

SPIM

Habilitation à Diriger des Recherches



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

De la modélisation et de l'optimisation de la
qualité des systèmes multi-échelles

■ OUMAYA BAALA

S P I M

Habilitation à Diriger des Recherches



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

de l'Université Bourgogne Franche-Comté

préparée au sein de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Spécialité : **Informatique**

présentée par

OUMAYA BAALA

De la modélisation et de l'optimisation de la qualité
des systèmes multi-échelles

Soutenue publiquement le 10 Novembre 2017 devant le Jury composé de :

HAKIMA CHAOUCHI	Rapporteur	Professeur à l'Institut Mines Telecom Sud Paris
ANDRÉ-LUC BEYLOT	Rapporteur	Professeur à l'ENSEEIH
VAN-DAT CUNG	Rapporteur	Professeur à Grenoble INP
ALAIN BUI	Examineur	Professeur à l'UVSQ
FRANÇOIS SPIES	Examineur	Professeur à l'Université de Franche-Comté
ALEXANDRE CAMINADA	Examineur	Professeur à Polytech Nice Sophia

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance aux Professeurs Hakima Chaouchi, André-Luc Beylot et Van-Dat Cung d'avoir accepté de s'atteler à la lourde tâche de relecture, de synthèse et d'évaluation de ce manuscrit.

Plus largement, je remercie chaleureusement les examinateurs Alain Bui, François Spies et Alexandre Caminada qui m'ont fait l'honneur de constituer le jury.

Le travail présenté dans ce manuscrit est un travail d'équipe. Rien n'aurait pu être possible sans la bonne ambiance qui règne au sein de notre équipe et la qualité humaine et professionnelle de mes collègues. Ce manuscrit ne serait pas terminé sans leur confiance, leurs encouragements et leur soutien sans faille. Enfin, je n'aurais sans doute pas accompli tout ce travail sans l'accompagnement d'Alexandre Caminada qui, de par sa fonction et nos affinités, a joué un rôle important dans mon apprentissage de l'encadrement scientifique. Son arrivée à l'UTBM à la tête de notre équipe a donné une véritable impulsion à mon activité de recherche. Ses compétences, son professionnalisme et sa bienveillance m'ont fait grandir.

Je ne voudrais surtout pas oublier tous les ingénieurs-docteurs, les doctorants, les élèves-ingénieurs et les stagiaires que j'ai côtoyés et qui, chacun à son niveau, a contribué positivement à ces travaux, je les remercie de leur précieuse collaboration. Travailler ensemble a été un plaisir et une source d'enrichissement mutuel. Un grand merci à Michal, Aymen, Houssam, Alexandre Jr., You, Kahina, Abderrahim, Noureddine, Julien, Frédéric, Sid, Laurent, ...

Et pour terminer, j'ai évidemment une pensée toute particulière pour ma famille pour m'avoir encouragée dans cette voie. Je remercie vivement mes parents, mon conjoint et mes enfants pour leur soutien. A tous, je dis simplement merci !

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	9
1.1. CONTEXTE.....	9
1.2. PROBLEMATIQUES.....	10
1.3. CONTRIBUTIONS.....	11
1.4. ORGANISATION DU DOCUMENT.....	13
2. PLANIFICATION AUTOMATIQUE DES RESEAUX LOCAUX SANS FIL POUR UNE QUALITE DE SERVICE ET DE LOCALISATION	14
2.1. MODELISATION DE LA PLANIFICATION.....	15
2.1.1. <i>Modèle de placement des AP</i>	15
2.1.2. <i>Modèle de paramétrage des AP</i>	16
2.1.3. <i>Modèle de trafic</i>	16
2.1.4. <i>Modèle de propagation</i>	16
2.1.5. <i>Modèle de débit</i>	16
2.2. OPTIMISATION DE LA QUALITE DE SERVICE.....	17
2.2.1. <i>Stratégies d'optimisation</i>	17
2.2.2. <i>Méthode de recherche à Voisinage Variable Aléatoire</i>	20
2.2.3. <i>Expérimentations et résultats</i>	20
2.3. OPTIMISATION DE LA LOCALISATION INDOOR.....	24
2.3.1. <i>Problématique de localisation indoor</i>	25
2.3.2. <i>Les objectifs de la localisation</i>	27
2.3.3. <i>Méthode de recherche Tabou à Voisinage Variable</i>	28
2.3.4. <i>Expérimentations et résultats</i>	28
2.4. SYNTHESE DE LA PLANIFICATION AUTOMATIQUE DES WLAN.....	33
3. MOBILITE DANS LES RESEAUX VEHICULAIRES	35
3.1. MODELE DE MOBILITE POUR LES RESEAUX VEHICULAIRES.....	36
3.1.1. <i>Caractérisation de l'environnement</i>	37
3.1.2. <i>Topologie des routes</i>	39
3.1.3. <i>Détermination Origine-Destination</i>	39
3.1.4. <i>Calcul de la trajectoire</i>	40
3.1.5. <i>Régulation de la vitesse</i>	41
3.1.6. <i>Changement de voie</i>	42
3.1.7. <i>Validation du modèle V-MBMM</i>	42
3.2. PROPAGATION ET CONNECTIVITE RADIO DANS LES RESEAUX VEHICULAIRES.....	50
3.2.1. <i>Description du modèle V-PROPAG</i>	51
3.2.2. <i>Validation du modèle V-PROPAG</i>	53
3.2.3. <i>Connectivité radio dans les réseaux véhiculaires</i>	56
3.3. PERFORMANCES DES PROTOCOLES DE ROUTAGE.....	62
3.3.1. <i>Routage dans les VANET</i>	63
3.3.2. <i>Architecture du simulateur VANET</i>	64
3.3.3. <i>Résultats de simulation</i>	65
3.4. SYNTHESE DE LA MOBILITE VEHICULAIRE.....	69
4. OPTIMISATION EN LIGNE DANS LES RESEAUX LTE.....	71
4.1. FORMULATION DU PROBLEME D'OPTIMISATION EN LIGNE.....	74
4.1.1. <i>Le modèle de trafic</i>	74
4.1.2. <i>Le modèle de paramétrage des stations de base</i>	74
4.1.3. <i>Le modèle d'allocation de ressources radio</i>	75
4.1.4. <i>Le modèle de propagation</i>	75
4.1.5. <i>Le modèle de débit</i>	76
4.1.6. <i>Le modèle de handover</i>	76
4.2. METHODES D'OPTIMISATION.....	77
4.2.1. <i>Préoccupation de robustesse</i>	77
4.2.2. <i>Hypothèses sur le réseau</i>	79
4.2.3. <i>Méthodes d'optimisation des paramètres du réseau</i>	81

4.2.4.	<i>Evaluation de l'optimisation avec robustesse</i>	83
4.3.	STRATEGIES D'AUTO-OPTIMISATION DES SON.....	85
4.3.1.	<i>Optimisation robuste des pics sur la journée</i>	86
4.3.2.	<i>Optimisation non robuste des pics sur la journée</i>	87
4.3.3.	<i>Optimisation robuste des dominances en 3 périodes successives</i>	89
4.3.4.	<i>Optimisation non robuste des dominances en 3 périodes successives</i>	92
4.3.5.	<i>Synthèse des stratégies d'optimisation</i>	94
4.4.	SYNTHESE DE L'OPTIMISATION EN LIGNE	94
5.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE	95
5.1.	BILAN.....	95
5.2.	PERSPECTIVES	97
	RÉFÉRENCES	100

1. Introduction

Ce document décrit mes activités de recherche depuis mon arrivée à l'UTBM en septembre 1998 ; celles-ci reflètent un parcours qui s'est enrichi d'une mobilité thématique. Centrés autour des performances d'un système quel qu'il soit, mes travaux sont guidés par la nécessité ou la volonté d'améliorer la qualité des services offerts par le système concerné qu'il s'agisse du domaine des systèmes informatiques distribués ou de celui des réseaux informatiques ou cellulaires qui peuvent être vus comme des systèmes distribués à large échelle. En particulier, l'objet de mes recherches porte sur la modélisation mathématique des systèmes de communications radio et l'optimisation de leurs performances en utilisant des approches algorithmiques à base d'heuristiques.

Tout d'abord, je commence par préciser le contexte général de mes travaux, je poursuis en décrivant les problématiques puis en indiquant brièvement mes principales contributions et je termine cette partie en décrivant l'organisation du document.

1.1. Contexte

La recherche dans le domaine des *systèmes distribués* a vu le jour dans les années 80, à cette époque, les premiers *réseaux locaux* (*LAN, Local Area Networks*) commençaient à se déployer facilitant ainsi la communication inter-systèmes, l'accès distant à des ressources délocalisées et l'exécution parallèle d'un programme sur un ensemble de machines. La définition d'un système distribué soulevait déjà des questions quant à sa *complexité* et à ses *performances*. Un système distribué est un ensemble d'entités autonomes et communicantes ; une telle définition évoque plusieurs aspects. Généralement, un système distribué est vu comme un système unique qui offre un accès aux ressources partagées en toute transparence, fiabilité et sécurité et qui par conséquent augmente le parallélisme des programmes [114, 167, 170]. Parmi les composantes importantes à définir, on retrouve les *algorithmes distribués* qui concernent des entités de calcul qui interagissent entre elles au sein du système distribué et qui s'exécutent de manière concurrente et indépendante. Il est alors nécessaire de prendre en compte l'interaction des entités autonomes, l'équilibrage de charge entre les entités et l'optimisation de l'utilisation des ressources en vue d'améliorer les performances du système [43, 114, 126, 167, 170].

La *performance* est un élément essentiel d'un système distribué et peut être mesurée en fonction de plusieurs facteurs ou indicateurs clés qui permettent d'obtenir une *qualité de service (QoS)* adaptée aux spécifications de l'application et aux exigences des utilisateurs induisant ainsi une bonne qualité d'expérience (*QoE*) des clients [53, 88, 179]. En matière de *QoS*, il n'existe pas une définition unique mais plusieurs définitions en fonction du domaine ; l'ISO l'a d'ailleurs défini comme un *ensemble de caractéristiques se rapportant au comportement collectif d'un ou plusieurs objets* [96]. Pour superviser et améliorer la *QoS* d'une application distribuée, il est nécessaire de collecter les informations pertinentes, appelées métriques, émanant de l'application elle-même et du réseau sous-jacent. Le traitement des données collectées permet de prendre les décisions d'optimisation de la *QoS* en temps-réel [2, 49, 94, 153, 182].

Dans les années 90, les *réseaux cellulaires* ont connu un développement d'envergure avec l'avènement des réseaux de téléphonie mobile de 2^e génération de type *GSM* pour *Global System for Mobile Communications*. Dans la décennie qui a suivi, la technologie de téléphonie mobile évolue et donne lieu aux réseaux cellulaires de 3^e génération de type *UMTS* pour *Universal Mobile Telecommunications System*. A partir de 2004, le consortium *3GPP* commence à définir la norme *LTE* pour *Long Term Evolution*, une évolution des normes de téléphonie mobile *2G* et *3G* [1]. Aujourd'hui, alors que les réseaux cellulaires de 4^e génération continuent leur essor pour faire face aux besoins grandissant des utilisateurs et que les opérateurs redoublent d'effort pour garantir une bonne *QoS* et s'assurer des revenus à la hauteur des investissements utiles à la modernisation de leurs infrastructures, les experts réfléchissent déjà à une nouvelle norme, la *5G*, avec toujours ce même objectif d'augmenter les débits, mais surtout de préparer *l'Internet des objets*. Déployer ces réseaux est un grand défi sociétal et technologique :

régulièrement, de nouvelles applications voient le jour avec de l'information personnalisée et des exigences de *QoS* ; des verrous scientifiques doivent être levés en termes de méthodes et outils de planification qui intègrent notamment des modèles de propagation des ondes radio, des modèles d'estimation de qualité de service et des algorithmes d'optimisation du paramétrage [14, 24, 62, 134].

Dans les années 2000, et parallèlement à ces technologies de téléphonie mobile, le besoin de communiquer sans fil s'est porté sur les réseaux informatiques pour l'échange de données. Les *réseaux locaux sans fil (WLAN pour Wireless Local Area Networks)*, conformes à la norme *IEEE 802.11* ont depuis été largement déployés dans les lieux publics et privés : halles commerciales, cafés, restaurants, logements, hôtels, bibliothèques, universités, gares, aéroports, entreprises... [35, 37, 143, 177]. Les *WLAN* permettent de profiter des principaux avantages des systèmes de type Ethernet tout en s'affranchissant de la nécessité de se connecter physiquement au réseau local de l'entreprise ou du bâtiment, apportant ainsi mobilité et flexibilité. Depuis son apparition au milieu des années 90, cette norme évolue régulièrement ; les technologies sous-jacentes permettent aux réseaux d'offrir des débits de plus en plus élevés et d'avoir accès à des services évolués de type accès Internet, TV, ToIP. Avec ce type de réseaux, nous retrouvons les mêmes exigences de qualité de service et les mêmes difficultés techniques liées à la maîtrise du médium de communication mais pour un cadre de déploiement à l'intérieur des bâtiments [35, 37, 141].

1.2. Problématiques

Aujourd'hui, nous vivons dans une société de plus en plus dominée par le numérique. Les réseaux *Wi-Fi*, très populaires, sont largement déployés, les réseaux cellulaires *LTE* font partie des offres standards des opérateurs et la plupart des terminaux mobiles sont équipés d'interfaces radio compatibles avec les standards du marché. Offrir des services avec des débits adaptés aux besoins des clients a toujours été un grand enjeu pour les différents acteurs de la téléphonie mobile et de l'Internet. L'avènement de ces technologies sur le marché et leur impact sur notre quotidien constituent des défis en soi et soulèvent des verrous scientifiques en termes de dimensionnement, de planification et d'évaluation des performances de ces systèmes radio. Dans ce contexte, ma principale problématique est la modélisation et l'optimisation des performances de réseaux radio.

Cette problématique recouvre plusieurs domaines d'application telles que la mobilité, les systèmes de transports intelligents (*ITS*), la ville intelligente, etc. Ces domaines d'application sont sources de nombreuses questions pour notre problématique. Citons l'exemple des services géo-localisés dans une ville intelligente. Les *Location-Based Services (LBS)* sont en général des services issus d'une combinaison de trois technologies, l'Internet, un Système d'Information Géographique (*SIG*) et une technologie de géolocalisation [158], qui utilisent les coordonnées géographiques pour proposer des services environnants. A l'intérieur des bâtiments, où le *GPS* est inopérant, lorsque des réseaux *WLAN* sont déployés, ils constituent une alternative peu coûteuse puisqu'il est possible de tirer profit de l'infrastructure existante pour localiser des personnes ou des objets mobiles. Dans ce cas, les concepteurs de réseaux *WLAN* doivent considérer un problème de conception et d'ingénierie réseau tel que le dimensionnement et la planification du système de sorte à garantir une certaine *QoS* mais en tenant compte de contraintes supplémentaires à savoir la *localisation* de personnes ou d'objets avec la meilleure précision possible.

Dans le domaine des *ITS*, les environnements véhiculaires (*WAVE pour Wireless Access in Vehicular Environments* [168]) ont ouvert le champ à de nombreuses applications [32, 106]. Les *VANET pour Vehicular Ad hoc Network* sont des réseaux très dynamiques, à environnement obstrué, à densité du trafic variable et offrent des possibilités de transmission des données de véhicule-à-véhicule (*V2V*) ou de véhicule-à-infrastructure (*V2I*). Deux principaux éléments distinguent les réseaux véhiculaires des autres réseaux sans fil : la mobilité des véhicules et la

propagation des signaux radio dans l'environnement considéré. Ces deux éléments définissent la topologie du réseau et sa variation dans le temps. En effet, la configuration à tout instant du trafic est déterminée grâce à un modèle de mobilité véhiculaire ; l'identification des liaisons radio possibles entre véhicules se fait grâce à un modèle de propagation.

Lorsque des services *ITS* sont déployés dans un contexte *VANET*, certains s'appuient sur des communications inter-véhicules tandis que d'autres ont besoin de communications basées sur les réseaux cellulaires aux abords des routes [18, 19, 20], notamment, les réseaux de la norme *4G LTE* qui constituent l'une des meilleures solutions pour les communications *V2I* [189]. En effet, les réseaux *LTE* offrent un bon débit, une bonne couverture et une bonne gestion de la mobilité en milieu urbain, cependant, le débit offert peut rapidement se dégrader lorsque le nombre de voitures augmente ce qui nécessite une planification du réseau, une configuration et un paramétrage adapté aux besoins des services *ITS* [20]. Avec les réseaux *LTE* apparaît pour la première fois la notion de *Self-Organizing Networks (SON)* avec l'introduction de fonctions avancées de paramétrage automatique du réseau en fonction de la demande et des services offerts [145, 175]. Ces fonctions ont pour but de contrôler les performances du réseau en fonctionnement ; après une étape d'analyses des données remontées par le réseau, des algorithmes d'optimisation et de corrections sont déclenchés automatiquement afin de prendre des décisions de re-paramétrage du réseau en fonction des objectifs des opérateurs et des besoins des utilisateurs.

Les exemples cités ci-dessus montrent que quel que soit le système, la technologie ou l'application considérés, nous faisons face aux mêmes verrous scientifiques. Pour apporter des réponses adaptées aux différentes problématiques, j'ai adopté une démarche scientifique centrée sur la modélisation du système physique étudié, sa formulation comme un problème d'optimisation puis sa résolution par une approche algorithmique adaptée pour évaluer ses performances en s'appuyant sur des critères de débit, de couverture, de localisation, etc.

1.3. Contributions

Je décris brièvement, dans cette partie du document, mes travaux sur la modélisation et l'optimisation de la qualité radio d'un système dans des environnements complexes en extérieur ou à l'intérieur, selon trois axes : la planification automatique de réseaux *WLAN*, la mobilité dans les réseaux véhiculaires et l'optimisation en ligne des réseaux *LTE*.

Planification des réseaux locaux sans fil pour une qualité de service et de localisation

i) Planification automatique de WLAN

Le problème de planification de réseau *WLAN* consiste d'une part à positionner et à paramétrer des émetteurs ou *AP* pour *point d'accès* dans un bâtiment et d'autre part à leur affecter une fréquence afin d'offrir aux clients un accès sans fil au réseau local avec la couverture souhaitée et la qualité de service requise, tout en minimisant le coût financier. Très souvent, le problème du placement des émetteurs habituellement nommé *ACP* pour Automatic Cell Planning et le problème d'allocation des fréquences nommé *AFP* pour Automatic Frequency Planning étaient traités en séquence de par leur complexité de modélisation et leur nature combinatoire [17, 42, 131, 157]. Nous avons contribué sur ce thème par la proposition de deux nouvelles stratégies d'optimisation : l'une, séquentielle, tient compte lors du placement des émetteurs d'un brouillage moyen entre émetteurs. L'autre, globale, optimise simultanément le placement des émetteurs et l'affectation des fréquences. Pour évaluer leur qualité, nous avons réalisé une étude comparative qui porte sur deux stratégies couramment utilisées dans la littérature et les deux stratégies que nous avons proposées.

ii) Localisation Indoor

La localisation de personnes et d'objets mobiles à l'intérieur des bâtiments basée sur les réseaux *WLAN* est un système qui exploite l'information du niveau de puissance reçue et permet de déduire la position du terminal mobile [30, 144, 181, 186]. La localisation indoor étant une problématique liée aux communications radio, le système développé dépend du réseau *WLAN* déployé et reste limité par la nature complexe du signal radio (les trajets multiples, le bruit et les interférences), cependant, il présente l'avantage de ne pas nécessiter de vue directe entre l'émetteur et le récepteur. Dans la littérature, plusieurs dispositifs ont été mis au point pour localiser grâce aux réseaux *WLAN* et utilisent différentes techniques [90]. Nous avons contribué sur ce thème au développement d'un système de localisation indoor basé sur un réseau *WLAN* en proposant une approche novatrice qui s'inscrit dans le problème global de planification d'un réseau *WLAN*. Cette approche consiste à aborder un *système de positionnement indoor* comme un problème d'optimisation combinatoire afin de garantir à la fois une *qualité de communication* et une *précision de localisation*.

Mobilité dans les réseaux véhiculaires

Depuis leur apparition, les *réseaux véhiculaires* ou *VANET*, conformes à la norme *IEEE 802.11p* [168], ont connu un très grand essor, de nombreux standards, applications et mécanismes de routage ont été proposés pour répondre aux spécificités de cette nouvelle classe de réseaux [20, 120]. Les communications dans les *VANET* reste une problématique forte ; les défis à relever pour leur conception découlent principalement de la forte mobilité des véhicules, de la diversité spatio-temporelle de la densité du trafic et de la propagation des ondes radio en environnement extérieur défavorable à l'établissement des communications sans fil [33, 70, 172, 184].

Le déploiement des *VANET* dans un environnement réel est une tâche difficile, aussi bien économique que logistique, de ce fait la *simulation* s'impose comme une solution largement utilisée pour la conception et l'évaluation des solutions proposées [50, 71, 160, 178]. Cependant, la validité des résultats de simulation dépend fortement de la capacité des modèles utilisés à reproduire le plus fidèlement possible les situations réelles. Nous nous sommes intéressés aux deux principaux éléments qui différencient les *VANET* des autres réseaux sans fil : la *mobilité des véhicules* et la *propagation des ondes radio*. Nous avons contribué sur ce thème par le développement d'un *modèle de mobilité* et d'un *modèle de propagation* d'ondes radio pour réseaux de véhicules en environnement urbain et suburbain. Pour définir des schémas réalistes, ces deux modèles sont basés sur des données statiques et dynamiques réelles décrivant les caractéristiques topographiques et socio-économiques de l'environnement. Ces données concernent particulièrement la distribution spatio-temporelle des véhicules et les infrastructures présentes dans l'environnement.

Optimisation en ligne des réseaux LTE

Le nouveau standard *LTE* a pour objectif le très haut débit mobile et le développement de nouvelles applications. Dans ce standard, les efforts ont porté sur la reconfiguration automatique des réseaux en fonction de la demande des clients dans un processus appelé *Self-Organizing Network* ou *SON*, une technologie qui permet l'auto-configuration, l'auto-exploitation et l'auto-optimisation des équipements du réseau. Dès lors, les opérateurs, qui jusqu'alors configuraient manuellement les paramètres du réseau, opérations lentes coûteuses et source d'erreurs, vont pouvoir améliorer la flexibilité et les performances de leur infrastructure tout en réduisant les coûts et les délais des opérations [138, 175].

Un *SON* doit être capable de détecter automatiquement les problèmes de *QoS* via des mesures sur les équipements du réseau, 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, en continu...) ? L'adaptabilité dynamique du *SON* à la demande nous place dans un contexte où les données remontées par le réseau sont incertaines (demande, propagation du signal, coût). De ce fait, la sélection spatiale et la sélection temporelle des stations de base ont un impact sur le réseau à optimiser. Il s'agit d'identifier, où dans le réseau, et à quel moment, il faut optimiser. Pour répondre à ces questions, il était nécessaire de définir des indicateurs de qualité et des paramètres à optimiser. L'ensemble de ces éléments a permis de décrire le réseau comme un problème d'optimisation combinatoire.

Nous avons contribué sur ce thème par la mise au point d'algorithmes d'optimisation robuste applicables au cas de forte variabilité des données d'entrée. 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. Nous avons réalisé 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 des données pour valider l'apport de la robustesse.

1.4.Organisation du document

La suite du document est composée de trois parties portant sur quelques-unes de mes contributions : la partie 2 décrit mes contributions à l'optimisation de la planification automatique des réseaux *WLAN*, la partie 3 décrit mes contributions à la modélisation de la mobilité et des communications véhiculaires et la partie 4 décrit mes contributions à l'optimisation en ligne des réseaux *LTE*. Enfin, je conclus mon document en dressant un bilan et en donnant une orientation quant à la poursuite de mes travaux.

2. Planification automatique des réseaux locaux sans fil pour une qualité de service et de localisation

Dans les années 2000, le besoin de communiquer sans fil s'est porté sur les réseaux informatiques pour l'échange de données. Les *réseaux locaux sans fil*, ou *WLAN* pour *Wireless Local Area Network*, de norme *IEEE 802.11* (ou de label *Wi-Fi*) ont envahi tous les lieux publics et privés. Ces réseaux supportent de très hauts débits et permettent d'avoir accès à des services évolués (Internet, TV, téléphonie-IP...) tout en s'affranchissant de la nécessité de se connecter physiquement au réseau local de l'entreprise ou du bâtiment, apportant ainsi mobilité et flexibilité. Le grand enjeu scientifique et technique actuel des réseaux locaux sans fil est de réussir leur déploiement à grande échelle. En effet, depuis la norme *802.11g* de juin 2003, le marché est passé progressivement d'une niche à un marché d'affaires pour les équipementiers, les opérateurs de réseaux et les fournisseurs d'accès *Internet*. Ainsi, il y a un besoin de passer d'une méthode manuelle basée sur le savoir-faire de l'installateur à une conception plus exigeante avec un grand nombre d'utilisateurs sur des zones très étendues et pour un engagement de Qualité de Service (*QoS*).

L'ensemble de ces éléments conduit à des problèmes complexes dont la résolution nécessite des approches performantes basées sur des méthodes d'optimisation. Répondre à ces problèmes passe par la proposition de modèles et d'algorithmes pour optimiser la planification des réseaux *WLAN* à grande échelle. La planification consiste d'une part à positionner et à paramétrer des émetteurs dans un bâtiment et d'autre part à leur affecter un canal de fréquence porteuse afin d'offrir un accès sans fil au réseau local. Ce processus se réalise avec des critères de couverture radio pour avoir une connexion, de qualité de service pour avoir un débit, de continuité de service pour permettre la mobilité, tout en minimisant un coût financier.

La *QoS* est le critère le plus difficile à maîtriser. Elle demande une modélisation physique pointue et elle ne peut se faire que lorsque tous les paramètres du réseau sont connus. Dans l'état de l'art des méthodes d'optimisation de la planification des *WLAN*, les paramètres du réseau qui sont les inconnues du problème, sont majoritairement affectés en deux étapes successives : le *placement* et le *paramétrage* des émetteurs, puis l'*allocation des fréquences*. Chacun de ces deux problèmes est un problème combinatoire *NP-difficile* et demande donc des méthodes de résolutions appropriées. Face à cette complexité, quelques travaux vont jusqu'à distinguer aussi le placement (choix du site) et le paramétrage (choix de l'antenne et de la puissance d'émission) des émetteurs ce qui constitue trois étapes au final. Le problème décomposé en sous-problèmes indépendants conduit à l'obtention de minima locaux et donc probablement à des solutions sous-optimales.

La planification de réseaux sans fil est un problème qui est largement étudié pour les réseaux cellulaires (*GSM/GPRS/EDGE/UMTS/LTE*). Pour les *WLAN*, la problématique est plus récente. Outre que la technologie soit différente, les *WLAN* présentent certaines particularités : (i) l'usage des *WLAN* n'est soumis à aucune licence, le déploiement d'un *WLAN* est libre, (ii) leur coût d'achat, d'installation et d'exploitation des équipements est moins onéreux que ceux des réseaux cellulaires, (iii) ils utilisent des bandes de fréquences autour de 2400 MHz et de 5000 MHz tandis que les réseaux *GSM* utilisent les bandes de fréquences 900 MHz et 1800 MHz. La portée d'une onde *Wi-Fi* est donc bien plus faible que la portée d'une onde *GSM* qui peut atteindre une cinquantaine de kilomètres. L'affaiblissement d'une onde radio est inversement proportionnelle au carré de la fréquence utilisée (cf. formule de Friis [74]), (iv) ils concernent le plus souvent des réseaux d'intérieur, avec des phénomènes de propagation spécifiques : réflexion, diffraction, interférence (iv) les services des *WLAN* prétendent à des débits théoriques de 54 Mbps alors que les débits théoriques sont de 9.6 kbps pour le *GSM*, de 171.2 kbps pour le *GPRS*, de 384 kbps pour l'*EDGE* et 1.92 Mbps pour l'*UMTS*.

Le problème de planification de réseaux sans fil revient à trouver une configuration réseau à moindre coût en optimisant la qualité de service, en particulier *le débit*. La littérature présente une grande diversité des problèmes à optimiser liée à un grand nombre de critères de qualité de service (couverture, interférence, capacité, débit...) [15, 17, 31, 41, 73, 97, 118, 130, 147, 150, 166]. La planification d'un *WLAN* soulève deux problèmes imbriqués. Le premier, connu dans la littérature sous le nom d'*ACP* (pour *Automatic Cell planning*), consiste à *sélectionner les sites* pour placer et paramétrer les émetteurs ou *AP*. Le deuxième, connu sous le nom d'*AFP*, consiste à *affecter les fréquences* aux *AP*. Les deux problèmes sont *NP-difficiles* [76, 104, 105, 130] et sont généralement traités séquentiellement. Cependant, la littérature montre que les deux problèmes peuvent être abordés ensemble sous réserve que la dimension des espaces étudiés soit abordable (nombre de points de calcul et nombre de sites candidats). L'approche simultanée permet de garantir la meilleure optimisation du critère de débit qui est le critère de performance le plus sensible pour le client. Par ailleurs, la planification d'un *WLAN* peut être vue sous un autre angle : on peut déployer un réseau pour fournir des services à valeur ajoutée, tels que des applications qui requièrent la localisation de l'utilisateur. De là naît l'idée d'ajouter un critère supplémentaire de localisation à la planification du *WLAN*.

Dans la suite, nous commençons par une description succincte de notre modèle de planification de *WLAN* en considérant d'abord le critère de débit. Puis, nous présentons notre approche d'optimisation de ce critère. Enfin, nous présentons notre approche d'optimisation du critère de localisation, en plus de celui de la *QoS*. Cette partie se termine par une synthèse de nos travaux sur la planification de *WLAN*.

2.1. Modélisation de la planification

Une analyse détaillée du fonctionnement d'un *WLAN* de la norme *IEEE 802.11b, g et a* nous a permis d'identifier le débit réel comme le critère unifiant les différentes caractéristiques de qualité de service : couverture, interférences et capacité. Nous présentons ainsi un modèle unifié de la qualité de service qui nécessite le traitement simultané des problèmes de placement des émetteurs et d'allocation des fréquences. Ce modèle de planification de *WLAN* permet d'optimiser tous les paramètres liés aux points d'accès : type d'antenne, azimut, puissance d'émission et fréquence. La Figure 1 illustre la décomposition du modèle de la réalité physique en plusieurs sous-modèles et décrit leurs interactions.

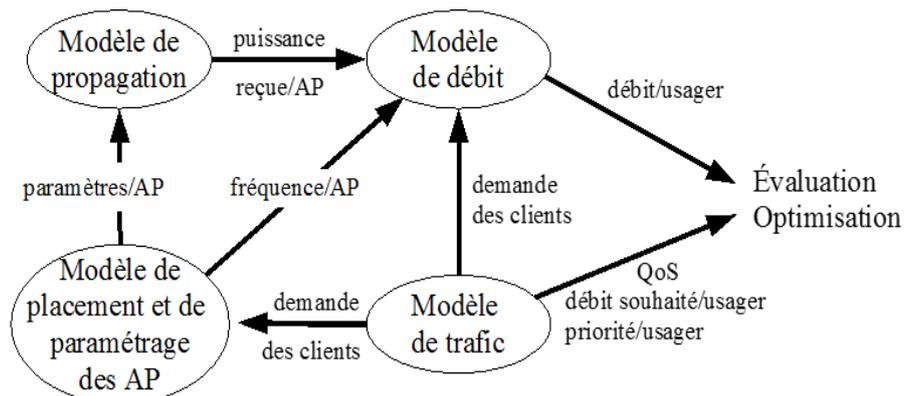


Figure 1 – Interaction entre les sous-modèles de la réalité physique.

2.1.1. Modèle de placement des AP

La première étape consiste à définir l'espace de recherche de notre problème : le placement des *AP* dans une zone géographique, appelée site, dans un environnement clos de type gare, aéroport, université, bâtiment... L'ensemble des sites candidats est fini. Chaque site est susceptible d'accueillir un ou plusieurs *AP*. Un secteur est un emplacement d'*AP* choisi parmi la liste des emplacements possibles pour un site donné.

2.1.2. Modèle de paramétrage des AP

Une fois les sites candidats fixés, il faut déterminer la liste des AP que l'on peut placer sur ces sites. Concrètement, le paramétrage commence par le choix du type d'AP en fonction de son diagramme de rayonnement, puis par le réglage de ses paramètres c'est-à-dire son azimut, sa puissance et sa fréquence d'émission. Le diagramme, l'azimut et la puissance seront les éléments décisifs pour établir la couverture de l'émetteur, et la fréquence interviendra pour le calcul des interférences et du débit. Le réglage du tilt qui correspond à l'inclinaison de l'antenne par rapport à la verticale n'est pas utilisé en 802.11 car la hauteur des émetteurs n'est pas significativement différente de la hauteur de réception du signal.

2.1.3. Modèle de trafic

Le modèle de trafic du réseau définit la manière de représenter la demande de service dans le réseau : répartition des clients, services demandés, débits souhaités, etc., il donne également un cadre à l'expression de la qualité de service souhaitée. Pour répondre à la demande des clients, l'environnement étudié est discrétisé en *zones de service* représentées par des polygones. Chaque polygone est caractérisé par un nombre de clients et le débit souhaité par les clients de ce polygone. Nous adoptons donc un modèle de trafic continu. Chaque zone de service est décomposée en *points de service* selon le maillage choisi pour le bâtiment. Une maille est considérée comme appartenant à une zone de service si et seulement si le centre de la maille est inclus dans le polygone qui définit la zone de service. Le nombre de points de service dépend donc du pas de maillage du bâtiment. L'ensemble des points de service décrit la demande offerte du réseau.

2.1.4. Modèle de propagation

Le modèle définit les règles de propagation du signal dans un bâtiment. A partir des variables du problème qui définissent le placement et le paramétrage des AP, il détermine la puissance du signal reçue en tout point du bâtiment; ce fonctionnement est décrit par la Figure 2. Les paramètres d'un AP intervenant dans l'évaluation de la puissance reçue sont : la position de l'AP, sa puissance d'émission, son diagramme de rayonnement, son azimut et la norme choisie (802.11b/g ou 802.11a). Les AP sont des équipements raccordés au réseau local et incorporent une antenne leur permettant de dialoguer avec les clients situés à proximité. La communication entre les AP et les clients se fait par ondes radio aux fréquences définies par la norme. Pour ces fréquences, la propagation des ondes dans le bâtiment est complexe du fait des multiples obstacles. Il est donc très difficile d'établir précisément la zone de couverture de chaque émetteur. Lors de la planification du réseau, le modèle qui permet de simuler la propagation des ondes radio est un élément déterminant pour établir la qualité du résultat. Selon la bande de fréquences utilisée (2,4 GHz ou 5 GHz), le modèle de propagation est totalement différent.

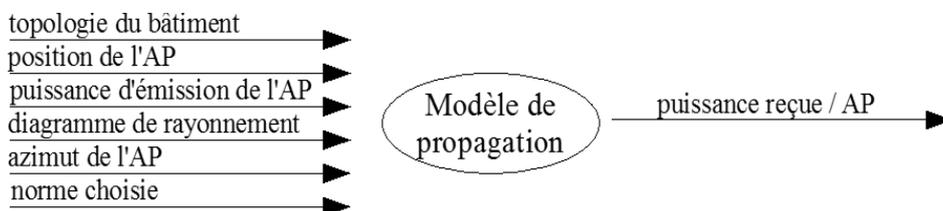


Figure 2 – Modèle de propagation avec les paramètres de l'AP.

2.1.5. Modèle de débit

Dans un environnement indoor, le modèle de propagation définit comment les ondes émises par chaque AP se propagent dans le bâtiment en fonction de sa topologie. Le modèle de débit traduit ces données de propagation en termes de service fourni par le réseau, c'est-à-dire en termes de débit offert aux clients. Le modèle définit les règles permettant d'estimer pour l'ensemble du bâtiment le débit offert par une configuration de réseau. Les deux paramètres entrant dans ce

calcul sont la puissance reçue et le rapport signal à interférence plus bruit ou *SINR* pour *Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*.

Pour calculer le débit réel d'un client, il faut d'abord déterminer l'*AP* avec lequel le client se connecte : c'est le modèle d'association. Les règles d'association ne sont pas fixées par la norme 802.11 et les constructeurs ont la liberté d'implémenter les règles de leur choix. Cependant une règle se dégage des autres : un client s'associe avec le point d'accès qui lui offre le signal le plus fort. Dans notre modèle, nous avons choisi d'utiliser ce type d'association, appelé association au meilleur signal.

Ensuite, il faut estimer la qualité de la liaison radio entre le client et l'*AP* de connexion. Cette étape se base sur le calcul du *SINR*. Enfin, dans un réseau de type 802.11, un client doit partager le canal radio avec l'ensemble des clients du même *AP* et les clients en visibilité radio qui utilisent le même canal de fréquences que lui. Une analyse détaillée de la couche MAC de la norme 802.11 est réalisée pour estimer in fine le débit réel d'un client.

2.2. Optimisation de la qualité de service

L'objectif proposé de l'optimisation de la planification de *WLAN* est de minimiser le coût du réseau sous les contraintes d'un nombre maximum d'*AP* et de couverture (critère de service minimum). Le problème d'optimisation revient à déterminer les variables de décision (les sites, les puissances d'émission des *AP*, les azimuts, les fréquences) qui minimise la fonction de coût sous certaines contraintes de débit.

$$\sum_S c_s + c_{w_s} + \beta \times \sum_T \max(0; -p_t \kappa_t \Delta_t) \quad (1)$$

Le premier terme de la fonction *objectif* concerne le coût financier d'installation du réseau (achat des *AP* et coût du raccordement au réseau). Le second terme concerne la qualité de service du réseau, plus précisément le nombre de *kilobits/s* souhaité par des clients et non offerts par le réseau, ce nombre de *kbps* est pondéré par le facteur de priorité p_t associé au point de service t et rapporté au nombre de clients κ_t situés sur le point de service t . Etant donné la nature différente des termes de la fonction objectif (€ et *kbps*), le coefficient β a été introduit; il correspond au coût financier d'un *kbps* non satisfait.

2.2.1. Stratégies d'optimisation

Traiter successivement les problèmes d'*ACP* et d'*AFP*, comme dans la plupart des travaux de la littérature, nécessite d'ajouter des contraintes au problème de placement des *AP* afin de faciliter, dans un second temps, le problème d'affectation des fréquences. Nous montrons qu'il est possible de traiter simultanément ces deux problèmes par une optimisation globale. Nous proposons d'évaluer la *QoS* des réseaux obtenus par différentes stratégies d'optimisation séquentielle ou d'optimisation globale.

Dans la littérature, deux stratégies classiques d'optimisation de la planification sont largement utilisées : la première méthode est purement *séquentielle*, la deuxième s'appuie sur un placement des *AP* avec coloration de graphe pour l'*AFP*. Deux nouvelles stratégies d'optimisation sont proposées. L'une, séquentielle, tient compte lors du placement des émetteurs d'un *brouillage moyen* entre émetteurs. L'autre, globale, optimise simultanément *le placement des émetteurs et l'affectation des fréquences*.

