, 7	12h15	19, 10.5
09h00	17, 6.5	12h30	14.5, 4
09h15	10, 10	12h45	12.5, 7
Total	**324/222.5**		

Créneaux	Evaluation Sol. initiale2/TMV2p1	Créneaux	Evaluation Sol. initiale2/TMV2p1
06h00	0, 0	09h30	11, 11
06h15	0, 0	09h45	9, 9
06h30	0, 0	10h00	15.5, 11.5
06h45	1, 1	10h15	17, 14
07h00	2, 2	10h30	14, 13
07h15	1, 1	10h45	15, 13.5
07h30	7, 7	11h00	12, 14
07h45	5.5, 5	11h15	24,19.5
08h00	4, 3	11h30	12.5, 9
08h15	4.5, 3	11h45	11, 9
08h30	11.5, 10	12h00	23, 19.5
08h45	11.5,7	12h15	19, 9.5
09h00	9, 6	12h30	6.5, 3
09h15	6, 6.5	12h45	9, 9
Total	**262.5/216**		

Créneaux	Evaluation Sol. initiale3/TMV3p1	Créneaux	Evaluation Sol. initiale3/TMV3p1
06h00	0, 0	09h30	17, 13
06h15	0, 0	09h45	13, 10
06h30	0, 0	10h00	18.5, 12
06h45	1, 1	10h15	20.5, 18
07h00	2, 2	10h30	17.5, 12
07h15	1, 1	10h45	19, 13.5
07h30	6, 7	11h00	14.5, 13
07h45	5.5, 5	11h15	23.5, 21
08h00	2.5, 3	11h30	13.5, 10
08h15	3.5, 4	11h45	16, 13
08h30	15, 14.5	12h00	27, 23
08h45	15, 8	12h15	23.5, 14
09h00	9.5, 8	12h30	12, 7
09h15	9, 6	12h45	13, 8
Total	**318.5/247**		

Créneaux	Evaluation Sol. initiale4/TMV4p1	Créneaux	Evaluation Sol. initiale4/TMV1p4
06h00	0, 0	09h30	21.5, 12
06h15	0, 0	09h45	18.5, 8
06h30	0, 0	10h00	23, 11
06h45	1, 1	10h15	32, 17
07h00	2, 2	10h30	23.5, 12
07h15	4, 1	10h45	24, 13
07h30	10, 6	11h00	35.5, 14
07h45	9.5, 5	11h15	36, 20
08h00	11.5, 2	11h30	18.5, 7
08h15	11, 3	11h45	29.5, 9
08h30	20, 12	12h00	57.5, 21
08h45	20.5, 8	12h15	40, 11
09h00	18.5, 6	12h30	24, 4
09h15	20.5, 6	12h45	22, 7
Total	**534/218**		

Table 5.9 – Optimisation robuste de la période du matin avec TMV.

5.4.2 Optimisation robuste - Période de l'après-midi

A titre d'exemple visuel, la Figure 5.5 montre sur toute la période la comparaison entre l'évaluation du réseau initial issu de la période précédente et du réseau robuste produit pour une exécution prise au hasard. Tous les créneaux sont améliorés ; le gain le plus important n'est pas forcément sur les créneaux optimisés, le gain le plus fort est à 13h45.

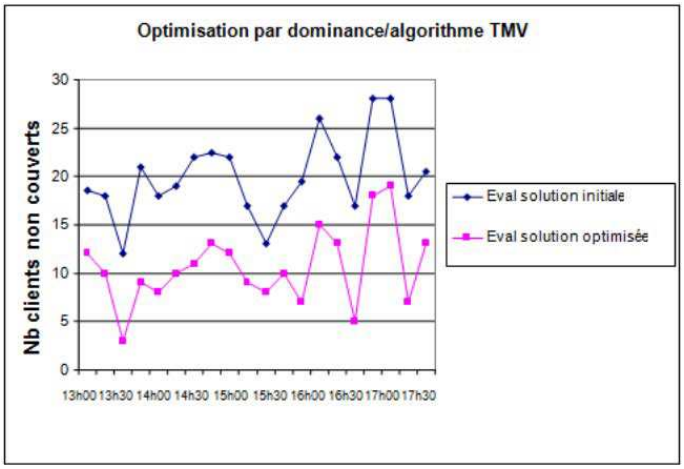


Figure 5.5 – Comparaison d'un réseau initial et d'un réseau robuste sur tous les créneaux de l'après-midi.

Les tables suivantes donnent l'ensemble des évaluations sur les 4 exécutions avec tout d'abord une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes, puis le nombre de sites modifiés, dont les critiques, et ensuite les 4 évaluations séparément. Les gains sont moins importants que sur la période du matin, 4,7% en moyenne. Le 2ème test conduit à un réseau qui est globalement moins bon que le réseau d'entrée (qui était très bon) ; cela peut se produire puisque l'optimisation ne porte que sur un sous-ensemble de créneaux alors que l'évaluation est sur l'ensemble des créneaux. Dans les 2 colonnes d'évaluation de la solution TMV, la valeur est indiquée en rouge si, après optimisation robuste, le nombre de clients non couverts est plus important pour ce créneau. Sur les 4 tests, cela se produit 15 fois (sur 80 cas au total) dont 4 fois pour des créneaux critiques. Le temps de calcul moyen est de 2h50 pour 6 créneaux utilisés.

Sur 4 exécutions	**Evaluation initiale TMVp1**	**Evaluation TMVp2**	**Gain**
Minimum	215	209.5	2.6%
Maximum	252	222.5	11.8%
Moyenne	228.9	218.1	4.7%

Numéro d'exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
Nombre de sites modifiés (total, critique)	(10, 4)	(14,7)	(14,7)	(10, 4)	**(12, 5.5)**
Temps de calcul en heure	2h45	2h48	3h07	2h45	**2h50**

Créneaux	Evaluation Solution initiale TMV1p1/TMV1p2	Créneaux	Evaluation Solution initiale TMV1p1/TMV1p2
13h00	13.5, 11	15h30	8.5, 7
13h15	13, 12	15h45	10, 10
13h30	2, 2	16h00	7, 7
13h45	11.5, 12	16h15	18, 17.5
14h00	8, 8	16h30	13, 14
14h15	10, 10	16h45	5, 7
14h30	11, 10	17h00	18, 18
14h45	12.5, 12	17h15	20.5, 20
15h00	13, 10	17h30	7, 7
15h15	10, 8	17h45	13, 15
Total	**224.5/218.5**		

Créneaux	Evaluation Solution initiale TMV2p1/TMV2p2	Créneaux	Evaluation Solution initiale TMV2p1/TMV2p2
13h00	13.5, 13.5	15h30	8. 5,7
13h15	10, 14	15h45	10, 9.5
13h30	2, 2	16h00	9, 9
13h45	9, 10.5	16h15	17.5, 18
14h00	8, 8	16h30	12, 11
14h15	9.5, 11	16h45	6.5, 7
14h30	11.5, 11	17h00	18, 18
14h45	13, 12	17h15	20, 19
15h00	11, 10	17h30	7, 7
15h15	7, 10	17h45	12, 15
Total	**215/222.5**		

Créneaux	Evaluation Solution initiale TMV3p1/TMV3p2	Créneaux	Evaluation Solution initiale TMV3p1/TMV3p2
13h00	14, 13	15h30	8, 8
13h15	15, 9	15h45	12, 10
13h30	4, 3	16h00	8.5, 6
13h45	13.5, 11	16h15	18, 17
14h00	9, 8	16h30	15.5, 12
14h15	11, 9	16h45	6, 5
14h30	10, 10	17h00	21.5, 18
14h45	13.5, 12	17h15	23, 19.5
15h00	14, 12	17h30	11, 8
15h15	10, 7	17h45	14.5, 12
Total	**252/209.5**		

Créneaux	Evaluation Solution initiale TMV4p1/TMV4p2	Créneaux	Evaluation Solution initiale TMV4p1/TMV4p2
13h00	13, 11	15h30	9, 8
13h15	10,14	15h45	10, 9
13h30	4,3	16h00	8, 8
13h45	11, 11	16h15	17, 16
14h00	9, 9	16h30	14, 11
14h15	9, 10	16h45	7, 7
14h30	10, 11	17h00	19, 19
14h45	14, 13	17h15	21, 20
15h00	12, 11	17h30	7, 7
15h15	8, 8	17h45	12, 16
Total	**224/222**		

Table 5.10 – Optimisation robuste de la période de l'après-midi avec TMV.

5.4.3 Optimisation robuste - Période du soir

A titre d'exemple visuel, la Figure 5.6 montre sur toute la période la comparaison entre l'évaluation du réseau initial issu de la période précédente et du réseau robuste produit pour une exécution prise au hasard. 6 créneaux sur 24 sont dégradés pour 1 ou 2 clients perdus à chaque fois ; le gain le plus important n'est pas forcément sur les créneaux optimisés, le gain le plus fort est à 18h15 (6 clients en plus).

Les tables suivantes donnent l'ensemble des évaluations sur les 4 exécutions avec tout d'abord une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes, puis le nombre de sites modifiés, dont les critiques, et ensuite les 4 évaluations séparément. Le gain

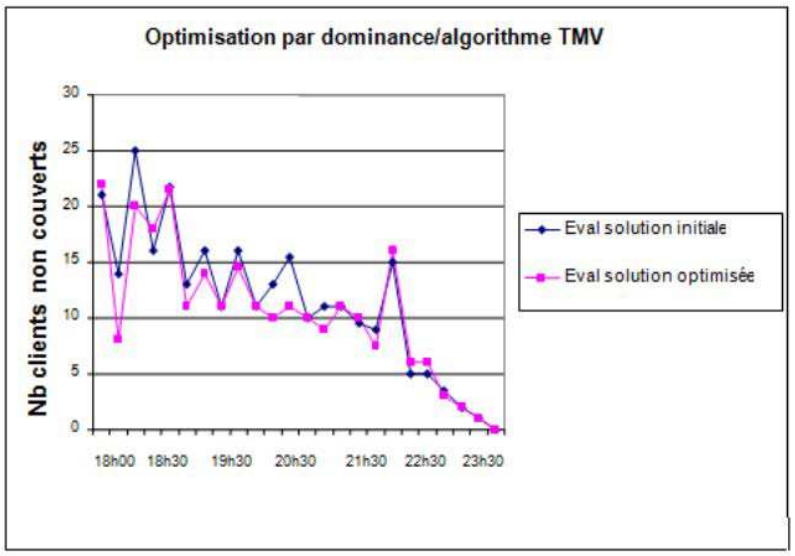


Figure 5.6 – Comparaison d'un réseau initiale et d'un réseau robuste sur tous les créneaux du soir.

moyen est de 3%. Dans les 2 colonnes d ?évaluation de la solution TMV, la valeur est indiquée en rouge si, après optimisation robuste, le nombre de clients non couverts est plus important pour ce créneau. Sur les 4 tests, cela se produit 17 fois (sur 96 cas au total) dont 4 fois pour des créneaux critiques. Le temps de calcul moyen est de 2h42 pour 6 créneaux utilisés.