Chacune de ces stratégies est caractérisée par la façon dont les interférences sont prises en compte. Les interférences sont souvent mesurées en un *point de service* du réseau par le *SINR*. Nous rappelons sa définition pour un point de service t dans le cas où seules les interférences entre *AP* sont considérées :

$$SINR_t = \frac{p_{s_t t}^R}{\sum_{s \neq s_t} p_{s t}^R \times \gamma(|f_{s_t} - f_s|) + p^B} \quad (2)$$

où s_t indique l'AP serveur du point de service t , $p_{s_t t}^R$ est la puissance du signal reçue par le point de service t provenant de l'AP serveur, $p_{s t}^R$ est la puissance du signal issue de l'AP s et reçue par le point de service t , f_s est le canal de fréquence affecté à l'AP s , p^B est la puissance du bruit thermique et $\gamma(\cdot)$ est le facteur de protection entre canaux. Ce facteur dépend de la distance canal entre le signal serveur et les interférents ; plus cette distance augmente plus le facteur de protection est petit, et inversement.

L'estimation du $SINR$ nécessite à la fois de connaître la configuration des AP (position, diagramme de rayonnement, azimut, puissance) et les fréquences utilisées par chacun d'entre eux. Le $SINR$ se calcule donc uniquement si les problèmes ACP et AFP ont été tous les deux traités. Cependant, la façon dont les interférences sont généralement considérées se traduit souvent par des simplifications du $SINR$ qui permettent de traiter successivement les problèmes avant de calculer l'évaluation du réseau via le $SINR$.

A chacune des quatre stratégies d'optimisation de la planification que nous allons présenter ci-après correspond une approximation différente du $SINR$ qui s'éloigne plus ou moins du calcul réel donné par l'équation (2).

A. Stratégie séquentielle

Lorsque les problèmes d'ACP et d'AFP sont traités successivement, il est nécessaire d'ajouter des contraintes au problème d'ACP afin de tenir compte des limites en ressource radio. Dans la littérature, la contrainte la plus courante consiste à considérer le recouvrement entre cellules en interdisant de sélectionner deux sites candidats trop proches [130] ou en minimisant les zones de recouvrement entre cellules [42]. Des approches plus sophistiquées évaluent l'écart de puissances entre les signaux interférents [3, 152], d'autres définissent un critère de réutilisation de canaux de fréquences pour un réseau en fonction du recouvrement [118].

La stratégie purement séquentielle retenue pour notre étude consiste à pénaliser les recouvrements entre cellules comme dans [42, 130] en tenant compte des écarts de puissances entre les signaux interférents comme dans [17, 157]. Le problème d'ACP sélectionnera donc les configurations d'AP qui couvrent le mieux le réseau tout en minimisant les recouvrements de cellules. Une fois les configurations d'AP choisies, le problème d'AFP est traité en utilisant les 13 canaux de fréquences disponibles pour la norme *IEEE 802.11g*.

Il y a recouvrement entre cellules lorsqu'un point de service reçoit plusieurs signaux. L'importance du recouvrement est fonction de l'écart de puissance entre le signal porteur et les signaux interférents. Pour mesurer le recouvrement en un point de service t , l'approximation du $SINR$ ci-dessous est appropriée :

$$SINR_t \simeq \frac{p_{s_t t}^R}{\sum_{s \neq s_t} p_{s t}^R + p^B} \quad (3)$$

Formellement cette approximation correspond au cas où tous les AP utilisent le même canal : $\forall s \neq s_t : |f_{s_t} - f_s| = 0$, ce qui entraîne $\gamma(|f_{s_t} - f_s|) = 1$. Cette stratégie permet de traiter le problème ACP sans faire d'affectation de fréquences. Elle va diriger la planification vers un nombre limité d'AP puisque tout recouvrement est fortement pénalisé. Une fois les configurations d'AP sélectionnées, la planification se termine en affectant au mieux les canaux de fréquences à chaque AP.

Une stratégie opposée consiste à négliger toutes les interférences. Cela correspond à approximer le $SINR$ en SNR (*Signal-to-Noise-Ratio*) :

$$SINR_t \simeq \frac{p_{s_t t}^R}{p^B} = SNR_t \quad (4)$$

Dans ce cas, l'affectation des fréquences sera très difficile et les résultats en terme de qualité de service seront médiocres.

B. Stratégie de placement avec coloration de graphe

Dans [31, 147, 150, 183], les auteurs traitent le problème AFP en même temps que le problème d' ACP , mais en utilisant seulement 3 canaux disjoints pour la planification de fréquences. Les normes 802.11b et g définissent 14 canaux de fréquences dont seuls 13 sont autorisés en France. Comme illustré en figure 2, ces canaux se chevauchent ce qui provoque des interférences lorsque deux AP dont les cellules se recouvrent utilisent des canaux proches (écart inférieur à 5 canaux). Dans la plupart des publications, les auteurs se limitent à l'usage de trois canaux disjoints : 1, 6 et 11 par exemple, ce qui simplifie le problème d' AFP . Dans ce cas il n'y a plus d'interférences entre canaux adjacents, seules existent les interférences co-canal, entre AP utilisant le même canal. En effet, avec seulement trois fréquences lorsqu'il s'agit d'installer plus de trois AP il faut réutiliser un canal déjà affecté à un autre AP . Dans ce cas, soit $\gamma(|f_{s_t} - f_s| = 0) = 1$ si les AP s et s_t utilisent le même canal, soit $\gamma(|f_{s_t} - f_s| \geq 5) = 0$ si les AP s et s_t utilisent des canaux disjoints. Alors le $SINR$ devient :

$$SINR_t \simeq \frac{p_{s_t}^R}{\sum_{s, \text{ co-canal}} p_{s_t}^R + p^B} \quad (5)$$

Dans cette stratégie, les fréquences sont bien affectées aux configurations d' AP , mais sur un espace limité. Le problème d'affectation de fréquences ainsi réduit à trois couleurs (1, 6 et 11) correspond au problème bien connu de coloration de graphe à 3 couleurs (*3-Graph coloring*). [122] ont une approche similaire mais au lieu de calculer le $SINR$ correspondant à la stratégie, ils estiment directement le débit en fonction de la probabilité de collision.

Dans cette stratégie à 3 fréquences, il y a recouvrement uniquement si deux AP utilisant le même canal couvrent la même zone. Pour comparer cette stratégie avec les autres, il est nécessaire, après cette optimisation globale du placement des AP avec un nombre de couleurs réduit, de procéder à une nouvelle planification de fréquences mais cette fois avec les 13 canaux de fréquences disponibles pour la norme *IEEE 802.11g*. Le résultat donne un réseau complètement paramétré et ayant toute liberté d'utiliser toutes les fréquences du spectre même si seulement 3 fréquences ont été utilisées pour le placement.

C. Stratégie de placement avec brouillage moyen entre AP

Les deux stratégies présentées précédemment sont inspirées de la littérature et adaptées à notre problème focalisé sur le $SINR$. Cette troisième stratégie est nouvelle et traite le problème ACP avant le problème AFP et constitue donc une contribution sur les stratégies d'optimisation séquentielle. Pour prendre en compte les interférences dans la première étape sans faire d'affectation de fréquences, nous considérons un brouillage moyen entre les AP et pour définir ce brouillage moyen, un facteur de protection moyen $\bar{\gamma}$ est introduit.

Le facteur de protection moyen $\bar{\gamma}$ est un réel compris entre 0 et 1. Il caractérise la protection d'un signal par rapport à un signal brouilleur utilisant un autre canal de fréquences. Plus le facteur

de protection moyen $\bar{\gamma}$ est petit plus la protection est importante. Il indique l'approximation moyenne de $\gamma(\cdot)$ qui est le facteur de protection entre canaux. Il nous permet d'approximer le *SINR* d'un point de service t par la formule suivante :

$$SINR_t \simeq \frac{p_{s_t}^R}{\sum_{s \neq s_t} \bar{\gamma} \times p_{s_t}^R + p^B} \quad (6)$$

Cette approche généralise l'approximation de la première stratégie puisque si $\bar{\gamma} = 1$, alors nous retrouvons l'équation (3) et si $\bar{\gamma} = 0$, alors nous retrouvons le *SNR* de l'équation (4). Pour déterminer la valeur de $\bar{\gamma}$ pour un réseau donné, il est nécessaire d'estimer la densité d'*AP* sur le réseau. Plus il y a d'*AP*, plus il y a d'interférences et donc plus $\bar{\gamma}$ est important. Dans le problème *AFP*, si nous supposons toujours qu'il est possible de respecter un écart de 2 ou 3 canaux entre tous les *AP*, alors on peut fixer la valeur de $\bar{\gamma}$ entre $\gamma(3) = 0,0375$ et $\gamma(2) = 0,2714$. Dans l'exemple que nous présentons, nous prenons $\bar{\gamma} = 0.1$.

Ce paramètre est défini au début de l'expérience selon le nombre d'*AP* attendus dans un réseau. Cependant, il est possible de prendre différentes valeurs du facteur de protection sur les différentes zones d'un même réseau. Nous pouvons, de plus, faire varier ce paramètre au cours de l'optimisation selon la densité d'*AP* dans les diverses zones du réseau.

Cette stratégie souple et dynamique permet de séparer les deux problèmes; une planification des canaux de fréquences est donc nécessaire dans un second temps. La start-up *TRINAPS* avait intégré cette stratégie dans son programme de planification à partir des travaux publiés dans [77]. Il est également envisageable d'itérer plusieurs fois consécutives le problème de placement avec brouillage moyen et le problème d'allocation de fréquences. Le facteur de protection moyen de chaque itération est déterminé grâce à la solution du problème d'allocation de fréquences de l'itération précédente; il évolue donc à chaque itération.

D. Stratégie d'optimisation globale

La quatrième stratégie résout les deux problèmes simultanément : il n'y a pas d'approximation du *SINR*, nous utilisons l'équation (2) et l'affectation des fréquences utilise les **13** fréquences disponibles. Il ne sera donc pas nécessaire, comme dans les autres stratégies, de résoudre un problème d'affectation de fréquences dans un second temps.

2.2.2. Méthode de recherche à Voisinage Variable Aléatoire

Pour la mise en œuvre de ces stratégies, nous avons défini un algorithme basé sur un principe simple : le changement aléatoire de voisinage durant la recherche contrairement à ce qui se fait dans la littérature [86]. Nous avons développé un algorithme à Voisins Variables Aléatoires (VVA) où le type de voisinage est tiré au hasard à chaque itération d'une recherche locale. L'algorithme VVA s'appuie sur une recherche locale basée sur une exploration itérative et aléatoire de cinq types différents de voisinage : un voisinage de suppression, un voisinage d'ajout, un voisinage de remplacement, un voisinage fréquentiel et un voisinage intra-site. A chaque itération, un voisinage et son heuristique associée est sélectionné aléatoirement selon une probabilité fixée dès le départ. Ces probabilités sont approximativement inversement proportionnelles à la durée d'exploration de chaque voisinage. Pour initialiser l'algorithme VVA, nous avons construit une solution réalisable fournie par un algorithme glouton aléatoire [133], de meilleure qualité qu'une solution aléatoire ; la solution initiale obtenue satisfait au mieux la contrainte de couverture sans dépasser un nombre fixé d'*AP*.

2.2.3. Expérimentations et résultats

Afin d'unifier les problèmes de placement des *AP* et d'affectation des fréquences, il est nécessaire d'avoir un unique critère d'évaluation de la *QoS* d'un réseau que nous pouvons classer en trois principales catégories : *couverture*, *interférence* et *capacité*. Les critères basés sur la

couverture nécessitent le calcul des puissances de réception des signaux des *AP* ou des distances aux *AP*. Les critères basés sur les *interférences* estiment le recouvrement entre cellules ou approximent le *SINR*. Les critères sur la *capacité* sont souvent basés sur une estimation de la couche *MAC* ou du nombre de clients par *AP*. Le seul critère qui unifie ces trois aspects est le **débit réel par utilisateur**. En effet, pour avoir une estimation correcte du débit réel par client, il est nécessaire de tenir compte de ces trois critères. Le modèle développé calcule ce débit réel par client, nous l'utiliserons pour évaluer les résultats des quatre stratégies avec les approximations de *SINR* respectives.

A. Expérimentations

L'optimisation nécessite de calculer préalablement les cartes de couverture des sites potentiels qui sont les données d'entrée du problème d'optimisation. Pour cela, nous avons utilisé une application propriétaire de *Orange Labs* qui est un logiciel de propagation d'ondes radio en milieu indoor; il est basé sur la méthode de *lancer de rayons* dans les trois dimensions de l'espace [44]. Le nombre de rayons et de réflexions à considérer pour le calcul est paramétrable. Les phénomènes de diffraction sont également pris en compte.

Le problème à optimiser correspond à un bâtiment de deux étages décrit par la Figure 3. Chaque étage est un rectangle de 120 mètres de long pour 40 mètres de large. Nous définissons 94 sites potentiels d'installation d'*AP* répartis sur les deux étages. Pour se focaliser sur les différentes stratégies d'optimisation on a réduit la combinatoire du problème : un seul type d'*AP* est disponible avec un diagramme de rayonnement omnidirectionnel et deux niveaux de puissance d'émission possibles. Le nombre maximum d'*AP* à installer est fixé à 30.



Figure 3 – Description du RdC (a) et deuxième (b) étage du bâtiment test.

Pour définir la demande en trafic, nous utilisons des zones de service représentées par des polygones couvrant une partie du bâtiment. Chaque zone est caractérisée par un nombre de clients et un débit souhaité par chacun des clients de cette zone. Une zone de service est définie en vert sur la Figure 3 sur chaque étage du bâtiment. 300 clients sont uniformément répartis sur chaque zone de service et chacun d'entre eux souhaite 500kbps. La demande globale est donc de 300 Mbps. Les deux zones de service couvrent 7728 mètres carrés, nous définissons donc 7728 points de service pour le calcul du *SINR*. Préalablement à l'optimisation, il est nécessaire de calculer les cartes de couverture relatives aux 94 sites potentiels. La durée de calcul des 94 cartes par le modèle de propagation d'*Orange Labs* demande environ 1h30.

B. Analyses des résultats

Pour chaque stratégie, notre algorithme est exécuté trois fois pendant une durée d'une heure. Nous présentons le meilleur résultat des trois exécutions. Les résultats des quatre stratégies sont

présentés sur la Figure 4. Pour chaque stratégie, nous comparons le nombre d'AP sélectionnés, le nombre de points de service non couverts et le nombre de points de service non satisfaits. Un point de service est non couvert en service si son *SINR* est trop faible (inférieur à 4 dB) c'est-à-dire qu'il y a trop d'interférences ou que le signal porteur est de trop faible puissance. Un point de service est non satisfait s'il est couvert en service mais que le débit réel qu'il obtient est inférieur au débit qu'il souhaite (500 kbps).

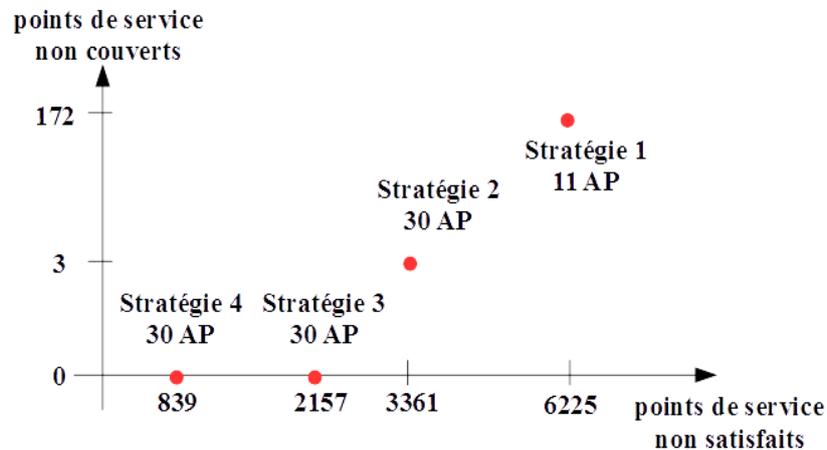


Figure 4 – Résultats des quatre stratégies (7728 points de service au total) : nombre d'AP sélectionnés, nombre de points de service non satisfaits, nombre de points de service non couverts.

Considérons d'abord le nombre d'AP sélectionnés pour les 4 solutions. La Figure 4 montre que les stratégies 2, 3 et 4 ont sélectionné 30 AP, ce qui est le maximum permis, la stratégie 1 n'a sélectionné que 11 AP. Cette limitation est due aux interférences : pour cette stratégie, lorsqu'un nouvel AP est ajouté lors de la phase ACP il fournit une connexion à de nouveaux points de service, ce qui justifie son ajout, mais il détériore également la qualité des liaisons radio de nombreux points de service car c'est un interféreur supplémentaire en co-canal. Cet équilibre limite le nombre d'AP installés à 11. Ce résultat montre que cette stratégie, pénalisant dans un premier temps tous les recouvrements sans utiliser les fréquences, sur-contraint le problème de planification WLAN. De ce fait, 11 AP ne suffisent pas à satisfaire la demande et cette stratégie donne les pires résultats en termes de points de service non couverts et non satisfaits. A noter que cette stratégie est celle qui est la plus couramment employée car sa modélisation est la plus accessible.

Les Figures 5 et 6 montrent respectivement les couvertures des quatre stratégies pour le rez-de-chaussée et le second étage du bâtiment. Le bleu clair indique l'extérieur du bâtiment. Les pixels noirs indiquent les points de service non couverts, les pixels verts foncés les points de service non satisfaits mais couverts. Les pixels verts clairs indiquent les points de service satisfaits, c'est-à-dire pour lesquels le débit réel offert est supérieur à celui souhaité. Enfin, les pixels blancs localisent les positions des AP sélectionnés par les quatre solutions.

En comparant les deux stratégies d'optimisation globale (stratégies 2 et 4), nous ne pouvons pas imputer le manque de couverture au fait de traiter simultanément ou pas les problèmes d'ACP et d'AFP. Les deux stratégies utilisent les 13 canaux de fréquence, mais pour la stratégie 2, la planification est réalisée en deux étapes; d'abord une optimisation ACP/AFP simultanée avec les 3 canaux disjoints, puis une optimisation AFP avec les 13 canaux. En revanche, nous concluons qu'affecter directement les 13 canaux disponibles (stratégie 4) au lieu des trois canaux disjoints (stratégie 2) donne de meilleurs résultats : pour un même nombre de sites, il y a plus de points de service satisfaits. Utiliser tous les canaux disponibles dans une approche

globale permet de répartir les interférences sur l'ensemble du bâtiment et de les garder à un niveau relativement faible. A contrario, avec 3 canaux disjoints, les points de service avec interférences sont moins nombreux mais le niveau de l'interférence est plus important, ce qui détériore plus la Qualité de Service d'un réseau. L'approche globale avec 3 canaux conduit à un minimum local et les points de service à problème ne sont pas rattrapables lors de l'AFP complémentaire avec 13 canaux.

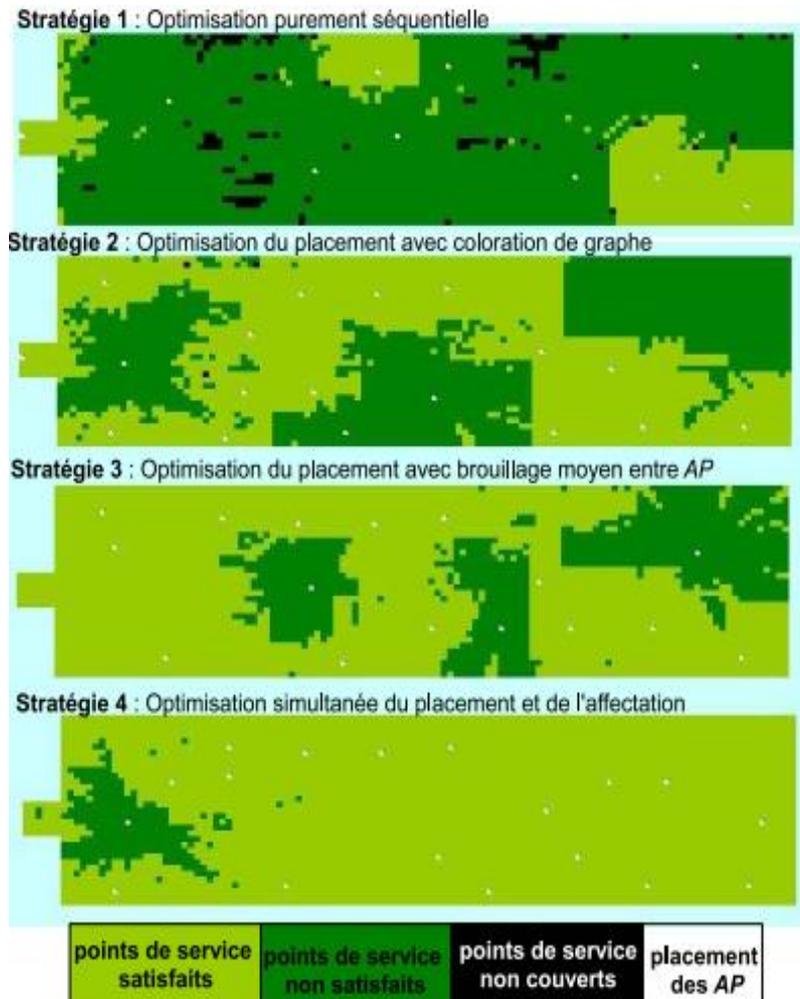


Figure 5 – Couverture du RdC du bâtiment test pour les 4 stratégies.

Nous obtenons de meilleurs résultats avec la *stratégie 3 séquentielle* qu'avec la *stratégie 2 globale* et des résultats bien meilleurs que la *stratégie 1 séquentielle*. Ce résultat surprenant signifie qu'il est intéressant de traiter simultanément les problèmes ACP/AFP uniquement sous la condition d'utiliser tous les canaux de fréquences. Ceci correspond à une avancée significative dans la résolution séquentielle des problèmes d'affectation de fréquences en général, que ce soit en WLAN ou en réseaux cellulaires comme le GSM.

Enfin la stratégie 4 obtient les meilleurs résultats avec près de trois fois moins de points de service non satisfaits que pour la stratégie 3. Tout d'abord cela prouve qu'il est maintenant possible de réaliser une optimisation globale du problème de planification sur des réseaux de grande taille. En effet, il est possible de planifier des réseaux de plus d'une centaine d'AP. Par ailleurs, les deux principales caractéristiques de cette stratégie (traitement simultané des problèmes de placement et d'affectation et utilisation de toutes les fréquences disponibles) doivent être utilisées simultanément pour obtenir les meilleurs résultats puisque les stratégies 2 et 3 sont dominées.

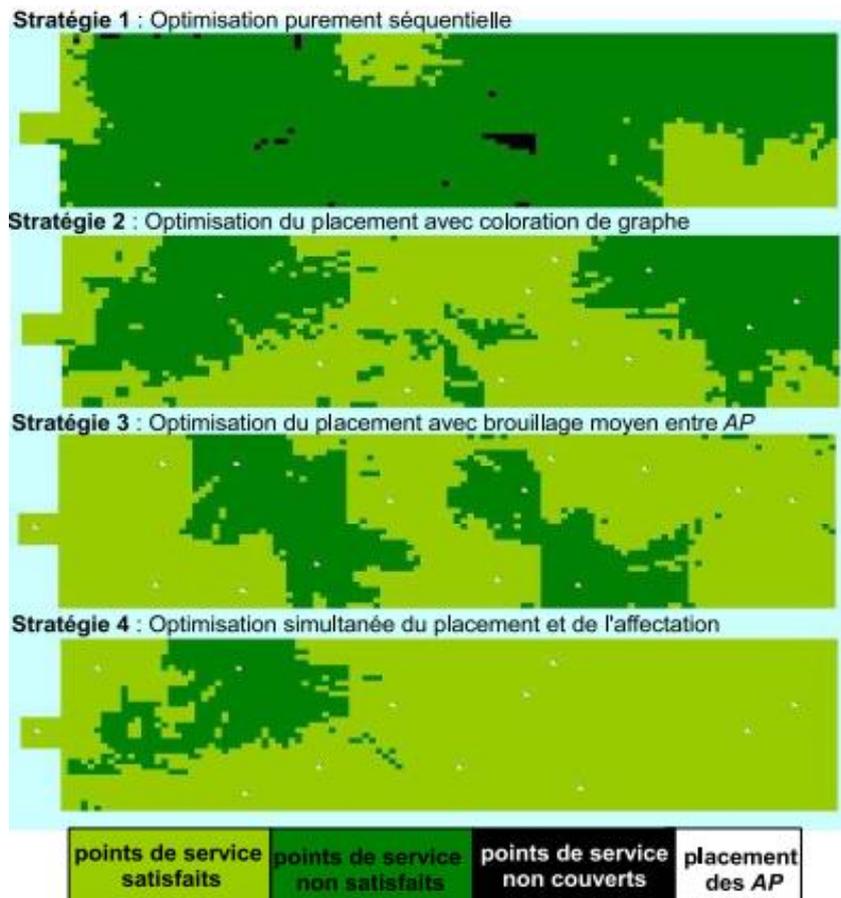


Figure 6 – Couverture du 1^{er} étage du bâtiment test pour les 4 stratégies.

Malgré des résultats moins bons que pour la stratégie 4, la stratégie 3 est très prometteuse puisqu'elle permet de séparer les deux problèmes sans perte de qualité trop importante. Elle présente l'avantage d'avoir une combinatoire beaucoup plus faible et d'avoir un modèle de calcul moins sophistiqué que la stratégie 4. De plus cette méthode peut être améliorée. Au lieu de fixer le facteur de protection moyen $\bar{\gamma}$ à une valeur unique pour toute l'expérience (ici, $\bar{\gamma} = 0,1$), il est possible d'employer plusieurs valeurs selon les différentes zones du bâtiment. Par exemple, si l'on souhaite un débit moins important sur le premier étage, ce qui signifie moins d'AP et donc moins d'interférences, on peut baisser le facteur de protection moyen $\bar{\gamma}$ à 0,05 ; inversement on peut fixer $\bar{\gamma} = 0,5$ sur une zone de forte densité d'AP. Il est également envisageable de faire évoluer le coefficient $\bar{\gamma}$ au cours de l'optimisation en fonction de la densité d'AP.

2.3. Optimisation de la localisation indoor

Depuis ces dernières décennies, les *services géo-localisés*, connus sous l'appellation *Location-Based Services (LBS)* sont largement déployés dans divers environnements intérieurs et extérieurs [45, 57, 75, 102, 149]. Les systèmes de localisation indoor ou *IPS* pour *Indoor Positioning Systems* utilisés par les *LBS* sont des composants importants de la localisation et de la navigation à l'intérieur des bâtiments. Les *IPS* basés sur les réseaux locaux sans fil, couramment déployés aujourd'hui, offrent une solution peu coûteuse qui tire profit de l'installation *WLAN* existante ; ce qui permet de réduire les coûts d'implémentation et de proposer des services de géolocalisation attractifs [58, 91, 169]. Les utilisateurs disposant de terminaux mobiles équipés d'interfaces radio peuvent se connecter aux *WLAN* existants et, par la même occasion, communiquer et être géo-localisés.

Parmi les approches développées pour déterminer la position d'un terminal mobile, la technique de l'empreinte radio (*fingerprinting technique*) est largement répandue [29, 39, 59, 65, 92, 181, 185, 188]; elle consiste à construire une carte radio de l'environnement en mesurant, à des points déterminés à l'avance, la puissance du signal reçue depuis les *AP* déployés. Généralement, les *IPS* prennent en considération deux éléments principaux : les algorithmes utilisés pour faire l'association entre la carte radio et la position recherchée, et la réduction du coût de développement de la carte radio. Plusieurs campagnes de mesures peuvent s'avérer nécessaires pour construire une carte radio de qualité permettant d'obtenir une bonne précision de localisation. Cependant, d'autres facteurs peuvent impacter les performances de ce type de systèmes telles que la configuration du réseau et la topologie du bâtiment considéré qui a un effet direct sur les caractéristiques de la propagation radio.

Le plus souvent, les *WLAN* étant largement déployés, les *IPS* s'appuient sur l'infrastructure *WLAN* existante [61, 65, 131]. Il faut garder à l'esprit que le premier objectif d'un *WLAN* est de fournir une connectivité et la *QoS* souhaitée par l'utilisateur. Cependant, la pratique la plus répandue en termes de conception et de configuration réseau néglige cet objectif principal et fait de la localisation le seul objectif de paramétrage réseau. La conception et la configuration du réseau se résume alors au déploiement d'un certain nombre d'*AP* pour lesquels il s'agit de paramétrer la fréquence, la puissance d'émission et l'azimut. Dans ce contexte, l'augmentation de la *densité d'AP* peut améliorer la précision du système par contre, elle a pour effet d'augmenter le coût d'installation et surtout de dégrader la qualité des communications dû aux interférences.

Il n'existe nulle part dans la littérature de recette permettant de concevoir un *IPS* performant. Une question se pose alors : *est-il possible de déployer un WLAN pour garantir à la fois la QoS requise et la précision nécessaire aux services LBS ?* Aujourd'hui, il est difficile de donner une réponse simple et unique à cette question. En effet, développer un *IPS* dépend de plusieurs paramètres techniques et contextuels. Techniquement, les performances d'un *IPS* dépendent des technologies réseaux utilisées, leurs caractéristiques électromagnétiques, leurs sensibilités, etc. Par ailleurs, pour garantir le bon fonctionnement d'un *IPS*, il faut tenir compte de l'environnement dans lequel il est déployé : la nature et la topologie du bâtiment ont un impact direct sur la précision du système ; la conception de l'*IPS* varie selon que l'on fait face à des espaces ouverts avec peu d'obstacles, à des environnements moyennement obstrués ou à des environnements fortement obstrués. Notre manière de répondre à la question posée est de considérer le problème de planification de *WLAN* sous 2 aspects : d'abord, fournir la *QoS* requise ; mais aussi, réduire l'erreur de localisation. Nous proposons une approche novatrice et efficace où la planification de *WLAN* et la réduction d'erreur de localisation sont traitées comme un problème d'optimisation et abordées simultanément pendant le processus de déploiement *WLAN*.

2.3.1. Problématique de localisation indoor

Le cadre général de fonctionnement du système de localisation indoor (*IPS*) développé par Y. Zheng [190] est décrit par la Figure 7. Le système utilise la technique du *fingerprinting* et comprend deux principaux modules. Un module de propagation qui calcule, pour un ensemble de points préalablement définis dans le bâtiment, la carte radio en fonction des caractéristiques du *WLAN* et de la topologie du bâtiment. Un module de localisation qui retourne la position calculée basée sur une approche probabiliste et en fonction du mode choisi. Dans le cas du mode statique (*utilisateur stationnaire*), le module prend en entrée l'ensemble des signaux reçus des *AP* détectables par l'utilisateur et retourne la position d'un point de la carte radio qui a la plus forte probabilité de correspondre à la position réelle de l'utilisateur. Dans le cas du mode dynamique (*utilisateur en mouvement ou tracking*), en plus des signaux reçus des *AP* détectables, le module prend en compte une ou plusieurs positions précédentes calculées pour déterminer la position de l'utilisateur. En cas de changement drastique de l'environnement, il

est possible d'opérer un calibrage du système pour limiter les erreurs de localisation dues à une carte radio incohérente.

Concevoir un *IPS* est une démarche qui combine deux aspects : planifier un *WLAN* pour garantir la *QoS* souhaitée et réduire l'erreur de localisation. Nous retrouvons à nouveau les deux problèmes de placement (*ACP*) et de paramétrage (*AFP*) du réseau où le placement des *AP* doit se faire non seulement en respectant des critères de couverture, de capacité, de débit... mais aussi un nouveau critère qui est l'erreur de localisation.

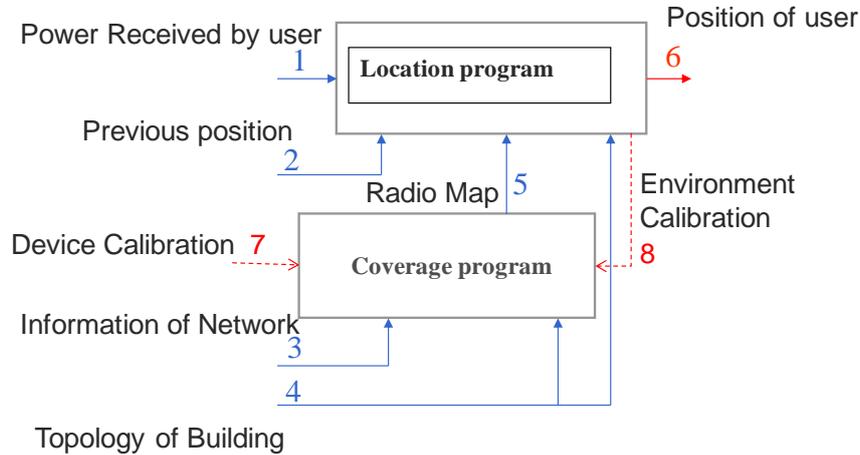


Figure 7 – Architecture fonctionnelle.

Pour trouver une configuration réseau faisable et qui satisfait les contraintes de *QoS* et d'erreur de localisation, il est important de définir les *indicateurs clés* permettant d'évaluer la valeur réelle des critères de *QoS* et de *localisation*. Pour cela, et indépendamment des zones de service, l'environnement de travail est décomposé en *zones de localisation* qui sont des zones de calcul traduites en un ensemble de points discrets, appelés *points de référence*, qui caractérisent le besoin en *localisation* des utilisateurs du réseau. Ainsi, les indicateurs définis sont calculés à chaque *point de service* et à chaque *point de référence* pour évaluer respectivement la *QoS* réelle du réseau et l'*erreur de localisation*.

A. Indicateur de *QoS*

Pour un réseau *WLAN*, la *QoS* peut être mesurée en chaque point de service en calculant le *SINR* dont on rappelle ci-dessous la définition :

$$SINR_t = \frac{p_{st}^R}{\sum_{s \neq st} p_{st}^R \times \gamma(|f_{st} - f_s|) + p^B} \quad (7)$$

où p_{st}^R est la puissance du signal reçue par le point de service t provenant de l'*AP* serveur, p_{st}^R est la puissance des signaux interférents reçue par le point de service t , f_s est le canal de fréquence affecté à l'*AP* s , p^B est la puissance du bruit thermique et $\gamma(\cdot)$ est le facteur de protection correspondant au coefficient d'atténuation entre canaux.

B. Indicateurs d'erreur de localisation

Plusieurs facteurs contribuent à l'erreur de localisation. D'abord, l'erreur peut être provoquée par le système de localisation lui-même. L'utilisation de la technique du *fingerprinting* présente un inconvénient appelé *aliasing* [84]. Le phénomène d'*aliasing* traduit une mauvaise diversité des vecteurs *RSS* pour *Received Signal Strength* : plusieurs points de référence distincts peuvent

voir les mêmes AP et recevoir la même valeur de RSS provenant de ces AP . Par conséquent, les vecteurs RSS de ces points de référence sont identiques et ne permettent pas une discrimination de la position recherchée. Si ce phénomène apparaît au niveau d'un nombre élevé de points de référence, alors la technique du *fingerprinting* devient inefficace. Une façon d'éliminer l'*aliasing* est d'augmenter le nombre d' AP ou bien de modifier leur placement [26]. Nous définissons le taux amélioré d'erreur spécifique appelé **RSER** pour *Refined Specific Error Ratio* et qui permet d'évaluer l'erreur d'*aliasing* :

$$RSER(k) = \frac{1}{(n(n-1))} \sum_i \sum_{j \neq i} dist(i, j) \quad (8)$$

i et j représentent le numéro de séquence des points de référence ayant le même vecteur RSS au point de référence k , n est le nombre de points de référence ayant le même vecteur RSS et $dist(i, j)$ est la distance Euclidienne entre les points de référence i et j . L'indicateur $RSER$ calcule une moyenne arithmétique des distances deux à deux entre les points de référence ayant le même vecteur RSS et correspond à une erreur statistique sur un point de référence.

Ensuite, un autre critère largement utilisé dans le GNSS, le **GDOP** pour *Geometric Dilution of Precision*, reflète la distribution géométrique des satellites ; la valeur optimale de ce critère est égale à 1. Dans [197, 198], le $GDOP$ a été adapté aux WLAN et permet d'établir un lien entre la précision de localisation et la distribution géométrique des AP , plus la valeur du $GDOP$ est petite, meilleure est la précision.

Enfin, l'erreur de localisation peut être aléatoire ; elle peut être due aux perturbations inhérentes à l'environnement telles que l'orientation de l'émetteur, la distance séparant l'émetteur et le terminal mobile, des interférences causées par des émetteurs à proximité, la présence de foule plus ou moins dense, etc. D'un point de vue statistique, l'erreur aléatoire provient du fait que l'on observe un échantillon plutôt qu'une population entière. Généralement, elle est estimée et minimisée par le biais d'analyses statistiques sur des mesures répétées. Pour cela, nous nous intéressons à l'estimation de l'erreur moyenne de localisation appelée **APE** (pour *Average Positioning Error*) calculée en chaque point de référence RP .

En résumé, pour évaluer deux configurations différentes d'un IPS , APE puis $GDOP$ sont les indicateurs les plus pertinents à prendre en compte. Tandis que l'indicateur $RSER$ est appliqué pour améliorer la recherche de la solution (configuration) optimale compte tenu du fait qu'il y a un lien inhérent entre l'*aliasing* et l'erreur moyenne de localisation.

2.3.2. Les objectifs de la localisation

Trois objectifs sont définis pour la localisation indoor : un objectif de précision de la localisation, un objectif de QoS et un objectif de coût économique du réseau déployé. Ces objectifs sont à minimiser ou à maximiser en tenant compte de contraintes à satisfaire pour obtenir une solution réalisable. De plus, nous savons que ces objectifs sont antagonistes : pour améliorer la précision de localisation, nous pouvons augmenter le nombre d' AP ce qui aura pour conséquence d'une part d'augmenter le coût d'installation du réseau et d'autre part de dégrader la QoS requise en raison des interférences. Une manière de trouver une solution réalisable est de traiter ces 3 critères simultanément sous la forme d'un problème d'optimisation mono-objectif dont la fonction agrégée a la forme suivante :

$$\sum_{Site} C_{site} + \sum_{TP} \beta \times \Delta_t + \sum_{RP} \gamma \times E_k \quad (9)$$

où C_{site} est le coût de déploiement du réseau qui comprend le coût d'installation des sites, le coût d'achat et d'installation des AP. β est le coefficient de pénalité affecté à chaque point de service t , Δ_t est l'écart entre le débit demandé et le débit fourni, il correspond au critère de QoS défini au niveau de tous les points de service. γ est le coefficient de pénalité affecté à chaque point de référence k , E_k est la magnitude de l'erreur de localisation sur tous les points de référence. Dans cette formulation, le premier terme concerne le coût d'installation du réseau, le deuxième terme concerne le coût des demandes non satisfaites en débit et le troisième terme concerne le coût des demandes non satisfaites en localisation. Tous les termes ont la même unité qui est l'euro ce qui transforme notre problème de localisation en un problème purement économique.