Sur 4 exécutions	**Evaluation initiale TMVp2**	**Evaluation TMVp3**	**Gain**
Minimum	230.5	220	5%
Maximum	242	232.5	4%
Moyenne	234.1	226.4	3%

Numéro d'exécution	**Run1**	**Run2**	**Run3**	**Run4**	**Moyenne**
Nombre de sites modifiés (total, critique)	(12, 3)	(12, 3)	(13, 3)	(10, 4)	**(11.8, 3.3)**
Temps de calcul en heure	2h29	2h45	2h54	2h39	**2h42**

Créneaux	Evaluation Solution TMV1p2/TMV1p3	Créneaux	Evaluation Solution TMV1p2/TMV1p3
18h00	20, 17	21h00	10, 8
18h15	9, 7	21h15	9, 10
18h30	21, 20	21h30	11, 10
18h45	15, 15	21h45	9, 10.5
19h00	17.5, 17	22h00	7, 7
19h15	10, 10	22h15	14, 14
19h30	13, 11	22h30	4, 4
19h45	10, 9	22h45	5, 5
20h00	12, 14	23h00	3, 3
20h15	10, 11	23h15	2, 2
20h30	10, 11	23h30	1, 1
20h45	8, 9	23h45	0, 0
Total	**230.5/ 225.5**		

Créneaux	Evaluation Solution TMV2p2/TMV2p3	Créneaux	Evaluation Solution TMV2p2/TMV2p3
18h00	19, 16	21h00	9, 7
18h15	8.5, 7	21h15	9, 9
18h30	24, 22	21h30	10, 10
18h45	15, 15	21h45	10, 9
19h00	17, 16	22h00	7.5, 7
19h15	10, 10	22h15	14, 14
19h30	12, 11	22h30	4, 4
19h45	9, 8	22h45	5, 5
20h00	13, 14	23h00	3, 3
20h15	11, 10	23h15	2, 2
20h30	10, 11	23h30	1, 1
20h45	9, 9	23h45	0, 0
Total	**232/ 220**		

Créneaux	Evaluation Solution TMV3p2/TMV3p3	Créneaux	Evaluation Solution TMV3p2/TMV3p3
18h00	16, 17	21h00	17, 7
18h15	9, 10	21h15	9, 9
18h30	22, 20	21h30	10, 12
18h45	18.5, 13	21h45	9, 9
19h00	20, 19	22h00	8.5, 7
19h15	10, 10	22h15	14, 14
19h30	14, 15	22h30	6, 5
19h45	8, 9	22h45	5, 6
20h00	14, 14.5	23h00	3, 3
20h15	11, 11	23h15	2, 2
20h30	11, 11	23h30	1, 1
20h45	10, 9	23h45	0, 0
Total	**242/ 232.5**		

Créneaux	Evaluation Solution TMV4p2/TMV4p3	Créneaux	Evaluation Solution TMV4p2/TMV4p3
18h00	19, 17	21h00	9, 8
18h15	10, 10	21h15	9, 9
18h30	23, 22	21h30	11, 11
18h45	15, 15	21h45	10.5, 9.5
19h00	17.5, 16	22h00	7.5, 7
19h15	10,10	22h15	14, 14
19h30	13, 13	22h30	4, 4
19h45	9.5, 9	22h45	4, 5
20h00	12, 13	23h00	3, 3
20h15	10, 10	23h15	2, 2
20h30	10, 10	23h30	1, 1
20h45	8, 9	23h45	0, 0
Total	**232/ 227.5**		

Table 5.11 – Optimisation robuste de la période du soir avec TMV.

5.4.4 Optimisation robuste sur 3 périodes successives - Synthèse sur une journée

Globalement le tableau qui suit présente une synthèse de l'évaluation du réseau optimisé par la méthode robuste en 3 périodes sur l'ensemble de la journée. Le numéro d'une exécution sur les 3 périodes permet de suivre la succession de l'évolution du réseau de départ, on peut donc faire une évaluation globale sur la journée. Le tableau suivant présente

les 4 réseaux initiaux et optimisés évalués sur la journée complète, les gains, le nombre de sites modifiés ainsi que les sites critiques, le nombre de créneaux dégradés et les moyennes de tous les indicateurs.

Pour chaque exécution	**Evaluation des 3 réseaux initiaux (solution initiale+ TMVp1+TMVp2)**	**Evaluation des 3 réseaux finaux (TMVp1+TMVp2 +TMVp3)**	**Gain**	**Nb de sites modifiés (total/ critiques)**	**Nb de créneaux dégradés sur 72**
Run1	779	666.5	14%	30/10	12
Run2	709.5	658.5	7%	41/16	11
Run3	812.5	689	15%	37/13	9
Run4	990	667.5	33%	34/14	7
Moyenne	**822.8**	**670.4**	**18.5%**	**35.5/13.3**	**9.8**

Table 5.12 – Synthèse des évaluations sur la journée complète avec 3 réseaux robustes successifs.

La méthode dominance/robustesse offre globalement un comportement très stable sur les indicateurs du nombre de clients non couverts sur les réseaux finaux (colonne 3), sur le cumul du nombre de sites modifiés (NB : le même site peut avoir été modifié sur chaque période et il est donc compté plusieurs fois, ce qui implique que le cumul peut être supérieur à 36 qui est le nombre de sites du réseau) et sur le nombre de créneaux dégradés (50% d'augmentation entre le minimum et le maximum sur ces deux indicateurs), et ce quelle que soit la qualité des réseaux initiaux pour les 4 exécutions. Il faut retenir aussi que les 3 périodes considérées se comportent de façon très distincte sur le gain en nombre de clients non couverts : la première période génère 37% de gain en moyenne, puis les autres 4,7% et 3%. Cette approche en 3 périodes robuste permet donc de construire rapidement un réseau (pendant la première période) ayant un bon comportement pour les 2 périodes suivantes de la journée car les gains suivants sont plus faibles.

5.5 Optimisation non robuste des dominances en 3 périodes successives

Dans cette section nous présentons l'optimisation non robuste en 3 étapes basée sur la méthode de la dominance pour la sélection des créneaux. Les 3 étapes correspondent aux mêmes 3 intervalles de temps disjoints de la journée qu'en section précédente (cf. tableau 5.1). Comme en section précédente, l'optimisation en 3 périodes successives consiste à ajuster les ressources au fur et à mesure, sauf qu'ici pour chacune des 3 périodes nous appliquons la méthode TMV sur le créneau le plus dominant de la période, soit :

– Pour le matin : le créneau *12h45* qui domine sur 62 plans

- Pour l'après-midi : le créneau *13h15* qui domine sur 106 plans
- Pour le soir : le créneau *18h00* qui domine sur 77 plans

La démarche consiste à optimiser le créneau critique dominant du matin puis à l'évaluer sur l'ensemble des créneaux de cette période. Ce réseau devient la solution initiale pour l'optimisation du créneau critique dominant de la période de l'après-midi ; le réseau optimisé est ensuite évalué sur l'ensemble des créneaux de la 2ème période puis on continue le processus en passant à la période suivante, etc. Il y a donc 3 réseaux générés au cours de la journée. Nous aurions aussi pu optimiser successivement l'ensemble des créneaux dominants de chaque période (3, 6 et 6) comme en section 5.3 (voir tableau 5.5). Mais nous avons souhaité apporter cette variante pour voir l'impact du nombre de modifications portées dans le réseau ; seulement 3 ici contre 7 dans le cas séquentiel précédent, sachant que 2 créneaux critiques sur 3 sont aussi dans les 7.

Pour rester cohérent avec cette approche en 3 périodes distinctes issues de la méthode de dominance, l'évaluation de chacun des 3 réseaux est faite sur les créneaux de l'ensemble de la période (comme en 5.4) et non pas sur l'ensemble des créneaux précédents (comme en 5.3), multi-période dans ce cas.

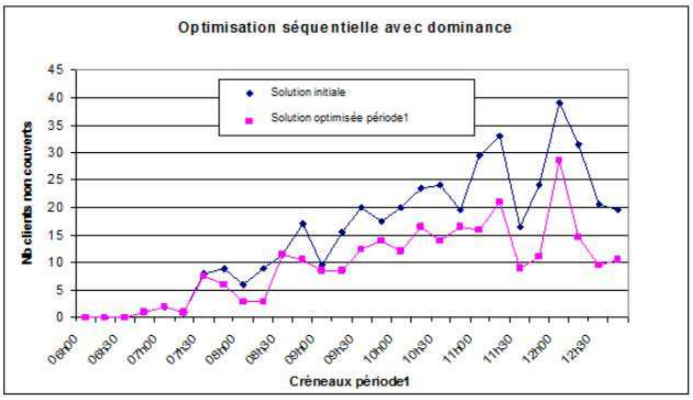
Les parties qui suivent présentent les résultats sur les 3 périodes d'optimisation avec 4 exécutions à chaque fois. Les exécutions sont numérotées de 1 à 4 ; le réseau issu de l'exécution 1 période 1 (TMV1p1) est injectée en entrée de l'exécution 1 période 2 pour générer un nouveau réseau (TMV1p2) lui-même injecté en entrée de l'exécution 1 période 3, etc. Donc à chaque fois, les tableaux présentent l'évaluation du réseau en entrée, et du réseau optimisé, codé TMV_ip_j où i est l'indice de l'exécution et j l'indice de la période où le réseau a été optimisé, sur l'ensemble des créneaux de la période considérée, comme en section précédente.