2.3.3. Méthode de recherche Tabou à Voisinage Variable

Dans la littérature, plusieurs métaheuristiques peuvent être utilisées pour résoudre ce type de problème [21, 97, 174, 176]. Dans notre cas nous avons opté pour un algorithme hybride basé sur les méthodes de *recherche Tabou* et de *recherche à Voisinage Variable*. La construction d'une bonne solution initiale est importante car elle conditionne la qualité de la solution du problème. Un algorithme glouton aléatoire permet d'obtenir une solution initiale en un temps raisonnable et satisfaisant la contrainte de couverture. A partir de la solution initiale, un algorithme de recherche Tabou à Voisinage Variable (TVNS pour *Tabu Variable Neighbourhood Search*) est utilisé pour améliorer la solution initiale. A chaque itération de l'algorithme, une recherche Tabou est réalisée sur un parmi les 4 types de voisinage : un voisinage de suppression, un voisinage d'ajout, un voisinage de remplacement et un voisinage de configuration. Un voisinage fréquentiel est utilisé conjointement avec chacun des 4 voisinages mentionnés pour optimiser l'allocation de fréquence. Le choix du voisinage se fait dynamiquement sur la base d'une estimation du potentiel d'amélioration de la solution ; plus un voisinage permet d'améliorer la solution en un temps raisonnable plus son utilisation est privilégiée. Une liste Tabou est associée à l'algorithme de recherche Tabou dont la taille est déterminée dynamiquement et est comprise entre deux valeurs minimales et maximale fixées de manière empirique.

2.3.4. Expérimentations et résultats

Contrairement à la QoS, l'erreur de localisation dépend uniquement du vecteur RSS aux points de référence RP. Dans le modèle de propagation de *Orange Labs* utilisé, la puissance de signal reçue de chaque AP est mutuellement indépendante, par conséquent, l'erreur de localisation dépend uniquement des opérations d'ajout, de suppression, de remplacement et de configuration d'un AP. Dans ce contexte, la moyenne de l'erreur sera recalculée uniquement au niveau des RP contenus dans les zones de couverture des AP modifiés à chaque opération. Seulement deux AP au plus sont concernés par une opération donnée, et le plus souvent, un seul AP est modifié par celle-ci. Ceci réduit considérablement le nombre de RP limités à une ou deux zones de couverture d'un AP, évitant ainsi un surcoût de calcul portant sur l'ensembles des zones de localisation. Par ailleurs, à chaque configuration d'AP correspond une variation de l'erreur de localisation. L'indicateur d'aliasing RSER est alors calculé, uniquement pour les RP dans la zone de couverture de l'AP concerné, pour estimer l'erreur de localisation de cette configuration.

A. Expérimentations

Les expérimentations ont été conduites dans les mêmes condition que la section 2.2.2 et dans le même bâtiment de la Figure 3. Pour définir la demande en trafic et la demande en localisation, nous avons défini une zone de service et une zone de localisation. Pour simplifier les calculs, les deux zones de service et de localisation sont confondues. La zone de service compte 7728 points de service de calcul du SINR, avec une demande globale de 300 Mbps. La zone de localisation compte également 7728 points de référence pour le calcul du RSER. La demande

en précision de localisation est de zéro, en d'autres termes, l'écart entre la position recherchée et la position estimée doit être le plus petit possible, et idéalement nul. Pour mieux appréhender la relation entre la QoS et l'erreur de localisation, nous ignorerons l'objectif de coût économique pour nous focaliser sur les deux objectifs qui nous intéressent, à savoir la QoS et l'erreur de localisation. La formulation (9) de la fonction objectif devient :

$$\beta \times \sum_{TP} (0; -u_c^T \times \Delta_t) + \gamma \times \sum_{RP} APE_r \quad (10)$$

où u_c^T est le nombre de clients au point de service t dans la zone de service T , Δ_t est l'écart entre le débit demandé et le débit fourni au point de service t . APE_r est l'erreur moyenne au point de référence r . Les coefficients β et γ sont des valeurs constantes déterminés de manière empirique. Lors des expérimentations, le rapport γ/β a été fixé à 0,1 pour obtenir une combinaison linéaire des deux termes de la fonction objectif de telle sorte qu'ils aient approximativement le même poids.

B. Analyses des résultats

Etant donné que notre modèle est totalement nouveau, il n'existe pas de benchmark nous permettant d'évaluer les performances de notre algorithme *TVNS*. Une solution a consisté à le comparer à deux autres algorithmes. Le premier est une variante de l'algorithme de base de recherche à voisinage variable. L'algorithme *GVNS* pour *General Variable Neighbourhood Search* remplace l'étape de recherche locale simple par une descente à voisinage variable [87]. Le deuxième est l'algorithme de recherche à voisinage variable aléatoire défini dans la section 2.2.1. L'algorithme à voisinage variable aléatoire, désigné ici par *RVNS* pour *Random Variable Neighbourhood Search* remplace l'étape de recherche locale simple par une recherche Tabou. Un premier résultat intéressant est illustré par la Figure 8 qui donne un aperçu du temps de convergence des algorithmes pour calculer la fonction objectif. Le temps d'exécution des algorithmes est limité à 10 heures.

Les courbes de la Figure 8 représentent les traces de **dix** heures d'exécution des algorithmes *GVNS*, *RVNS* et *TVNS* et indiquent le temps mis par chacun pour converger vers sa meilleure solution. Plus la valeur de la fonction objectif est faible, meilleure est la solution. Durant la première heure, les trois algorithmes ont des performances équivalentes, avec un léger avantage à l'algorithme *GVNS* car il sélectionne toujours le meilleur voisin. Au bout d'une heure, les 3 algorithmes voient leurs performances se dégrader. *RVNS* est l'algorithme qui présente les moins bonnes performances, ceci est dû au fait qu'il a moins de liberté sur le choix de voisinage en raison de la valeur fixée à l'avance et associée à chaque voisinage. Enfin, *TVNS* présente globalement de meilleures performances que *GVNS* ; sur **dix** exécutions, la fonction objectif fournie par *TVNS* est **huit** fois meilleure que celle fournie par *GVNS*. Ceci confirme l'efficacité de la recherche à voisinage variable associant la méthode Tabou.

Dans une optimisation mono-objectif, les coefficients β et γ ont un impact sur l'importance accordée aux critères d'optimisation. En situation réelle, l'expert pourrait vouloir tester plusieurs compromis entre des objectifs antagonistes, comme par exemple, privilégier la précision de localisation au débit fourni. Pour répondre à une telle demande, nous avons réalisé une expérimentation pour comprendre le lien entre les critères de *QoS* et d'erreur de localisation et pouvoir en déduire les compromis à faire en fonction de l'importance de tel ou tel critère.

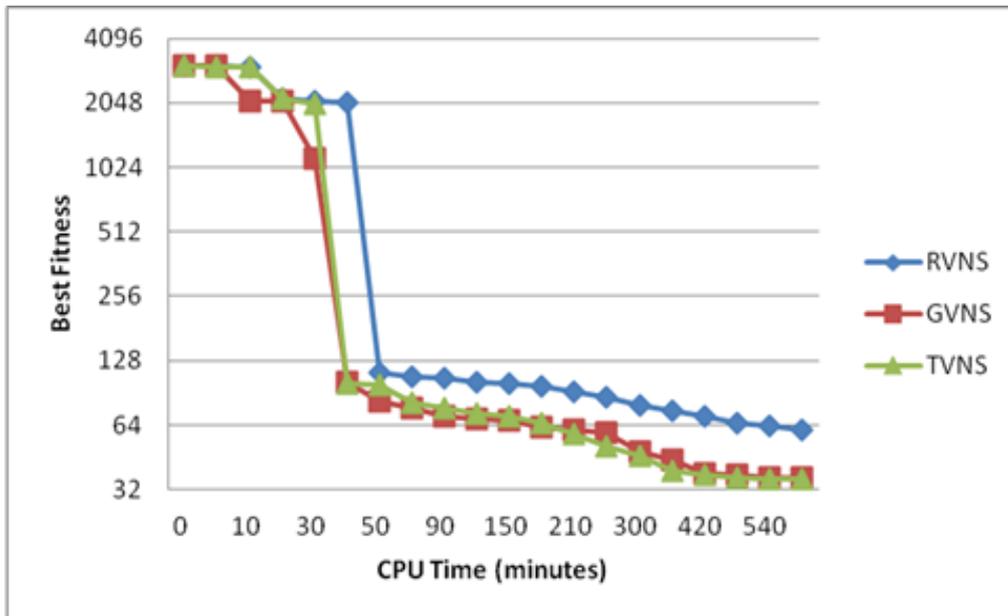


Figure 8 – Vitesse d'exécution des algorithmes.

Nous avons exécuté l'algorithme *TVNS* sur trois scénarios différents en faisant varier à chaque fois le ratio γ/β . La durée d'une exécution est de **dix** heures, environ 10 000 évaluations de fonctions ont été faites et les valeurs de ratios sont 0.01, 0.1 et 100. Les résultats obtenus sont illustrés par les Figures 9 et 10. A partir de ces résultats, nous pouvons conclure qu'un ratio élevé de 100 a tendance à privilégier le critère de localisation puisqu'il garantit un total d'erreur de localisation faible tandis que le déficit total sur la demande en débit est élevé. En revanche, un faible ratio de 0,01 a tendance à privilégier le critère de *QoS* puisqu'il garantit un faible déficit sur la demande en débit mais induit un total d'erreur de localisation élevé.

Les Figures 9 et 10 nous montrent également que traiter les coefficients β et γ de manière équitable s'avère être un bon compromis. Avec une valeur appropriée du ratio ($\gamma/\beta = 0,1$), notre approche est capable de trouver une configuration d'*AP* qui peut fournir une bonne *QoS* avec une bonne précision de localisation (courbe rouge).

Dans cette première démarche de résolution du problème de localisation, nous avons adopté une approche d'optimisation multicritère, la *QoS* et l'erreur de localisation. Ces critères sont pondérés par des coefficients de pénalité en fonction de leur importance et sont agrégés au sein d'une même fonction objectif. L'approche d'optimisation mono-objectif adoptée a permis d'obtenir une solution optimale qui dépend des valeurs des coefficients β et γ fixés à l'avance. Cependant, il est impossible d'avoir une solution qui réponde au mieux aux objectifs de *QoS* et d'erreur de localisation puisque ces deux objectifs s'opposent. Rappelons qu'un réseau comportant un nombre important d'*AP* offre une bonne couverture ainsi qu'une bonne précision de localisation, par contre, le débit offert sera de mauvaise qualité en raison des interférences. Une optimisation multi-objectif est une méthode de résolution qui traite les objectifs antagonistes équitablement et simultanément dans une même exécution. Une optimisation multi-objectif fournit un ensemble de solutions non-dominées ; chaque solution non-dominée représente un compromis optimal entre les objectifs.

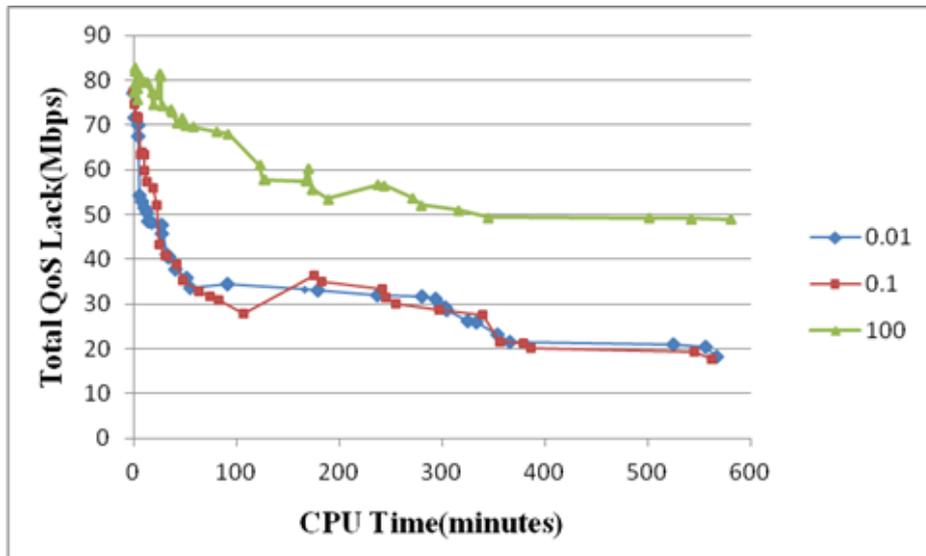


Figure 9 – Variation de l'écart total de QoS avec différents ratios γ/β

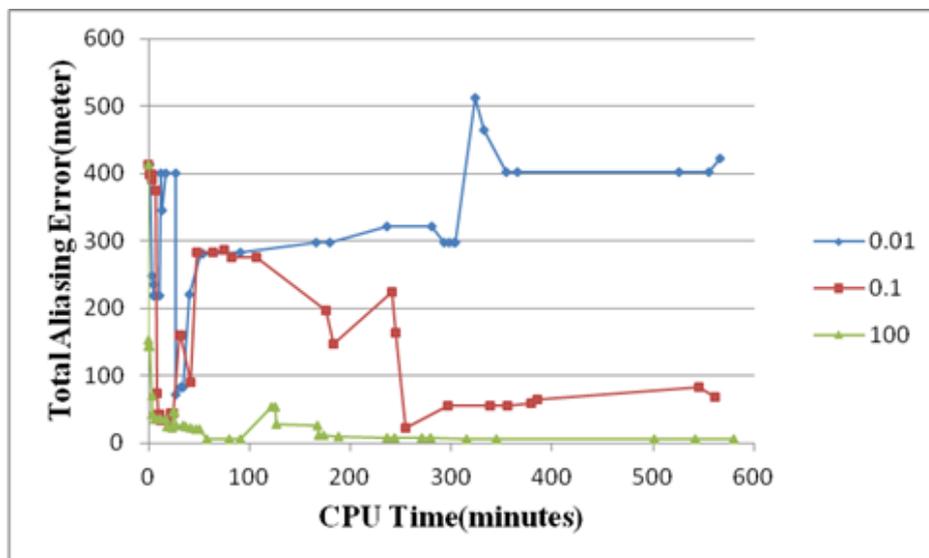


Figure 10 – Variation de l'erreur d'aliasing avec différents ratios γ/β

A partir de l'algorithme TVNS, nous avons déduit un algorithme d'optimisation multi-objectif dont le but est de trouver une configuration réseau (le nombre d'AP, les sites des AP, la puissance et l'azimut des AP, la fréquence de chaque AP) qui minimisent simultanément les trois objectifs : le coût financier, le déficit de QoS et le déficit de précision de localisation. L'algorithme *PTVNS* pour *Pareto TVNS* fournit non pas une mais plusieurs solutions qu'il est nécessaire de comparer en se basant sur la notion de Pareto-dominance. Dans ce cas, on recherche un ensemble de solutions non-dominées, appelées front de Pareto, solutions parmi lesquelles il est impossible de décider qu'une solution est meilleure qu'une autre ; aucune solution n'est meilleure aux autres sur tous les objectifs.

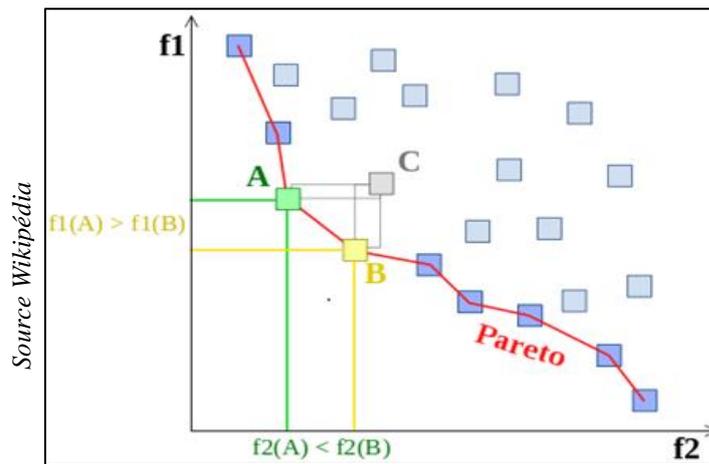


Figure 11 – Pareto-optimalité et Pareto-dominance.

La Figure 11 présente une explication illustrée de la notion de front de Pareto et de la Pareto-dominance. Le problème nécessite la minimisation de deux objectifs f_1 et f_2 . La courbe rouge représente l'ensemble des solutions Pareto-optimales. Les solutions A et B sont non dominées alors que la solution C n'est optimale pour aucun des objectifs ; elle est dominée par les solutions A et B .

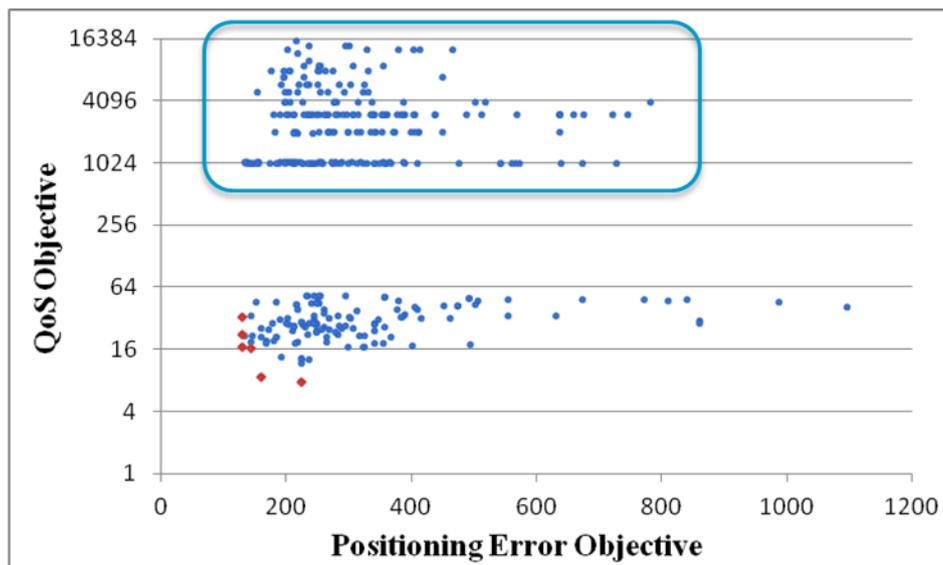


Figure 12 – Estimation du front de Pareto pour le déficit de la QoS et l'erreur de localisation.

L'algorithme *PTVNS* a permis d'obtenir les résultats illustrés par la Figure 12 après 30 heures d'exécution et environ 36 000 évaluations de fonctions. Les six points rouges correspondent au front de Pareto ; c'est l'ensemble des solutions non-dominées trouvées par *PTVNS*. Les points bleus représentent les valeurs des solutions à chaque itération. Nous pouvons distinguer deux nuages de points bleus : leur situation en haut ou en bas de la figure est fonction de leur déficit en QoS. Le nuage composé de points entourés par un rectangle correspond aux solutions pour lesquelles la contrainte de couverture n'est pas satisfaite, ce qui n'est pas acceptable. Ces solutions sont bonnes sur l'unique critère de précision de la localisation mais ne peuvent être retenues comme des solutions acceptables à cause du critère de couverture.

2.4. Synthèse de la planification automatique des WLAN

Jusqu' alors, le problème de placement des émetteurs et le problème d' allocation des fréquences étaient traités en séquence compte tenu de la complexité de leur modélisation et leur nature combinatoire. Nous avons montré qu' il est possible de réaliser une modélisation et une optimisation du problème de planification des WLAN en abordant simultanément les problèmes de placement et de paramétrage des émetteurs et d' affectation des fréquences. Notre travail est fondé sur une estimation fine de la qualité de service utilisant le calcul complet du *SINR* en tous les points du réseau. Une analyse détaillée du fonctionnement des WLAN nous a permis d' identifier le débit réel comme le critère unifiant les différentes caractéristiques de *QoS* : couverture, interférences et capacité. Le calcul du débit réel nécessite de traiter simultanément les problèmes de placement des émetteurs et d' allocation des fréquences. Notre modèle de planification des WLAN permet d' optimiser tous les paramètres liés aux AP : type d' antenne, azimut et puissance d' émission. L' usage du débit réel permet d' exprimer naturellement et simplement les besoins des clients du réseau. Notre modèle minimise l' écart entre le débit souhaité par les clients du réseau et le débit que le réseau leur fournit réellement. En complément de deux stratégies usuelles d' optimisation des problèmes de planification des WLAN, une méthode purement séquentielle et une méthode de placement avec coloration de graphe, nous avons proposé deux nouvelles stratégies :

- Une méthode globale, qui optimise simultanément le placement des AP et l' affectation des fréquences, et qui utilise les 13 canaux de fréquences autorisés en France pour la norme 802.11g. Cette méthode est complexe par certains calculs effectués mais elle explore toutes les ressources disponibles pour la planification ;
- Une méthode séquentielle qui tient compte, lors du placement des AP, d' un brouillage moyen entre AP puis qui résout le problème AFP pour les sites sélectionnés en utilisant la même fonction d' évaluation que pour le problème ACP. Cette fonction d' évaluation, basée sur le calcul du débit réel en chaque point de service, tient compte à la fois des variables de placement sur les sites et des fréquences.

Nous avons montré que l' optimisation globale permet de planifier automatiquement des WLAN de grande taille composés d' une centaine d' AP et qu' elle donne les meilleurs résultats des quatre approches qui ont été comparées. L' optimisation séquentielle avec brouillage moyen donne souvent des résultats très proches et s' est avérée beaucoup plus performantes que les méthodes séquentielles usuelles.

Ces stratégies ont été mises en œuvre par une heuristique nouvelle dite à voisinages variables aléatoires : à chaque itération de cette recherche locale le type de voisinage est pris au hasard. Cette heuristique est très modulaire et permet facilement de combiner les deux sous problèmes que sont le placement et l' affectation. C' est une heuristique qui n' est pas propre à notre problème et qui peut être considérée comme un mécanisme général d' optimisation.

Le travail sur la planification automatique de WLAN a été réalisé dans le cadre d' un projet collaboratif bilatéral avec le centre de recherche d' Orange Labs ; il comprend les contributions d' Alexandre GONDRAN dans le cadre de sa thèse et une collaboration fructueuse avec Julien Fondrevelle, Hakim Mabed et Alexandre Caminada. Sur la base de nos travaux, un programme utilisant l' optimisation globale a été développé et livré à *Orange Labs*. Il permet de proposer aux entreprises des solutions sans fil de haute qualité de service. Un autre programme basé sur l' optimisation séquentielle avec brouillage moyen a été livré, dans le cadre d' une cession de PI, à la start-up *TRINAPS* pour proposer des solutions de réseau à ses clients. Les principales publications sur le sujet sont : *ICI'07* [81], *SoftCOM'07* [80], *IJMNDI'07* [82], *VTC'08* [79], *PIMRC'08* [78].

Les résultats de nos travaux sur la planification des *WLAN* ont servi comme une base à nos travaux sur la localisation à l'intérieur des bâtiments. En effet, un système de localisation indoor exploitant un *WLAN* existant peut être abordé comme un problème d'optimisation multicritère pour lequel il est possible de développer un algorithme qui recherche la meilleure configuration du réseau quel que soit l'environnement considéré ; la *QoS* et l'erreur de localisation sont des objectifs qui doivent être traités conjointement. Le système de localisation indoor qui a été développé utilise la technique du *fingerprinting* qui nécessite de construire une carte radio de l'environnement étudié. Un modèle de propagation radio efficace est alors nécessaire pour obtenir une carte radio fiable permettant une localisation précise. Dans le domaine de la localisation indoor, nous avons été les premiers à décrire un système de localisation indoor sous la forme d'un problème d'optimisation avec comme objectif d'optimiser la qualité des communications, qui est le premier objectif d'un *WLAN*, et d'optimiser également la précision de localisation. Le modèle proposé permet d'optimiser les paramètres des *AP*, le débit des utilisateurs et la précision de localisation. Dans ce cadre, nous avons proposé deux approches permettant de trouver une solution au problème de planification de *WLAN* fournissant une bonne *QoS* et une faible erreur de localisation utile aux services contextualisés :

- La première approche est basée sur un algorithme d'optimisation multicritère *TVNS* dont la formulation globale s'appuie sur une fonction objectif agrégée, une combinaison linéaire pondérée des critères (la *QoS* et l'erreur de localisation). L'algorithme utilise une heuristique de type recherche à voisinage variable hybridée avec une recherche Tabou. La solution initiale est obtenue par une méthode gloutonne ;
- La deuxième approche est basée sur un algorithme d'optimisation multi-objectif qui fournit un ensemble de solutions Pareto-optimales. Dans ce cas, chaque solution représente un compromis différent entre les objectifs. L'algorithme *PTVNS*, une adaptation de *TVNS*, exploite un ensemble de solutions initiales, il est également exécuté en mode « multi-threadé » offrant un potentiel d'accélération de son exécution qui permet d'explorer un espace de recherche plus grand.

Pour étudier les performances de notre algorithme *TVNS*, nous l'avons comparé à deux autres algorithmes : l'algorithme *GVNS* issue de la littérature et l'algorithme *RVNS* développé précédemment dans le cadre de la planification automatique de *WLAN*. Cette étude comparative a montré que l'algorithme *TVNS* présente les meilleures performances. Par ailleurs, l'analyse de l'impact des coefficients de pénalité sur la solution optimale a montré que l'objectif associé à un coefficient élevé est fortement optimisé empêchant ainsi l'amélioration des autres objectifs qui lui sont opposés. Fixer les valeurs des coefficients de pénalité de manière équitable permet à l'algorithme *TVNS* de fournir une solution optimale qui soit un bon compromis entre des objectifs antagonistes.

L'approche mono-objectif présente l'inconvénient du compromis à faire dans le choix des coefficients de pénalité. Nous avons mis en place l'algorithme *PTVNS* qui implémente une approche multi-objectif et fournit un ensemble de solutions représentant chacune un compromis différent entre les objectifs de *QoS* et de précision de localisation. Dans le même environnement d'expérimentation que *TVNS*, l'algorithme *PTVNS* fournit un front de Pareto composé de six solutions obtenues après 30 heures d'exécution et environ 36 000 évaluations, contre 10 heures et 10 000 évaluations pour *TVNS*. En conclusion, *PTVNS* trouve un plus grand nombre de solutions, et par conséquent met plus de temps à les trouver que *TVNS*. Il offre ainsi une plus grande diversité de solutions ayant chacune un compromis différent entre la *QoS* et la précision de localisation.

Le travail sur les systèmes de localisation Indoor basé sur les *WLAN* a été réalisé dans le cadre d'une thèse de Doctorat en partenariat avec le gouvernement chinois (programme *CSC* pour

China Scholarship Council) ; il comprend les contributions de You ZHENG dans le cadre de sa thèse et une collaboration fructueuse avec Alexandre Gondran, Frédéric Lassabe et Alexandre Caminada. Les principales publications sur le sujet sont : *WoWMoM'05* [115], *IIT'06* [28], *ICCT'06* [27], *JDIR'09* [196], *ICN'09* [26], *AICCSA'09* [25], *ROADEF'10* [194], *IPIN'10* [195], *WD'10* [193], *ICSPCS'10* [192], *ROADEF'11* [191], *IPIN'11* [116].

3. Mobilité dans les réseaux véhiculaires

Les *VANET* forment une classe particulière de réseaux qui ont été spécialement développés pour les systèmes de transports intelligents (*ITS*) [187]. Ils intègrent des données et des technologies de communication dans le but d'échanger des informations de trafic qui contribuent à l'amélioration de la sécurité et du confort des usagers. La conception et la mise en œuvre de solutions adaptées aux *VANET* posent de nombreux défis déjà connus dans les réseaux mobiles mais qui sont accentués dans les *VANET* en raison de leur caractéristiques et comportement particuliers [11]. En effet, les *VANET* sont des réseaux très dynamiques, à environnement obstrué, à densité variable du trafic qui peut être forte dans certaines situations (heures de pointe) et faible dans d'autres (la nuit, heures creuses). L'ensemble de ces caractéristiques engendre des problèmes complexes dont, la connectivité intermittente, la détérioration des signaux radio, la topologie dynamique, la fragmentation du réseau et la saturation du canal radio.

La conception d'une nouvelle solution pour *VANET* passe par un processus d'évaluation et de validation avant son éventuel déploiement. Cependant, la mise en œuvre réelle est difficile en raison du coût économique et logistique ; la *simulation* est alors l'approche la plus adaptée pour valider toute nouvelle solution. La validité de la simulation dépend en grande partie de la capacité des modèles sous-jacents à reproduire des scénarios réels. Il s'agit principalement de la *modélisation de la mobilité* des entités du réseau et de la *propagation des ondes* dans l'environnement.

La modélisation de la mobilité décrit l'ensemble des règles qui définissent le schéma de mouvement des véhicules ; il doit intégrer un niveau de *macro-mobilité* et un niveau de *micro-mobilité* [72]. La macro-mobilité concerne la modélisation des *aspects macroscopiques* du trafic tels que la topologie des routes, leurs caractéristiques (sens unique ou double sens de circulation, nombre de voies de circulation, limitation de vitesse), les règles de circulation, les règles de dépassement, la signalisation aux intersections, etc. La *micro-mobilité* concerne la modélisation des caractéristiques tels que l'accélération, la décélération, le freinage et l'interaction du conducteur avec l'infrastructure routière. Plusieurs modèles existent dans la littérature, nous y trouvons des modèles simples tels que *City Section* [98], *Manhattan* [34] ou *Obstacle Mobility Model* [99] qui ne tiennent compte que des contraintes géographiques pour restreindre le déplacement des véhicules. D'autres modèles sont plus sophistiqués et intègrent des informations supplémentaires sur la topologie des routes et les habitudes des conducteurs comme *STRAW* [50], *SWANS* [38] ou *VanetMobiSim* [71]. Mais, d'une manière générale, tous ces modèles manquent de réalisme car ils ne prennent pas en compte la variabilité spatio-temporelle des schémas de mobilité. Le modèle que nous avons défini utilise des informations statiques et dynamiques réelles sur les caractéristiques de l'environnement et de ses infrastructures et sur les habitudes de la population. De plus, le modèle utilise des mécanismes qui permettent d'introduire à tout instant de nouvelles informations à l'environnement et de changer la configuration de la mobilité en fonction de ces informations.

La modélisation de la propagation est une formulation mathématique qui caractérise la manière dont les signaux radio se propagent dans l'environnement que l'on souhaite simuler. Les signaux transmis par les véhicules se propagent en environnement externe et sont dégradés par plusieurs obstacles dont l'effet est difficile à maîtriser. Plusieurs travaux de recherche ont été

réalisés sur la modélisation de l'affaiblissement de trajet (*path loss*) dans le cadre spécifique des réseaux de véhicules. Certains de ces travaux utilisent des modèles théoriques [129, 136, 139], d'autres utilisent des modèles empiriques [83, 103, 112, 127] issus de campagnes de mesures. Les modèles théoriques sont généralement définis pour la propagation en milieu urbain et supposent une topologie de routes *Manhattan* structurée en une grille composée de routes horizontales et verticales, les obstacles sont situés dans les blocs formés par les routes. Ces modèles vont prédire l'atténuation en fonction du nombre d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur sans se soucier des caractéristiques des obstacles traversés. Les modèles empiriques sont construits à partir de données mesurées et se basent sur une classification de l'environnement en quatre milieux : urbain, suburbain, rural et autoroutier [135]. Ils considèrent que l'impact des obstacles sur les ondes radio diffère d'un milieu à l'autre ; à chaque catégorie, ils associent une formule du *path loss* basé sur le modèle *Two-Ray Ground* et une valeur distincte de l'exposant *path loss* déduite à partir des mesures. Dans les environnements ruraux non obstrués, le modèle le plus approprié est le modèle *Two-Ray Ground* modélisant le *shadow fading* avec une composante aléatoire. Quant aux environnements obstrués tels que les autoroutes, les milieux urbains et suburbains, c'est la *loi de puissance path loss* modélisant le *shadow fading* avec une composante aléatoire qui est le modèle le plus adapté. Le modèle de propagation que nous avons proposé offre plus de réalisme comparé aux modèles de la littérature. Nous avons traité la modélisation de l'affaiblissement de trajet (*path loss*) dans les réseaux véhiculaires en tenant compte des caractéristiques particulières de chaque environnement et en reproduisant leur effet sur les signaux transmis. L'affaiblissement du trajet n'est pas prédit en se basant sur une classification globale de l'environnement mais sur des informations réelles et plus précises sur la densité et la nature d'obstacles qui séparent deux véhicules communicants.

Dans la suite, nous commençons par une description de notre modèle de mobilité, appelé *V-MBMM* pour *Vehicular Mask Based Mobility Model*. Puis, nous présentons notre modèle de propagation, appelé *V-PROPAG* pour *Vehicular Radio Propagation Model*. Enfin, nous présentons une étude des performances des protocoles de routage. Cette partie se termine par une synthèse de nos travaux sur la mobilité dans les réseaux véhiculaires.

3.1. Modèle de mobilité pour les réseaux véhiculaires

Le modèle de mobilité véhiculaire proposé dans [5] offre plus de réalisme et de flexibilité en intégrant les caractéristiques variables de l'environnement dans la définition du schéma de mobilité. Le modèle *V-MBMM* s'inspire du modèle *MBMM* pour *Mask Based Mobility Model*, modèle de mobilité douce défini dans le cadre de la thèse de C. Joumaa [101]. Le modèle se base sur des données topologiques et socio-économiques pour définir un schéma de mobilité réaliste qui prend en compte l'impact variable des caractéristiques du terrain et des infrastructures urbaines sur la mobilité quotidienne des individus et groupes d'individus. La prise en compte de l'environnement, la dynamique spatiale et temporelle, la flexibilité et la généralité sont les points forts du modèle *MBMM* qui font que le modèle est capable de reproduire le mouvement des individus avec un très bon degré de réalisme.

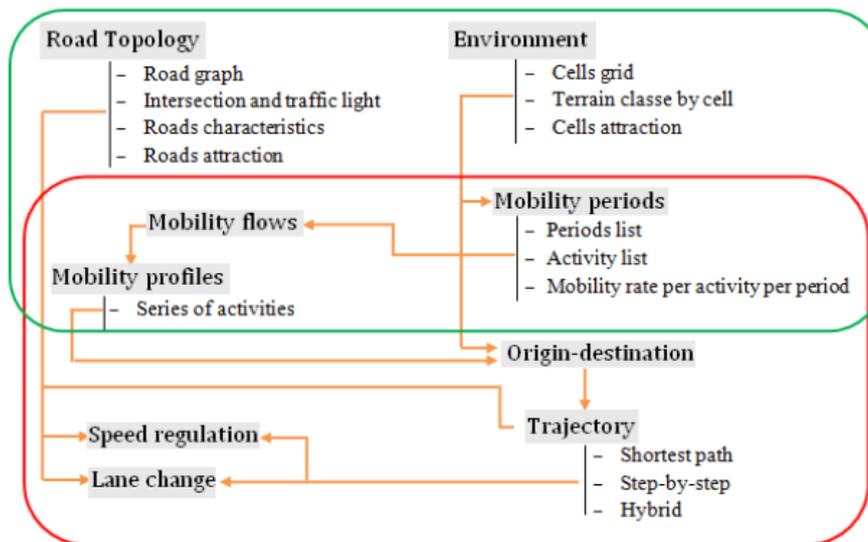


Figure 13 – *Modèle V-MBMM : composantes données et traitement.*

Le modèle *V-MBMM* simule le déplacement des véhicules sur un graphe qui représente les routes. Le mouvement des véhicules est déterminé en fonction de trois principaux paramètres qui sont : la topologie des routes, les caractéristiques des infrastructures et l'attractivité variable des lieux. De plus, le schéma de mobilité dans *V-MBMM* est paramétrable, déterminé à partir d'un ensemble de paramètres sur les routes, des caractéristiques du terrain et de l'attractivité des lieux. Le Figure 13 décrit les deux composantes du modèle de mobilité. La composante *données* (encadré vert) inclut toutes les informations sur les caractéristiques de l'environnement, la topologie des routes et les flux de déplacement. Ces données sont utilisées par la composante *traitement* (encadré rouge) pour déterminer les points Origine-Destination, calculer la trajectoire, la régulation de la vitesse et le changement de voies.

3.1.1. Caractérisation de l'environnement

La carte de l'environnement est divisée en mailles de taille égale. Les véhicules se déplacent sur la grille par pas de maille, du centre d'une maille vers le centre de la maille voisine. Les règles de déplacement sont définies par des informations spatiales et temporelles, celles-ci sont discrétisées au pas de maille également. Chaque maille est caractérisée par deux types d'informations :

- *Caractérisation spatiale* : il s'agit d'une donnée spatiale qui correspond au type de structures présentes sur la maille (bâtiment, commerce, habitation, etc.). Les *classes de terrain* sont déterminées à partir de données topographiques décrivant les caractéristiques et les fonctions socioéconomiques des infrastructures de l'environnement. Les valeurs socioéconomiques sont basées sur des données décrivant les caractéristiques de l'environnement en termes d'activités (domicile, entreprise, enseignement, etc.), de taille et d'occupation journalière ;
- *Caractérisation temporelle* : il s'agit d'une donnée temporelle pour différencier les mailles en leur affectant un vecteur d'attractivité qui reflète le degré d'intérêt qu'une maille représente pour les véhicules. Contrairement à la classification de terrain selon la nature du sol qui est statique, l'attractivité est une donnée dynamique qui varie au cours de la journée et des jours de la semaine. A chaque maille est associé un vecteur d'attractivité de taille égale au nombre de périodes de la journée. Ce vecteur est déterminé par la valeur socioéconomique, la caractéristique géographique de la structure présente sur la maille et la variation de la distribution de la population.



Figure 14 – Vue aérienne du centre- ville de Belfort.

L'environnement de simulation, représentant une ville réelle, sur lequel nous avons appliqué le modèle de mobilité est la *Communauté d'Agglomération Belfortaine (CAB)* qui s'étend sur une superficie de $174,10 \text{ km}^2$. La Figure 14 représente une vue aérienne du centre-ville de Belfort. La population de la CAB a été estimée à 94 982 habitants en 2007 répartis sur les 30 communes de l'agglomération dont plus de 50% résidant dans la commune de Belfort.

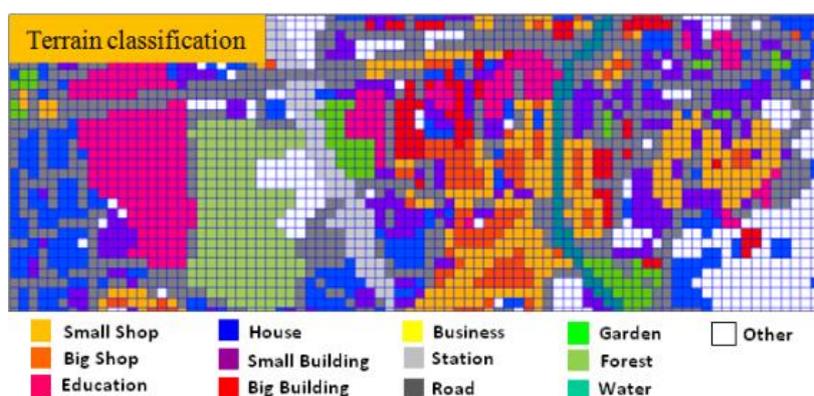


Figure 15 – Classification du terrain du centre-ville de Belfort.