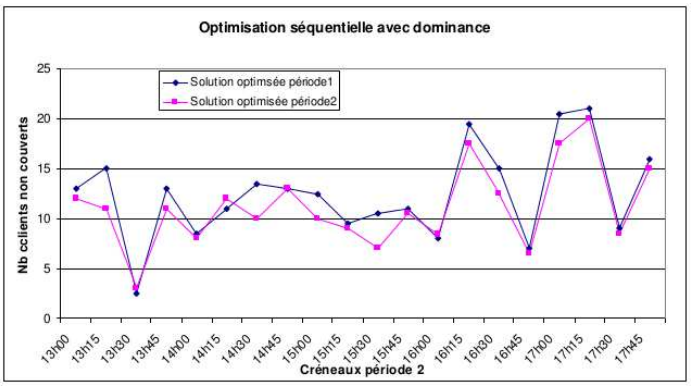
Comme en 5.3, le temps de calcul de chaque exécution est faible, de 300 à 600 secondes, étant donné qu'il n'y a qu'un seul scénario de trafic en optimisation. Comme dans la section 5.3, pour une évaluation globale on retiendra 450 secondes en moyenne pour un scénario de trafic, soit 3x450 = 23 minutes d'optimisation en moyenne pour la journée. Nous montrons tout d'abord un exemple de résultat.

5.5.1 Illustration sur un exemple

A titre d'exemple visuel, la Figure 5.7 montre sur les 3 périodes la comparaison entre l'évaluation du réseau entrant (issu de la période précédente, sauf pour la période 1 où celui- ci est aléatoire) et du réseau sortant (issu de l'optimisation sur cette période) pour un test d'optimisation pris au hasard. On voit déjà tout comme dans l'optimisation robuste

précédente en 3 périodes que se confirme, mais cette fois avec un seul créneau critique, que la période du soir est plus difficile à optimiser (7 créneaux détériorés - 6 en optimisation robuste) que celle de l'après-midi (3 créneaux détériorés ? aucun en optimisation robuste), elle-même que celle du matin (tous les créneaux améliorés ? idem en optimisation robuste). On peut donc faire l'hypothèse que ce comportement n'est pas spécifique à l'optimisation robuste où plusieurs créneaux sont considérés en même temps.





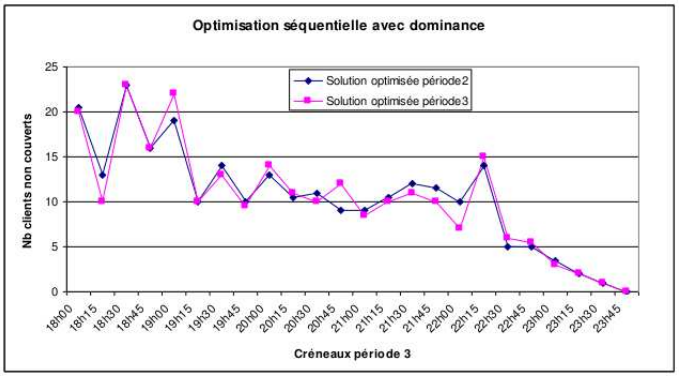


FIGURE 5.7 – Comparaison du réseau entrant et du réseau optimisé pour les 3 périodes en optimisation séquentielle.

5.5.2 Optimisation non robuste - Période du matin

Les tables suivantes donnent l'ensemble des évaluations sur les 4 exécutions avec tout d'abord une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes, puis le nombre de sites modifiés, dont les critiques, et ensuite les 4 évaluations séparément. Dans les 2 colonnes d'évaluation de la solution TMV, la valeur est indiquée en rouge si, après optimisation robuste, le nombre de clients non couverts est plus important pour ce créneau. Sur les 4 tests, cela se produit 4 fois (sur 112 cas au total ? 6 fois en optimisation robuste sur cette période) et uniquement pour des créneaux non critiques de la période.

Sur 4 exécutions	**Evaluation initiale**	**Evaluation TMVp1**	**Gain**
Minimum	318.5	219	31%
Maximum	534	247	54%
Moyenne	387.5	230.8	40%

Numéro d'exécution	**Run1**	**Run2**	**Run3**	**Run4**	**Moyenne**
Nombre de sites modifiés (total, critique)	(13, 7)	(8, 1)	(8, 4)	(8, 4)	**(9.3, 4)**

Créneaux	**Evaluation Sol. initiale1/TMV1p1**	**Créneaux**	**Evaluation Sol. initiale1/TMV1p1**
06h00	0, 0	09h30	16, 11
06h15	0, 0	09h45	15.5, 11
06h30	0, 0	10h00	18, 11
06h45	1, 1	10h15	17, 16
07h00	2, 2	10h30	20, 12
07h15	1, 1	10h45	16, 10
07h30	7.5, 7	11h00	23.5, 13
07h45	7, 5	11h15	26.5, 20.5
08h00	3, 3	11h30	15, 8
08h15	7.5, 3	11h45	14, 12
08h30	16, 10	12h00	15, 20
08h45	9.5, 6	12h15	19, 11.5
09h00	17, 6	12h30	14.5, 4
09h15	10, 6	12h45	12.5, 9
Total	**324/ 219**		

Créneaux	Evaluation Sol. initiale2/TMV2p1	Créneaux	Evaluation Sol. initiale2/TMV2p1
06h00	0, 0	09h30	15, 10
06h15	0,0	09h45	15, 9
06h30	0, 0	10h00	22.5, 12.5
06h45	1, 1	10h15	20, 16
07h00	2, 2	10h30	18.5, 11.5
07h15	1, 1	10h45	19.5, 13
07h30	8, 7	11h00	20, 12.5
07h45	5, 5	11h15	26.5, 22
08h00	7.5, 3	11h30	16, 9
08h15	6, 4	11h45	21, 9
08h30	15.5, 9	12h00	32, 21
08h45	18.5, 6	12h15	30.5, 9
09h00	13, 6	12h30	15, 8
09h15	12, 6.5	12h45	13, 8
Total	**374**/ **221**		

Créneaux	Evaluation Sol. initiale3/TMV3p1	Créneaux	Evaluation Sol. initiale3/TMV3p1
06h00	0, 0	09h30	17, 14.5
06h15	0, 0	09h45	13, 10
06h30	0, 0	10h00	18.5, 11.5
06h45	1, 1	10h15	20.5, 16
07h00	2, 2	10h30	17.5, 14.5
07h15	1, 1	10h45	19, 12.5
07h30	6, 7	11h00	14.5, 16.5
07h45	5.5, 6	11h15	23.5, 21
08h00	2.5, 3	11h30	13.5, 11
08h15	3.5, 3	11h45	16, 11.5
08h30	15, 11.5	12h00	27, 23
08h45	15, 11.5	12h15	23.5, 12.5
09h00	9.5, 6	12h30	12, 5
09h15	9, 7.5	12h45	13, 8
Total	**318.5**/ **247**		

Créneaux	Evaluation Sol. initiale4/TMV4p1	Créneaux	Evaluation Sol. initiale4/TMV4p1
06h00	0, 0	09h30	21.5, 13
06h15	0, 0	09h45	18.5, 11
06h30	0, 0	10h00	23, 12
06h45	1, 1	10h15	32, 15
07h00	2, 2	10h30	23.5, 17
07h15	4, 1	10h45	24, 13
07h30	10, 7	11h00	35.5, 15.5
07h45	9.5, 5	11h15	36, 20.5
08h00	11.5, 3	11h30	18.5, 8
08h15	11, 3	11h45	29.5, 9
08h30	20, 13.5	12h00	57.5, 21
08h45	20.5, 6	12h15	40, 13.5
09h00	18.5, 6	12h30	24, 3
09h15	20.5, 7.5	12h45	22, 10
Total	**534**/ **236.5**		

Table 5.13 – Optimisation séquentielle de la période du matin avec TMV.

5.5.3 Optimisation non robuste - Période de l'après midi

Les tables suivantes donnent l'ensemble des évaluations sur les 4 exécutions avec tout d'abord une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes, puis le nombre de sites modifiés, dont les critiques, et ensuite les 4 évaluations séparément. Les résultats ne sont vraiment pas bons puisque l'optimisation conduit 3 fois sur 4 à une dégradation de la qualité du réseau d'entrée (5% de dégradation en moyenne). Le créneau unique retenu pour l'optimisation, 13h15, ne permet pas d'améliorer le réseau issu de l'optimisation du matin pour tous les créneaux de l'après-midi. Dans les 2 colonnes d'évaluation de la solution TMV, la valeur est indiquée en si, après optimisation robuste, le nombre de clients non couverts est plus important pour ce créneau. Sur les 4 tests, cela se produit de nombreuses fois (33 fois sur 80 cas - 16 fois en optimisation robuste sur cette période), dont 10 fois sur les autres créneaux dominants de la période, mais pas lors du test 3 qui est stable sur tous les créneaux.

Sur 4 exécutions	Evaluation initiale TMVp1	Evaluation TMVp2	Gain
Minimum	224.5	232	-3%
Maximum	251.5	253	0%
Moyenne	233	245.8	-5%

Numéro d'exécution	**Run1**	**Run2**	**Run3**	**Run4**	**Moyenne**
Nombre de sites modifiés (total, critique)	(6, 3)	(6, 3)	(5, 2)	(2, 0)	**(4.8,2)**

Créneaux	**Evaluation Solution TMV1p1/TMV1p2**	**Créneaux**	**Evaluation Solution TMV1p1/TMV1p2**
13h00	13.5, 12	15h30	8.5, 8
13h15	13, 13	15h45	10, 11
13h30	2, 5	16h00	7, 7.5
13h45	11.5, 11.5	16h15	18, 17
14h00	8, 10	16h30	13, 14.5
14h15	10, 9	16h45	5, 6
14h30	11, 13	17h00	18, 21
14h45	12.5, 16	17h15	20.5, 23
15h00	13, 14	17h30	7, 12
15h15	10, 8.5	17h45	13, 15
Total	**224.5**/ **247**		

Créneaux	**Evaluation Solution TMV2p1/TMV2p2**	**Créneaux**	**Evaluation Solution TMV2p1/TMV2p2**
13h00	13, 13	15h30	13, 10
13h15	11, 10	15h45	10, 13.5
13h30	5, 3	16h00	7.5, 8
13h45	11, 13	16h15	16, 20
14h00	9, 10	16h30	11, 14.5
14h15	9, 9	16h45	6, 9
14h30	12, 11	17h00	19, 20.5
14h45	12.5, 15.5	17h15	20.5, 21.5
15h00	13.5, 17.5	17h30	10, 11
15h15	9, 9	17h45	13.5, 14
Total	**228.5**/ **253**		

Créneaux	Evaluation Solution TMV3p1/TMV3p2	Créneaux	Evaluation Solution TMV3p1/TMV3p2
13h00	14, 14	15h30	10, 10
13h15	12, 12	15h45	12.5, 12.5
13h30	3, 3	16h00	9, 9
13h45	13, 13	16h15	20, 20
14h00	9, 9	16h30	14, 14
14h15	12, 12	16h45	8, 8
14h30	12, 12	17h00	18.5, 18
14h45	14.5, 14.5	17h15	20.5, 20.5
15h00	15, 15	17h30	9.5, 9.5
15h15	10, 10	17h45	15, 15
Total	**251.5/ 251**		

Créneaux	Evaluation Solution TMV4p1/TMV4p2	Créneaux	Evaluation Solution TMV4p1/TMV4p2
13h00	12, 12	15h30	7.5, 8
13h15	11, 11	15h45	11.5, 12
13h30	4.5, 4.5	16h00	9.5, 10.5
13h45	11, 11	16h15	17, 17
14h00	9, 10	16h30	14, 13
14h15	11.5, 10	16h45	6, 5.5
14h30	10, 12	17h00	19, 18.5
14h45	12, 13	17h15	22, 21
15h00	10.5, 14	17h30	8, 8
15h15	8, 8.5	17h45	13.5, 12.5
Total	**227.5/ 232**		

Table 5.14 – Optimisation séquentielle de la période de l'après-midi avec TMV.

5.5.4 Optimisation non robuste - Période du soir

Les tables suivantes donnent l'ensemble des évaluations sur les 4 exécutions avec une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes. Les résultats sont positifs car l'algorithme améliore le réseau issu de l'après-midi pour les 4 tests. Dans les 2 colonnes d'évaluation de la solution TMV, la valeur est indiquée en rouge si, après optimisation robuste, le nombre de clients non couverts est plus important pour ce créneau. Sur les 4 tests, cela se produit 23 fois (sur 96 cas au total - 29 fois en optimisation robuste sur cette période) mais jamais sur le créneau dominant optimisé et 3 fois sur un des autres créneaux dominants de la période.

Sur 4 exécutions	Evaluation initiale TMVp2	Evaluation TMVp3	Gain
Minimum	253.5	248.5	2%
Maximum	290	262	9.7%
Moyenne	267.8	255.4	4.6%

Numéro d'exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
Nombre de sites modifiés (total, critique)	(10, 5)	(6, 3)	(10, 2)	(5, 0)	**(7.8, 2.5)**

Créneaux	Evaluation Solution TMV1p2/TMV1p3	Créneaux	Evaluation Solution TMV1p2/TMV1p3
18h00	26, 18.5	21h00	9, 9
18h15	13.5, 14	21h15	11.5, 9
18h30	24.5, 28	21h30	12.5, 11.5
18h45	20.5, 15	21h45	13, 10
19h00	23, 21	22h00	8, 9
19h15	12, 10	22h15	18, 14.5
19h30	14, 15	22h30	6, 4.5
19h45	12, 9.5	22h45	6, 6
20h00	15.5, 13.5	23h00	3, 3
20h15	13, 12	23h15	2, 2
20h30	11.5, 10	23h30	1, 1
20h45	14.5, 9.5	23h45	0, 0
Total	**290**/ **255.5**		

Créneaux	Evaluation Solution TMV2p2/TMV2p3	Créneaux	Evaluation Solution TMV2p2/TMV2p3
18h00	24, 19	21h00	9, 11.5
18h15	11.5, 10	21h15	9.5, 9
18h30	24, 24	21h30	12, 11
18h45	17, 18	21h45	10.5, 13
19h00	22, 20	22h00	7, 8
19h15	17, 16.5	22h15	14.5, 15
19h30	13.5, 14	22h30	5, 4.5
19h45	13, 10.5	22h45	5, 6
20h00	15, 15.5	23h00	3, 3
20h15	11, 10	23h15	2, 2
20h30	13, 12	23h30	1, 1
20h45	9, 8.5	23h45	0, 0
Total	**268.5**/ **262**		

Créneaux	Evaluation Solution TMV3p2/TMV3p3	Créneaux	Evaluation Solution TMV3p2/TMV3p3
18h00	22, 20	21h00	9, 10.5
18h15	11, 12	21h15	9, 10
18h30	24, 23.5	21h30	11, 11.5
18h45	17, 15	21h45	11, 11
19h00	20.5, 20	22h00	7, 7
19h15	15.5, 13	22h15	16, 15
19h30	13, 14	22h30	5, 4
19h45	10, 10	22h45	5, 5
20h00	16, 16	23h00	3, 3
20h15	10.5, 12	23h15	2, 2
20h30	11, 11	23h30	1, 1
20h45	9.5, 9	23h45	0, 0
Total	**259**/ **255.5**		

Créneaux	Evaluation Solution TMV4p2/TMV4p3	Créneaux	Evaluation Solution TMV4p2/TMV4p3
18h00	19, 18	21h00	10, 8
18h15	11, 13	21h15	10, 9
18h30	24.5, 24	21h30	11, 12
18h45	15, 18	21h45	13.5, 11
19h00	18, 18	22h00	7.5, 8
19h15	12, 11	22h15	16, 15
19h30	13, 15	22h30	4, 4
19h45	12.5, 9	22h45	6, 5
20h00	13, 15	23h00	3, 3
20h15	10, 10	23h15	2, 2
20h30	10.5, 10	23h30	1, 1
20h45	11, 9.5	23h45	0, 0
Total	**253.5**/ **248.5**		

Table 5.15 – Optimisation séquentielle de la période du soir avec TMV.

5.5.5 Optimisation non robuste sur les 3 périodes - Synthèse sur une journée

Globalement le tableau qui suit présente une synthèse de l'évaluation du réseau optimisé par la méthode non robuste en 3 périodes sur l'ensemble de la journée. Le numéro d'une exécution sur les 3 périodes permet de suivre la succession de l'évolution du réseau de départ, on peut donc faire une évaluation globale sur la journée. Le tableau suivant présente les 4 réseaux initiaux et optimisés évalués sur la journée complète, les gains, le nombre de sites modifiés ainsi que les sites critiques, le nombre de créneaux dégradés et les moyennes de tous les indicateurs.

Pour chaque exécution	Evaluation des 3 réseaux initiaux (sol. initiale + TMVp1+TMVp2)	Evaluation des 3 réseaux finaux (TMVp1+TMVp2 +TMVp3)	Gain	Nb de sites modifiés (total/ critiques)	Nb de créneaux dégradés sur 72
Run1	838.5	721.5	14%	29/15	16
Run2	871	736	15.5%	20/7	21
Run3	829	753.5	9%	23/8	9
Run4	1015	717	29.4%	15/4	14
Moyenne	**888.4**	**732**	**17.6%**	**21.8/8.5**	**15**

Table 5.16 – Synthèse des évaluations sur la journée complète avec 3 réseaux non robustes successifs.

La méthode dominance/non robustesse offre globalement un comportement très stable sur les indicateurs du nombre de clients non couverts sur les réseaux finaux (colonne 3) et ce quelle que soit la qualité des réseaux initiaux pour les 4 exécutions. Par contre sur le cumul du nombre de sites modifiés (NB : le même site peut avoir été modifié sur chaque période et il est donc compté plusieurs fois, ce qui implique que le cumul peut être supérieur à 36 qui est le nombre de sites du réseau) et sur le nombre de créneaux dégradés, les résultats sont instables avec une variation du simple au triple (4 à 15 pour les sites critiques et 15 à 29 pour tous les sites. Il faut retenir aussi que les 3 périodes considérées se comportent de façon très distincte sur le gain en nombre de clients non couverts puisque l'approche non robuste ne fonctionne pas en période d'après-midi : l'optimisation du créneau dominant de l'après-midi n'est pas valable pour les autres créneaux de la même période (dégradation du réseau de départ de 5% de moyenne).

5.6 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons retenu exclusivement la méthode TMV. Nous avons présenté notre démarche pour comparer l'optimisation robuste (optimiser plusieurs créneaux ensemble) et non robuste (optimiser un seul créneau à la fois), toutes les deux combinées avec l'optimisation à la journée (vision globale des situations à problème) et l'optimisation en 3 périodes (vision échelonnée matin, après-midi et soir), soit 4 combinaisons au total. Nous avons établi le lien entre l'optimisation et la méthode de sélection des couples créneaux/stations à optimiser : soit la méthode des pics qui retient les plus mauvais couples indépendamment les uns des autres ; soit la méthode des dominances, qui retient les plus mauvais couples dans un rapport de dominance les uns par rapport aux autres.

Le tableau ci-dessous donne les résultats sur un ensemble d'indicateurs (colonne 1) : les valeurs en bleu sont plutôt favorables à la méthode, et en rouge plutôt défavorable.

- Colonne 5 : l'optimisation non robuste basée sur les créneaux dominants est la plus mauvaise sur les clients non couverts et le nombre de créneaux dégradés.
- Colonne 4 : l'optimisation robuste basée sur les créneaux dominants modifie un nombre important de sites et n'est pas la meilleure sur les autres critères.
- Colonne 3 : l'optimisation non robuste basée sur les créneaux pics est la plus mauvaise sur le nombre de sites à modifier, mais elle requiert 5 à 10 mn pour optimiser un réseau sur un unique créneau horaire avec un bon résultat sur le nombre total de clients non couverts (optimisation en temps continue possible).
- Colonne 2 : l'optimisation robuste basée sur les créneaux pics est la meilleure sur le nombre de sites à modifier et le nombre de créneaux dégradés, avec un bon résultat sur le nombre de clients non couverts, mais elle requiert 6h à 7h de calcul (optimisation

en temps continue impossible).