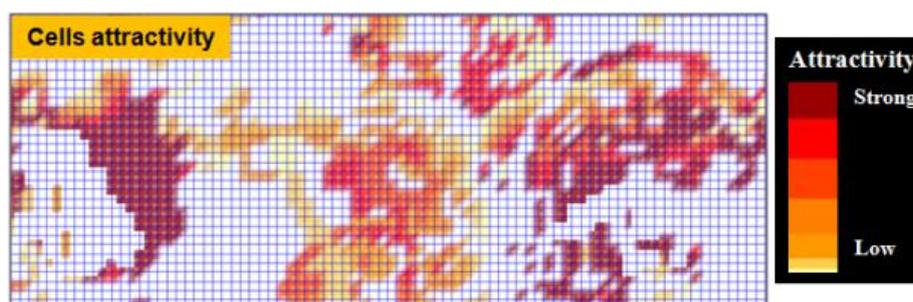


Figure 16 – Cartographie de l'attractivité du centre-ville de Belfort à midi.

Le territoire est représenté par une grille de mailles de taille identique de $25m \times 25m$. Chaque maille est caractérisée par : (i) une classe de terrain, l'une des 13 classes représentées sur la Figure 15 et qui correspondent aux principaux types de structures présents dans le territoire (ii) un vecteur de poids contenant 72 valeurs chacune représentant le pouvoir attractif de la maille durant un quart d'heure donné de la journée, entre 6h00 et 23h45. La Figure 16 représente l'attractivité des mailles au centre-ville de Belfort à midi. Les poids d'attraction sont calculés à partir de données sur la charge du réseau de téléphonie mobile, fournies par *Orange Labs* dans le cadre du projet *Territoire Mobile (TM)*, et des caractéristiques géographiques et socioéconomiques du terrain, fournies par la CAB et le *Syndicat Mixte des Transports en Commun (SMTC)*.

3.1.2. Topologie des routes

La topologie des routes est représentée par un graphe orienté pondéré $G(R, I, S, A, PA)$. R représente les segments de route ou les arêtes du graphe, I représente les intersections ou les sommets du graphe, S représente les signes de trafic ou les feux, A représente les attributs de chaque segment de route (longueur, vitesse limite, nombre et direction des voies) et PA représente les poids d'attraction. La journée est divisée en N périodes $T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$, celles-ci sont utilisées pour définir le pouvoir d'attraction d'une maille. Chaque élément de l'ensemble PA est un vecteur $[PA_1, PA_2, \dots, PA_N]$ associé à un segment de route. Les N valeurs représentent les poids d'attraction du segment durant les N périodes de la journée ; ils sont calculés à partir des poids d'attraction des mailles couvertes par le segment de route.

3.1.3. Détermination Origine-Destination

La détermination des points Origine-Destination des véhicules se base sur le pouvoir d'attraction des mailles et des profils de mobilité. Les profils de mobilité caractérisent les tendances de la mobilité intrinsèques aux différentes classes socio-professionnelles des individus. Ces tendances sont définies par un ensemble d'activités associées à chaque classe. La notion d'activité a été introduite dans [67] comme étant le processus selon lequel l'individu se déplace vers un pôle attracteur puis y reste. Dans la plupart des modèles définis dans la littérature, les deux classes socioprofessionnelles les plus largement considérées sont les étudiants et les employés ; l'étudiant étant plus attiré par les établissements d'enseignement et l'employé par les entreprises. Afin de pouvoir modéliser plusieurs catégories d'individus (étudiant, employé, retraité, sans profession...), les activités sont définies dans $V\text{-MBMM}$ indépendamment des classes socioprofessionnelles. Une activité correspond à un déplacement d'un point origine vers un point destination. Elle est définie par la paire (Structure Origine, Structure Destination) qui définit implicitement la classe socio-professionnelle. Le profil de chaque individu change durant la journée, ce qui correspond à des scénarios réels où les individus font diverses activités dans la journée.

L'approche utilisée dans $V\text{-MBMM}$ consiste à définir l'ensemble des activités qui peuvent se produire durant une journée et à déterminer à partir de cet ensemble les déplacements des individus. La journée est tout d'abord divisée en plusieurs périodes représentant les différents scénarios que l'on peut observer durant une journée : départ au travail le matin, pause déjeuner à partir de 11h45, retour au travail à partir de 13h30, etc. A chaque période sont associés : (i) un taux de mobilité représentant le pourcentage de la population en déplacement durant la période (ii) une loi de distribution qui représente la répartition de la mobilité durant la période (croissante, décroissante, uniforme, etc.) (iii) la liste d'activités qui peuvent se produire durant la période avec le taux de mobilité par activité.

Pour chaque véhicule simulé, une activité, ou une série d'activités est définie. Les points origine-destination sont par la suite déterminés à partir de l'activité. En supposant que la structure origine du véhicule soit m_o , le véhicule doit être placé sur une maille de classe de terrain m_o . Sur l'ensemble des mailles de la classe m_o , les mailles ayant la plus grande attractivité, à la période T_i , ont la plus grande probabilité d'être sélectionnées pour accueillir le véhicule à son origine. La probabilité, $P(m, T_i)$, de choisir la maille m comme origine à la période T_i est égale au poids d'attractivité de m à T_i divisé par la somme des poids d'attractivité, à T_i , de toutes les mailles de la classe m_o . La sélection de la maille pour accueillir le véhicule à son origine est donnée par la formule suivante :

$$P(m, T_i) = \frac{PA(m, T_i)}{\sum_{n=1}^{N_{m_o}} PA(n, T_i)} \quad (11)$$

avec N_{m_o} le nombre de maille qui appartiennent à la classe de terrain m_o . La destination est déterminée pour chaque véhicule en fonction de la structure destination m_d spécifiée dans l'activité qui lui est associée et, des pouvoirs attractifs des mailles sur toutes les périodes situées entre T_i (début simulation) et T_j (fin simulation). A chaque maille de la classe de terrain m_d sont ainsi associées $j - i$ probabilités ; une probabilité par période. La probabilité de sélectionner la maille m comme destination à la période T_l , tel que $i \leq l < j$, est :

$$P(m, T_l) = \frac{PA(m, T_l)}{\sum_{k=1}^{j-1} \sum_{n=1}^{N_{m_d}} PA(n, T_k)} \quad (12)$$

Une fois la maille origine sélectionnée, le véhicule sera placé sur le segment de route le plus proche de la maille. De même, une fois la maille destination déterminée, le point destination est placé sur le segment de route le plus proche de la maille. Une fois que le véhicule a atteint sa destination, une nouvelle activité est assignée au conducteur en fonction de son profil et de la période de la journée, celle-ci va définir sa mobilité future.

3.1.4. Calcul de la trajectoire

La trajectoire entre l'origine et la destination peut être pré-calculée ou déterminé pas à pas. Le pré-calcul de la trajectoire se fait par l'algorithme du plus court chemin de *Dijkstra* sur le graphe de la route. Le résultat se base sur un ou plusieurs critères tels que la distance, la vitesse maximale autorisée, le nombre maximum de voies ou le poids d'attraction. L'algorithme pas à pas s'inspire de l'approche du modèle *MBMM* : le véhicule se déplace d'une intersection à une autre en choisissant à chaque étape une nouvelle direction à prendre. Un masque, composé de toutes les routes connectées à l'intersection et de leurs poids, définit le champ de vision du véhicule dans le graphe de routes. La direction est déterminée par une *chaîne de Markov* dont nombre d'états est égal au nombre de routes connectées à l'intersection. La probabilité de transition d'un état i vers un état j correspond à la probabilité d'aller de l'intersection i à l'intersection j dont la formule est la suivante :

$$P_{ij}(T_l) = \frac{PA(m, T_l)}{\sum_{k=1}^{R_i} PA(k, T_l)} \quad (13)$$

où T_l est la période en cours et R_i le nombre de routes connectées à l'intersection i . Pour rendre le modèle plus réaliste, trois coefficients sont appliqués : le *coefficient d'avancement (CA)* qui, propre à chaque véhicule, permet d'inhiber les déplacements incorrects (retour en arrière, tourner en rond plusieurs fois, etc.) si l'on se base uniquement sur les poids d'attraction. Pour guider le véhicule vers sa destination finale, un *coefficient de direction (CD)* est appliqué à chaque fois aux segments de route connectés à l'intersection en courante. L'application de ce coefficient au masque augmente l'attractivité des routes qui conduisent vers la destination finale. Le *coefficient de liberté (CL)* prend en compte le taux d'occupation des routes et favorise les routes les moins congestionnées parmi toutes celles possibles à prendre. Le poids de la route r_{ij} , à l'instant t , est calculé à partir de l'ensemble des coefficients comme suit :

$$Poids(r_{ij}, t) = \frac{PA(r, T_p)^\alpha \times CA(r_{ij}, t)^\beta \times CL(r_{ij})^\gamma}{CD(r_{ij})^\theta} \quad (14)$$

avec T_p la période à l'instant t . Nous pouvons alors ajuster la définition de la probabilité de choisir la route r_{ij} de l'intersection i à l'instant t comme suit :

$$P(r_{ij}, t) = \frac{Poids(r_{ij}, t)}{\sum_{k=1}^{R_i} Poids(r_{ik}, t)} \quad (15)$$

Le pré-calcul de trajectoire permet à un véhicule de converger rapidement vers sa destination. Le calcul de trajectoire pas à pas met plus de temps à faire converger le véhicule vers sa destination finale puisqu'il est susceptible de traverser plusieurs segments de route avant d'arriver à destination, ce qui correspond davantage à un comportement réaliste où l'on prend en compte les conditions de trafic en temps réel.

Une troisième approche a été définie, il s'agit d'une approche hybride qui combine l'approche du plus court chemin et l'approche pas à pas. Cette approche hybride détermine le plus court chemin entre l'origine et la destination permettant aux véhicules de converger rapidement vers leur destination, et détermine la trajectoire entre deux objectifs intermédiaires en utilisant des données réactualisées.

3.1.5. Régulation de la vitesse

La vitesse d'un véhicule est définie comme étant le minimum de trois vitesses qui sont : la vitesse limite sur la route, la vitesse interne et la vitesse externe. La *vitesse limite sur la route* est un attribut de chaque segment de route ; cette donnée est soit extraite à partir d'informations réelles sur la route, soit positionnée à une valeur par défaut qui dépend du milieu que l'on désire simuler (50km/h pour les milieux urbains, 80km/h pour les milieux suburbains. . .). la *vitesse interne* est une valeur attribuée à chaque conducteur et tirée aléatoirement dans un intervalle $[v_{min}, v_{max}]$. Elle permet de modéliser différentes catégories de conducteurs, ceux qui favorisent la conduite à petite vitesse, ceux qui conduisent à grande vitesse, etc. De plus, en affectant différentes valeurs à v_{min} et v_{max} , il est possible de simuler plusieurs catégories de mobiles tels que les voitures, les bus, les vélos, etc., ainsi que les modes de propulsion thermique, électrique, etc. La *vitesse externe* est déterminée en fonction des feux de signalisation et de la vitesse des véhicules voisins. Elle permet de reproduire le comportement des conducteurs qui consiste à ralentir à l'approche d'un obstacle. Essentiellement, le conducteur doit ralentir lorsqu'il s'approche d'un véhicule afin de maintenir la distance de sécurité et d'éviter les collisions, et à l'approche d'un feu rouge pour s'arrêter. Pour modéliser ce comportement, le modèle *IDM* pour *Intelligent Driving Model* de type *Car following Models* est utilisé [173]. Le comportement de chaque conducteur est caractérisé en fonction des véhicules qui le précèdent. L'accélération instantanée d'un conducteur est décrite par l'équation suivante :

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 - v \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right] \quad (16)$$

avec :

$$s^* = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \quad (17)$$

v désigne la vitesse actuelle du véhicule, v_0 la vitesse désirée qui représente la vitesse que le conducteur souhaite atteindre lorsque la route est libre, et s la distance qui sépare le véhicule du véhicule qui le précède. s^* est appelée « vitesse dynamique souhaitée » et dépend de la distance minimale parechoc à parechoc s_0 , du temps de réaction T , de la différence de vitesse avec le véhicule précédent Δv , et de l'accélération et de la décélération maximales, respectivement a et b .

3.1.6. Changement de voie

Nous avons défini un mécanisme simple pour le changement de voie selon lequel un véhicule ne peut changer de voie qu'au niveau d'une intersection. Lorsqu'un véhicule arrive à une intersection, il détermine la prochaine route à prendre suivant l'un des trois algorithmes de calcul de trajectoire. Si la route est à voies multiples, le véhicule choisit parmi les voies possibles celle sur laquelle il n'aura pas à décélérer. La sélection de la voie se fait sur la base de la vitesse du dernier véhicule situé sur chacune des voies.

3.1.7. Validation du modèle V-MBMM

Pour mettre en œuvre le modèle *V-MBMM* et visualiser les traces de mobilité, nous avons développé une application appelée *VNS* pour *Vehicular Network Simulator*. L'application *VNS* intègre plusieurs modèles de mobilité, *Random Waypoint*, *Random Walk*, *Markovian Movement*, *MBMM* et *V-MBMM* et plusieurs modèles de propagation, *Two Ray Ground* ou *V-PROPAG*. Nous avons réalisé deux séries de tests afin de valider le modèle proposé. Les premières expérimentations ont pour objectif de valider les mécanismes de base utilisés dans le modèle qui sont la régulation de la vitesse et le changement de voies. Pour faire varier les attributs des routes et bien analyser leur impact, nous avons considéré les environnements simples de type *grille de Manhattan* et *diagramme de Voronoï* représentés par la Figure 17. Les expérimentations suivantes ont pour objectif de démontrer que le modèle *V-MBMM* prend bien en compte l'influence de l'environnement sur le déplacement des véhicules et reproduit les activités journalières des individus. Les expérimentations ont été réalisées en considérant un environnement réel, la *CAB*.

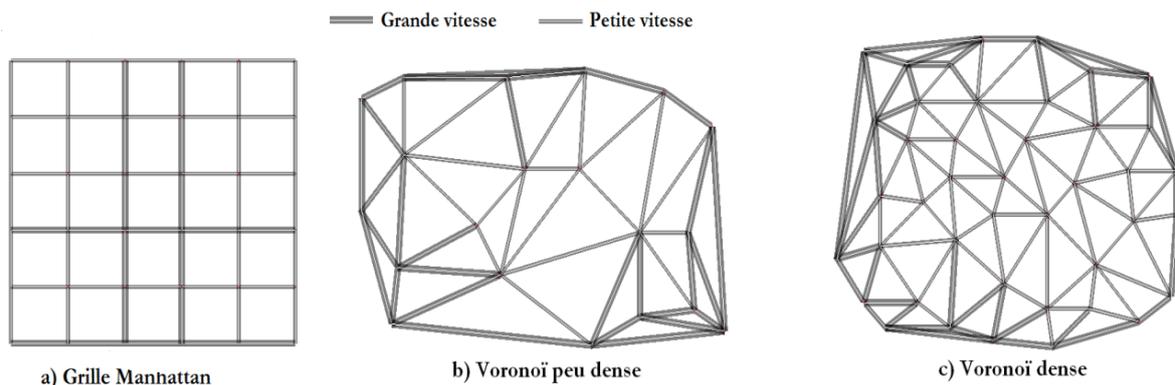


Figure 17 – Exemples de topologies de routes dans des environnements théoriques.

A. Analyse des mécanismes de base

Dans la première série d'expérimentations, nous avons analysé l'impact de la densité des véhicules et des caractéristiques de la route sur la vitesse moyenne. En plus de la densité des véhicules, nous avons identifié quatre caractéristiques dominantes qui influencent la vitesse moyenne : (i) la densité des routes, plus le nombre de routes est faible plus les embouteillages sont importants ce qui cause la baisse de la vitesse (ii) le nombre de voies, les routes à voies multiples offrent une meilleure fluidité de trafic qui permet aux véhicules de circuler au plus proche des vitesses désirées (iii) le nombre d'intersections, plus les intersections sont fréquentes plus les véhicules sont obligés de ralentir pour s'arrêter aux feux ce qui réduit la vitesse moyenne (iv) le nombre de routes aux intersections, le temps d'attente des véhicules aux intersections est directement lié à la durée des feux rouges qui est proportionnelle au nombre de routes qui se rejoignent à l'intersection. Lorsque ce nombre est élevé, la durée des feux rouges, et par conséquent le temps d'attente des véhicules, augmente et cause une diminution de la vitesse moyenne. Nous avons analysé la variation de la vitesse moyenne en fonction de quatre paramètres : densité des véhicules, nombre de voies par route, durée des feux rouges et

vitesse minimale et maximale des véhicules. Le Tableau 1 résume les valeurs des paramètres de simulation des premières expérimentations réalisées.

La Figure 18 montre la variation de la vitesse en fonction de la densité des véhicules. Les résultats montrent qu'à très faible densité, population de 2500 véhicules, les plus grandes vitesses sont observées dans *Manh400* et *VoroSparse* et les plus faibles dans *Manh200* et *VoroDense*. A forte densité de véhicules, les conducteurs ralentissent principalement à cause des embouteillages alors qu'à faible densité de trafic, les conducteurs ralentissent principalement à l'approche des feux rouges, la probabilité de rencontrer un véhicule lent est très faible. La probabilité qu'un véhicule rencontre un véhicule lent étant très faible.

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
Taille de la zone	5km × 5km
Environnement	<i>Manh200</i> : grille Manhattan avec des blocs de 200m <i>Manh400</i> : grille Manhattan avec des blocs de 400m <i>VoroDense</i> : diagramme de Voronoi dense <i>VoroSparse</i> : diagramme de Voronoi peu dense
Population candidate pour la mobilité	2500, 5000, 7500, 10000, 12500, 15000, 17500, 20000, 25000, 30000
Durée des feux rouges	45s
V_{min}, V_{max}	30km/h, 50km / h
Vitesse limite des routes	80km / h
Nombre de voies	Double avec une voie dans chaque sens
Attractivité et Activités	Non prises en compte, donc uniformes

Tableau 1 – Valeurs des paramètres de simulation des mécanismes de base de V-MBMM – Expérimentation 1.

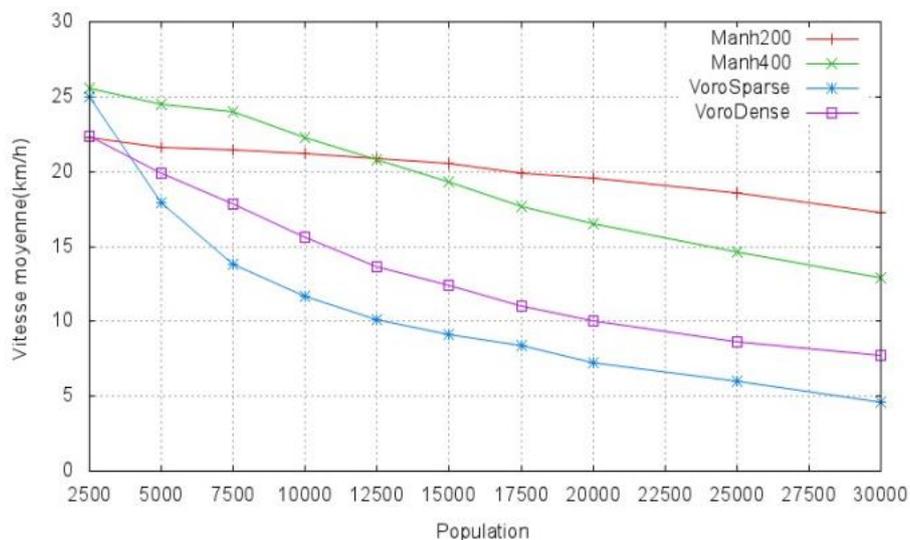


Figure 18 – Densité de trafic.

Le Tableau 2 donne les caractéristiques des routes dans les quatre environnements, déduites à partir des paramètres de simulation. A densité faible de trafic, 2500 véhicules, les routes sont fluides et les conducteurs décélèrent essentiellement à l'approche des intersections. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées avec les environnements *VoroSparse* et *Manh400*. *VoroSparse* possède le plus petit nombre d'intersections ; les véhicules ralentissent et s'arrêtent moins souvent que dans les autres environnements. De même, *Manh400* possède le plus petit nombre de routes aux intersections, la durée d'attente des véhicules aux feux rouges est par conséquent plus faible.

Environnement	Manh200	Manh400	VoroDense	VoroSparse
Longueur totale de route (km)	227,7	112,8	148,74	88,3
Nombre d'intersections	529	144	60	18
Longueur moyenne des routes entre intersections (km)	0,225	0,425	0,885	1,919
Moyenne de routes par intersection	3,82	3,66	5,6	5,11

Tableau 2 – *Caractéristiques des routes des environnements simulés.*

Lorsque la densité du trafic augmente, les véhicules ralentissent principalement à cause des embouteillages. *VoroSparse* étant l'environnement qui possède le moins de routes, 88,3km contre 227,7km dans *Manh200*, les véhicules se déplacent avec les plus faibles valeurs de vitesse moyenne. Les valeurs dans *VoroDense* sont plus faibles que dans *Manh200* et *Manh400* à cause d'une part, de la faible densité des routes et d'autre part, du nombre élevé de routes aux intersections.

Afin de montrer à la fois la prise en compte des caractéristiques de la route par *V-MBMM* et d'étudier l'impact de ces caractéristiques sur la mobilité des véhicules, nous avons conduit d'autres expérimentations pour analyser l'effet de la durée des feux sur la vitesse moyenne. Le Tableau 3 résume les valeurs des paramètres, les zones considérées sont deux fois plus grandes qu'auparavant.

Paramètre	Valeur
Taille de la zone	10km × 10km
Environnement	<i>Manh200</i> : grille Manhattan avec des blocs de 200m <i>Manh400</i> : grille Manhattan avec des blocs de 400m <i>Manh800</i> : grille Manhattan avec des blocs de 800m
Population candidate pour la mobilité	10000, 20000
Durée des feux rouges	0, 45s , 90s , 135s , 180s
V_{min}, V_{max}	30km/h, 50km / h
Vitesse limite des routes	80km / h
Nombre de voies	Double avec une voie dans chaque sens

Tableau 3 – *Valeurs des paramètres de simulation des mécanismes de base de V-MBMM – Expérimentation 2.*

La Figure 19 représente la variation de la vitesse moyenne en fonction de la durée des feux observée dans les six cas de configuration, *Manh200*, *Manh400* et *Manh800* avec une population de 10000 et 20000 véhicules candidats à la mobilité. Les résultats montrent qu'avec l'augmentation de la durée des feux rouges, la vitesse moyenne diminue dans toutes les configurations car les véhicules attendent plus longtemps aux intersections. Les valeurs diffèrent d'un environnement à l'autre en raison des différentes caractéristiques des routes. La vitesse moyenne dans chaque environnement dépend de la densité de routes, du nombre total d'intersections et de la distance entre intersections. Dans *Manh200*, possédant le plus grand nombre d'intersections et la plus faible longueur de routes entre intersections, les véhicules décélèrent principalement à l'approche des feux rouges. Au contraire, dans *Manh800* où il y a moins d'intersections, une plus longue distance entre intersections mais une faible densité de routes, les véhicules ralentissent le plus souvent à cause des embouteillages. Quant à *Manh400*, les valeurs de tous les paramètres sont comprises entre celles de ces deux environnements. A forte densité de trafic, et pour toutes les durées de feux, la vitesse est plus faible dans *Manh800* à cause des embouteillages.

La vitesse moyenne observée est par conséquent dépendante du nombre d'intersections dans l'environnement et de la longueur de routes entre intersections. Elle est plus élevée dans

Manh800, suivi de *Manh400* puis *Manh200*. Ceci est confirmé par la Figure 20 qui présente la variation de la vitesse en fonction de la variation de la durée des feux. Les résultats montrent que lorsque la durée des feux passe de 0s à 45s, quelle que soit la densité, la vitesse baisse de plus de 15km/h dans *Manh200*, de plus de 11,5km/h dans *Manh400* et de moins de 5mk/h dans *Manh800*. Ce raisonnement explique également pourquoi la vitesse est supérieure dans *Manh400* comparé à *Manh200* pour une densité de 20000 véhicules et quel que soit la durée des feux rouges.

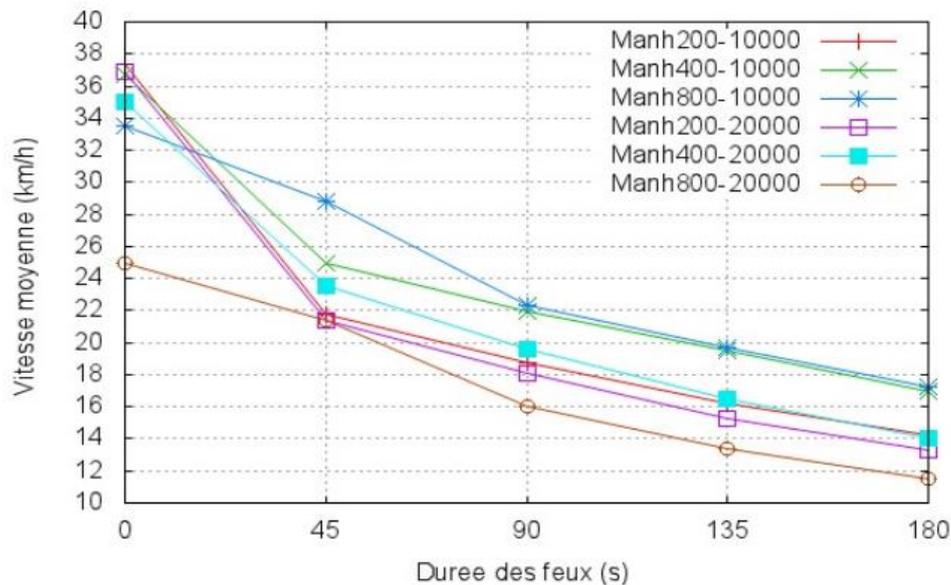


Figure 19 – Variation de la vitesse moyenne.

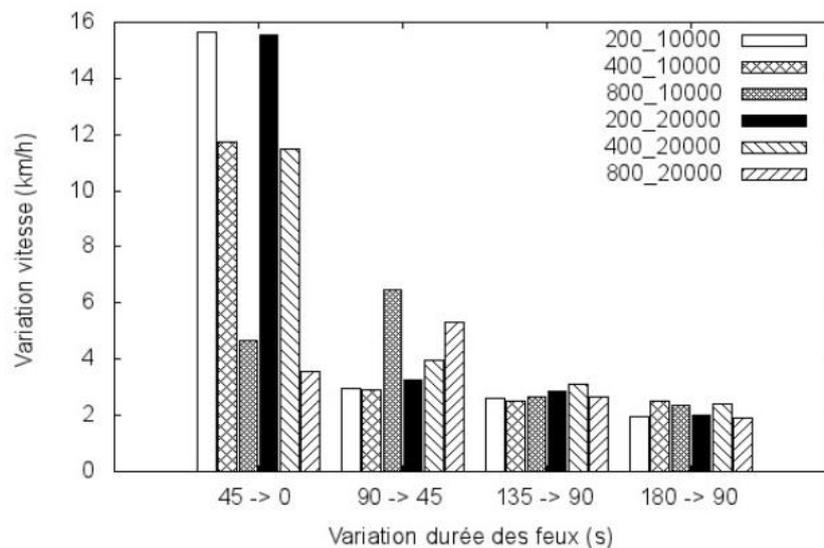


Figure 20 – Variation de la vitesse moyenne vs Variation de la durée des feux.

Avec des durées de feux supérieures ou égales à 90s et une densité de 10000 véhicules, nous pouvons observer sur la Figure 19 que les vitesses enregistrées dans *Manh800* ne sont plus supérieures à celles de *Manh400*. En s'arrêtant plus longtemps aux intersections, la durée des trajets des véhicules est plus longue, les véhicules circulent plus longtemps sur les routes 3 ce qui accroît les embouteillages. L'effet de ces derniers étant plus important dans *Manh800*. La Figure 20 montre qu'en effet, lorsque la durée des feux passe de 45s à 90s la vitesse diminue de 3km/h dans *Manh400* et de 6km/h dans *Manh800*.

Le dernier critère analysé est la variation de la vitesse moyenne issue de la simulation en fonction des vitesses maximales et minimales ($[v_{min}, v_{max}]$) des véhicules fournies en paramètres d'entrée. Les valeurs des paramètres de simulation sont les mêmes que ceux du Tableau 3 et la durée des feux est fixée à 45s.

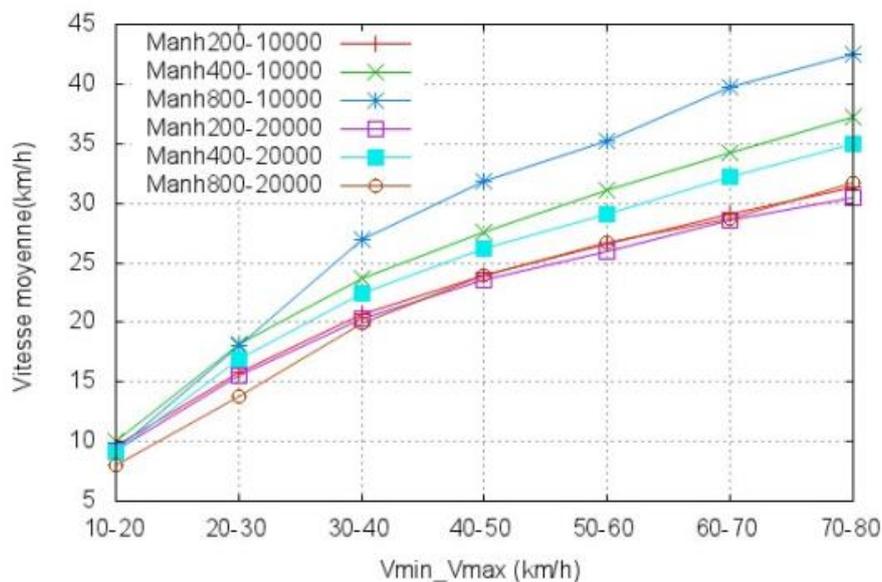


Figure 21 – Vitesses souhaitées.

Nous pouvons observer sur la Figure 21 que la vitesse augmente avec l'augmentation des valeurs de l'intervalle $[v_{min}, v_{max}]$. Avec une densité de 10000 véhicules, la vitesse est plus élevée dans *Manh800* suivi de *Manh400* puis de *Manh200*. Ceci est due d'une part au nombre d'intersections qui est plus faible dans *Manh800* comparé à *Manh400* et, dans *Manh400* comparé à *Manh200*, et d'autre part à la distance qui sépare les intersections qui est plus élevée dans *Manh800*, puis dans *Manh400* et enfin dans *Manh200*. Lorsque la distance entre intersections est plus grande, les véhicules ont plus de possibilité d'accélérer et d'atteindre leur vitesse maximale avant d'arriver à la prochaine intersection et de décélérer.

B. Analyse de la répartition de la population vs l'attractivité des lieux

Selon l'approche utilisée dans le modèle, la répartition de la population doit obéir à l'attractivité des lieux et les activités des individus doivent correspondre à ce que l'on peut observer dans la vie quotidienne. Pour réaliser ces nouvelles expérimentations, nous avons intégré l'environnement réel de la CAB à notre application VNS. Nous avons considéré l'ensemble des périodes de la journée définies dans le modèle et présenté les résultats obtenus sur les périodes représentatives des activités journalières des individus : départ au travail le matin, pause déjeuner à midi, sortie du travail en fin d'après-midi et loisirs le soir. Les expérimentations ont été réalisées sur une population de 10000 véhicules se déplaçant dans le Territoire de Belfort sur quatre tranches horaires : 7h00-9h00, 12h00-14h00, 17h00-19h00 et 19h00-21h00.

	CC	PAP	HYB
Taux d'arrivée à destination	0,94	0,51	0,83
$D_{parcourue}/D_{Euclidienne}$ entre origine-destination	1,62	3,80	2,46
Attractivité des route empruntées	1,38	2,19	1,69

Tableau 4 – Caractéristiques des trajectoires

Le premier critère étudié est la répartition de la population à l'issue de la simulation vis-à-vis de l'attractivité des lieux fournie en données d'entrée. Les véhicules doivent être plus attirés par les structures attractives de l'environnement. Deux critères ont été estimés et analysés : le degré d'attraction des routes empruntées par les véhicules et la répartition de la population par zone.

Le Tableau 4 montre les résultats, concernant les routes empruntées par les véhicules, obtenus avec les trois stratégies de calcul de trajectoire, plus court chemin (*CC*) calculé en fonction de la distance euclidienne, pas-à-pas (*PAP*) et hybride, soit pas-à-pas appliqué à partir du plus court chemin (*HYB*). Les valeurs sont des moyennes calculées sur les quatre tranches horaires. Le Tableau 4 met en évidence la différence qui existe entre les trois stratégies de calcul de trajectoire. Avec l'algorithme *CC*, plus de 94% de véhicules arrivent à destination. Le rapport entre la distance parcourue par les véhicules et la distance euclidienne qui sépare le point origine du point destination est de 1,62. Ce rapport augmente à 3,80 avec l'approche *PAP*, ce qui fait que seulement 51% des véhicules arrivent à destination. Cependant l'algorithme *PAP* prend mieux en compte l'attractivité des routes comparé à *CC*. Les routes traversées par les véhicules dans le cas *PAP* ont une attractivité 2,19 fois supérieure à la moyenne contre 1,38 dans le cas *CC*. L'algorithme *hybride* joue le rôle d'un compromis entre les deux méthodes : en utilisant l'approche *CC* il permet un meilleur taux d'arrivée comparé à *PAP*, 83% contre 51% , et en intégrant l'aspect *PAP*, il prend mieux en compte l'attractivité des routes comparé à *CC*, 1,69 contre 1,38.

Différence des taux	<i>CC</i>	<i>PAP</i>	<i>HYB</i>
Moyenne	0,006	0,002	0,003
Ecart type	0,057	0,005	0,008

Tableau 5 – *Différence de taux entre attractivité et présence de véhicules dans tout le territoire.*

Différence des taux	<i>CC</i>	<i>PAP</i>	<i>HYB</i>
Moyenne	0,004	0,001	0,002
Ecart type	0,040	0,003	0,004

Tableau 6 – *Différence des taux entre attractivité et présence de véhicules dans les zones à moyenne et faible attractivité.*

Pour analyser la répartition de la population dans le territoire, nous avons estimé le taux de présence des véhicules par zone. Nous avons divisé la carte du territoire en zones de taille $800m \times 800m$ et calculé le nombre de véhicules se trouvant sur chaque zone à intervalle de $3mn$. Les expérimentations ont été réalisées sur les quatre tranches horaires, 07h00 – 09h00, 12h00 – 14h00, 17h00 – 19h00 et 19h00 – 21h00, en utilisant chacun des algorithmes *CC*, *PAP*, et *HYB*. Les Tableaux 5 et 6 montrent la moyenne et l'écart type des différences entre les taux d'attractivité des zones et les taux de présence des véhicules par zone. Les calculs sont faits à partir des valeurs absolues. La moyenne des différences donne une information générale, dans tout le territoire, sur la répartition de la population par rapport à l'attractivité. Les valeurs des deux tableaux indiquent que quelle que soit la stratégie utilisée, l'attractivité des routes est globalement respectée. Comme les points origine et destination de chaque véhicule sont déterminés en fonction de l'attractivité des lieux, le trafic est plus important dans les zones attractives. Dans les algorithmes *PAP* et *HYB* l'attractivité est également prise en compte dans la détermination de la trajectoire, ce qui donne un meilleur rapport entre l'attractivité des lieux et la répartition de la population.

C. Analyse des activités journalières

Dans *V-MBMM*, les activités des individus sont définies en divisant la journée en périodes et en associant à chacune, un taux de mobilité, une loi de distribution de la mobilité sur la période

et une liste d'activités avec le taux de mobilité par activité. Dans le modèle *V-MBMM*, les taux de mobilité sont définis de manière pseudo aléatoire. La Figure 22 compare les taux de mobilité par quart d'heure obtenus par simulation aux taux des données réelles issues de la *CAB*. Les données de simulations sont obtenues sur des tests avec une population de 20000 véhicules. On peut observer que les deux courbes ont la même allure.

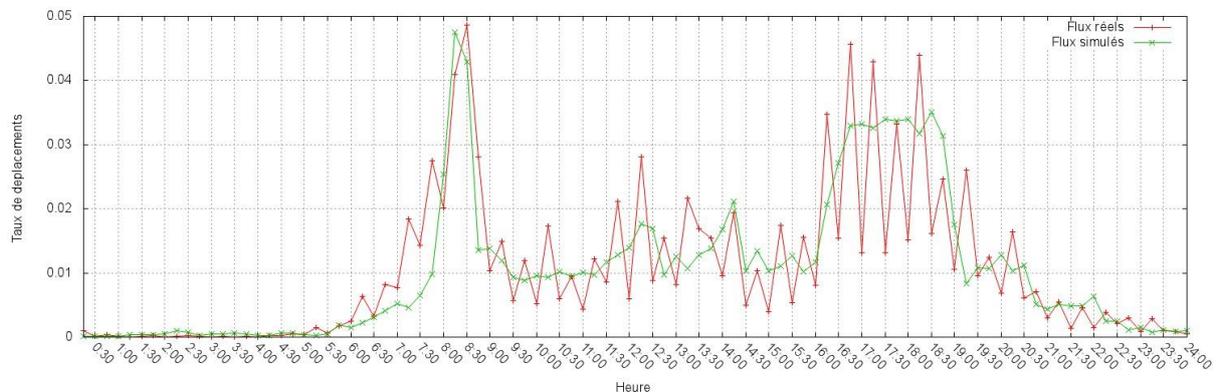


Figure 22 – Flux de déplacements réels vs déplacements simulés.

On peut distinguer quatre périodes : (i) une mobilité quasi nulle de 0h00 à 7h00 et la nuit de 22h à 24h (ii) une mobilité forte sur les périodes de départ au travail (de 7h00 à 9h00) et de retour au domicile (de 16h00 à 19h30), (iii) une mobilité moyenne et constante correspondant aux heures de bureau (de 9h00 à 11h45 et de 14h15 à 16h00), (iv) une mobilité forte à moyenne pendant la pause déjeuner (de 11h45 à 14h15).

Dans le but d'analyser les activités, nous avons considéré quatre types de structures de base (Entreprise, Enseignement, Commerce et Domicile) pour lesquels nous avons calculé les flux entrants et les flux sortants pour chacun. Les calculs sont faits sur cinq périodes de la journée : départ au travail entre 7h00 et 9h00, départ en pause déjeuner de 11h45 à 12h30, retour au travail de 13h30 à 14h15, sortie du travail entre 16h30 et 18h30 et loisirs et sorties de 20h00 à 22h00. Les résultats sont présentés sur les Figures 23 et 24. Les données obtenues montrent des scénarios réalistes ; départ du domicile vers le lieu de travail le matin, départ du lieu de travail vers les commerces ou les domiciles entre 11h45 et 12h30 puis retour au travail entre 13h30 et 14h15, départ du travail en fin d'après-midi, et enfin loisirs et autre durant la soirée.