Indicateurs	Optimisation robuste des pics sur la journée (4 RUNS)	Optimisation non robuste (séquentielle) des pics sur la journée (1 RUN)	Optimisation robuste des créneaux dominants en 3 périodes successives (4 RUNS)	Optimisation non robuste des créneaux dominants en 3 périodes successives (4 RUNS)
Nb moyen de clients non couverts sur la journée	664.4	664.5	670.4	732
Nb moyen de sites critiques modifiés	18.3	43	35.5	21.8
Dont critiques	8.8	15	13.3	8.5
Nb moyen de créneaux dégradés sur 72	5.5	10	9.8	15
Temps d'optimisation du réseau pour un seul créneau horaire	Sans objet	5 à 10 mn	Sans objet	5 à 10 mn
Temps moyen de calcul d'optimisation sur toute la journée	6h36	53 mn	6h15	23mn

Table 5.17 – Synthèse de la méthode TMV avec 4 options différentes d'optimisation.

A ce stade, nous pouvons développer quelques préconisations sur l'opportunité d'employer les différentes méthodes :

- Le choix des créneaux/sites à optimiser, l'optimisation du réseau sur les pics de trafic (colonnes 2 et 3), plutôt que sur une analyse de dominance, plus sophistiquée, est plus efficace. On applique ce choix sur les points suivants.
- L'amélioration du réseau dans un contexte où son comportement est assez prévisible, l'optimisation robuste à la journée (colonne 2) est à privilégier car elle fournit des réseaux *résistants*. Cela revient à produire un réseau type pour chaque jour de la semaine travaillé par exemple sur la base de statistiques de trafic sur plusieurs semaines travaillées.
- L'amélioration du réseau dans un contexte où son comportement est assez imprévisible, l'optimisation non robuste à la journée (colonne 3) est à privilégier car elle fournit des réseaux adaptés en quelques minutes mais ils ne sont pas *résistants*.

Les options 2 et 3 sont à utiliser ensemble. Prenons un exemple : le réseau type du *mardi travaillé* fait l'objet d'une optimisation robuste basée sur des statistiques de trafic sur plusieurs mardis (colonne 2). Il est mis en place le mardi matin très tôt. Quand le monitoring de trafic détecte un écart sur 15 mn par rapport aux prévisions, on fait immédiatement une optimisation non robuste (colonne 3) : le réseau type est alors défait pour être adapté. Il s'en suit qu'il faut poursuivre son adaptation non robuste au fur et à mesure en fonction de l'évolution du trafic. Si le monitoring montre que le trafic revient au comportement type, on remet immédiatement le réseau robuste.

Conclusion et perspectives

Ce mémoire de thèse porte sur les modèles et algorithmes pour l'optimisation en ligne du SON (*Self-Organizing Network*) dans les réseaux 4G/LTE. L'objectif principal est d'optimiser en continue la qualité du lien radio haut débit mobile tout en réduisant les coûts de maintenance. Le travail comprend essentiellement deux contributions : la modélisation du problème d'optimisation en tant que tel, et la résolution de ce problème dans un cadre d'optimisation robuste c'est-à-dire en contexte de forte variabilité des données d'entrée. D'une part, une phase de diagnostic sur le fonctionnement du réseau à partir des données, et une étude de sensibilité des solutions vis-à-vis des variations dans la réalisation des données ont été faites. Et d'autre part, en complément de la modélisation, le travail a porté sur la conception, le développement et l'expérimentation sur scénarios de méthodes d'optimisation robuste avec données variables et contraintes impératives de temps de calcul.

Principales contributions

Modélisation du processus global d'optimisation et du problème combinatoire à résoudre

Nous avons dans un premier temps réalisé un état de l'art sur l'optimisation dans les réseaux cellulaires en mettant l'accent sur la technologie 4G-LTE (*Long Term Evolution*) et les principes du SON (*Self-Organizing Networks*) qui est considérée comme étant la fonctionnalité intelligente de la future norme de téléphonie mobile. Le principe du SON consiste à utiliser des fonctions d'auto-organisations permettant à la fois de réduire la complexité du paramétrage du système et les coûts d'exploitation du réseau. L'adaptabilité dynamique du SON à la demande en trafic a fait apparaitre le cadre de l'optimisation robuste qui occupe en optimisation une place prépondérante dans le contexte de données incertaines. Or, cette incertitude sur les données est le facteur de base du rendement du réseau sur l'ensemble de la journée. En effet la demande en trafic, qui est incertaine,

impacte la qualité perçue par les clients, donc leur satisfaction, du fait de la répartition des ressources radio entre eux et de la corrélation entre la montée en charge du réseau et le niveau d'interférence généré sur les liens radio.

Nous avons donc proposé une formalisation du problème d'optimisation posée dans le cadre du SON dans un contexte robuste. C'est une contribution qui intègre non seulement la description des objectifs, contraintes et données du problème dans un contexte robuste de variation de la demande en trafic, mais aussi une modélisation des composantes physiques du réseau. En effet, le processus de l'optimisation en ligne est découpé en plusieurs sous-modèles fonctionnels qui interagissent de manière à représenter le comportement global du réseau. Pour cela nous avons défini plusieurs modèles : un modèle des stations eNB, un modèle de trafic, un modèle de définition des listes de voisines, un modèle d'interférence et un modèle de débit. Le modèle le plus complexe est le modèle de débit dans lequel nous avons intégré tous les facteurs qui permettent de calculer le débit offert aux UE et aux eNB. La gestion de l'incertitude sur le trafic est quant à elle prise en charge par une analyse de sensibilité des solutions au modèle ; la sensibilité est analysée avec des scénarios de trafic ignorés en entrée du modèle lors de la phase d'optimisation.

Approches d'optimisation robuste et options d'optimisation pour le SON

Nous avons proposé une méthodologie basée sur la robustesse afin d'étudier l'impact des paramètres antennaires principaux, que sont les fréquences, les inclinaisons verticales (tilts) et les puissances d'émission des eNB, sur la performance du réseau. La méthodologie repose principalement sur deux aspects : la sélection spatiale des stations du réseau à optimiser d'une part, et la sélection temporelle des stations à optimiser d'autre part. Dans ce contexte, nous avons montré que les composantes spatiales et temporelles qui identifient un mauvais fonctionnement du réseau (les pics d'appels rejetés dans notre cas), peuvent être utilisées de plusieurs manières : soit instantanément et séparément pour corriger le réseau, soit de façon dépendante dans un contexte robuste. Nous avons montré que dans le premier cas, le réseau produit instantanément est instable face à la variation de la demande et nécessite d'être continûment réorganisé pour combler cette instabilité. Nous avons aussi montré qu'une optimisation robuste produit des réseaux stables, résistant à la variation de la demande (le nombre total de clients rejetés dans la journée est sensiblement le même qu'avec une optimisation instantanée), et demandant beaucoup moins de réorganisation. En effet, le nombre d'eNB impactés par la première méthode peut être deux fois plus important qu'avec une approche robuste, ce qui génère un risque plus grand au niveau du fonctionnement du réseau.

Dans le contexte algorithmique, notre travail s'est focalisé sur les métaheuristiques ; ce choix a été justifié par la complexité du problème à résoudre. L'objectif a été tout d'abord

de sélectionner les paramètres d'optimisation les plus pertinents avec un algorithme glouton. Nous avons montré que l'optimisation des fréquences est plus efficace que celle des tilts, elle-même plus efficace que celle des puissances d'émission pour améliorer le réseau. Par la suite, nous avons exploré trois variantes d'une méthode de Recherche Tabou basée sur la notion de voisinage. Une analyse sur les performances des variantes dans un cadre restreint de scénarios de trafic, puis sur l'ensemble de la journée, a permis de montrer que la méthode TMV (*Tabou dégradé Meilleur Voisin*) était la plus efficace dans l'articulation des phases d'exploration et d'intensification dans l'espace de recherche. A ce stade, TMV a été évaluée pour quatre configurations de problème à résoudre qui combinent l'utilisation d'une fonction objectif robuste ou pas, et l'utilisation de scénarios de trafic à la journée ou en sous-ensemble (3 périodes), avec quatre exécutions pour chaque cas de figure. Globalement, nous avons observé qu'en moyenne l'optimisation robuste à la journée permet d'obtenir les meilleurs résultats sur le nombre de clients non couverts, le nombre de sites modifiés et le nombre de scénarios dégradés. Les réseaux produits sont très résistants. Cependant si la demande en trafic répond à un comportement totalement imprévu, et très éloigné des prévisions, alors une optimisation immédiate pour gérer l'imprévision peut être nécessaire. Dans ce cas, la méthode non exacte que nous avons développée montre qu'il est possible de réorganiser efficacement le réseau en quelques minutes.

Perspectives et travaux en cours

Plusieurs parties de notre travail peuvent donner lieu à de nouvelles recherches tant le domaine est vaste et encore peu exploré. Nous citons ici trois orientations qui nous paraissent importantes.

Gestion globale de l'auto-configuration du réseau

Dans le travail que nous avons réalisé dans cette thèse, nous n'avons pas tenu compte du niveau de l'architecture du réseau LTE où les fonctionnalités d'auto-optimisation sont incorporées et de leurs interactions avec les fonctions d'auto-configuration plus globale. Il s'agit donc de traiter le problème dans un cadre plus vaste intégrant non seulement la qualité radio mais plus largement la qualité de service du réseau. Dans ce contexte, notre travail doit être complétée par des modèles et des méthodes d'optimisation situés plus en amont dans le réseau, au niveau du cœur de réseau appelé EPC (*Evolved Packet Core*), et dans les couches protocolaires IP.

Scénarios de réseau et de trafic

Notre travail a pu être réalisé dans un contexte quasi-réel puisque nous avons utilisé pour cas d'étude une architecture de réseau GSM/UMTS existant (aucun réseau LTE n'était déployé au début de la thèse). Les premiers réseaux LTE sont véritablement opérationnels depuis 2013, il y a donc une vraie opportunité à confronter nos résultats sur d'autres contextes. En particulier, même si les réseaux LTE actuels s'appuient complétement sur les réseaux GSM/UMTS, et que le trafic est extrêmement faible, donc avec des remontées de données relativement peu expressives des problèmes réels que pourront rencontrer les réseaux chargés dans 5 ou 6 ans, un lien reste à faire avec les taux de charge, les indicateurs et les options d'auto-optimisation présentes dans les équipements déployés actuellement.

Optimisation temps réel

Notre travail a porté sur la recherche d'un modèle mathématique à optimiser, d'une méthode de sélection des stations et scénarios à optimiser, et d'une méthode d'optimisation approchée. La question de l'optimisation en temps réel, comme on peut le trouver en informatique industrielle, c'est-à-dire avec un modèle calculable et une méthode qui peut fournir un résultat en quelques secondes, ou moins, reste entièrement ouverte. Nous n'avons pas abordé ce sujet, qui est un domaine à part entière, dans lequel une méthode d'optimisation combinatoire pourrait être remplacée par une approche de contrôle commande à base de graphe d'états par exemple. Ce genre de méthode s'applique sur des systèmes avec architecture distribuée, cependant rarement dans des cadres aussi vaste, complexe et intelligent qu'un réseau mobile. La démonstration de faisabilité est à faire.

Publications

Conférences internationales avec actes et comité de sélection

[1] Nourredine Tabia, Alexandre Gondran, Oumaya Baala, Alexandre Caminada. Self-Organizing Networks on LTE System : Antenna Parameters Configuration Effects on LTE Networks Coverage with Respect to Traffic Distribution. IARIA-*MOBILITY*, Lisbon. 2013.

[2] Nourredine Tabia, Alexandre Gondran, Oumaya Baala, Alexandre Caminada. Interference Model and Antenna Parameters Setting Effects in LTE Networks coverage : Robust Optimization with Respect to Traffic Distribution. ACM-*International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. Paphos. 2012.

[3] Nourredine Tabia, Alexandre Gondran, Oumaya Baala, Alexandre Caminada. Frequency Robustness Optimization with respect to Traffic Distribution for LTE Network. In Springer 2012. Lecture Notes in Computer Science ISBN 978-3-642-29177-7, *EvoCop international conference, EvoApplications*, Malaga. 2012.

[4] Nourredine Tabia, Alexandre Gondran, Oumaya Baala, Alexandre Caminada. Interference Model and Evaluation in LTE Networks. IEEE-IFIP *Wireless and Mobile Networking Conference*. Toulouse 2011.

Conférences nationales et communications

[1] Nourredine Tabia, Alexandre Gondran, Oumaya Baala, Alexandre Caminada. Impact des paramètres antennaires sur la couverture dans les réseaux LTE : approche robuste. Conférence ROADEF. Troyes. 2013.

[2] Abderrahim Chariete, Nourredine Tabia, Oumaya Baala, Alexandre Caminada. Analyse des taux de coupures d'appels sur handover pour l'optimisation des réseaux LTE. IngéDoc. Belfort 2012.

[3] Nourredine Tabia, Oumaya Baala, Alexandre Caminada, Alexandre Gondran. Impact des paramètres antennaires sur la couverture dans les réseaux LTE. Conférence ROADEF. Angers. 2012.

[4] Nourredine Tabia, Alexandre Gondran, Oumaya Baala, Alexandre Caminada. Intérêt de l'optimisation robuste dans les réseaux de radiocommunication. Conférence ROADEF. Saint-Etienne 2011.

[5] Nourredine Tabia, Alexandre Gondran, Oumaya Baala, Alexandre Caminada. Modèle de calcul d'interférence dans le réseau de communication 4G-LTE. JDIR. UTBM, Belfort 2011.

[6] Nourredine Tabia, Alexandre Caminada, Oumaya Baala, Alexandre Gondran. Self-Organizing Networks dans les futurs réseaux de télécommunication LTE. Journée CNRS-ASR RGE. Belfort 2010.

[7] Nourredine Tabia, Alexandre Caminada, Oumaya Baala, Alexandre Gondran Optimisation online dans les réseaux de radiocommunication. Journée CNRS ASR Rescom. 2010.

Bibliographie

[1609.1., 2006] IEEE P1609.1. Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager. *IEEE Computer Society*, 2006.

[3GPP. R1-050738., 2005] 3GPP. R1-050738. Interference Mitigation- Consideration and Results on Frequency Reuse. Siemens, 2005.

[3GPP. R1-050507., 2005] 3GPP. R1-050507. Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE,. Huawei, May 2005.

[Mao *et al.*, 2008] A. Mao., A. Maaref and K. Teo. GlobCom : Adaptive Soft Frequency Reuse for Inter-Cell Interference Coordination in SC-FDMA Based 3GGP LTE Uplinks. *P*roc. of IEEE Global Telecommunication Conference New Orleans LO, USA, Dec 2008.

[Rahman *et al.*, 2010] M. Rahman and H. Yanikomeroglu. Enhancing Cell Edge Performance : A Downlink Dynamic Interference Avoidance Scheme With Inter-Cell Coordination. *I*EEE Transaction on Wireless Telecommunication vol.9, no.4, pp. 1414-1425, April 2010

[Rahman *et al.*, 2009] M. Rahman and H. Yanikomeroglu. Interference Avoidance with Dynamic Inter-Cell Coordination for Downlink LTE System. *P*roc. of Wireless Communication and and Networking Conferenc Budapest, Hungary, April 2009

[3GPP R1-050738 *et al.*, 2005] 3GPP R1-050738. Interference mitigation- Considerations and results on frequency reuse *Siemens.*, 2005.

[3GPP R1-050507 *et al.*, 2005] 3GPP R1-050507. Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE. *Huawei*, 2005.

[*Yilmaz et al.*, 2009] O.N.C. Yilmaz., S. Hamalainen and J. Hamalainen. System level analysis of vertical sectorisation for 3GPP LTE. *Proc. IEEE 6th International Symposium On Wireless Ccommunication System (CSWCS).*, 2009.

[Siomina *et al.*, 2006] I. Siomina., P. Varbrand and D. Yuan. Automated optimization of service coverage and base station antenna configuration in UMTS networks. *IEEE Wireless Communications. Vol 13. no. 6. pp. 16-25*, 2006.

[Yilmaz *et al.*, 2009] O.N.C. Yilmaz and S. Hamalainen. Comparaison of remote electrical and mechanical antenna downtilt performance for 3GPP LTE *Proc. IEEE 70th Vehicular Conference Fall (VTC-2009 FALL)*, 2009

[Schoenen *et al.*, 2008] R. Schoenen, W. Zirwas and B.H Walke. Capacity and coverage analysis of a 3 GPP-LTE multihop deployment scenario. *Proc. IEEE International Conference On Communications Workshops.*, May.2008.

[Holma *et al.*, 2009] H. Holma and A. Toskala. LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. *John Wiley & sons Ltd Edition.*, August.2009.

[Gondran*et al.*, 2006] A. Gondran, O. Baala, A. Caminada, H. Mabed. Interference management in IEEE 802.11 frequency assignment. *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 2238-2242*, 2006.

[Altman *et al.*, 2002] Z.Altman., J.M Picard., S. Ben Jamaa., B. Fourestie., A. Caminada., T. Dony., J.F Morlier., S. Mourniac. New challenges in automatic cell planning of UMTS networks *Proc. 56th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), pp. 951-954*, December 2002

[Wang *et al.*, 2012] Y. Wang., D. Wang., J. Pang and G. Shen. Self-Organizing of Downlink Transmission Power 3GPP LTE-A Heteregoneous Network *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012.

[Combes *et al.*, 2011] R. Combes., Z. Altman., M. Haddad, M. and E. Altman. Self-Optimizing Strategies for Interference Coordination in OFDMA Networks. *Proc. IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2011.

[Chung Shue Chen *et al.*, 2012] Chung Shue Chen and F. Baccelli. Self-Optimization in Mobile Cellular Networks : Power Control and User Association. *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC).*, 2010.

[Wang *et al.*, 2010] Z. Wang., W. Xiong., C. Dong., J. Wang and S. Li. A novel downlink power control scheme in LTE heterogeneous network. *Proc. IEEE International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP)*, 2011.

[Yang *et al.*, 2011] L. Yang and W. Pingping. Location Based Autonomous Power Control for ICIC in LTE-A Heterogeneous Networks. *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011).*, 2011.

[Gonzalez *et al.*, 2013] D.G Gonzalez., M. Garcia-Lozano., S. Ruiz Boque and L. Dong Seop. Optimization of Soft Frequency Reuse for Irregular LTE Macrocellular Networks . *IEEE Transactions on Wireless Communications. vol.12, no.5, p.2410-2423*, 2013.

[Lee *et al.*, 2013] D. Lee., G.Y. Li and S. Tang. Inter Inter-Cell Interference Coordination for LTE Systems. *Proc. IEEE Transactions on Vehicular Technology.*, 2013.

[Racz *et al.*, 2008] A. Racz., N. Reider and G. Fodor. On the Impact of Inter-Cell Interference in LTE. *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference.*, 2008.

[Hu *et al.*, 2010] H. Hu., J. Zhang., X. Zheng., Y. Yang and P. Wu. Self-Configuration and Self-Optimization for LTE Networks. *IEEE Communications Magazine.*, 2010.

[Park *et al.*, 2012] C. Park and H.S Choi. Optimization of downlink power control based on LTE . *Proc. IEEE International Conference on ICT Convergence (ICTC).*, 2012.

[Awada *et al.*, 2011] A. Awada., B. Wegmann., I. Viering, A. Klein. Optimizing the Radio Network Parameters of the Long Term Evolution System Using Taguchi's Method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.60, no. 8, p.3825-3839.*, 2011.