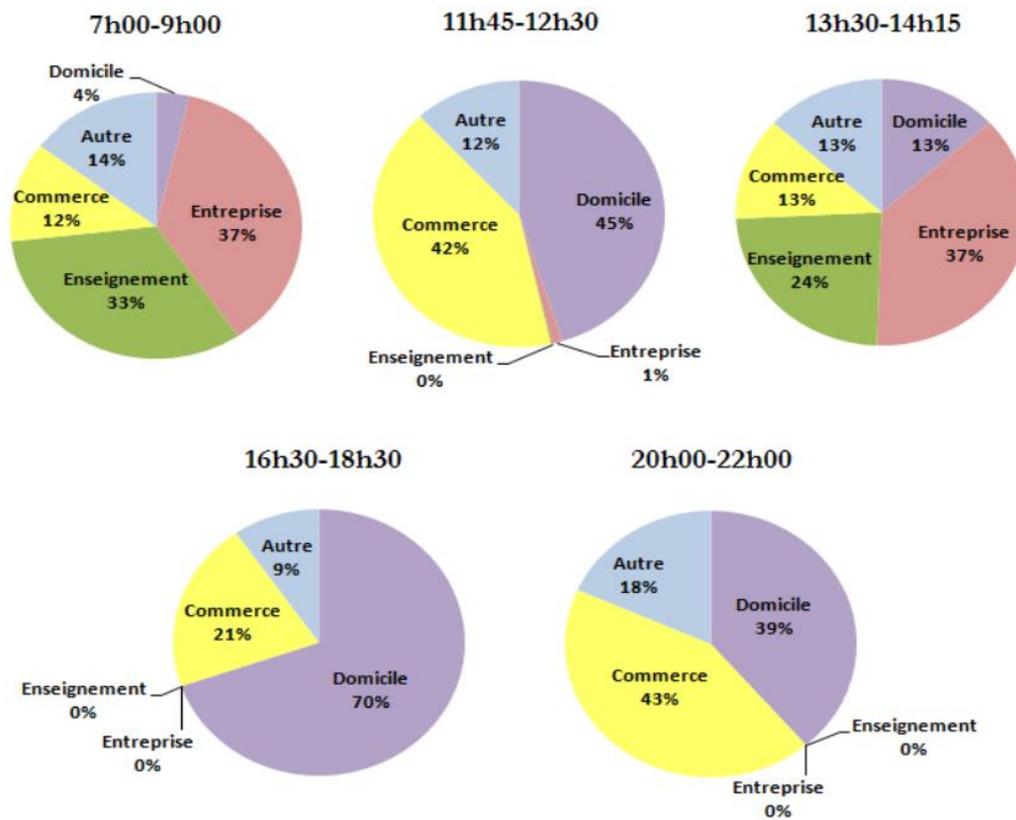


Figure 23 – Flux de déplacements entrants.

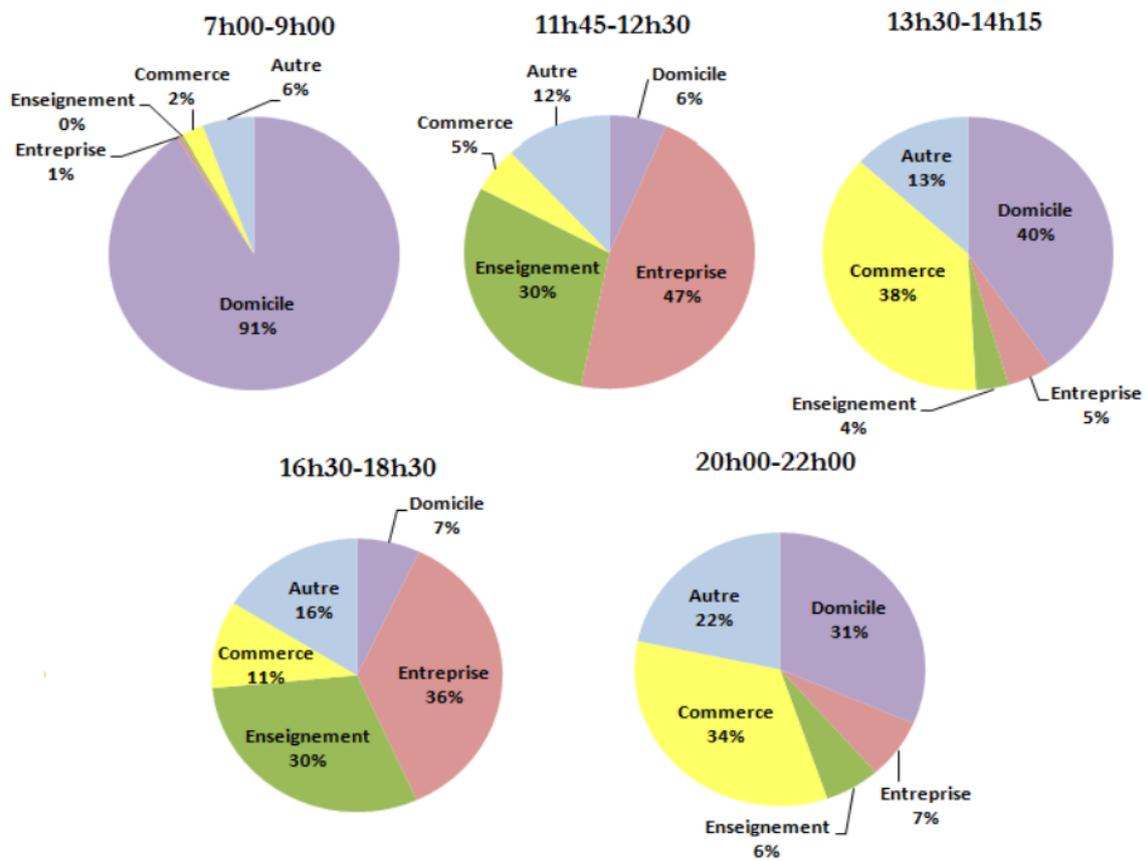


Figure 24 – Flux de déplacements sortants.

3.2. Propagation et connectivité radio dans les réseaux véhiculaires

Le modèle que nous avons proposé est une adaptation du modèle *ERCEG* [64], un modèle statistique du *path loss* pour réseaux cellulaires en environnements suburbains développé à partir de données expérimentales, sur la fréquence $1,9GHz$, recueillies sur plusieurs macro-cellules à travers les USA et couvrant un large panel de catégories de terrain. Un terrain est classifié en trois catégories intégrées au modèle du *path loss* proposé. La première catégorie, notée *A*, correspond aux terrains vallonnés avec des densités d'arbres modérées à fortes, cette catégorie représente les terrains les plus obstrués et possède les valeurs les plus élevées du *path loss*. La deuxième catégorie, notée *B*, représente les terrains plats avec des densités d'arbres modérées à fortes et les terrains vallonnés avec de faibles densités d'arbres. Enfin, la catégorie qui présente les plus faibles valeurs du *path loss* est la catégorie *C* qui correspond aux terrains plats avec de faibles densités d'arbres.

Le modèle développé dans [64] s'appuie sur la formule commune du *path loss* exprimé en fonction de deux paramètres : l'exposant du *path loss* γ et le *shadow fading* s . γ permet de caractériser l'atténuation du signal en fonction de la distance, sa valeur dépend du type de l'environnement. s est une variable aléatoire ajoutée au *path loss* pour modéliser sa variation causée par le *shadow fading*. La formule générale du *path loss* du modèle *ERCEG* est :

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s \quad d \geq d_0 \quad (18)$$

Dans l'équation (18), A est une quantité fixe qui correspond au *path loss* en espace libre calculé à une distance de référence d_0 selon l'équation (19). Dans le modèle, d_0 est fixée à $100m$ et la valeur de A est de $78dBm$.

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (19)$$

L'exposant du *path loss* est une variable aléatoire Gaussienne qui dépend de la catégorie du terrain et de la hauteur de l'antenne de la station de base, h_b . La formule de l'exposant *path loss* est donnée par l'équation 20, le terme entre parenthèse dans l'équation désigne la moyenne de γ et σ_γ sa variation. Les paramètres a , b , c et σ_γ sont des constantes déduites à partir des données expérimentales, leurs valeurs sont propres à chaque catégorie de terrain. x est une variable Gaussienne de moyenne nulle et de variation $N[0; 1]$. Les valeurs numériques des constantes liées aux catégories de terrain sont données dans le Tableau 7.

$$\gamma = \left(a - bh_b + \frac{c}{h_b} \right) + x\sigma_\gamma \quad 10m \leq h_b \leq 80m \quad (20)$$

L'équation de s est :

$$s = y\sigma \quad (21)$$

avec y une variable Gaussienne de moyenne nulle et de variation $N[0; 1]$ et σ la variation de s qui est également une variable Gaussienne calculée comme suit :

$$\sigma = \mu_\sigma + z\sigma_\sigma \quad (22)$$

avec μ_σ la moyenne de σ et σ_σ sa variation ; z est une variable Gaussienne de moyenne nulle et de variation $N[0; 1]$. μ_σ et σ_σ sont des constantes déduites à partir des données expérimentales et sont propres à chaque catégorie de terrain, leurs valeurs sont données dans le Tableau 7.

<i>Paramètres du modèles</i>	Catégories de terrain		
	A	B	C
a	4,6	4,0	3,6
$b (m^{-1})$	0,0075	0,0065	0,0050
$c(m)$	12,6	17,1	20,0
σ_v	0,57	0,75	0,59
μ_σ	10,6	9,6	8,2
σ_σ	2,3	3,0	1,6
$h_b(m)$	[10 ; 80]		
$d_0(m)$	100		
Fréquence (GHz)	1,9		

Tableau 7 – Valeurs des paramètres du modèle ERCEG.

Pour être plus réaliste, le modèle *V-MBMM* s'appuie sur une description plus précise de l'environnement selon les trois catégories de terrain définies dans le modèle *ERCEG*. Cette description consiste à diviser l'environnement en plusieurs zones et à associer à chacune d'elle l'une des catégories de terrain, *A*, *B* ou *C*. Les catégories traduisent la densité d'obstacles présents sur les zones, elles sont déterminées à partir du type et de la densité des structures présentes sur chaque zone. Le *path loss* que subissent les signaux transmis est calculé en fonction de la catégorie de terrain des zones situées entre les deux antennes des mobiles émetteur et récepteur.

3.2.1. Description du modèle *V-PROPAG*

La carte représentant l'environnement est divisée en une grille de mailles de taille identique. Chaque maille, m , est caractérisée par un triplet (p_m, c_m, h_m) dont les composantes indiquent respectivement les coordonnées en abscisses et ordonnées (position) du centre de la maille m sur la carte, la catégorie, *A*, *B* ou *C*, du terrain présent sur la maille et l'altitude de la maille. Les données de toutes les mailles sont représentées par une matrice maille/caractéristiques (coordonnées, catégorie du terrain, altitude) utilisée comme données d'entrée du modèle *V-PROPAG*.

Les formules utilisées pour le calcul du *path loss* dans le modèle *V-PROPAG* sont déduites à partir de celles du modèle *ERCEG* adaptées aux réseaux véhiculaires et aux données sur l'environnement. Le Tableau 7 montre la différence entre les paramètres des environnements considérés dans les deux modèles et qui doit être prise en compte dans le calcul du *path loss*.

A partir des paramètres du Tableau 8, deux observations sont à faire : d'abord, la fréquence et la hauteur des antennes émetteurs et récepteurs exigent un ajustement des valeurs des constantes du modèle *ERCEG* pour être appliquées aux réseaux véhiculaires. Ensuite, la représentation discrétisée en maille des données de l'environnement a l'avantage d'offrir une description plus précise des caractéristiques de l'environnement mais ajoute une étape supplémentaire dans le calcul du *path loss* pour la détermination de toutes les mailles situées entre l'antenne de l'émetteur et celle du récepteur. Pour faire un compromis entre le temps de calcul et la précision, cette étape peut être évitée en travaillant sur des mailles de grandes tailles, par exemple, de taille égale à la couverture maximale que peut avoir une antenne.

Paramètres	ERCEG	V-PROPAG
Représentation de l'environnement	carte d'une ville	carte d'une ville divisée en une grille de mailles
Catégorie du terrain entre A_X et A_R	une seule caractérisant le terrain entre A_X et A_R	catégorie de chacune des mailles située entre A_X et A_R
Fréquence	1,9GHz	5,9GHz (DSRC)
Hauteur A_X	[12m , 79m]	1,5m
Hauteur A_R	2m	1,5m
Rayon de couverture	dizaines de m jusqu'à 8km	300m à 1000m (théorique DSRC)
A_X : antenne émetteur ; A_R : antenne récepteur		

Tableau 8 – Paramètres environnement.

Contrairement à tous les modèles de la littérature qui considèrent un terrain plat, le modèle *V-PROPAG* tient compte de l'altitude du terrain qui peut également influencer la propagation des signaux radio. Un signal transmis par une voiture en hauteur se propage mieux qu'un signal transmis par une voiture qui se trouve dans un terrain plat. De plus, dans certains cas, l'altitude du terrain qui sépare les deux véhicules peut être plus élevée et empêcher toute propagation du signal. Toutes ces configurations sont prises en compte dans le modèle en se basant non seulement sur la hauteur de l'antenne dans le calcul du *path loss* mais également sur l'altitude des mailles. Les formules du *path loss* entre deux antennes quelconques A_X et A_R sont :

$$PL = \begin{cases} A + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + s & d \geq d_0 \\ 20 \log_{10} \left(4\pi d / \lambda \right) + s & d < d_0 \end{cases} \quad (23)$$

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (24)$$

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T (a_t - b_t h_b + \frac{c_t}{h_b}) N_c[t] + x \sigma_\gamma N_c[t] \quad 1,5m \leq h_b \leq 30m \quad (25)$$

$$s = y(\mu_\sigma + z \sigma_\sigma) \quad (26)$$

avec :

$$\sigma_\gamma = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sigma_{\gamma t} N_c[t] ; \quad \mu_\sigma = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \mu_{\sigma t} N_c[t] ; \quad \sigma_\sigma = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \sigma_{\sigma t} N_c[t] \quad (27)$$

Dans l'équation (23), A est le *path loss* en espace libre, calculé à la fréquence de 5,9GHz selon l'équation (24) donne sa formule de calcul. L'exposant du *path loss* γ et le *shadow fading* s sont des moyennes calculées en considérant les catégories de terrain de toutes les mailles situées entre m_X et m_R , ils sont calculés selon les équation 25 et 26 respectivement.

Dans toutes les équations, le terme X_t désigne le paramètre X de la catégorie de terrain t , ce sont des constantes déduites à partir des données expérimentales. T désigne le nombre de catégories de terrain qui est égal à 3, N désigne le nombre de mailles situées sur la droite reliant les deux mailles m_X et m_R , h_b est la différence entre l'altitude des mailles m_X et m_R à laquelle est ajoutée la hauteur de l'antenne et N_c est un vecteur de trois valeurs qui représentent le nombre de mailles traversées par le signal par catégorie de terrain A , B et C .

<i>Paramètres du modèles</i>	Catégories de terrain		
	A	B	C
<i>a</i>	3,5	2,9	2,3
<i>b (m⁻¹)</i>	0,004	0,003	0,002
<i>c(m)</i>	0,6	0,65	0,75
σ_γ	0,13	0,22	0,15
μ_σ	1,5	0,94	0,72
σ_σ	0,35	0,75	0,54
<i>h_b(m)</i>	[1,5 ; 30]		
<i>d₀(m)</i>	32		
Fréquence (GHz)	5,9		

Tableau 9 – Valeurs des paramètres du modèle V-PROPAG.

Le Tableau 9 montre les valeurs des constantes du modèle ERCEG adaptées aux réseaux véhiculaires. Les catégories de terrain sont définies, dans le cas des réseaux véhiculaires, en fonction de la densité d'obstacles (bâtiments, arbres, etc.) présents dans l'environnement. Les bâtiments étant le principal type d'obstacles que peut rencontrer un signal qui se propage dans une ville, la classification s'est faite de la manière suivante : toutes les mailles ayant plus de 66% de structures sont classifiées dans la catégorie **A** (forte densité d'obstacles), toutes celles dont le pourcentage de structures est compris entre 33% et 66% appartiennent à la catégorie **B** (densité d'obstacles moyenne), toutes les autres mailles sont classifiées dans la catégorie **C** (faible densité d'obstacles). En plus des catégories de terrain, les données fournies sur l'altitude des mailles sont prises en compte dans le calcul de la hauteur des antennes et aussi pour déterminer si un obstacle physique existe entre deux véhicules.

3.2.2. Validation du modèle V-PROPAG

L'analyse de Erceg et al. [64] a montré que les deux paramètres qui influencent le *path loss* dans chaque catégorie sont la *distance entre les deux mobiles émetteur et récepteur* et la *hauteur des antennes*. Le degré d'influence de ces paramètres sur la puissance reçue diffère selon la catégorie du terrain situé entre les deux mobiles.

Pour étudier l'impact de ces paramètres, nous avons considéré un environnement non maillé où le calcul du *path loss* se fait selon l'équation (23) en fixant la taille des mailles à une valeur supérieure ou égale à la zone de couverture maximale d'une antenne. La hauteur de l'antenne (h_b) dans le modèle ERCEG varie de 10m à 80m. Dans le modèle V-PROPAG, la hauteur varie de 1,5m à 30m. Le *path loss* est calculé à des distances régulières pour chaque modèle, allant de 100m à 1500m avec un pas de 100m pour le modèle ERCEG et de 25m à 500m avec un pas de 25m pour le modèle V-PROPAG. Les Figures 25 et 26 montrent le *path loss* obtenu, respectivement avec le modèle V-PROPAG et le modèle ERCEG en faisant varier la distance et la hauteur des antennes.

Les premières expérimentations ont démontré que le modèle V-PROPAG se comporte de la même manière que le modèle ERCEG. Les Figures 25 et 26 montrent que dans les deux modèles le *path loss* augmente avec l'augmentation de la distance, l'impact de la distance étant plus important dans la catégorie A suivie de B puis de C. de plus, la distinction entre les catégories est plus notable avec V-PROPAG qu'avec ERCEG. Ceci peut s'expliquer par le fait que la hauteur des antennes est plus faible dans les réseaux véhiculaires et par conséquent l'influence des obstacles est plus importante. En d'autres termes, en utilisant des antennes plus hautes, le signal radio évite plus d'obstacles qu'avec des antennes à faible hauteur.

De plus, les courbes des Figures 25 et 26 indiquent la moyenne des valeurs et leur écart type. Les résultats montrent qu'avec des antennes plus hautes, le *path loss* devient plus faible. Pour les mêmes raisons énoncées précédemment, le *path loss* est impacté plus fortement par la

variation de la hauteur d'antenne avec la catégorie *C* suivie de *B* puis de *A*. En passant d'une antenne à 10m à une antenne à 80m, le gain sur le *path loss*, obtenu avec le modèle *ERCEG*, est de +13,41dBm pour la catégorie *A*, +14,62dBm pour la catégorie *B* et +16,95dBm pour la catégorie *C*. Chaque valeur est la moyenne des différences du *path loss* calculées sur toutes les distances. Avec le modèle *V-PROPAG*, en passant d'une antenne à 1,5m à une antenne à 30m, le gain sur le *path loss* est respectivement de +3,96dBm, +4,20dBm et +4,71dBm.

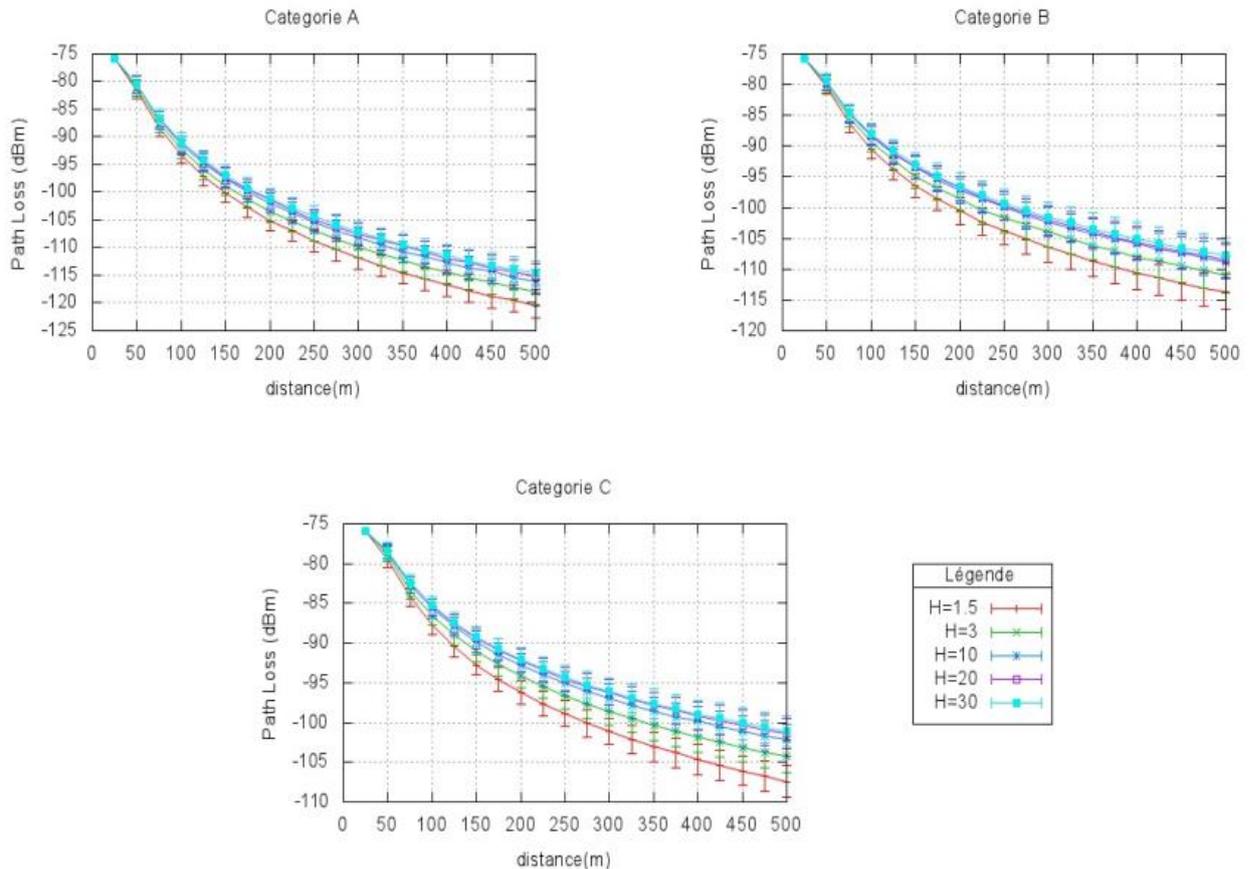


Figure 25 – Variation du *path loss* en fonction de la hauteur des antennes - *V-PROPAG*.

Un autre paramètre que nous avons validé dans le modèle est l'influence de l'altitude du terrain sur le *path loss* en considérant des environnements maillés de $3\text{km} \times 3\text{km}$ structurés en une grille Manhattan. Les mailles sont de taille égale à $25\text{m} \times 25\text{m}$, les routes ont une largeur de 25m et les blocs une taille de $300\text{m} \times 300\text{m}$. Les tests sont réalisés en faisant varier la catégorie et l'altitude des mailles de la grille. Dans chaque test, le *path loss* est calculé en supposant que l'antenne émettrice se trouve au centre d'une maille route. Six grilles à terrain plat et différentes répartitions de mailles par catégorie de terrain ont été considérées dans les expérimentations. Nous avons positionné l'altitude des mailles route à 0m, 2m puis 4m.

La Figure 27 montre les valeurs moyennes du rayon et du nombre de mailles couvertes par 200 antenne pour un seuil de réception à -77dBm . Le rayon d'une cellule est défini par la distance euclidienne entre la maille de l'émetteur et la maille la plus éloignée de la couverture. Les antennes émettrices sont positionnées sur des mailles route choisies aléatoirement à une hauteur de 1,5m du sol. La légende indique le taux de mailles par catégories de terrain de chacune des grilles. Par exemple, 100A indique une grille avec 100% de mailles de catégorie *A* (terrain homogène) et 70A15B15C indique une grille avec 70% de mailles de catégorie *A*, 15% de catégorie *B* et 15% de catégorie *C* (terrain mixte). Les résultats mettent en évidence que les antennes ont une meilleure couverture dans les environnements les moins obstrués. En comparant, pour chacune des grilles, les résultats obtenus avec les trois altitudes, nous pouvons

constater que la couverture est meilleure avec les antennes à haute altitude. En effet, les signaux émis par des antennes en hauteur se propagent mieux puisqu'ils rencontrent moins d'obstacles.

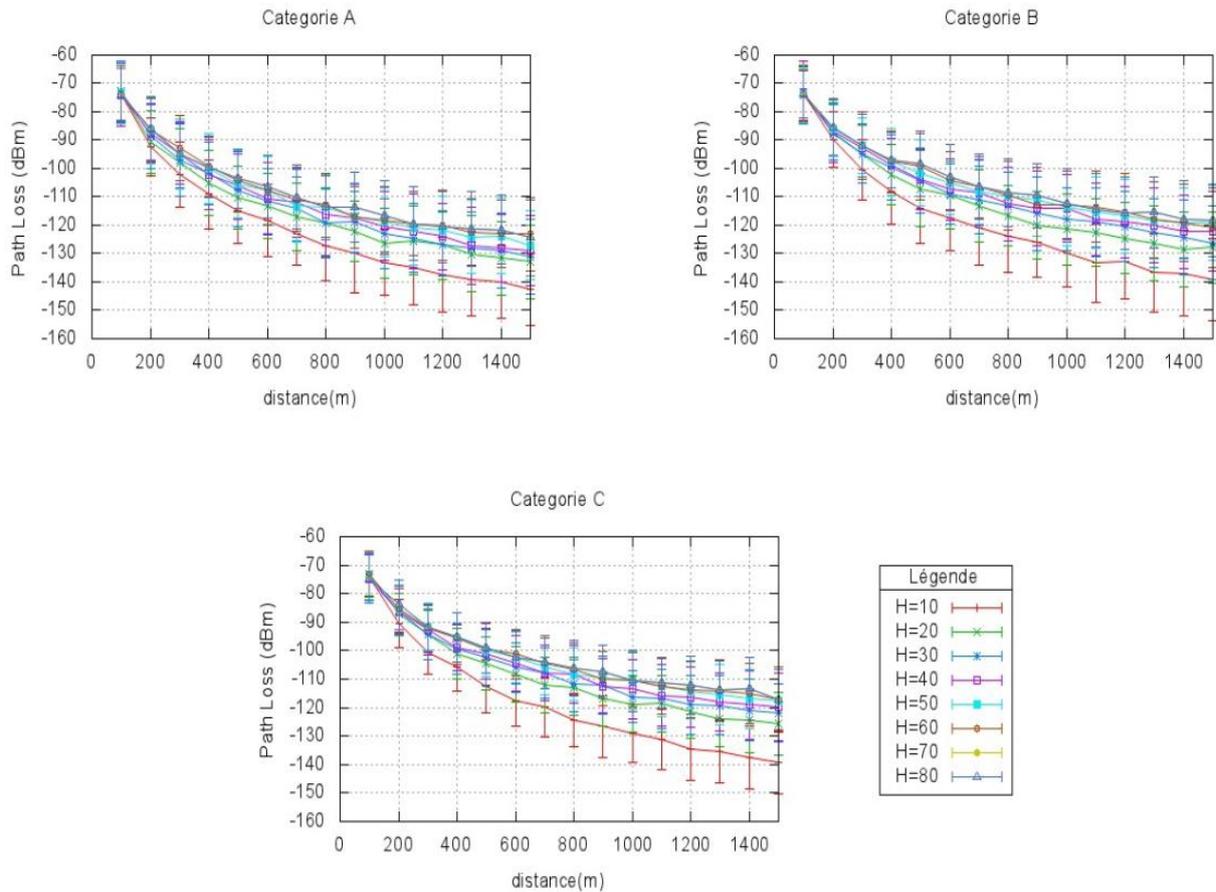


Figure 26 – Variation du path loss en fonction de la hauteur des antennes - ERCEG.

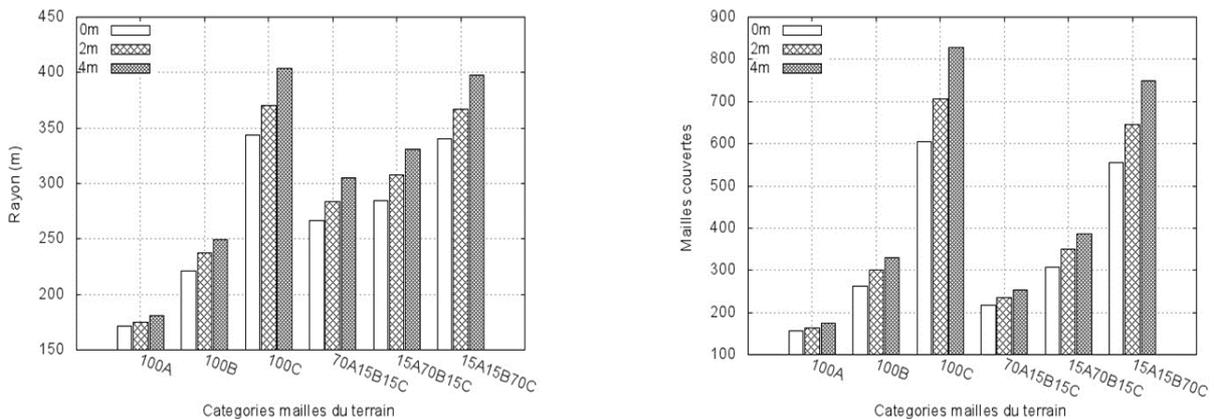


Figure 27 – Nombre moyen de mailles couvertes et rayons moyens vs altitude du terrain.

L'ensemble des expérimentations de validation réalisées dans cette partie montre que le modèle *V-PROPAG* reproduit fidèlement l'effet des obstacles sur la propagation des signaux en se basant sur des informations plus précises sur l'obstruction des terrains en tenant compte des variations de hauteur du sol et de la densité des obstacles du sursol. Les expérimentations montrent également que le modèle est correctement adapté, à partir du modèle *ERCEG*, aux réseaux véhiculaires et tient compte de toutes les observations présentées dans [64]. Ces facteurs nous permettront d'avoir une sensibilité de la connectivité des *VANET* aux terrains,

cependant, des mesures spécifiques seront nécessaires pour calibrer les paramètres du Tableau 9 selon les villes.

3.2.3. Connectivité radio dans les réseaux véhiculaires

L'objectif de cette partie est l'étude de la topologie réseau des VANET en environnements urbains et suburbains pour identifier les propriétés du réseau d'un point de vue liaisons radio. Plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude de la connectivité radio dans les VANET. Dans [23, 180], les auteurs ont étudié les caractéristiques de la connectivité radio entre véhicules se déplaçant sur une autoroute. Une étude comparative de la connectivité radio dans les VANET a été réalisée dans [52] en considérant en plus du modèle utilisé dans [52] le modèle *Random Waypoint* et une grille *Manhattan*. Plusieurs modèles de mobilité utilisant différents mécanismes et niveaux de réalisme ont été considérés dans [70] pour étudier l'influence de la modélisation de la mobilité sur la topologie du réseau. D'un point de vue propagation radio, tous les travaux se basent sur une modélisation irréaliste qui considère les zones de couverture des véhicules comme des cercles parfaits de même rayon. Nous voulons montrer, ici, l'impact d'une modélisation réaliste de la propagation radio dans les VANET, analyser et identifier les propriétés de la connectivité radio qui doivent être pris en compte dans toute nouvelle solution de routage.

Nous avons développé une architecture à quatre modules pour l'analyse des caractéristiques de la connectivité radio dans les VANET, comme le montre la Figure 28. Les données de chaque module, à l'exception du module propagation radio, sont générées et/ou mises à jour périodiquement toutes les T secondes (par exemple toutes les 2 secondes).

Le *module de mobilité*, implémentant le modèle *V-MBMM*, a pour rôle de déterminer la position périodique de chaque véhicule dans l'environnement simulé. Le résultat est un fichier qui associe à chaque véhicule un vecteur de valeurs indiquant les positions, toutes les T secondes, par lesquelles est passé le véhicule. Les données de ce fichier sont pré-calculées et utilisées comme entrée du module graphes de connectivité.

Le *module propagation radio* a pour rôle de déterminer la zone de couverture radio de chaque véhicule dans le réseau. Deux modèles de propagation radio sont implémentés dans ce module, *Two-Ray Ground (TRG)* qui est le modèle le plus communément utilisé et qui représente la zone de couverture de tout véhicule par un cercle parfait, et *V-PROPAG* qui prend en compte les obstacles de l'environnement. Le résultat du module propagation radio est un fichier spécifiant la zone de couverture de toutes des mailles de l'environnement simulé. C'est une matrice qui associe à chaque maille un vecteur spécifiant l'ensemble des mailles couvertes et la puissance reçue au niveau de chaque maille.

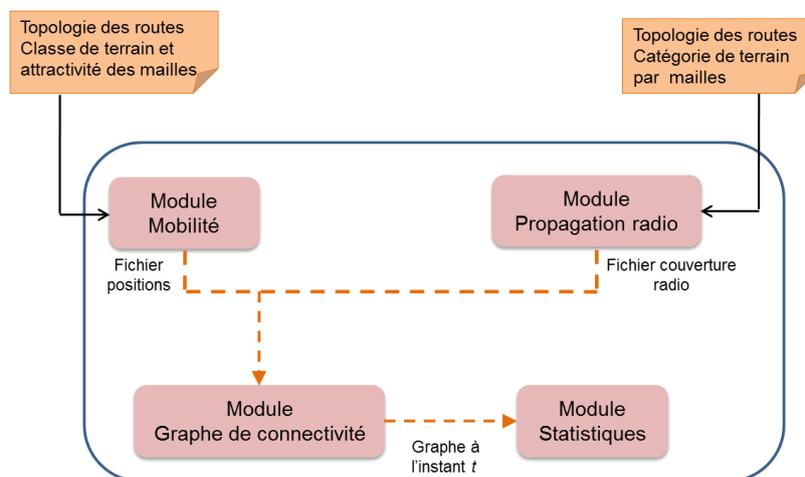


Figure 28 – Architecture modulaire pour l'analyse de la connectivité radio.

Le *module graphe de connectivité* a pour rôle la construction du graphe de connectivité entre les véhicules en fonction de leurs positions dans le réseau, de leur zone de couverture et de leur nombre. Les données utilisées comme entrée du module sont le fichier position, pré-calculé par le module mobilité, qui indique les positions périodiques de chacun des véhicules simulés, et le fichier couverture radio, pré-calculé par le module propagation radio, qui indique la zone de couverture de chaque maille route. La zone de couverture d'un véhicule correspond à celle de la maille à laquelle il appartient. Les connexions entre les véhicules sont déterminées à partir de leurs zones de couverture. Un véhicule i est lié au véhicule j si le véhicule j appartient à l'une des mailles couvertes par le véhicule i . Les connexions entre les véhicules sont représentées par un graphe $G(V, C)$ orienté dynamique. V est l'ensemble des sommets du graphe, chacun représentant un véhicule actif, C est l'ensemble des arêtes qui modélisent les connexions radio entre véhicules. Chaque élément de C est un couple (v_i, v_j) qui relie deux véhicules v_i et v_j pouvant communiquer. A chaque couple (v_i, v_j) est associée une orientation qui définit le type du lien radio entre v_i et v_j qui est, bidirectionnel si les véhicules v_i et v_j sont mutuellement à portée radio, ou unidirectionnel si seul l'un des deux véhicules (extrémité de l'arête) est à portée radio de l'autre (l'origine de l'arête). Les Figures 29 et 30 illustrent des graphes de connectivité de 100 véhicules obtenus respectivement avec les modèles *TRG* et *V-PROPAG*. Le graphe en (b) de chaque modèle représente l'évolution, après 3mn de mobilité, du graphe en (a). On observe déjà que le graphe de connectivité obtenu par *TRG* est plus dense puisqu'il ne tient pas compte de l'effet des obstacles contrairement à *V-PROPAG*.

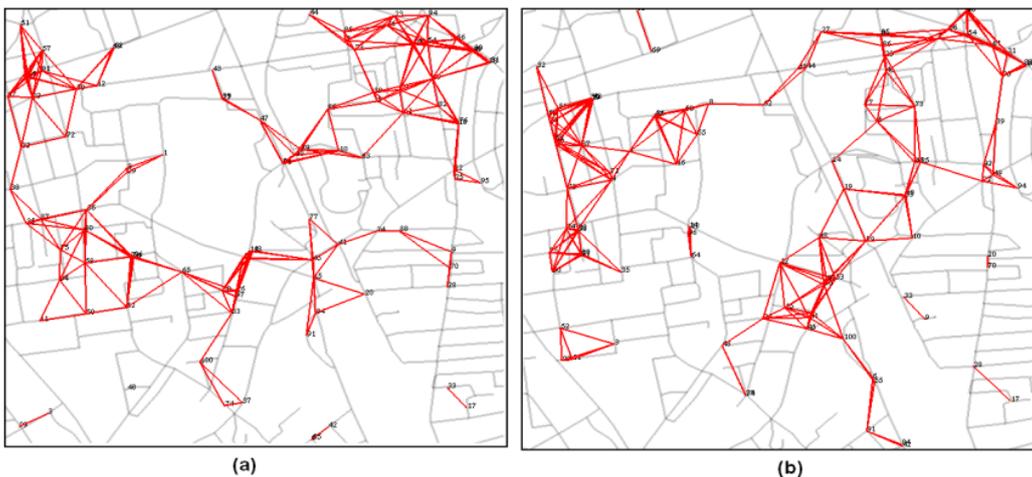


Figure 29 – Graphe de connectivité de 100 véhicules : cas *TRG*.