[Chung *et al.*, 2012] S.P Chung and Y.W Chen. Performance Analysis of Call Admission Control in SFR-Based LTE Systems . *IEEE Communication Letters, Vol.16, No.7, pp.1014-1017*, 2011.

[Simonsson *et al.*, 2008] R. Simonsson., C.F Ball., K. Ivanov., J. Lienhart and P. Hric. Uplink Power Control in LTE - Overview and Performance, Subtitle : Principles and Benefits of Utilizing rather than Compensating for SINR Variations . *Proc. IEEE 68th Vehicular Technology Conference, VTC 2008-Fall.*, 2008.

[Mullner *et al.*, 2009] R. Mullner., C.F Ball., K. Ivanov., J. Lienhart and P. Hric. Contrasting Open-Loop and Closed-Loop Power Control Performance in UTRAN LTE Uplink by UE Trace Analysis. *Proc. IEEE International Conference on Communications, 2009. ICC '09.*, 2009.

[Edwards *et al.*, 1998] G. Edwards and R.Shankar. Microcellular Handoff using Fuzzy Logic Techniques. *Wireless Networks, vol. 4, pp. 401-409*, 1998.

[Edwards *et al.*, 2000] G. Edwards. R.Kandel and R.Sankar. Fuzzy Handoff Algorithms for Wireless Communication. *Elsevier Fuzzy Sets and Systems, vol 111, pp. 379-388.*, 2000.

[Hou *et al.*, 2000] J. Hou. and D.C O'Brien. Vertical Handover-Decision-Making Algorithm using Fuzzy Logic for the Integrated Radio and OW System. *IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, No. 1, pp. 176-185.*, 2006.

[Foong *et al.*, 2009] K.C Foong., C.T Chee. and L.S Wei. Adaptive network fuzzy inference system (ANFIS handoff algorithm. *IEEE ICFCC'09, Int. Conf. On Future Computer and Communication, pp 195-198.*, 3-5 April 2009.

[Jang., 1993] J.S.R Jang. ANFIS : Adaptive Network Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.23, No. 3.*, May/Jun 1993.

[Sesia *et al.*, 2009] S. Sesia., I. Toufik and M. Baker. The UMTS Long Term Evolution :from Theory to Practice. *A John Wiley & Sons, Ltd, Publication.*, 2009.

[Brockmann *et al.*, 1994] W. Brockmann and O. Huwendiek. Prediction in Real-Time Control Using Adaptive Networks With On-line Learning . *IEEE Conference on Control Applications, vol.2, pp 1067-1072.*, August.1994.

[Miernik.,2007] M. Miernik. Application of 2G Spatial Traffic Analysis in the Process of 2G and 3G Radio Network Optimization. *IEEE 65th Vehicular Technology Conference, pp 909-913.*, April.2007.

[Kohonen *et al.*, 1996] T. Kohonen, J. Hynninen., J. Kangas., J. Laaksonen and K. Torkkola. SOM-PAK : The Self-Organizing Map Program Package. *Lab. Comput. Inform. Sci., Helsinki Univ. Technol., Espoo.*, 1996.

[Lehtimaki *et al.*, 2007] P. Lehtimaki P., K. Raivio and O. Simula. Mobile radio access network monitoring using the self-organizing map. *European Symposium on Artificial Neural Network, Bruges, Belgium, pp. 231-236.*, 2002.

[Laiho *et al.*, 2007] J. Laiho., K. Raivio., P. Lehtimaki., K. Hatonen and O. Simula. Advanced analysis methods for 3G cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.4 , no.3, p. 930-942.*, May.2005.

[Baliosian *et al.*, 2006] J. Baliosian., H. Oliver., A. Devitt., F. Sailhan, E. Salamanca, B. Danev and G. Parr. Application of 2G Spatial Traffic Analysis in the Process of 2G and 3G Radio Network Optimization. *IEEE 65th Vehicular Technology Conference, pp 909-913.*, June.2007.

[Lee *et al.*, 2008] J.M Lee, S.H Jeon and J.K Choi. Adaptive network access mechanism for multi-interfaced terminal over heterogeneous wireless networks. *14th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC.*, April.2007.

[Altman *et al.*, 2006] Z. Altman., H. Dubreil., R. Nasri., O. Ben Amor., J.M Picard., V. Diascorn and M. Clerc. Auto-tuning of RRM parameters in UMTS networks, chapter 16 in Understanding UMTS Radio network modelling. *planning and automated optimisation : theory and practice, Editors : M. Nawrocki, M. Dohler and H. Aghvami, Wiley,*, 2006.

[Tiwana *et al.*, 2009] M.I Tiwana M.I., B. Sayrac B and Z. Altman. Statistical learning for automated RRM : Application to eUTRAN mobility. *IEEE International conference on Communications, OrangeLabs.*, 2009.

[Itao *et al.*, 2001] T. Itao., T. Suda, T. Nakamura and M. Matsuo. Adaptive Networking Architecture for Service Emergence. *Symposium on Applications and the Internet Workshops, pp 9-16.*, 2001.

[Ericson., 2009] Ericson. LTE : An introduction, Long Term Evolution offers a superior user experience and simplified technology for next-generation mobile Broadband. *White paper.*, 2009.

[Agilent Technologies, 2009] Agilent Technologies. 3GPP Long Term Evolution : System Overview, Product, Development, and Test Challenges. *Application Note.*, 2009.

[Olsson *et al.*, 2009] M. Olsson., S. Sultana., S. Rommer, L. Frid and C. Mulligan. SAE and the Evolved Packet Core : Driving The Mobile Broadband Revolution. *Elsevier Ltd.*, 2009.

[Effort., 2009] EFFORT. LTE+SAE = EPS, Principes et Architecture. *www.efort.com.*, 2009.

[Hung *et al.*, 2009] M.N Hung., S. Lin and S. Tatesh. Coexistence Studies for 3GPP LTE with Other Mobile Systems. *LTE Part II : 3GPP Release 8, Alcatel-Lucent.*, 2009.

[Holma *et al.*, 2009] H. Holma and T. Antti. LTE for UMTS. OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. *Nokia Siemens Networks, Finland, John Wiley & Sons Ltd.*, 2009.

[Astély *et al.*, 2009] D. Astély., E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindström and S. Parkvall. LTE : The Evolution of Mobile Broadband. *LTE Part II : 3GPP Release 8, Ericsson research.*, 2009.

[NEC Corporation, 2009] NEC Corporation. Self-Organizing Network : NEC's proposals for next-generation radio network management. *NEC Corporation*, February.2009.

[Van Den Berg *et al.*, 2008] J.L Van Den Berg., R. Litjens., A. Einsenblaeter., M. Amirijoo., O. Linnell, C. Blondia., T. Kuerner., N. Scully., J. Oszmiansky., L.C Schmelz. Self-Organization in Future Mobile Communication Networks. *In Proceding. of ICT Mobile Summit*, 2008.

[3GPP TS 32.521 V1.1.0., 2009] 3GPP TS 32.521 V1.1.0. 3rd Generation Partnership Project ; Technical Specification Group Services and System Aspects. *Telecommunication Management; Self-Optmization OAM; Concepts and Requirements (Release 9)*, July.2009.

[Feng *et al.*, 2008] S. Feng and E. Seidel. Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution. *Nomor Research GmbH, Munich, Germany*, May.2008.

[SOCRATES., 2008] S. Feng and E. Seidel. Self-Organisation and Self-Configuration in Wireless Networks. *Project Period From 01/01/2008 to 31/12/2010, www.fp7-socrates.eu*, May.2008.

[Ngmn07., 2007] Next Generation Mobile Networks. Use cases related to Self Organising Network. *Overall Description, May 31st 2007. www.ngmn.org*, May.2007.

[Ngmn08., 2008] Next Generation Mobile Networks. Recommendation on SON and O&M Requirements. , December 2008.

[SOCRATES., 2008] SOCRATES. Self-Organisation and Self-Configuration in Wireless Networks. *Project Period From 01/01/2008 to 31/12/2010, www.fp7-socrates.eu*, 2008-2010.

[Kuehn *et al.*, 2007] E. Kuehn., A. Ambrosi., D. Hofmann., C. Gerlach and M. Litzenberger. Self-Optimization and Self Configuration of 4G radio access Networks. *Alcatel Lucent R&D, Stuttgart, Germany*, 2007.

[Ghassabeh *et al.*, 2007] Y.A Ghassabeh and H.A Moghaddam. Self Organized Networks for Optimal Feature Extraction. *Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Jacksonville, FL, USA, June 20-23.*, June.2007.

[Racz *et al.*, 2007] A. Racz., A. Tamesvary., N. Reider. Handover Performance in 3GPP Long Term Evolution (LTE) Systems. *Systems, Mobile and wireless communication summit.*, July 2007.

[Magnusson *et al.*, 2001] P. Magnusson and J. Oom. An architecture for Self-Tuning Cellular Systems. *Ericson research, Lin Lab, Linköping, Sweden.*, July 2001.

[Nas *et al.*, 2007] R. Nas R and Z. Altman. Handover adaptation for Dynamic Load Balancing in 3GPP Long Term Evolution Systems. *Proceedings of MoMM.*, 2007.

[Ambrosy *et al.*, 2007] A. Ambrosy., D. Hofmann., E. Kuhn., Z. Yongsheng. Self-configuration and self-optimization of 4G radio Access Networks. *Alcatel-Lucent R&D, Alcatel Shanghai Bell.*, August 2007.

[Didan *et al.*, 2007] E. Dinan and A. Kurochkin. The impact of antenna azimuth and tilt installation accuracy on UMTS Network Performance. *Bechtel Corporation.*, January 2006.

[Prehofer *et al.*, 2005] C. Prehofer and C. Bettstetter. Self-organization in communication networks : principles and design paradigms. *IEEE Communications Magazine, vol.43, no.7, p.78-85*, 2005.

[Bouguen *et al.*, 2012] Y. Bouguen., Eric Hardouin and F.X Wolff. LTE et les réseaux 4G. *Eyrolles Edition*, 2012.

[Dantzig., 1955] G.B Dantzig. Linear programming under uncertainty. *Management Science, vol.43, no.7 p.197-206*, 1955.