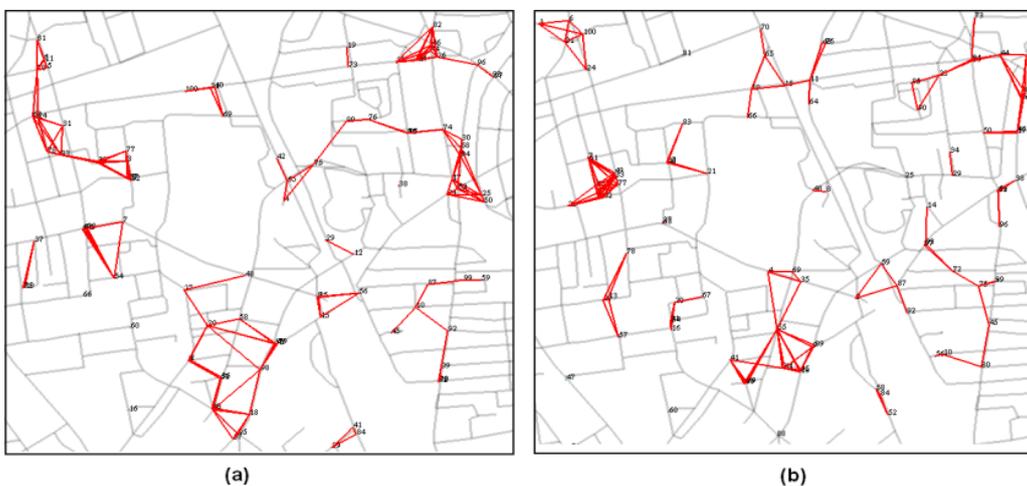


Figure 30 – Graphe de connectivité de 100 véhicules : cas *V-PROPAG*.

Le *module statistiques* s'exécute en parallèle avec le module graphe de connectivité et utilise le résultat de ce dernier pour l'estimation des propriétés de la connectivité radio dans les VANET. Les principaux facteurs qui affectent la connectivité radio dans les réseaux véhiculaires sont la forte mobilité des nœuds, la diversité de leur densité et la sévère dégradation de la qualité des signaux transmis due aux obstacles, hauteurs et distances. Ces facteurs sont la cause des trois problèmes majeurs des réseaux véhiculaires qui sont la connectivité intermittente, la fragmentation du réseau et le *broadcast storm*. Le *module statistiques* évalue trois métriques à partir des graphes générés : la *durée moyenne des liens radio*, le *degré des nœuds du graphe* et le *partitionnement du réseau*.

Paramètres		Valeurs
Environnement		Centre-ville de Belfort 2500m × 2500m
Période de mises à jour (<i>T</i>)		1s
Mobilité	Modèle	V-MBMM
	V_{min}, V_{max}	30km/h, 50km / h
	Durée feux	45s
	Trajectoire	Pas-à-pas
	Population candidate à la mobilité	8000, 10000 mobiles
	Tranche horaire	12h – 14h
Propagation	Modèles	V-PROPAG, TRG
	Gain antenne	2dBi
	Hauteur antenne	1,5m
	Puissance d'émission	23dBm
	Sensibilité	-77dBm
	Fréquence	5,9GHz
	d_{max}	500m

Tableau 10 – Paramètres de simulation pour l'étude de la connectivité.

Pour l'étude de la connectivité, nous avons considéré l'environnement de la CAB. Le Tableau 10 résume les valeurs des paramètres de simulation. Selon les valeurs des paramètres de propagation spécifiées dans le tableau, le rayon de couverture avec *Two-Ray Ground* est d'environ 300m.

Pour prédire la couverture radio des véhicules dans un environnement donné, le modèle V-PROPAG utilise la catégorie du terrain selon la classification A, B ou C, et l'altitude de toutes les mailles de l'environnement pour calculer le *path loss*. Les informations sur l'altitude des mailles sont prises en compte dans le calcul de la hauteur des antennes et aussi pour déterminer si un obstacle physique existe entre deux véhicules.

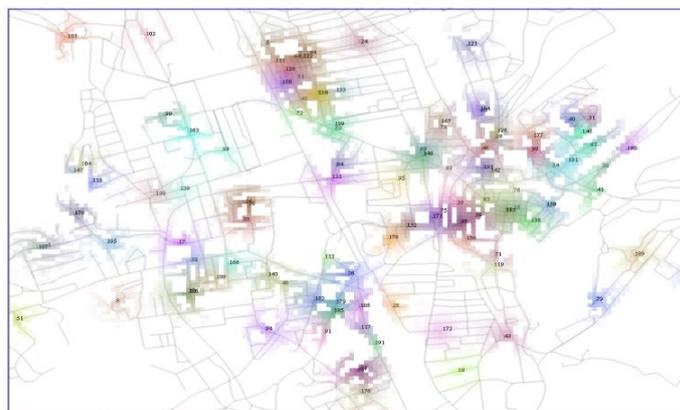


Figure 31 – Zones de couverture de 200 véhicules.

La Figure 31 montre un exemple de zones de couverture de 200 véhicules se déplaçant dans le centre-ville de Belfort. La couverture est fournie par le *module propagation radio* et le modèle *V-PROPAG*. Chaque couleur représente la couverture radio depuis un véhicule, et l'atténuation de la couleur représente l'atténuation du signal jusqu'au seuil de -77dBm . La Figure 32 montre un exemple de graphe de connectivité entre 200 véhicules se déplaçant également dans le centre-ville de Belfort. Le graphe est généré par le *module graphes de connectivité*.



Figure 32 – Graphe de connectivité entre 200 véhicules.

Deux séries d'expérimentations ont été réalisées avec une population de 8000 et de 10000 véhicules candidats à la mobilité dans le centre-ville de Belfort entre 12h et 14h. Les Figures 33, 34 et 35 montrent les valeurs des métriques de connectivités obtenues avec les deux modèles *V-PROPAG* et *TRG*.

A l'issue des expérimentations, la première observation porte sur la connectivité radio dans les *VANET*, celle-ci est intermittente et extrêmement instable ; dans les cas que nous avons étudiés, plus de 20% des liens ont une durée inférieure à 5s comme on peut le voir sur la Figure 33(c). Les résultats sur la durée des liens obtenus avec *TRG* sont optimistes par rapport à ceux obtenus avec *V-PROPAG*. La Figure 33(a) montre que la durée moyenne des liens pour une population de 8000 est d'environ 100s avec *TRG* et de 58s avec *V-PROPAG*. Avec une population candidate de 10000 mobiles, le réseau est un peu plus stable et la durée moyenne des liens augmente à 118s avec *TRG* contre 60s avec *V-PROPAG*. Dans la Figure 33(b), on considère uniquement les liens les plus stables ; liens ayant une durée supérieure à 60s. Le graphe trace le pourcentage de ces liens ($P\text{-TRG}$, $P\text{-V-PROPAG}$) et leur durée moyenne ($D\text{-TRG}$, $D\text{-V-PROPAG}$). Les résultats montrent que lorsque les obstacles sont ignorés la qualité des liens est supposée meilleure. A nouveau c'est *TRG* qui offre la meilleure connectivité puisqu'il ignore l'effet des obstacles. La Figure 33(c) montre la distribution de liens vis-à-vis de la durée maximale. Avec une population de 8000 mobiles et pour les faibles durées de liens, les taux trouvés avec *V-PROPAG* sont proches de ceux trouvés avec *TRG*, la différence est plus remarquable pour les durées supérieures à 95s. Avec 10000 mobiles, le réseau est un peu plus stable et la différence entre les deux modèles devient plus notable. Le taux de véhicules ayant une durée de liens inférieure à 35s est plus élevé dans *V-PROPAG* comparé à *TRG*. Pour des durées incluses entre 35s et 95s les taux trouvés avec les deux modèles sont quasiment les mêmes. Au-delà de 95s, le taux de liens avec *TRG* est pratiquement le double de celui trouvé avec *V-PROPAG*.

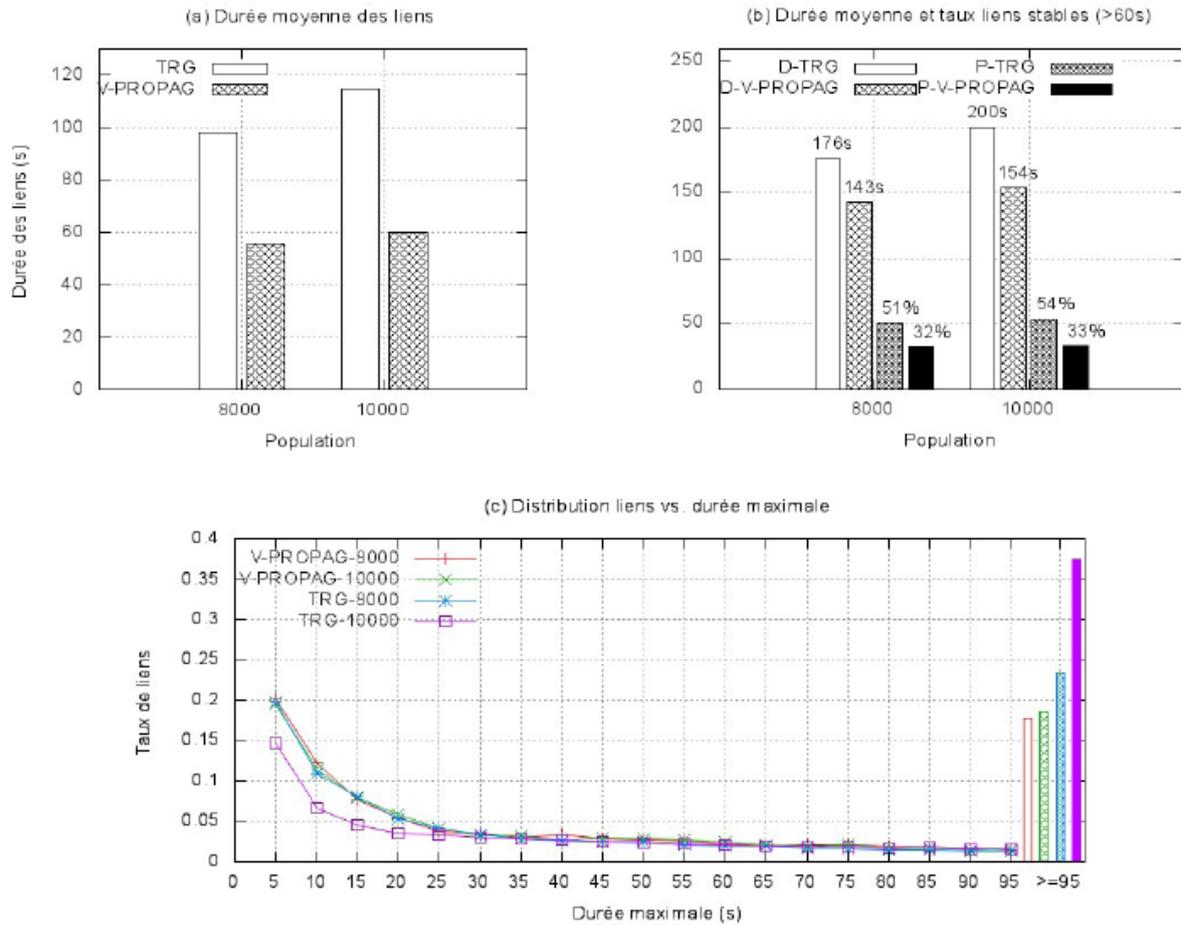


Figure 33 – Durée des liens radio entre nœuds.

La deuxième observation porte sur la densité des nœuds qui est variable, elle dépend de la localisation des nœuds et de la période simulée. Elle est forte aux heures de pointe dans les zones attractives et faible durant les heures creuses notamment dans les zones à faible attractivité. Plus la densité de mobiles est élevée plus la connectivité est élevée et inversement.

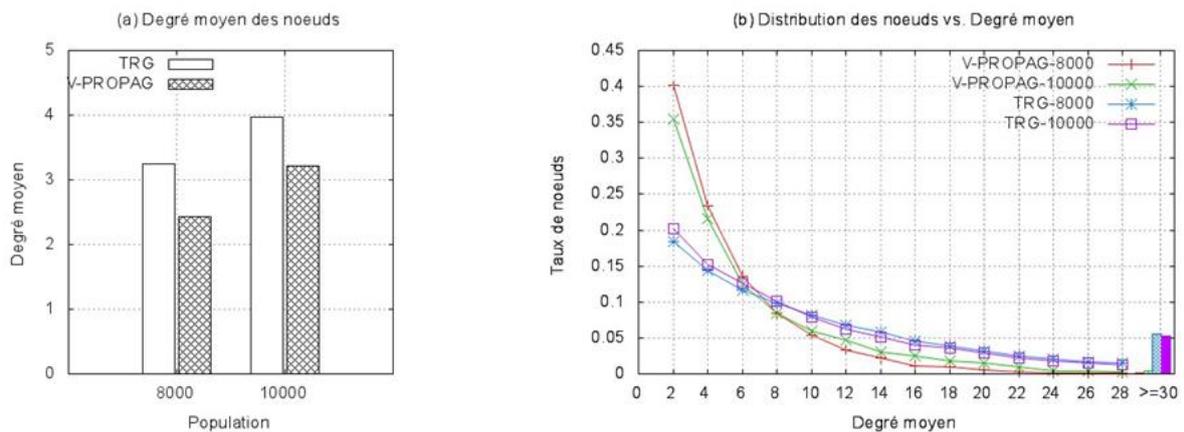


Figure 34 – Degré de connectivité entre nœuds.

La Figure 34(a) montre que le degré moyen de connectivité augmente avec l'augmentation du nombre de nœuds ce qui est logique puisque chaque véhicule a plus de chance de rencontrer un autre véhicule qui rentre dans sa zone de couverture. En comparant les résultats obtenus avec TRG à ceux obtenus avec V-PROPAG, on constate que TRG suppose une meilleure connectivité

puisque'il ignore l'effet des obstacles et considère un espace plat et ouvert. La même observation peut également être faite pour la Figure 34(b) qui trace la distribution des nœuds vis-à-vis du nombre de voisins. Pour les deux densités de mobiles, 8 000 et 10 000, *TRG* surestime très largement la connectivité des véhicules. Pour les faibles degrés de voisins, inférieur à 6, *V-PROPAG* présente les valeurs de taux les plus élevées signifiant qu'il y a plus de 75% des nœuds avec un degré inférieur à 6.

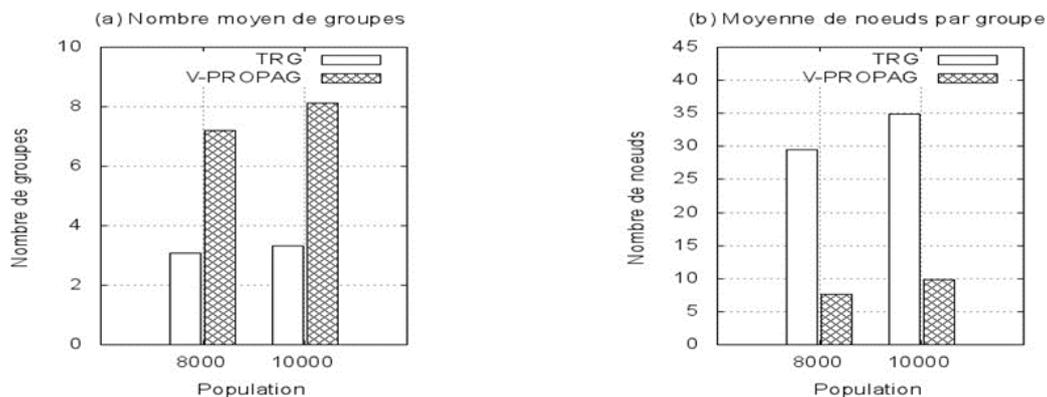


Figure 35 – Partitionnement du réseau en groupes *d'au moins deux nœuds*.

Par ailleurs, nous pouvons observer que le problème du partitionnement du réseau se pose dans tous les scénarios. Les véhicules ont tendance à se déplacer en groupes isolés, le nombre de groupes diffère d'une période à l'autre et leur taille change d'une zone à l'autre. Plus de 40% des nœuds sont totalement isolés dans les périodes à moyenne densité du trafic. La Figure 35 montre les résultats sur le partitionnement du réseau en groupes isolés de nœuds. En supposant des rayons de couverture de 300m sur un espace de 2500m × 2500m, les graphes de connectivité générés avec le modèle *TRG* sont en général connexes. Avec le modèle *V-PROPAG*, la connectivité n'est pas uniquement affectée par la distance mais également par les obstacles présents dans l'environnement. Ces obstacles peuvent empêcher la communication entre nœuds physiquement proches d'où la formation de plus de groupes isolés de nœuds dans le réseau.

Le graphe 35(a) montre que le nombre moyen de groupes isolés avec *V-PROPAG* est plus du double du nombre trouvé avec *TRG*. Notons que les nœuds isolés, c'est-à-dire n'ayant aucun lien radio avec d'autres nœuds, sont ignorés dans les calculs puisqu'ils ne font partie d'aucun groupe. Les deux graphes (a) et (b) de la Figure 35 montrent qu'en moyenne, pour des graphes de connectivité générés chaque seconde pendant 2 heures de simulation, le nombre de nœuds qui appartiennent à des groupes dans le cas de *TRG* est de 91 pour une population de 8000 mobiles et de 116 pour une population de 10000 mobiles. Avec le modèle *V-PROPAG*, les nombres de nœuds sont seulement de 55 et 79. Le nombre moyen de nœuds mobiles présents par période est de 100 pour une population de 8000 et de 130 pour une population de 10000.

L'un des aspects de la mobilité dans les réseaux véhiculaires est la variation des caractéristiques du trafic durant les périodes de la journée et les jours de la semaine. Cet aspect est modélisé dans le modèle *V-MBMM* en divisant la journée en plusieurs périodes représentatives du comportement journalier des individus et en associant à chacune son propre taux de mobilité et son ensemble d'activités. La dernière observation que nous faisons concerne la connectivité radio dans les VANET qui n'est pas uniforme mais varie dans l'espace et le temps. Les caractéristiques du réseau diffèrent à tout instant d'une région à l'autre, et dans une même région d'une période à l'autre.

Nous avons réalisé les dernières expérimentations dans l'objectif de déterminer l'influence que peut avoir la variation du trafic sur les caractéristiques du réseau. Trois périodes ont été considérées : la pause déjeuner de 12h à 14h, la sortie du travail de 17h à 19h et les loisirs de

19h à 21h. La Figure 36 montre les caractéristiques de la connectivité radio obtenues avec le modèle *V-PROPAG* sur ces trois périodes avec des populations de 8000 et 10000 mobiles. Les valeurs des paramètres de simulation sont celles présentées dans le Tableau 10.

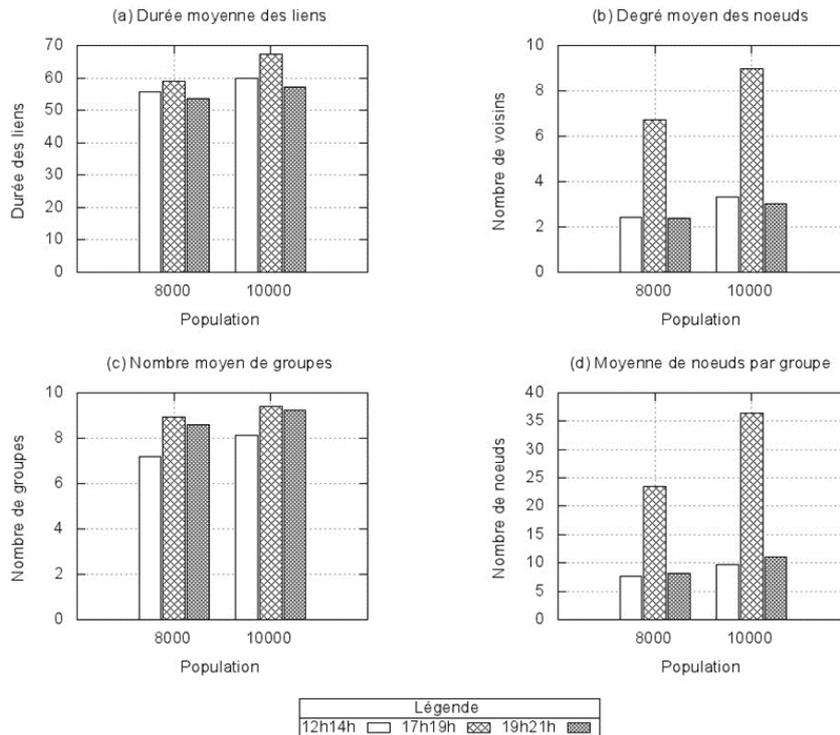


Figure 36 – Aspect temporel et connectivité radio – *V-PROPAG*.

Les résultats de la Figure 36 montrent que le réseau est plus stable entre 17h et 19h. La raison étant que le nombre de mobiles et la densité du trafic par région sont élevés durant cette période, ce qui diminue les discontinuités dans le réseau. Les durées de liens et les degrés de nœuds sont plus élevés comparés aux périodes 12h – 14h et 19h – 21h qui présentent pratiquement les mêmes valeurs. Concernant le partitionnement du réseau en groupes isolés de nœuds, les résultats montrent qu'il y a beaucoup de groupes de faible connectivité durant la période 19h – 21h. La raison étant que les mobiles sont répartis sur l'ensemble de l'espace de simulation formant plusieurs petits groupes isolés de nœuds. Le partitionnement du réseau est également important entre 12h et 14h mais la cause ici est liée au plus faible nombre de nœuds dans le réseau. Le nombre moyen de véhicules présents par tranche de 1s est de 100 pour une population de 8 000 et de 130 pour une population de 10 000. Les nombres moyens de nœuds isolés pour les deux populations sont respectivement de 45 et 51. Entre 17h et 19h, le réseau est partitionné en peu de groupes de grandes tailles. Ceci est dû au nombre élevé de véhicules et à leur forte densité par région qui favorisent la formation de groupes.

3.3. Performances des protocoles de routage

L'analyse de la connectivité radio a montré que les *VANET* ont des caractéristiques particulières qui rendent difficile, voire impossible dans certains cas, la détermination de routes stables entre les sources et les destinations des données. Pour garantir son efficacité, un protocole de routage doit intégrer les mécanismes nécessaires pour faire face aux problèmes de connectivité intermittente, du partitionnement du réseau et du *broadcast storm* qui caractérisent les *VANET*. Dans cette partie, nous analysons les performances des protocoles de routage les plus étudiés dans la littérature dans le contexte des *VANET*. Notre objectif est d'identifier les mécanismes le plus adaptés aux *VANET* et ceux qui au contraire causent la dégradation de performances.

3.3.1. Routage dans les VANET

Le routage joue un rôle très important dans les *VANET* puisque tous les services supportés, unicast ou multicast, se basent sur des communications multi-saut pour l'acheminement des données. Dans notre étude, on s'intéresse exclusivement au routage unicast et aux protocoles qui se basent sur des informations sur la topologie du réseau.

A. Protocoles réactifs :

Dans cette famille de protocoles, la recherche de la route se fait à la demande. Un nœud qui désire envoyer des données lance une procédure de découverte de route en diffusant un paquet de contrôle dans le réseau à la recherche d'une route vers le destinataire. Parmi les protocoles les plus répandus, *AODV* pour *Ad-hoc On-Demand Distance Vector* [142] et *DSR* pour *Dynamic Source Routing* [100] appartiennent à la classe des protocoles réactifs.

Le protocole *AODV* est un protocole à vecteur de distance qui ne possède qu'une vision locale du réseau ; il maintient des informations sur son voisinage direct qu'il utilise pour déterminer les routes de proche en proche en fonction de la distance. La *distance* correspond au nombre de nœuds relais à traverser (nombre de sauts) sur la route entre la source et la destination. Le *vecteur* correspond à la direction où le trafic doit être dirigé. En tant que protocole réactif, *AODV* n'utilise pas d'échanges périodiques d'informations sur la topologie du réseau, seules les routes des communications actives sont maintenues dans les tables de routage des nœuds. Pour transmettre des données vers une destination, il vérifie l'existence d'une route valide dans sa table de routage. Si une telle route n'existe pas, il initie une procédure de découverte de route.

Le protocole *DSR* fonctionne de la même manière que le protocole *AODV* ; c'est un protocole réactif qui n'utilise aucun échange périodique d'informations de contrôle, seules les routes actives sont maintenues dans les tables de routage. La différence entre les deux protocoles réside dans le fait que, dans *AODV*, la route est déterminée de proche en proche, alors que *DSR* utilise la technique du routage par la source. Dans cette technique, le nœud source détermine la liste des nœuds à traverser qu'il insère dans l'entête de chaque paquet de données avant sa transmission. Cette séquence est utilisée par chaque nœud de la route pour déterminer le prochain relai vers le destinataire. Contrairement à *AODV*, chaque nœud peut garder plusieurs routes vers une destination, une route principale et des routes secondaires qui sont utilisées dans le cas de rupture de la route principale. La rupture de route peut être détectée par la source ou par un nœud intermédiaire qui peut également tenter de retransmettre les données s'il connaît une route vers le destinataire autre que celle indiquée dans le paquet de données.

B. Protocoles proactifs :

Les protocoles proactifs se basent sur un échange régulier de paquets de contrôle pour le maintien, au niveau de chaque nœud, d'informations sur la topologie entière du réseau. Chaque nœud maintient une table de routage qui est mise à jour, périodiquement ou à chaque modification topologique, en utilisant les messages de contrôle. L'inconvénient majeur de ces protocoles est l'inondation du réseau par l'échange périodique de messages de contrôle. Parmi les protocoles les plus répandus, *OLSR* pour *Optimized Link State Routing* [51] appartient à la classe des protocoles proactifs.

Le protocole *OLSR* est un protocole à état des liens qui, pour limiter la diffusion des messages de contrôle dans le réseau, utilise un mécanisme d'inondation optimisé selon lequel seul un sous ensemble de nœuds du réseau, les relais multipoints *MPR* pour *MultiPoint Relays*, sont autorisés à diffuser les informations sur la topologie du réseau. *OLSR* utilise deux types de message de contrôle, *HELLO* et *TC* pour *Topology Control*. Chaque nœud diffuse périodiquement un message *HELLO* contenant la liste de ses voisins directs, l'état et le type des liens avec ces voisins et la liste de ses nœuds *MPR*, et permettant de détecter les voisins à un et à deux sauts. Les messages *TC* sont diffusés périodiquement, à une fréquence plus faible que celle des

messages *HELLO*, dans tout le réseau pour permettre aux nœuds d'obtenir et de mettre à jour la base de données topologique du réseau.

3.3.2. Architecture du simulateur VANET

L'analyse des performances des protocoles de routage dans les *VANET* a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Certains travaux [56, 85, 98, 128] s'intéressent à l'étude de l'impact d'une modélisation réaliste sur les performances des protocoles et d'autres [123, 137, 148] ont pour objectif de proposer de nouvelles approches pour améliorer le rendement des protocoles. Généralement, les modèles de mobilité et de propagation des ondes radio considérés sont très simples et manquent de réalisme. Les environnements utilisés sont de type *grille Manhattan* ou *diagramme de Voronoi*, les véhicules se déplacent de manière aléatoire, les zones de couverture sont représentées par des cercles parfaits. La validité des résultats de toute étude basée sur les simulations est directement liée au niveau du réalisme des modèles utilisés. Dans le cadre des *VANET*, trois parties sont essentielles : la modélisation des protocoles réseaux, la modélisation de la mobilité des nœuds et la modélisation de la propagation radio.

Le simulateur réseaux utilisé dans l'étude présentée ici est le logiciel libre *ns-2* pour *Network Simulator* version 2. Le choix de *ns-2* est justifié par le fait que c'est l'un des simulateurs réseaux les plus complets qui intègre les principaux mécanismes des communications sans fil dont plusieurs protocoles de routage. De plus, son approche modulaire facilite l'ajout de nouveaux modèles. *ns-2* permet de simuler des réseaux sans fil en incluant la mobilité des nœuds, une couche physique avec des modèles de propagation des ondes radio, les interfaces radio et le mécanisme d'accès au canal *DCF* pour *Distributed Coordination Function*, de la norme *MAC IEEE 802.11*. Une insuffisance de *ns-2* concerne le manque de réalisme dans la modélisation de la mobilité des nœuds et de celle de la propagation des signaux radio. Dans le but d'avoir des résultats plus fiables, nous avons utilisé les modèles d'étude *V-MBMM* pour la simulation de la mobilité des nœuds et *V-PROPAG* pour la simulation de la propagation des ondes radio. Ces deux modèles ont été intégrés au simulateur *ns-2* pour constituer un simulateur de *VANET* complet dont l'architecture est donnée en Figure 37.

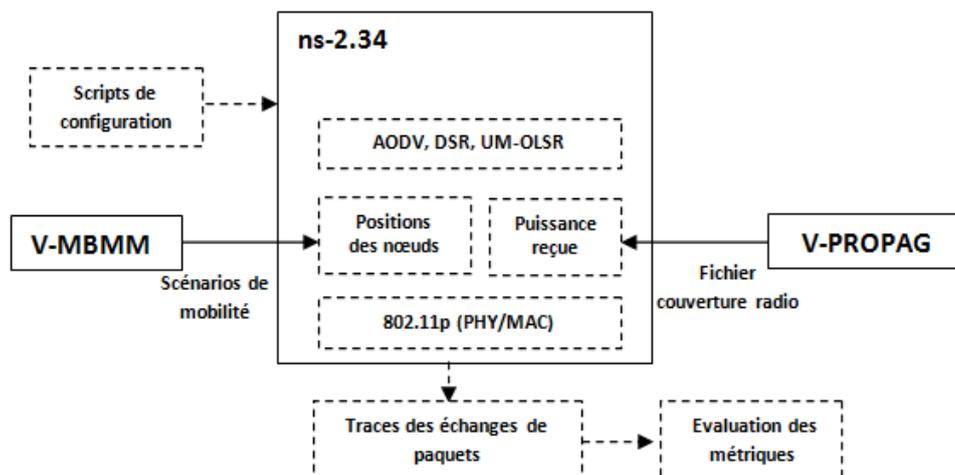


Figure 37 – Composantes du simulateur VANET.

Le module *V-MBMM* génère des traces de mobilité compatible avec *ns-2*, les traces sont pré-calculées et utilisées comme données d'entrée de *ns-2* pour déterminer la position et le mouvement des nœuds. Le module *V-PROPAG* utilise comme entrée les données sur les catégories de sursol et la hauteur du sol de l'environnement pour calculer l'affaiblissement des signaux. Les zones de couvertures sont pré-calculées, le résultat est un fichier spécifiant pour chaque maille route de l'environnement la puissance reçue au niveau des mailles route qui appartiennent à sa zone de couverture radio. Le fichier est par la suite utilisé comme entrée de *ns-2* qu'il charge au début de toute simulation.

3.3.3. Résultats de simulation

Nous sommes intéressés à l'étude des performances des protocoles de routage *AODV*, *DSR* et *OLSR* dans le contexte des deux modèles *V-MBMM* et *V-PROPAG*. L'environnement considéré dans la simulation est le centre-ville de Belfort. Les Tableaux 11 et 12 résument, respectivement, les paramètres de simulation de *ns-2* et ceux des modèles *V-MBMM* et *V-PROPAG*. Afin d'avoir plus de précision dans les zones de couverture radio des mailles, nous avons utilisé un maillage plus fin de $5m$ pour le calcul des puissances reçues. A chaque maille de $5m \times 5m$ sont associés la même catégorie de terrain et la même hauteur que celle de la maille $25m \times 25m$ à laquelle elle appartient. Les caractéristiques des antennes sont positionnées de sorte à avoir un rayon de couverture maximal d'environ $350m$ avec la catégorie de terrain *C* qui est la plus dégagée en termes d'obstacles. Dans l'étude présentée, nous avons également considéré une modélisation par un cercle de la zone de couverture des nœuds avec *TRG* pour montrer l'impact des modèles de propagation sur les performances du système. Nous avons conservé les valeurs par défaut du standard *802.11p* tel que spécifié dans *ns-2*, elles permettent d'avoir un rayon de couverture maximum de $200m$ avec le modèle *TRG*, à peu près équivalente à une couverture en catégorie *B* avec *V-PROPAG*. Les résultats sont des moyennes obtenues avec cinq traces de mobilité différentes pour prendre en compte le comportement pseudo-aléatoire de la simulation.

<i>Paramètres</i>		<i>Valeurs</i>
Environnement		Centre-ville de Belfort $2500m \times 2500m$
Durée de simulation		300s
Nombre de nœuds		100, 150, 200
<i>Routage</i>	<i>AODV</i> <i>DSR</i> <i>OLSR</i>	Intervalle TC 5s Intervalle Hello 2s
802.11p (PHY/MAC)	Fréquence Largeur de bande Puissance d'émission Sensibilité Modèle de propagation	5,9GHz 10MHz 0,001mW -85dBm TRG
<i>Trafic de données</i>	Type Gain antenne Intervalle inter paquets Taille des paquets	<i>CBR</i> 5%, 10%, 15%, 20% de nœuds 0,5s 512 octets

Tableau 11 – Paramètres de simulation dans *ns-2*.

<i>Paramètres</i>		<i>Valeurs</i>
Environnement		Centre-ville de Belfort $2500m \times 2500m$
<i>V-MBMM</i>	V_{min}, V_{max}	30km / h, 50km / h
	Durée feux	45s
	Trajectoire	Pas-à-pas
	Population candidate à la mobilité	100, 150, 200
	Tranche horaire	12h – 12h15
<i>V-PROPAG</i>	Taille des mailles	$5m \times 5m$
	Gain antenne	2dBi
	Hauteur antenne	1,5m
	Puissance d'émission	23dBm
	Sensibilité	-77dBm
	Fréquence	5,9GHz
d_{max}	500m	

Tableau 12 – Paramètres de simulation *V-MBMM* et *V-PROPAG*.

Le résultat majeur de cette analyse est la mise en évidence de l'impact des modèles de propagation radio sur les résultats de la simulation. En effet, les résultats obtenus diffèrent d'un modèle à l'autre et les performances peuvent complètement s'inverser comme c'est le cas de *DSR* qui, opérant avec le modèle *TRG*, présente les plus faibles taux de réception alors qu'avec *V-PROPAG*, qui est un modèle plus réaliste, il enregistre les meilleurs taux. Se baser ainsi sur des modèles de propagation simplistes conduit à des conclusions qui peuvent être complètement faussées. La Figure 38 représente les taux de réception de données obtenus avec les trois protocoles. Globalement, les protocoles opérant avec *TRG* ont de meilleures performances qu'avec *V-PROPAG* puisque *TRG* ignorent l'effet des obstacles. Avec *V-PROPAG*, la connectivité étant plus faible, les échecs de découverte de routes sont plus fréquents. *DSR* étant plus tolérant à ce problème, il enregistre de meilleurs résultats que *AODV*. En gardant dans la file les paquets de données pour lesquels la découverte de route a échoué, *DSR* offre plus de chance aux paquets d'être transmis contrairement à *AODV* qui supprime directement toutes les données en attente.

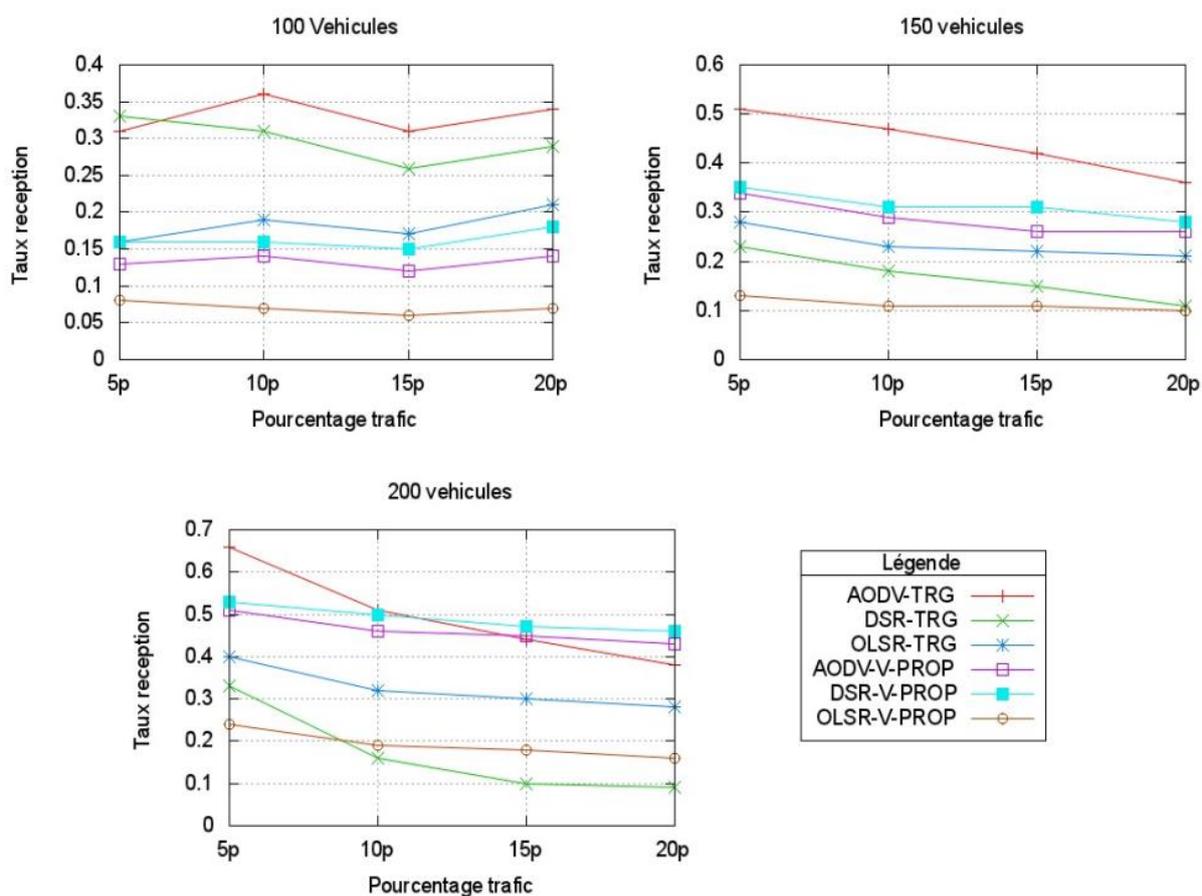


Figure 38 – Taux de réception de données – Critère à maximiser.

Le rendement des protocoles proactifs dépend essentiellement de la connectivité du réseau et de sa fréquence de variation. L'étude de la connectivité présentée dans la section 3.2.3 a montré que plus de 20% des liens entre voisins directs ont une durée inférieure à 5s. En envoyant des messages *HELLO* toutes les 2s, *OLSR* suppose qu'un lien dure au minimum 2s ce qui est dans la plupart des cas erroné. De plus, sachant que le voisinage distant, en termes de nombre de sauts, d'un nœud varie plus rapidement que son voisinage immédiat, les informations obtenues par chaque nœud à partir des messages *TC* deviennent très rapidement obsolètes. Les résultats montrent d'ailleurs que le nombre maximum de nœuds intermédiaires utilisés pour l'acheminement des données est de 3. Sur la Figure 39, nous pouvons observer que, pour toutes les densités de nœuds, le nombre de sauts dans *AODV* et *DSR*, obtenus avec le modèle *V-*

PROPAG, est approximativement le même. Avec le modèle *TRG*, le nombre de sauts avec *DSR* devient inférieur à celui de *AODV* dès que le pourcentage de nœuds source dépasse 10 ou que le nombre de véhicules est important. Le volume important du trafic de contrôle dans *DSR* empêche la découverte des routes à plusieurs sauts. Lorsque le modèle *V-PROPAG* est utilisé avec des densités de 150 et 200 véhicules, le nombre moyen de sauts dans les deux protocoles *AODV* et *DSR* est de 6. Malgré le fait que la connectivité soit plus faible comparé au modèle *TRG*, les deux protocoles tirent avantage du faible volume du trafic de contrôle qui libère le canal et permet la découverte des routes à plusieurs sauts.