[Prekopa.,1995] A. Prekopa. Stochastic Programming. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, 1995.

[Charnes *et al.*, 1958] A. Charnes., W.W Cooper, and G.H Symonds. Cost horizons and certainty equivalents : An approach to stochastic programming of heating oil. *Management Science, 4 : 183-195*, 1958.

[Roy., 2007] B. Roy. La robustesse en recherche opérationnelle et aide à la décision : Une préoccupation multi facettes. *Robustness in OR-DA, Annales du LAMSADE, 2007*, 2007.

[Roy., 2005] B. Roy. A propos de robustesse en recherche opérationnelle et aide à la décision, Flexibilité et robustesse en ordonnancement. *Paris, Lavoisier, pages 35-50*, 2005.

[Ben-Tal *et al.*, 2009] A. Ben-Tal A., L. El Ghaoui and A. Nemirovski. Robust Optimization, Princeton Series in Applied Mathematics. *Princeton University Press*, 2009.

[Luhandjula *et al.*, 1996] M.K Luhandjula and M.M Gupta. On fuzzy stochastic optimization. *Fuzzy Sets and Systems, 81(1) :47-55*, 1996.

[Saltelli *et al.*, 2000] A. Saltelli,. K. Chan and M. Scott. Sensitivity Analysis. *John Wiley & Sons publishers, Probability and Statistics series*, 2000.

[Meignan., 2008] D. Meignan. Une approche organisationnelle et multi-agent pour la modélisation et l'implantation de métaheuristiques, Application aux problèmes d'optimisation de réseaux de transports. *PhD Thesis, Université Technologique de Belfort-Montbéliard*, 2008.

[Moalic., 2013] L. Moalic. Modélisation dynamique de la densité de population via les réseaux cellulaires et optimisation multiobjectif de l'auto-partage. *PhD Thesis, Université Technologique de Belfort-Montbéliard*, 2013.

[Huang *et al.*, 2009] S. Huang and Q. Zheng. Research of capacity optimizing model on wireless mesh networks. *In Proc. 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, pp 569-572*, 2009.

[Puterman., 1994] M.L Puterman Markov decision processes : discrete stochastic dynamic programming *Wiley, New York, 649 pp.*, 1994.

[Kolomvos., 2007] G. Kolomvos. Résolution de grands problèmes stochastiques multi-étapes : Application à un problème de dimensionnement de capacités et de gestion de flux et de stocks. *PhD Thesis, Centrale Paris*, 2007.

[Liefooghe., 2009] A. Liefooghe. Métaheuristiques pour l'optimisation multiobjectif : Approches coopératives, prise en compte de l'incertitude et application en logistique. *PhD Thesis, Université Lille 1, 2009. http ://sites.google.com/site/arnaudliefooghe/research/phd*, 2009.

[Kall *et al.*, 1994] P. Kall and S.W Wallace. Stochastic Programming. *John Wiley & Sons. Disponible en téléchargement : http ://www.iro.umontreal.ca/ bastin/books/KallWall94.pdf*, 1994.

[Birge *et al.*, 1997] J.R Birge and F. Louveaux. Introduction to Stochastic Programming. *Springer-Verlag*, 1997.

[Ruszczynski *et al.*, 2003] A. Ruszczynski and A. Shapiro. Stochastic Programming. *Elsevier*, 2003.

[van der Vlerk., 2007] H.M van der Vlerk. Stochastic programming bibliography. *http ://mally.eco.rug.nl/spbib.html*, 1996-2007.

[Bertsimas *et al.*, 2004] D. Bertsimas and M. Sim. The Price of Robustness. *Operations Research, 52(1) : 35-53*, January-February 2004.

[Saltelli *et al.*, 2008] A. Saltelli.,M. Ratto., T. Andres., F. Campolongo., J. Cariboni., D. Gatelli., M. Saisana and S. Tarantola. Global Sensitivity Analysis. *The Primer, John Wiley & Sons*, 2008.

[Sochas., 1991] L. Sochas. A survey of quantitative and qualitative methods of sensitivity analysis for stochastic dynamic systems. *Probabilistic engineering mechanics, 6(3-4) : 148-163*, 1991.

[Saltelli *et al.*, 2004] A. Saltelli., S. Tarantola., F. Campolongo and M. Ratto. Sensitivity Analysis in Practice. A Guide to Assessing Scientific Models. *John Wiley & Sons publishers*, 2004.

[Ben-Tal *et al.*, 2000] A. Ben-Tal and A. Nemirovski. Robust Solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical Programming*, 2000.

[Kouvelis *et al.*, 1997] P. Kouvelis and G. Yu. Robust discrete optimization and its application. *Academic Publishers*, 1997.

[Mulvey *et al.*, 1995] J.M Mulvey., R.J Vanderbei and S.A Zenios. Robust optimization of large-scale system. *Operations Research, 43(2) : 264-281*, 1995.

[Markowitz., 1952] H. Markowitz. Portofolio secection. *Journal of Finance, vol.7 : 77-91*, 1952.

[Ruszczynski *et al.*, 2006] Ruszczynski A., Shapiro A. Optimization of convex risk functions. *Mathematics of Operations Research, 31 : 433-452*, 2006.

[Ben-Tal *et al.*, 1999] A. Ben-Tal and A. Nemirovski. Robust Solutions of Uncertain Linear Programs. *Operations Research Letters*, 1999.

[Le Maître., 2008] A. Le Maître. Optimisation robuste d'une migration de matériel dans un réseau en décroissance de clients. *PhD Thesis, CNAM*, 2008.

[Klopfenstein., 2008] O. Klopfenstein. Optimisation robuste de réseaux de télécommunications. *PhD Thesis, France Telecom*, 2008.

[Ouorou., 2008] A. Ouorou. Robust Capacity Assignment in Telecommunications. *Journal Computational Management Science, 3(4) : 285-305*, 2006.

[Soyster., 1973] A.L Soyster. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research, 21(5) : 1154-1157*, 1973.

[Lengoumbi., 2008] C. Lengoumbi. Accès multiple OFDMA pour les systèmes cellulaires post 3G : allocation de ressources et ordonnancement. *Thèse de doctorat, Telecom ParisTech*, 2008.

[Maqbool., 2009] M. Maqbool Ingénierie radio des réseaux d'accès OFDMA. *Thèse de doctorat, Telecom ParisTech*, 2009.

[Hata., 1980] M. Hata Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *In : IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.29, No.3*, 1980.

[Sen., 1970] A. Sen The Impossibility of a Paretian Liberal. *Journal of Political Economy, vol.78 : 152-7*, 1970.

Résumé :

La norme 3G/UMTS a permis de développer les premières applications multimédia pour téléphones et tablettes mobiles. Le nouveau standard 4G/LTE (Long Term Evolution) a pour objectif le très haut débit mobile. Dans ce standard, beaucoup d'efforts ont portés sur la reconfiguration automatique des réseaux en fonction de la demande des clients dans un processus appelé Self-Organizing Network (SON). Le travail de cette thèse s'inscrit dans cette direction. La reconfiguration de réseaux est comprise principalement dans le sens des modèles, des méthodes et des outils pour analyser les indicateurs remontés du réseau et configurer automatiquement les paramètres. Nous avons essentiellement travaillé sur les paramètres des aériens, l'allocation des fréquences, des puissances d'émission et des inclinaisons verticales.

Dans cette optique, étant donné la forte variabilité des données d'entrée de l'optimisation issues des remontées de réseau, cette thèse porte sur les modèles et algorithmes d'optimisation robuste dans le contexte de l'optimisation sous contraintes. L'optimisation robuste fait référence à un ensemble de procédés pour proposer des solutions à des problèmes combinatoires dans un contexte de données incertaines et de scénarios variables dans le temps. Une première partie est dédiée à l'état de l'art et présente les principes des Self-Organizing Network (SON). La deuxième partie est consacrée à l'état de l'art des méthodes en optimisation robuste. En troisième partie nous présentons la modélisation mathématique du problème d'optimisation pour lequel les données de trafic (répartitions des clients sur la zone de service et leurs demandes respectives) prennent des valeurs variables dans le temps. Une phase de diagnostic sur le fonctionnement du réseau à partir des données, et une étude de sensibilité des solutions vis-à-vis des variations dans la réalisation des données ont été faites en quatrième partie avec des algorithmes de recherche locale. La cinquième partie présente le travail de conception, développement et test sur scénarios, d'une Recherche Tabou ainsi qu'une analyse approfondie sur les méthodes de pilotage envisagées pour les SON en 4G.

Mots-clés : 4G/LTE, modèle d'optimisation de réseau, algorithme d'optimisation combinatoire, robustesse

Abstract:

The standard 3G/UMTS has launched the first multimedia applications for mobile phones and tablets. The new standard 4G/LTE (Long Term Evolution) has mobile broadband objective. In this standard a huge effort has been done on automatic network reconfiguration based on customer demand variation in a process called Self-Organizing Network (SON). The work of this thesis lies in this direction. Reconfiguration of networks lies mainly in the direction of models, methods and tools to analyze network Key Performance Indicators and automatically configure its settings. We mainly worked on the air interface parameters such that frequency assignment, emitted power and pattern vertical inclination.

In this context, given the high variability of optimization input data issued from the network, this thesis focuses on robust optimization under constraints. The robust optimization refers to a set of processes to provide solutions to combinatorial problems with uncertain and variable scenarios of data over time. The first Section presents the principles of Self-Organizing Network (SON). The second Section concerns the state of the art on robust optimization. The third Section defines the mathematical model to optimize for which traffic data (distribution of customers and throughput requirements on the service area) take variable values over time. A data diagnostic phase on the network operation and a sensitivity analysis of the solutions were made in the fourth Section with several local search algorithms. The fifth Section presents the work of design, development and test of a Tabu Search method and a thorough analysis of SON control methodology proposed for 4G.

Keywords : 4G/LTE, network optimization, robust combinatorial optimization.

SPIM

■ École doctorale SPIM - Université de Technologie Belfort-Montbéliard
F - 90010 Belfort Cedex ■ tél. +33 (0)3 84 58 31 39
■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

utbm
université de technologie
Belfort-Montbéliard