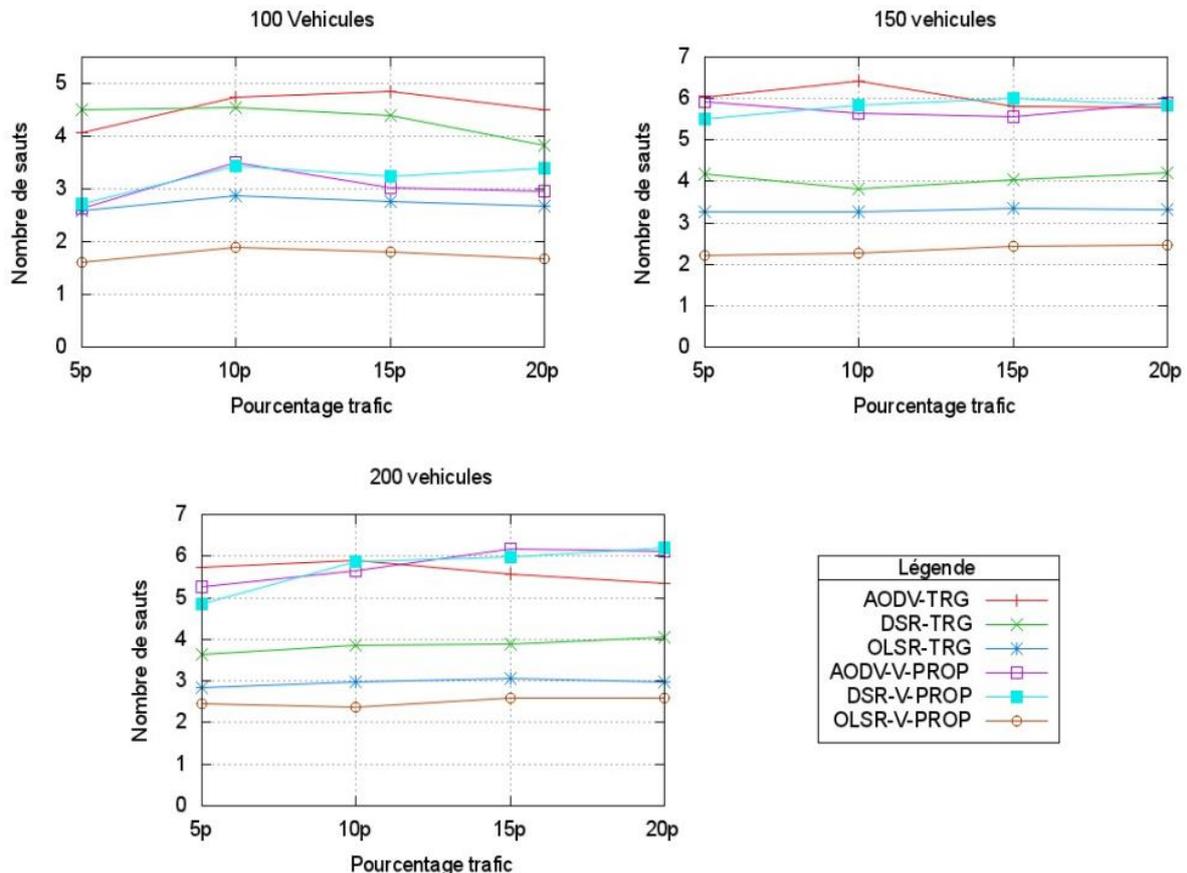


Figure 39 – Nombre moyen de sauts.

La Figure 40 représente le nombre de paquets de contrôle transmis et retransmis dans le réseau. Le trafic augmente avec l'augmentation de la densité puisque le nombre de sources de données augmente et le réseau bénéficie d'une meilleure connectivité. Avec une connectivité optimiste, le nombre moyen de paquets de contrôle augmente sensiblement avec *TRG* comparé à *V-PROPAG* notamment dans *DSR* ; le trafic de contrôle de *DSR* est nettement supérieur quel que soit le taux de trafic de données et ce à cause de la priorité donnée aux paquets de contrôle. Le taux de trafic de contrôle enregistré dans *AODV* avec le modèle *V-PROPAG* présente les meilleures performances, suivi de *DSR*, en particuliers pour des densités de 100 et 150 véhicules. Ceci s'explique par le fonctionnement des protocoles réactifs qui ne génèrent les paquets de contrôle qu'à la demande. La génération du trafic de contrôle dans *OLSR* étant indépendante du trafic de données, le nombre de paquets transmis est quasiment constant pour chaque densité ; la valeur du trafic croît à cause du nombre de nœuds qui augmente améliorant la connectivité du réseau. Pour répondre plus rapidement au changement de topologie, *OLSR* peut envoyer plus fréquemment les paquets *HELLO* et *TC*, cependant, ceci peut engendrer un trafic de contrôle très important qui surchargera le réseau et perturbera toutes les communications. En raison de la forte dynamique du réseau, il est évident que les protocoles proactifs ne peuvent pas être utilisés dans le cadre des *VANET*.

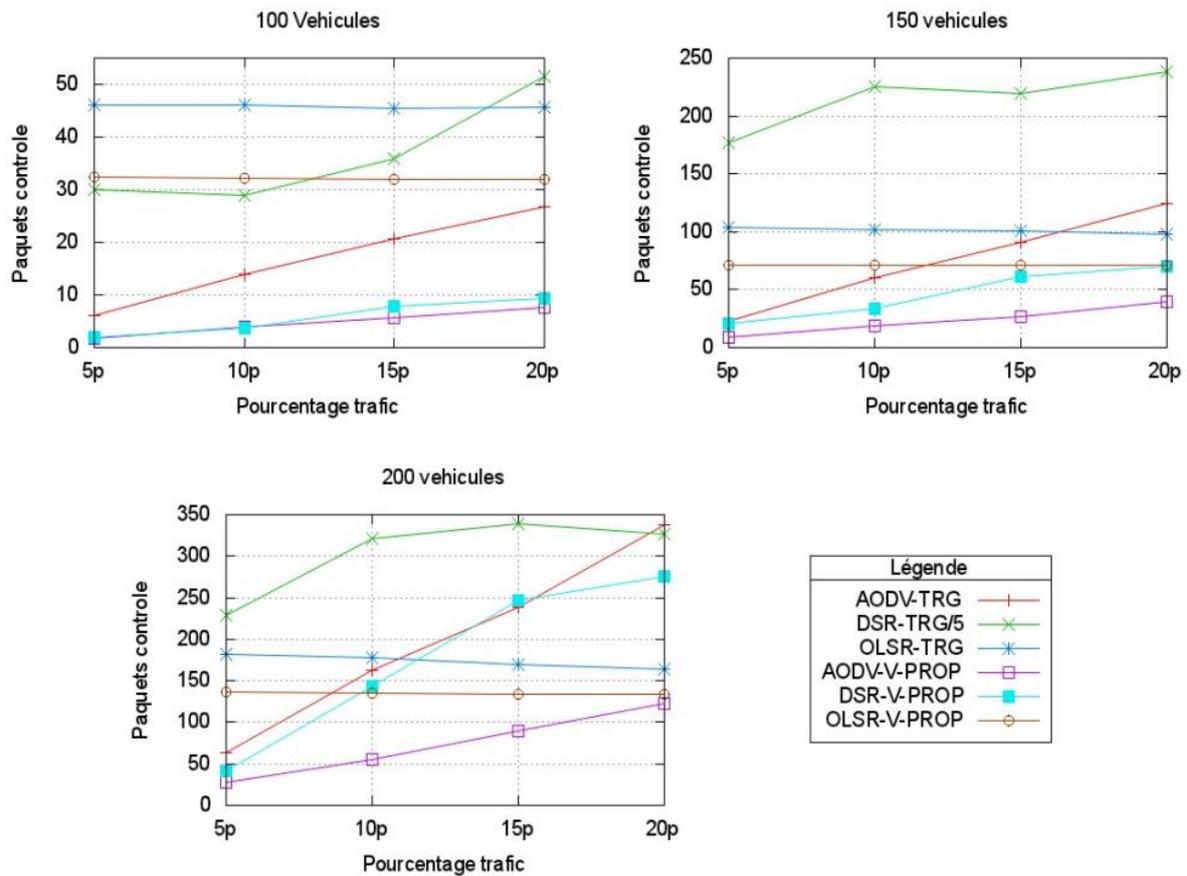


Figure 40 – Trafic de contrôle généré dans le réseau – Critère à minimiser.

Parmi les mécanismes utilisés par les protocoles de routage réactifs, le plus important est celui de la découverte de routes. Les résultats ont montré que le mécanisme de découverte de routes et la réaction du protocole à un échec de découverte de routes sont les facteurs prédominants des performances des protocoles réactifs, ajouté à cela la connectivité du réseau et sa fréquence de variation.

Dans le cas d'une faible connectivité, le réseau est partitionné en plusieurs petits groupes de nœuds isolés. La baisse de performances de *AODV* et *DSR* est due au manque de liens entre les nœuds qui empêche les communications multi-sauts. Une technique qui peut être utilisée par les protocoles pour l'acheminement des données est celle du *store-carry-forward* utilisée dans certains protocoles géographiques. Avec cette technique, le nœud garde à son niveau le paquet de données jusqu'à ce qu'il rencontre un autre nœud qui peut l'acheminer vers le destinataire. Cependant, ceci dépend totalement du type d'applications : est ce que les données transmises sont tolérantes aux délais ?

A moyenne et forte densité de nœuds, la connectivité est meilleure. Les résultats montrent que *DSR* présente les meilleurs taux de réception (cf. Figure 38). En évitant la suppression directe des paquets de données à la suite d'un échec de la procédure de découverte de route, *DSR* offre plus de probabilité aux données d'être envoyées avec un léger délai supplémentaire, comme illustré par les courbes de la Figure 41. Ce mécanisme est semblable à celui du *store-carry-forward* à l'exception que les données ne sont gardées au niveau des nœuds que pour un délai très limité. Les taux de réception enregistré avec *AODV* sont proches de ceux de *DSR* mais avec des délais de bout-en-bout et trafic de contrôle plus faibles. *AODV* tire profit du fait qu'il génère moins de paquets de contrôle que *DSR* pour découvrir plus rapidement les routes et transmettre plus de données.

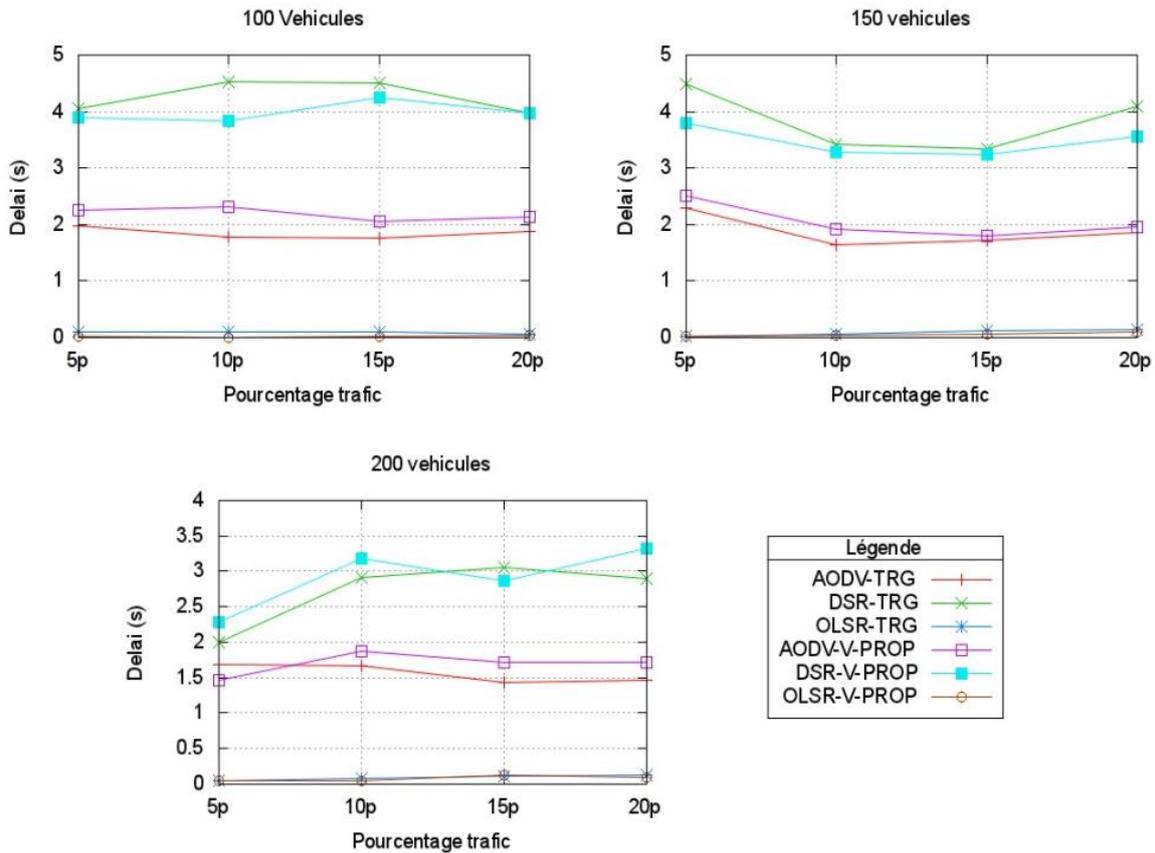


Figure 41 – Délai moyen de bout-en-bout – critère à minimiser.

Dans la conception des algorithmes de routage basés sur la topologie, le réseau est supposé suffisamment connecté pour permettre les communications de bout-en-bout entre tout couple de nœuds. Les protocoles ne prennent pas en compte l'un des problèmes majeurs des VANET qui est le partitionnement du réseau. L'utilisation d'un mécanisme similaire au *store-carry-forward* et la prise en compte d'informations supplémentaires sur l'état des liens et leur variation pourraient conduire à de meilleures performances.

3.4. Synthèse de la mobilité véhiculaire

La modélisation des VANET inclut deux aspects, protocolaire qui concerne les protocoles de communication qui interviennent dans les échanges de données et, comportementale qui modélise la dynamique des entités qui composent le réseau. Dans nos travaux, nous nous sommes focalisés sur ce second aspect et nous avons proposé un nouveau modèle de mobilité *V-MBMM* et un nouveau modèle de propagation radio *V-PROPAG* pour les réseaux véhiculaires.

- Le modèle *V-MBMM* est un modèle générique qui détermine le mouvement des véhicules à partir de données topographiques et socioéconomiques réelles concernant les caractéristiques des infrastructures ainsi que la répartition des individus dans l'environnement selon leur motif de déplacement et l'attractivité des lieux au regard de ces motifs. En s'appuyant sur ces données, le modèle définit des configurations réalistes du trafic aussi bien dans le domaine temporel que spatial ;
- Le modèle *V-PROPAG*, basé sur le modèle de propagation *ERCEG* défini pour les réseaux cellulaires, utilise des informations détaillées sur l'environnement pour prédire avec plus de précision la couverture radio des antennes embarquées dans les véhicules. Les données sur l'environnement sont discrétisées en mailles de taille identique. Elles sont ensuite classifiées individuellement en trois catégories de terrain selon leur niveau

d'obstruction. Les catégories sont déterminées à partir d'informations géographiques sur les caractéristiques et la densité des infrastructures présentes sur chaque maille.

Pour la validation et l'évaluation des deux modèles *V-MBMM* et *V-PROPAG*, nous avons simulé la mobilité et la propagation radio de véhicules dans un environnement urbain et suburbain de la *ville de Belfort* et de la Communauté d'Agglomération Belfortaine (*CAB*). Nous avons appliqué le modèle *V-MBMM* sur la *CAB*. Les résultats des expérimentations ont montré que le comportement des conducteurs tels que simulés par le modèle est très proche des habitudes et activités observées dans la vie quotidienne. Pour la validation et l'ajustement des paramètres et formules du modèle *V-PROPAG*, nous avons défini des environnements de simulation et analysé le comportement du modèle en faisant varier les caractéristiques de l'environnement. Les expérimentations réalisées ont montré qu'en tenant compte des principaux paramètres qui influencent la propagation des signaux, le modèle *V-PROPAG* représente avec plus de précision et d'exactitude la couverture radio des véhicules en environnements urbain et suburbain qu'avec les modèles théoriques fréquemment employés.

Deux objectifs peuvent être visés par le développement de simulateurs réseaux. D'une part l'analyse et l'identification des propriétés du réseau qui est une étape cruciale pour la définition des solutions les plus adéquates et les plus performantes ; et d'autre part l'évaluation et l'amélioration des solutions existantes et nouvelles. Ces deux points ont été traités en étudiant la connectivité radio dans les *VANET* et les performances des protocoles et mécanismes des protocoles de routage dans ces réseaux.

Les *VANET* se distinguent des autres réseaux par une forte mobilité des nœuds, une diversité spatio-temporelle de la densité des nœuds et le milieu de propagation obstrué défavorable à l'établissement des communications sans fil. Les conséquences directes de ces caractéristiques sont une connectivité intermittente, très volatile, causée par la mobilité des nœuds et la dégradation des signaux, la surcharge en communications du réseau dans les scénarios à forte densité de nœuds et le partitionnement du réseau dans le cas d'une faible densité de nœuds. L'étude de la connectivité radio a permis de mettre en évidence : une durée moyenne des liens radios assez faible (dans notre cas, 20% de liens radio ont une durée moyenne qui ne dépasse pas 5s), une grande variabilité spatiale et temporelle de la topologie du réseau, un degré de nœud très disparate et dépendant de la période et de la zone et un problème de partitionnement du réseau en groupes isolés de nœuds. L'ensemble de ces observations montre l'impact du choix du modèle de simulation.

Ces deux modèles ont été également utilisés en conjonction avec un simulateur de protocoles réseaux pour l'étude et l'analyse des performances des protocoles de routage les plus répandus dans la littérature : le protocole proactif *OLSR* et les protocoles réactifs *AODV* et *DSR*. L'étude a montré qu'une approche proactive n'est pas adaptée au routage dans les réseaux véhiculaires. Le réseau étant très dynamique et volatile, les informations sur la topologie, maintenues au niveau de chaque nœud, deviennent dans la plupart des cas obsolètes lors de l'envoi des données. Le rendement des protocoles réactifs est déterminé par le mécanisme utilisé pour la découverte des routes et la réaction des protocoles à un échec de découverte de route. Pour être efficace, un protocole réactif doit utiliser des mécanismes qui, d'une part, minimisent le surcout en trafic de contrôle tout en découvrant le plus de routes (cas de *AODV*), et d'autre part, tirent profit du changement de la topologie du réseau en saisissant toute opportunité qui se présente pour la transmission de données (cas de *DSR*). Nous avons montré que *AODV* et *DSR* sont compétitifs avec un avantage pour *DSR* à faible densité et pour *AODV* à forte densité.

Le travail sur la mobilité dans les réseaux véhiculaires a été réalisé dans le cadre d'une thèse en cotutelle avec l'Université de Tizi Ouzou en Algérie ; il comprend les contributions de Kahina AIT ALI, dans le cadre de sa thèse et une collaboration fructueuse avec Laurent Moalic, Alexandre Gondran, Chibli Joumaa, Sid Lamrous et Alexandre Caminada. Ces travaux ont tiré profit d'un projet d'étude sur la mobilité des individus dans le Territoire de Belfort. Les données

sur lesquelles est basé le modèle de mobilité sont fournies dans le cadre du projet *Territoire Mobile* réalisé à l'*UTBM* et labellisé par le *pôle Véhicule du futur*. Elles englobent des informations topographiques et socio-économiques concernant la mobilité des individus dans le territoire. Ces informations ont été collectées sur plusieurs jours par divers organismes. Les données utilisées dans *MBMM* proviennent de l'opérateur téléphonique *Orange Labs* concernant l'utilisation de la téléphonie mobile dans le Territoire de Belfort, de la *CAB* qui a fourni des données géographiques sur le territoire et du *SMTC* de *Belfort* qui a fourni des données de mobilité sur les transports en commun. Les principales publications sur le sujet sont : ICN'10 [10], WMNC'10 [9], VTC'11 [8], TSJ'13 [7], TVT'15 [6].

4. Optimisation en ligne dans les réseaux LTE

Les réseaux cellulaires numériques ont démarré en 1992 avec le *GSM* pour *Global System for Mobile Communications* qui correspond à la norme 2G. Pour la création de services de transmission de données, le standard 3G *UMTS* pour *Universal Mobile Telecommunications System* a été lancé en décembre 2002 en Norvège. Dans ce système une attention particulière a été portée à 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 *LTE* pour *Long Term Evolution* a été lancé pour la première fois en décembre 2009 simultanément au Japon (*NTT DoCoMo*) et en Suède (*TeliaSonera*) avec comme objectif de permettre d'obtenir un débit binaire théorique de 300Mbit/s en liaison descendante (downlink) pour une bande de 20MHz. Le standard *LTE-Advanced* offre jusqu'à 1Gbit/s en downlink avec des bandes de fréquences de 2x100MHz de largeur.

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. Dans le *GSM*, on a introduit plusieurs critères de décision analysés en même temps : la distance, le *BER* pour *Bit Error Rate* et la *QoS*. Pour l'*UMTS*, on a ajouté aux critères du *GSM* des critères inter-systèmes entre le *GSM* et l'*UMTS* qui permettent de faire une gestion inter-couche. 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. Par conséquent, les événements 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 ont inspiré les futures normes. La logique floue est une solution qui permet de prendre en compte simultanément plusieurs entrées pour proposer une décision. Dans certains travaux, des techniques de logique floue sont appliquées au *handover* [63, 62, 93]. 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. Le travail se base sur l'analyse de la distribution spatiale du trafic pour optimiser automatiquement les paramètres de plusieurs stations du réseau radio ; l'analyse de trafic est faite heure par heure [134]. Des cartes auto-organisatrices de *Kohonen* et un algorithme de *k-means* sont utilisés pour le paramétrage des réseaux 3G ; le nombre de paramètres est élevé, les cellules sont regroupées par comportement pour leur trouver un paramétrage commun [109, 113, 119]. Dès 2006, Ericsson fait des propositions sur le fonctionnement de réseaux à décision décentralisée sans parler précisément de 4G [36]. 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. Les techniques de modélisation statistique de comportement et d'apprentissage sont également

utilisées pour la gestion des ressources radio (*RRM*). Des études portent sur le monitoring du *handover* en 3G en vue de *LTE* pour établir un lien entre une base de données d'indicateurs remontés du réseau et les paramètres *RRM* correspondants [13, 171].

La norme 3G/UMTS a marqué l'avènement du haut débit mobile pour proposer de premières applications multimédia en mobilité. Depuis, le marché de la téléphonie mobile continue de croître, 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 par l'organisme de standardisation 3GPP (*Third Generation Partnership Project*). Le 3GPP a développé le standard *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. 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 qui sont très élevés [68, 69, 138, 175]. Les réseaux *LTE* fourniront aussi la capacité de supporter une explosion dans la demande de la connectivité d'une nouvelle génération de dispositifs grand public adaptés aux nouvelles applications mobiles.

En outre, pour rendre le processus de conception du réseau plus efficace au niveau des délais, des fonctionnalités dites *SON* pour *Self-Organizing Networks* ont été ajoutées au sein de l'architecture *LTE* afin d'intégrer des mécanismes d'optimisations automatisées. Les *SON* correspondent à une technologie permettant la gestion automatique du système tout en ayant pour objectif principal de réduire les coûts d'investissement du capital (*CAPEX*) ainsi que les dépenses d'exploitation (*OPEX*) et aussi, d'améliorer la gestion des tâches tout en réduisant la complexité du système. L'intérêt de ces systèmes automatisés est le fait qu'ils réagissent et s'adaptent aux différents changements dans leur environnement (flexibilité, robustesse, évolutivité...) sans aucune intervention externe ni coordination centrale, ce sont des systèmes dits distribués et non centralisés.

La Figure 42 illustre le cycle complet de la self-organisation introduite dans les réseaux d'accès radio [175]. Ce cycle montre trois étapes importantes : (i) l'étape de *self configuration* consiste à régler les paramètres de façon autonome selon le mode *plug & play*, le but principal de cette phase est de permettre une configuration automatisée de tous les paramètres d'une station de base (tilt, azimut...) [69] (ii) 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 [69, 175]. Ceci permettra entre autres d'évaluer les performances du réseau vis-à-vis de la demande utilisateur comme le trafic et la mobilité. Durant cette phase, 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 *QoS* (iii) la phase de *self-healing* durant laquelle 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. D'une certaine manière, la *self-configuration* fonctionne en mode pré-opérationnel et la *self-optimisation* intervient en mode opérationnel [111]. La *self-optimisation* a pour but de contrôler les performances du réseau en fonctionnement. Après 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.

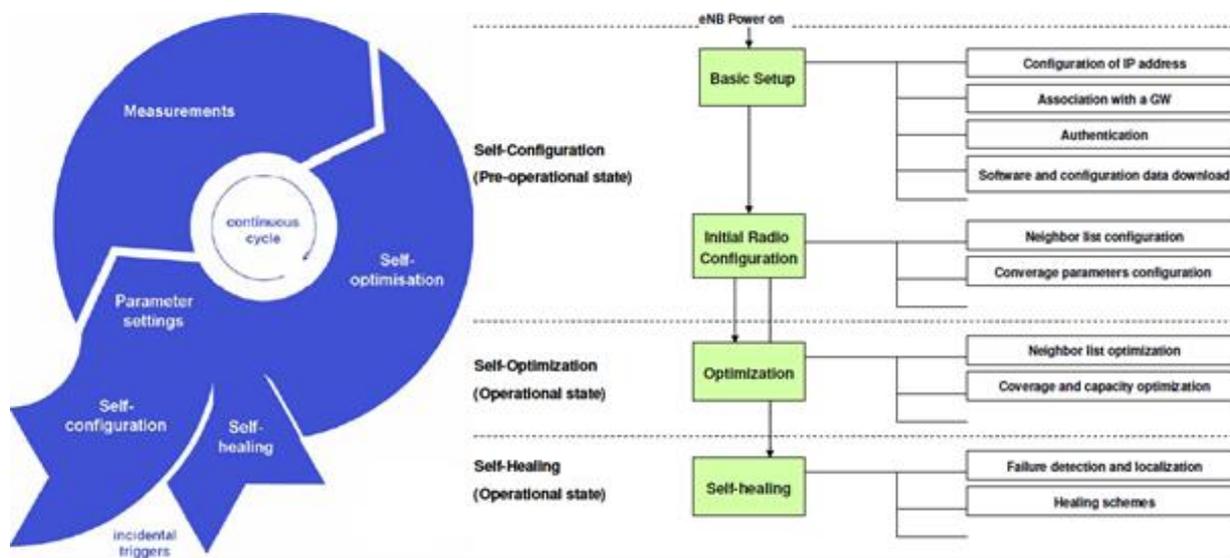


Figure 42 – Cycle de la Self-Organisation dans les réseaux radio.

Plusieurs outils de planification automatique de type ACP sont utilisés 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 *QoS*... ils s'appliquent en général sur des visions abstraites du fonctionnement du réseau 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. Le problème est alors de prendre de 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. Des nombreux travaux d'optimisation robuste ont porté sur des problèmes de télécommunications [108, 117, 140].

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 est placé dans le contexte de l'optimisation robuste. L'*optimisation robuste* tente d'apporter des éléments de réponse sur le *comment optimiser*, alors que l'*optimisation en ligne* porte plutôt sur le *quoi optimiser*. Nous proposons une architecture globale qui intègre les modèles et qui est pilotée 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 la suite, nous commençons par formuler le problème d'optimisation en ligne. Ensuite, nous décrivons les méthodes algorithmiques pour résoudre le problème. Enfin, nous étudions

différentes stratégies d'optimisation à mettre en place pour les *SON*. Cette partie se termine par synthèse de nos travaux sur l'optimisation en ligne des réseaux *LTE*.

4.1. Formulation du problème d'optimisation en ligne

La formalisation du problème 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. Il s'agit alors de définir le modèle mathématique du problème à optimiser après le découpage du processus global. 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.), nous proposons 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).

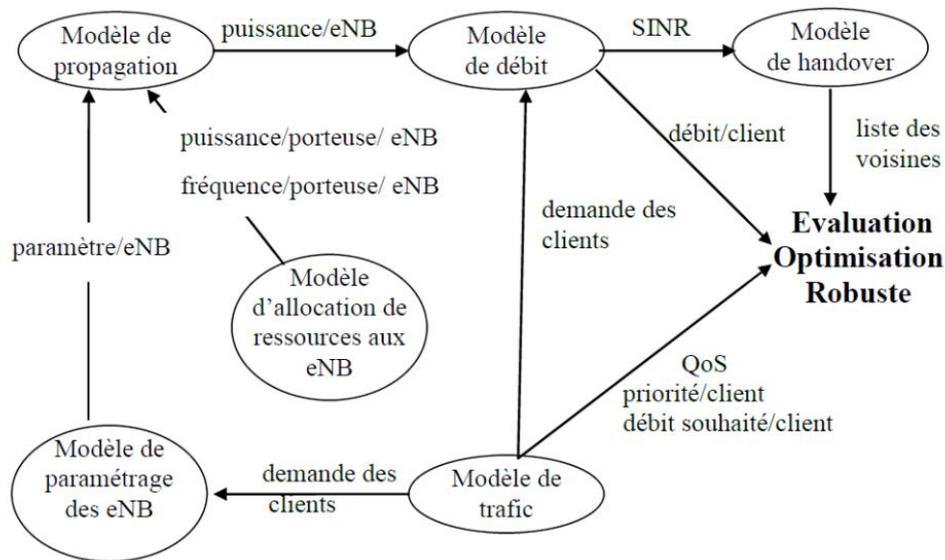


Figure 43 – Décomposition fonctionnelle pour l'optimisation d'un réseau *LTE*.

La décomposition fonctionnelle du processus est présente à la Figure 43. 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*.

4.1.1. Le modèle de trafic

Le modèle de trafic ou modèle de demande décrit l'expression de la demande en charge dans le réseau, il 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. Le modèle de trafic défini est un modèle discret, la zone géographique couverte par le réseau est discrétisée en mailles régulières carrées de $25m^2$ appelée *point test*, noté *TP*. A chaque point test est associée une demande en volume de trafic par service.

4.1.2. Le modèle de paramétrage des stations de base

Le modèle de paramétrage des stations de base définit les différents paramètres antennaires sur lesquels on agit. Le problème de placement des stations de base n'est pas abordé dans cette étude. Les positions des stations de base ou *eNB* pour *evolved Node Base* sont considérées fixes dans le réseau. De même, le type d'antenne installée 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 seules variables de décision de notre problème sont la puissance d'émission, les tilts électriques et mécaniques et l'allocation des fréquences.

4.1.3. Le modèle d'allocation de ressources radio

Le modèle d'allocation des ressources des réseaux *OFDMA* décrit la façon dont les porteuses sont allouées aux clients et comment est réalisée l'affectation des puissances d'émission des porteuses. Dans notre étude, on considère uniquement le cas de transmission descendante, de l'*eNB* vers la station mobile ou *UE* pour *User Equipment*. L'allocation de fréquence consiste alors à allouer à chaque *eNB* un sous-canal appelé porteuse. Les schémas d'interférences sont illustrés à l'aide d'un modèle théorique à sept cellules hexagonales comme le montre la Figure 44. 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 44(a) montre le schéma de réutilisation des fréquences $1 \times 3 \times 1$, où les trois secteurs de la même cellule utilisent toute la bande passante (*motif 1*). La Figure 44(b) montre le schéma $1 \times 3 \times 3$ (*motif 3*), les trois secteurs utilisent un sous-ensemble de fréquences de telle sorte qu'il n'y ait pas d'interférence 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 $1 \times 3 \times 3$ a besoin d'un plan de fréquences, mais devraient éviter les interférences lorsque la charge du réseau devient trop élevée pour appliquer le schéma $1 \times 3 \times 1$.

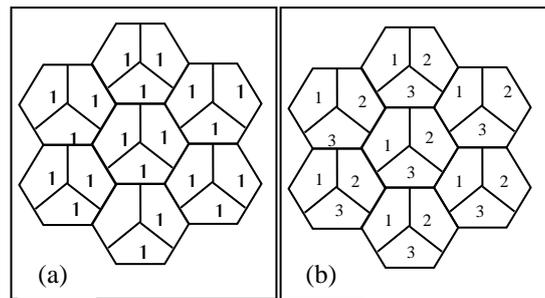


Figure 44 – Modèle de cellules hexagonales a) motif $1 \times 3 \times 1$ b) motif $1 \times 3 \times 3$.

Nous avons comparé les deux motifs de réutilisation $1 \times 3 \times 1$ et $1 \times 3 \times 3$. 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 $0,9 \text{ dB}$. Le nombre de clients non couverts est plus important en $1 \times 3 \times 1$ qu'en $1 \times 3 \times 3$ pour l'ensemble des scénarios de trafic, la différence s'accroît avec l'augmentation de la demande. L'utilisation de la totalité de la bande passante dans le modèle $1 \times 3 \times 1$ 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*.

4.1.4. Le modèle de propagation

Le modèle de propagation permet d'estimer la propagation des ondes radio dans la zone de couverture. Le schéma de la Figure 45 présente un modèle de propagation qui prend en entrée un ensemble de paramètres qui peuvent influencer sur la qualité de la puissance reçue par le récepteur. Le modèle de propagation de Hata-Okumura [89] est un modèle adapté pour des cellules de large couverture. Ce modèle est très utilisé dans la littérature et a donné de bon résultat dans plusieurs outils de simulation pour l'estimation de la puissance reçue par le point test t provenant de l'*eNB* b ; c'est ce modèle que nous avons adopté pour le calcul de propagation.

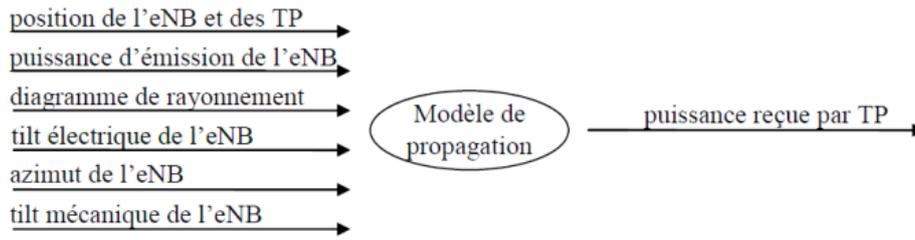


Figure 45 – *Modèle de propagation avec les paramètres de l'eNB.*

4.1.5. Le modèle de débit

Le modèle de débit traduit les puissances reçues au niveau des *UE* en termes de services offert par le réseau et définit les règles d'association d'un *UE* à une *eNB*. Pour déterminer le débit fourni par l'*eNB* à un *point test*, il faut prendre en compte le *SINR* et le taux d'occupation de la cellule. Dans notre étude, nous considérons le modèle d'association au *meilleur SINR*. Le *SINR* 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. Des scénarios de trafic sont utilisés pour représenter la répartition et l'évolution de la charge sur le réseau. Nous nous plaçons dans le cas d'un réseau en régime saturé c'est-à-dire que tous les *UE* présents sont actifs. Le *point test t* est dit couvert dans le scénario de trafic *s* si le meilleur *SINR* reçu de la station serveur *b* est supérieur au *SINR* requis pour pouvoir établir une communication. Nous donnons ci-dessous la formule de calcul du *SINR* reçu par le point test *t* provenant de l'*eNB b* dans le scénario de trafic *s*.

$$\gamma_{b,t,n,s} = \frac{p_{b,t}^R f_{b,n}}{\sum_{b' \neq b, f_{b',n} = f_{b',n}} p_{b',t}^R f_{b',n} \delta_{b,n,s} \delta_{b',n,s} + n_0 w} \quad (28)$$

où :

- $p_{b,t}^R$ et $p_{b',t}^R$ sont les puissances reçues par le point test *t* provenant de l'*eNB b* et de l'*eNB b'*, l'estimation des puissances est calculée par le modèle Hata ;
- $f_{b,n}$ et $f_{b',n}$ sont les variables d'allocation de la porteuse *n* à l'*eNB* serveur *b* et à l'*eNB* interférente *b'* ;
- $\delta_{b,n,s}$ et $\delta_{b',n,s}$ sont les taux d'occupation de la porteuse *n* dans le scénario de trafic *s* pour l'*eNB b* et l'*eNB b'*. Il s'agit d'un indicateur de performance pour mesurer le taux d'occupation des secteurs, *le facteur de charge*, et représente le ratio entre la bande passante utilisée et la bande passante maximale disponible ;
- n_0 est le bruit thermique ;
- w est la largeur de la porteuse en *MHz*.

4.1.6. Le modèle de handover

Le *handover* est défini comme étant l'ensemble des opérations permettant à une station mobile de changer de cellule sans interruption de service. Le modèle de *handover* explique la définition d'une cellule voisine. Une voisine est une cellule susceptible d'accueillir un mobile en *handover* entrant vers elle. Tout comme en *GSM* et en *UMTS*, *LTE* définit une liste de voisines pour chaque station de basse *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 [16]. 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.

4.2.Méthodes d'optimisation

Après avoir introduit les différents modèles mathématiques et les paramètres à optimiser au niveau du réseau, nous allons maintenant présenter les approches algorithmiques utilisées pour le problème d'optimisation en ligne. 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, qui sont 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. Dans le cas qui nous intéresse, il y a principalement deux incertitudes, la demande en trafic et la propagation du signal. Nous avons considéré l'incertitude sur la demande en trafic et son impact sur la qualité radio.

4.2.1. Préoccupation de robustesse

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 [48, 54]. 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 [151] : *c'est l'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 [146], l'optimisation robuste [40], l'optimisation sous contraintes probabilistes [48], l'optimisation floue [Luhandjula-1996], l'analyse de sensibilité [154] ... Cependant il n'y a pas de méthodologies qui se soient imposées pour définir l'approche robuste. Lorsque l'on se préoccupe de robustesse dans un problème de self-optimisation dans les réseaux radio, il est nécessaire d'identifier les points de fragilité de la modélisation. En effet, les données du problème sont souvent incertaines et proviennent essentiellement de prévision plus ou moins fiables : prévisions sur la demande de trafic, prévisions sur les puissances des signaux reçus, prévisions sur le coût du matériel, d'installation et de maintenance... Les données incertaines peuvent être représentées dans le modèle par un intervalle de valeurs possibles ou par une distribution de probabilité ou un ensemble de scénarios caractérisant les variations de données [108, 110, 117, 121]. Les données incertaines peuvent être classées en trois catégories :

- La *demande* : 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 tels que le nombre de connexions, le type de connexion (voix, données), la capacité demandée, la 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 constitue une bonne approche.

- 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. Des intervalles ou des distributions de probabilité semblent assez réalistes pour représenter ces effets aléatoires.
- Les *coûts* : le 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.

Il y a plusieurs axes de lecture d'une approche robuste : un axe données-modèles-traitements pour lequel les données du problème sont le principal point de fragilité du système, un axe scénarios-intervalles-distributions dans lequel l'incertitude des données est modélisée à l'aide de scénarios, d'intervalles de valeurs ou de distributions de probabilités et un axe objectifs-contraintes où 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.

Après l'étude de la littérature, il apparaît qu'il n'y a pas de méthodologie qui s'impose en optimisation avec données incertaines. Dans le contexte de l'optimisation en ligne de réseaux radio, la mise en place d'une approche robuste s'avère nécessaire car il faut trouver un compromis entre une solution optimale et une solution robuste. Pour évaluer la robustesse d'une solution, l'analyse de sensibilité apparaît comme un outil primordial. L'analyse de sensibilité étudie la stabilité de la qualité d'une solution lorsque l'on modifie les données d'entrée du problème [155]. 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 (analyse quantitative [156]). En général un ensemble de mesures de sensibilité est défini pour évaluer a posteriori la ou les solutions. Enfin, l'utilisation de scénarios est la solution retenue pour modéliser les incertitudes des données.

Dans les travaux de N. Tabia [161], nous avons considéré pour l'optimisation trois paramètres de l'antenne : la fréquence d'émission, l'inclinaison verticale de l'antenne (le tilt) et la puissance d'émission qui sont nos variables de décision. 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. Nous avons considéré deux fonctions objectif 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 sont comparées pour montrer l'intérêt de l'optimisation robuste pour le problème considéré.

Soit :

$n_{0,t}^C$ est le nombre d'*UE* non couverts dans le scénario s ;

Une fonction non robuste :

$$n_{0,t}^C = \sum_{t \in T_0^C} n_{t,s}^C \quad (29)$$

où $n_{t,s}^C$ est le nombre d'UE non couverts au point test t pour le scénario s

Une fonction robuste :

$$f^{ROB} = \sum_{s \in S} n_{0,s}^C \quad (30)$$

où f^{ROB} est la somme des UE non couverts sur tous les scénarios d'entrée

4.2.2. Hypothèses sur le réseau

Le réseau considéré pour cette étude est le réseau *Orange* sur le *Territoire de Belfort*. La carte de la zone est montrée sur la Figure 46, c'est une zone de $40\text{km} \times 20\text{km}$ avec une population d'environ 200 000 personnes. Pour les calculs de couverture, d'interférences et de charge, la zone est maillée en grille régulière. Chaque maille de 25×25 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 46 – Couverture par antenne dans la zone de service.

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 47 montre une courbe d'évolution du trafic par quart d'heure entre 6h et $23\text{h}45$, soit 72 créneaux horaires. La courbe illustre en particulier trois scénarios choisis à différents moments de la journée : un scénario s_1 de faible trafic à 8h du

matin avec 482 *clients*, un scénario s_2 de trafic moyen à 15h avec 1019 *clients* et un scénario s_3 de trafic assez important à 18h avec 1471 *clients*. On considère que tous les utilisateurs accèdent au réseau au même temps (régime saturé).

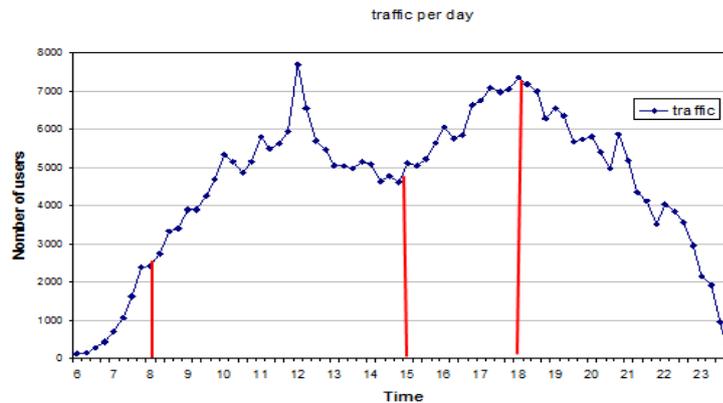


Figure 47 – Exemple d'évolution du trafic au cours d'une journée.

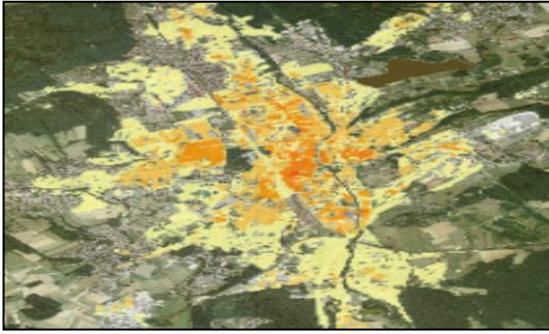
Les Figures 48(a), 48(b) et 48(c) illustrent trois distributions de trafic sur le territoire. Elles illustrent respectivement une densité de trafic faible (à 8h), une densité de trafic moyen (à 15h) et une densité de trafic élevé (à 18h). Le trafic est représenté par un dégradé de couleurs, de jaune à rouge pour passer du trafic faible au trafic élevé.



a - Densité de trafic à 8h.



b - Densité de trafic à 15h.



c – Densité de trafic à 18h.

Figure 48 – Distributions de trafic d'une journée.

Les principaux paramètres que nous avons utilisés dans les expérimentations sont ceux proposés par le 3GPP pour LTE, comme indiqué dans le Tableau 13.

Paramètres	Valeurs
Réseau	36 sites and 88 secteurs
Fréquence	1800 Mhz
Bande passante	20 Mhz
Motif	1 et 3
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	En proportion d'un GSM/UMTS existant

Tableau 13 – Paramètres du réseau LTE sur le lien descendant.

4.2.3. Méthodes d'optimisation des paramètres du réseau

Rappelons que l'objectif n'est pas de trouver la meilleure solution mais de minimiser le nombre d'UE en outage. Dans un premier temps, nous avons utilisé un *algorithme glouton* capable de trouver rapidement une bonne solution. L'*algorithme glouton* part d'une solution initiale et réduit itérativement le nombre d'UE non couverts en cherchant à chaque étape une amélioration locale dans le voisinage de la solution courante. L'algorithme est exécuté plusieurs fois avec des conditions variables pour chaque paramètre étudié : l'allocation des fréquences, des tilts et des puissances d'émission. Les paramètres ont été testés séparément pour voir l'impact de chacun sur la couverture globale du réseau. Les scénarios de trafic retenus pour ce travail sont $s_1 = 8h$, $s_2 = 15h$ et $s_3 = 18h$ étant donnée leur distribution différente. Ils ont été optimisés séparément sans la fonction robuste (Equation 29) ou simultanément avec la fonction robuste (Equation 30). Les résultats obtenus confirment que l'optimisation robuste peut améliorer la couverture du réseau. Sur l'ensemble des tests sur le réseau, l'optimisation robuste donne toujours les meilleures valeurs de la fonction objectif quel que soit le paramètre à optimiser. En

particulier, 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 . L'optimisation robuste émerge comme une méthode alternative efficace pour traiter notre problème où des données incertaines sont modélisées par un ensemble de scénarios.

Nous avons utilisé un algorithme glouton qui a permis de montrer l'intérêt de l'optimisation robuste, cependant, il ne donne aucune garantie sur la qualité des solutions trouvées à l'issue de l'exécution. Par la suite, nous avons mis en œuvre un algorithme de recherche Tabou qui propose des solutions non optimales mais dont le potentiel de trouver rapidement des solutions de qualité a été prouvé sur plusieurs problèmes combinatoires difficiles. La méthode Tabou a été utilisée pour résoudre le problème d'allocation de fréquences puisque ce paramètre est celui qui a le plus fort impact sur la qualité du réseau basé sur le calcul du *SINR* et donc sur la couverture. Nous avons mis en œuvre trois variantes de la méthode Tabou : un algorithme *Tabou Simple (TS)*, un algorithme *Tabou dégradé Dernier Voisin (TDV)* et un algorithme *Tabou dégradé Meilleur Voisin (TMV)*.

L'algorithme *TS* part d'une solution initiale (réseau initial), explore un site s choisi aléatoirement, énumère toutes les configurations possibles des fréquences, retient la meilleure combinaison, met le site s dans la liste Tabou, calcule les 5 meilleurs voisins du site (les plus proches géographiquement), et pour chaque site, pour chaque configuration vérifie laquelle améliore la fonction objectif robuste. Si aucun site parmi les 5 explorés n'apporte d'amélioration; *TS* choisit aléatoirement un site non tabou dans le voisinage de s . L'algorithme *TDV* présente une variante de *TS* pour le choix de site dans le voisinage de s . Si aucun site parmi les 5 voisins explorés n'apporte d'amélioration, *TDV* retient le 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 *TS*, 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 visités, ni parmi les sites tabous c'est-à-dire interdits à l'exploration. L'algorithme *TMV* a le même principe que l'algorithme *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 fonction objectif.

En termes de performances, nous avons comparé les méthodes *TS*, *TDV* et *TMV* avec une Descente Simple (*DS*). Les méthodes *TS* et *TMV* donnent de meilleurs résultats par rapport aux méthodes *DS* et *TDV*. Les méthodes *TS* et *TMV* convergent rapidement vers des solutions de même qualité en faisant moins d'itérations, en parcourant moins de sites et en modifiant moins de sites dans la solution finale. 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. La méthode *TDV* ne présente pas d'avantage particulier ni en termes de rapidité ni en termes de sites modifiés. Ce qui 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 départager le niveau de performance des deux méthodes *TS* et *TMV*, des expérimentations complémentaires ont été réalisées dont les résultats pour **5 exécutions** sous les mêmes conditions de départ sont illustrés par les Figures 49 et 50. A noter que les fréquences initiales sont aléatoires avec une racine (solution initiale) différente à chaque fois et sont 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.

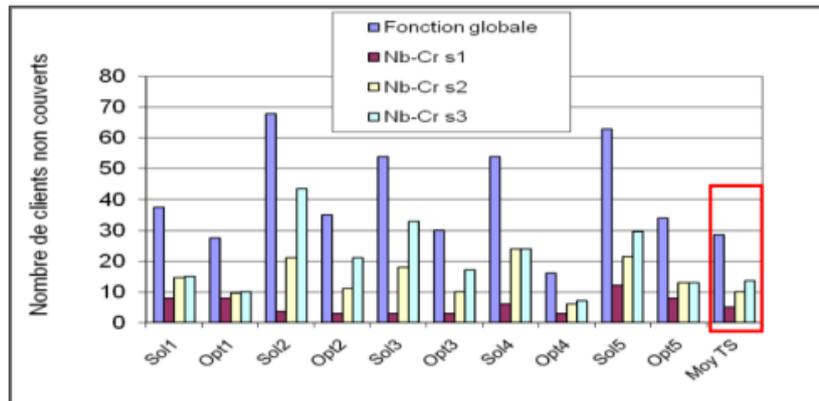


Figure 49 – *TS*, fréquences de départ aléatoire, plusieurs solutions initiales.

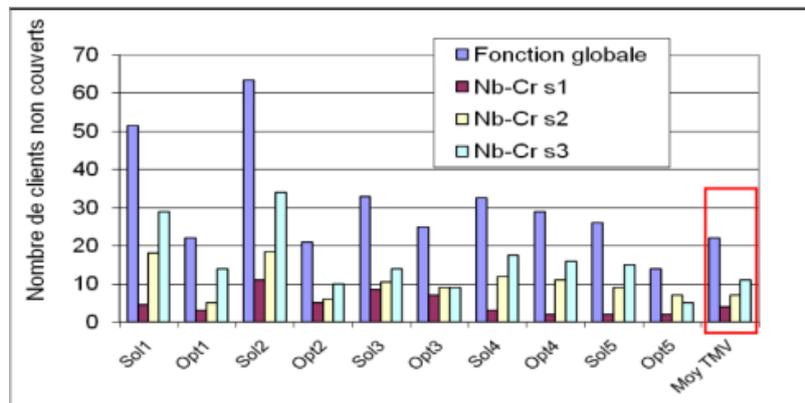


Figure 50 – *TMV*, fréquences de départ aléatoire, plusieurs solutions initiales.

4.2.4. Evaluation de l'optimisation avec robustesse

Les dernières expérimentations que nous avons menées entre *TS* et *TMV* tentent d'établir un lien entre les indicateurs du réseau et les algorithmes d'optimisation des performances du réseau. Jusqu'alors les algorithmes étaient appliqués de manière aléatoire sur les antennes du réseau ; 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. 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. L'étape d'analyse de données a été réalisée sur des données de taux de coupures sur handover, remontées du réseau *GSM/UMTS* et représentées par une matrice de couples stations-créneau. Des méthodes d'extraction de caractéristiques ont été appliquées et ont permis de sélectionner des couples critiques pour l'optimisation. La Figure 51 correspond à la sélection basée sur une méthode de sélection des pics d'appels rejetés sur toutes les stations sur l'ensemble 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 doivent être optimisés dans le cadre des SON. Nous avons utilisé les résultats de cette méthode de sélection pour comparer les performances de l'optimisation *TS* et *TMV* dans un processus où le choix des stations à optimiser est guidé par cette sélection. 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 la méthode de sélection, illustrés en Figure 51 sont :

Créneaux critiques (7) : 10h30, 11h30, 12h45, 17h00, 18h00, 18h30, 18h45.

Sites critiques (11) : 8, 12, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 27, 30.

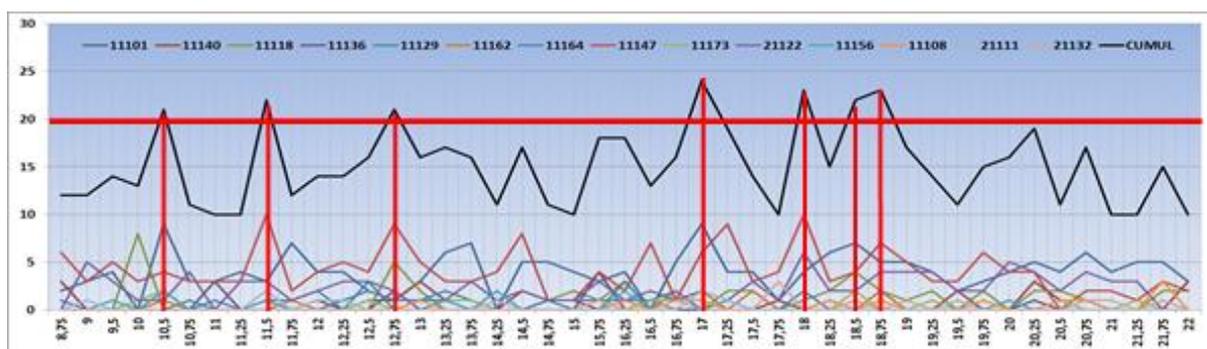


Figure 51 – Méthode des pics pour la sélection des couples stations-créneaux critiques.

L'évaluation des solutions fournies par *TS* montrent que l'optimisation apporte des améliorations sur tous les créneaux critiques (globalement de 55%) et des améliorations sur les la plupart des autres créneaux non critiques (globalement de 29%). La méthode *TMV* apporte également des améliorations sur tous les créneaux critiques (globalement de 64%) et des améliorations sur les autres créneaux non critiques (globalement de 53%) sans en dégrader aucun. 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. Pour tenter de répondre à cette question, nous avons comparé 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)

4.3.Stratégies d'auto-optimisation des SON

Dans cette dernière partie, nous avons utilisé exclusivement la méthode *TMV* qui a montré son efficacité sur l'ensemble des expérimentations précédentes. Il s'agit maintenant d'identifier une méthode de pilotage de l'optimisation des SON. Etant donné les résultats d'analyse sur les créneaux horaires et les stations critiques du fonctionnement du réseau, la question qui se pose est la suivante : faut-il réaliser une optimisation journalière unique comme fait précédemment, ou faut-il procéder par étape en optimisant le réseau plusieurs fois dans une journée ? La première hypothèse est plus longue à calculer mais coûte moins cher en coût d'exploitation du réseau. Dans la deuxième hypothèse, 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 : une optimisation robuste basée sur les pics de l'ensemble de la journée (un seul réseau produit pour tous les pics), une optimisation non robuste (séquentielle) basée sur les pics de l'ensemble de la journée (un réseau produit par pic), une 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), une 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).

Les créneaux retenus pour l'optimisation basée sur les pics sont ceux retenus dans la section précédente. Les créneaux retenus pour l'optimisation basée sur la dominance au sens de Pareto sont obtenus de manière analytique. La méthode de Pareto-dominance que nous avons retenue utilise les 14 stations ayant un nombre de rejets cumulés sur une journée supérieur ou égal à 10, celles 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 pour les stations prises deux-à-deux. Sur chaque plan ainsi créé, on peut alors observer les créneaux qui dominent les autres, et combien ils en dominent au sens de Pareto, pour le couple de stations considérées.

Ce critère nous paraît 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, puis les classer par ordre d'importance sur le critère de la dominance. 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 ont été retenus, pour chacun, le Tableau 14 indique le nombre cumulé de créneaux de leur période qu'il domine. Les créneaux critiques sont classés par ordre décroissant du nombre de créneaux qu'ils dominent. 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
# 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
# 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
# créneaux dominés par ce créneau sur l'ensemble des plans	77	68	61	60	55	51

Tableau 14 – Dominance des créneaux critiques sur les 3 périodes retenues.

4.3.1. Optimisation robuste des pics sur la journée

Nous analysons les résultats de quatre exécutions de *TMV* avec des racines (solutions initiales) distinctes, résumés dans le Tableau 15. Pour rappel, le paramètre d'optimisation est l'affectation des fréquences, avec comme objectif de minimiser le nombre d'*UE* non couverts. Les fréquences de la solution initiale sont toujours fixées de manière aléatoire et la racine de chaque exécution est aussi aléatoire. On remarque 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 initiales 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). Malgré cette variabilité, l'optimisation robuste apporte toujours un gain sur le nombre de clients non couverts pour les créneaux critiques, de 20% à 64% (44% en moyenne). En regardant la nature des modifications du réseau, 6 sites critiques modifiés sont communs aux 4 exécutions (8, 18, 23, 25, 26, 30), 3 sites apparaissent 3 fois (19, 24, 27), 1 site apparaît 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*.

Créneaux critiques	Sol Init1	TMV1	Sol Init2	TMV2	Sol Init3	TMV3	Sol Init4	TMV4	Moyenne	
									Init	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%
# sites modifiés		20		18		17		18		18,3
dont critiques		8		9		9		9		
Temps		7h		7h		7h		6h26		6h36

Tableau 15 – Optimisation robuste des pics sur la journée – Evaluation des créneaux critiques.

Le Tableau 16 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.

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

Tableau 16 – Optimisation robuste des pics sur la journée – Evaluation sur l'ensemble des créneaux de la journée.

Le graphique en Figure 52 montrent l'évaluation complète de la solution initiale et de la solution optimisée par *TMV* pour l'exécution quatre sur l'ensemble des créneaux de trafic. On fait ici l'hypothèse que, à défaut de modèle de prévision de trafic, le plan de fréquences robuste est appliqué sur l'ensemble des créneaux comme si ce trafic correspondait à la journée à optimiser. Le gain sur l'ensemble des créneaux est de 31% (33% pour les créneaux critiques). Sur 72 créneaux, 90% d'entre eux sont 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).

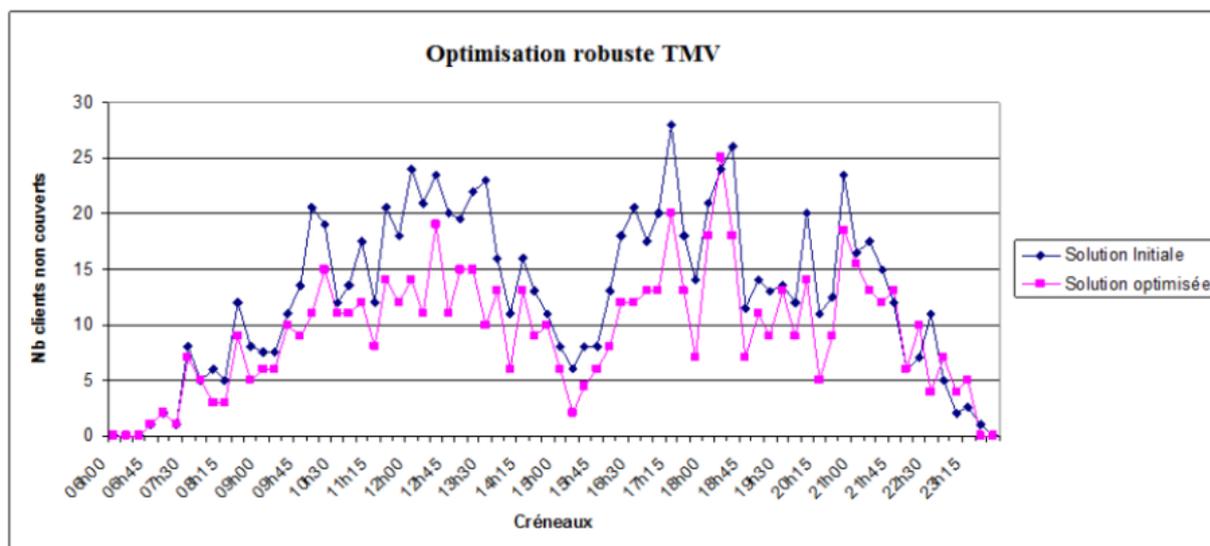


Figure 52 - Optimisation robuste des pics sur la journée par Tabou *TMV4* - Evaluation de tous les créneaux.

4.3.2. Optimisation non robuste des pics sur la journée

L'optimisation non robuste, 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^{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^{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.

Créneaux critiques	Sol. init	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 Init									41%
# sites modifiés		8	4	6	6	8	4	7	43
dont critiques		4	1	3	2	3	0	2	15

Tableau 17 – Optimisation séquentielle des pics sur la journée – Evaluation des créneaux critiques.

Le Tableau 17 montre les résultats sur une exécution (7 optimisations en séquence). Chaque colonne, notée $TMV S_1$ à $TMV S_7$, correspond à l'application de TMV sur le créneau correspondant. Une fois l'optimisation faite, dans chaque colonne est indiqué le nombre de clients non couverts pour le créneau courant et les créneaux suivants (sauf pour $TMV S_7$) avec le plan de fréquences qui vient d'être généré. Par exemple, en colonne $TMV S_3$, il y a 8 clients non couverts pour le créneau 3, 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), soit un gain global de 41%. Nous remarquons que l'optimisation du 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 (en rouge dans le tableau). Pourtant du créneau 4 au créneau 6, l'algorithme modifie 12 sites, l'impact sur la mise à jour du réseau est donc important. Il est à noter que le même site peut avoir été modifié sur chaque période, il est donc compté plusieurs fois ce qui implique un nombre total de modifications supérieur à 36 qui est le nombre de sites. Nous identifions 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).

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
# clients non couverts sur l'ensemble des créneaux antérieurs et postérieurs	112,5	98	110,5	97,5	90,5	100,5	93,5

Tableau 18 – Optimisation robuste des pics sur la journée – Evaluation sur tous les plans intermédiaires.

Le Tableau 18 montre les résultats du même exercice d'évaluation pour tous les plans intermédiaires. On constate que l'algorithme ne converge 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.

Le graphique en Figure 53 montrent l'évaluation complète de la solution initiale et de la solution optimisée par *TMV* sur l'ensemble des créneaux de trafic. L'hypothèse que nous prenons pour la méthode séquentielle est que, à défaut de modèle de prévision de trafic, 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 de 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.

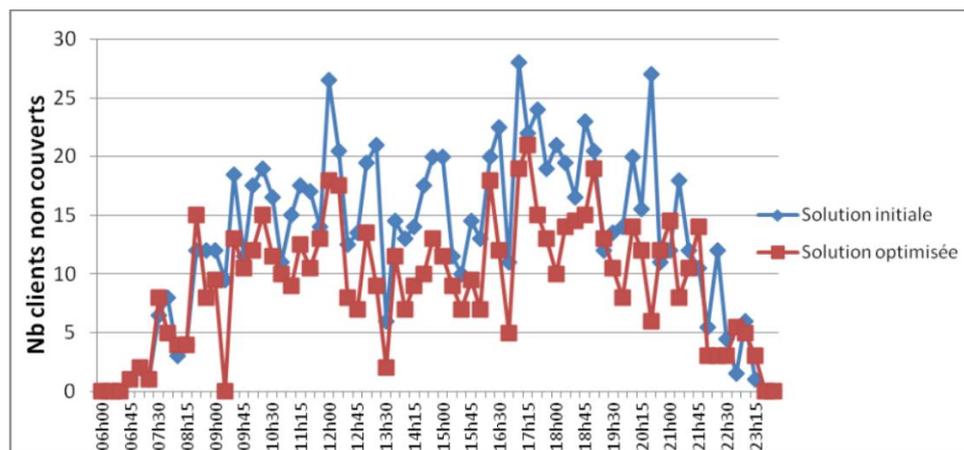


Figure 53 - Optimisation séquentielle des pics sur la journée par Tabou TMV4 - Evaluation de tous les créneaux.

4.3.3. Optimisation robuste des dominances en 3 périodes successives

Nous nous sommes intéressés à l'optimisation robuste en trois étapes basée sur la méthode de la dominance pour la sélection des créneaux. Les trois étapes correspondent à trois 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 incluse comme période de référence pour l'optimisation, le réseau de la période du soir reste actif.

L'optimisation robuste a été appliquée avec trois scénarios de trafic le matin, six scénarios de trafic l'après-midi et six scénarios de trafic le soir. Les trois 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.

La Figure 54 montre sur toute la **période du matin** 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 pas forcément sur les créneaux optimisés, par exemple le gain le plus fort est à 12h00. Le Tableau 19 donne l'ensemble des évaluations sur les quatre exécutions avec tout d'abord une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes, puis le nombre de sites modifiés, dont les critiques. Le temps de calcul moyen est de 43 *minutes* pour 3 créneaux utilisés.

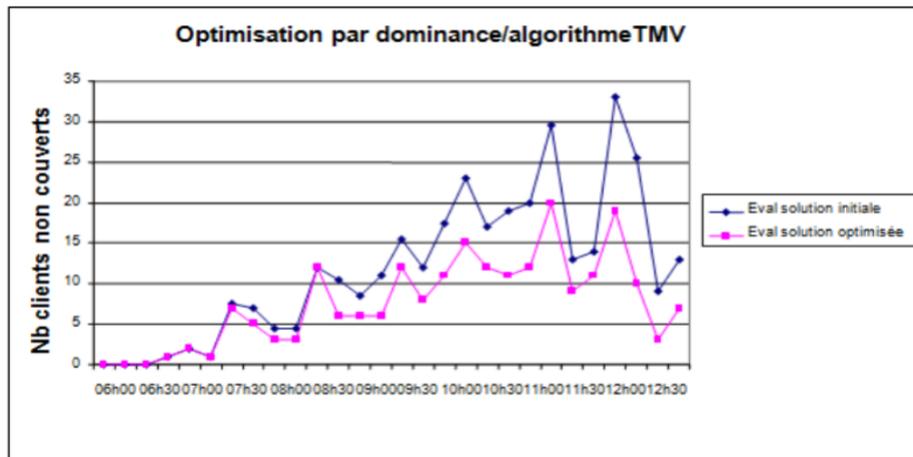


Figure 54 – Réseau initial vs réseau robuste sur tous les créneaux de la période du matin.

Sur 4 exécutions	Evaluation Initiale	Evaluation TMVp1	Gain
Minimum	262,5	216	18%
Maximum	534	247	54%
Moyenne	259	225,5	37%

N° exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
# sites modifiés (total, critique)	(8, 3)	(15, 6)	(10, 3)	(14, 6)	(11,8, 4,5)
Temps de calcul en mn	37'	46'	38'	52'	43'

Tableau 19 – Optimisation robuste de la période du matin.

La Figure 55 montre sur toute la **période de l'après-midi** 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. Le Tableau 20 donne l'ensemble des évaluations sur les quatre exécutions avec tout d'abord une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes, puis le nombre de sites modifiés, dont les critiques. 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 porte sur un sous-ensemble de créneaux alors que l'évaluation porte sur l'ensemble des créneaux. Le temps de calcul moyen est de 2h50 pour 6 créneaux utilisés.

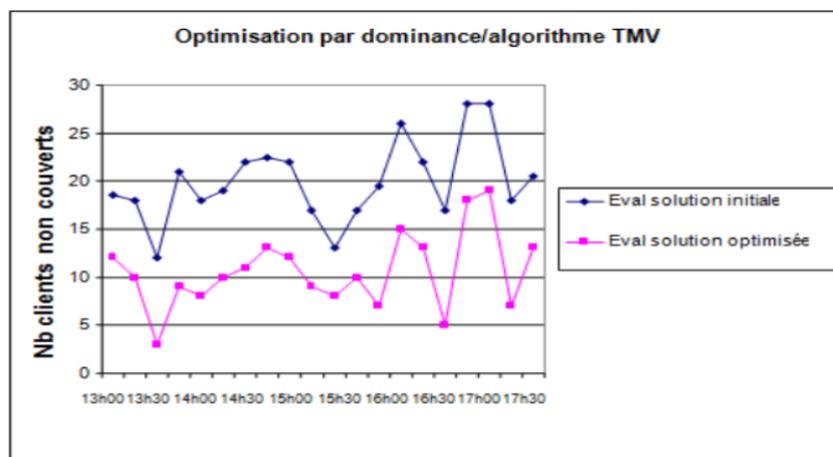


Figure 55 – Réseau initial vs réseau robuste sur tous les créneaux de la période de l'après-midi.

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%

N° exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
# sites modifiés (total, critique)	(10, 4)	(14, 7)	(14, 7)	(10, 4)	(12, 5.5)
Temps de calcul en h	2h45	2h48	3h07	2h45	2h50

Tableau 20 – Optimisation robuste de la période de l'après-midi.

La Figure 56 montre sur toute la **période du soir** 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). Le Tableau 21 donne 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. Le gain moyen est de 3%. Le temps de calcul moyen est de 2h42 pour 6 créneaux utilisés.

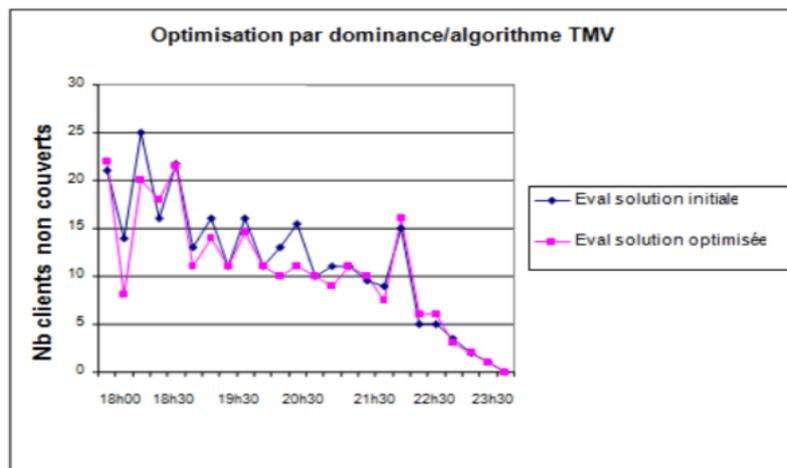


Figure 56 – Réseau initial vs réseau robuste sur tous les créneaux de la période du soir.

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%

N° exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
# sites modifiés (total, critique)	(12, 3)	(12, 3)	(13, 3)	(10, 4)	(11.8, 3.3)
Temps de calcul en h	2h29	2h45	2h54	2h39	2h42

Tableau 21 – Optimisation robuste de la période du soir.

Le Tableau 22 présente une synthèse de l'évaluation du réseau optimisé par la méthode robuste en trois périodes sur l'ensemble de la journée. Il présente les quatre 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 la moyenne de tous les indicateurs.

Exécution	Evaluation des 3 réseaux initiaux	Evaluation des 3 réseaux finaux	Gain	# sites modifiés (total/critiques)	# 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

Tableau 22 – Synthèse des évaluations sur la journée 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, sur le cumul du nombre de sites modifiés et sur le nombre de créneaux dégradés, et ce quelle que soit la qualité des réseaux initiaux pour les quatre exécutions. Il faut retenir que les trois 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 trois périodes robuste permet donc de construire rapidement un réseau (pendant la première période) ayant un bon comportement pour les deux périodes suivantes de la journée car les gains suivants sont plus faibles.

4.3.4. Optimisation non robuste des dominances en 3 périodes successives

Nous présentons maintenant l'optimisation non robuste en trois étapes basée sur la méthode de la dominance pour la sélection des créneaux. Les trois étapes correspondent aux mêmes trois intervalles de temps disjoints de la journée utilisés précédemment. Cette fois-ci, l'optimisation en trois périodes successives consiste à ajuster les ressources au fur et à mesure, sauf qu'ici pour chacune des trois périodes nous avons appliqué la méthode *TMV* sur le créneau le plus dominant de la période, soit : le créneau 12h45 pour la période du matin, le créneau 13h15 pour la période de l'après-midi et le créneau 18h00 pour la période du soir. 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 2^{ème} 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 avons souhaité apporter cette variante pour voir l'impact du nombre de modifications portées sur le réseau, seulement 3 contre 7 dans le cas séquentiel de la section 4.3.2. Pour une évaluation globale on retiendra 450 secondes en moyenne pour un scénario de trafic, soit $3 \times 450 = 23$ minutes d'optimisation en moyenne pour la journée.

Les Tableaux 23, 24 et 25 donnent, sur **toutes les périodes**, l'ensemble des évaluations sur les quatre exécutions avec tout d'abord une récapitulation sur les valeurs minimales, maximales et moyennes, puis le nombre de sites modifiés, dont les critiques.

Sur 4 exécutions	Evaluation Initiale	Evaluation <i>TMV</i> p1	Gain
Minimum	318,5	219	31%
Maximum	534	247	54%
Moyenne	387,5	230,8	40%

N° exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
# sites modifiés (total, critique)	(13, 7)	(8, 1)	(8, 4)	(8, 4)	(9,3, 4)

Tableau 23 – Optimisation séquentielle de la période du matin.

Les résultats pour la **période de l'après-midi** ne sont pas bons car 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.

Sur 4 exécutions	Evaluation Initiale TMVp1	Evaluation TMVp2	Gain
Minimum	224,5	232	-3%
Maximum	251,5	253	0%
Moyenne	233	245,8	-5%

N° exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
# sites modifiés (total, critique)	(6, 3)	(6, 3)	(5, 2)	(2, 0)	(4.8, 2)

Tableau 24 – *Optimisation séquentielle de la période de l'après-midi.*

Les résultats pour la **période du soir** sont positifs car l'algorithme améliore le réseau issu de l'après-midi pour les quatre exécutions.

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%

N° exécution	Run1	Run2	Run3	Run4	Moyenne
# sites modifiés (total, critique)	(10, 5)	(62, 3)	(10, 2)	(5, 0)	(7.8, 2.5)

Tableau 25 – *Optimisation séquentielle de la période du soir.*

Le Tableau 26 présente une synthèse de l'évaluation du réseau optimisé par la méthode non robuste en trois périodes sur l'ensemble de la journée. Il présente les quatre 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 la moyenne de tous les indicateurs. La méthode dominance/non robustesse offre globalement un comportement très stable sur les indicateurs du nombre de clients non couverts sur les réseaux finaux et ce quelle que soit la qualité des réseaux initiaux pour les quatre exécutions. Par contre sur le cumul du nombre de sites modifiés 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 trois 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% en moyenne).

Exécution	Evaluation des 3 réseaux initiaux	Evaluation des 3 réseaux finaux	Gain	# sites modifiés (total/critiques)	# créneaux dégradés sur 72
Run1	838,5	721,5	14%	29/15	16
Run2	871	736	15,5%	20/7	21
Run3	829	753	9%	23/8	9
Run4	1015	717	29,4%	15/4	14
Moyenne	888,4	732	17,6%	21,8/8,5	15

Tableau 26 – *Synthèse des évaluations sur la journée avec 3 réseaux non robustes successifs.*

4.3.5. Synthèse des stratégies d'optimisation

En résumé, nous avons adopté une 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 trois périodes (vision échelonnée matin, après-midi et soir). Nous avons établi le lien entre le type d'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. Cette étude nous a permis de développer quelques préconisations sur l'opportunité de mettre en œuvre les différentes méthodes dans le cadre d'auto-optimisation des *SON*.

- Concernant le choix des créneaux/sites à optimiser, l'optimisation du réseau sur les pics de trafic est plus efficace, plutôt que sur une analyse de dominance qui est plus sophistiquée. Ce choix s'applique sur les deux points suivants ;
- L'amélioration du réseau dans un contexte où son comportement est assez prévisible, l'optimisation robuste à la journée est à privilégier car elle fournit des réseaux résistants. Cela revient à produire un réseau type pour chaque jour de la semaine 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 est à privilégier car elle fournit des réseaux adaptés en quelques minutes mais ils ne sont pas résistants.

4.4.Synthèse de l'optimisation en ligne

La progression du paramétrage automatique des réseaux cellulaires a été très importante d'une génération à l'autre avec une introduction plus poussée d'algorithmes de contrôle et de décision au sein des équipements de réseaux. L'optimisation au sein du *SON* est un champ qui a émergé avec les réseaux *4G LTE*, l'objectif principal est d'optimiser en continu la qualité du lien radio tout en réduisant les coûts de maintenance. Nous avons apporté deux contributions majeures dans ce domaine : 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.

- Nous avons proposé une formalisation du problème d'optimisation posée dans le cadre du *SON* dans un contexte robuste. 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 de débit. 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 ;
- Nous avons proposé des solutions algorithmiques qui peuvent être pertinentes dans le cas du *SON*. La taille des réseaux à optimiser a rapidement conduit notre recherche vers les méta-heuristiques car les méthodes exactes ne sont pas applicables pour des temps de calcul compatibles avec la taille des problèmes. Plusieurs algorithmes sont élaborés, d'un algorithme glouton simple à plusieurs variantes d'une Recherche Tabou (*TS*, *TDV*, *TMV*).

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. 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. Dans le premier cas, nous avons montré que le réseau produit instantanément est instable face à la variation de la demande et nécessite d'être continûment réorganisé pour combler cette instabilité. Dans le deuxième cas, 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.

Les approches algorithmiques élaborées ont servi d'abord, à sélectionner les paramètres d'optimisation les plus pertinents avec un algorithme glouton ; 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. La méthode *TMV* a montré les meilleures performances. Cette variante a été évaluée pour quatre configurations de problème à résoudre qui combinent l'utilisation d'une fonction objectif robuste ou non, 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, et 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. La méthode développée montre qu'il est possible de réorganiser efficacement le réseau en quelques minutes.

Le travail sur l'optimisation en ligne des réseaux *LTE* a été réalisé dans le cadre d'un projet collaboratif bilatéral avec le centre de recherche d'*Orange Labs* ; il comprend les contributions de Noureddine TABIA dans le cadre de sa thèse et une collaboration fructueuse avec Abder Chariete, Alexandre Gondran et Alexandre Caminada. 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*. Les principales publications sur le sujet sont : *WMNC'11* [165], *EvoCOMNET'12* [164], *MSWiM(PM2HW2N)'12* [163], *MOBILITY'13* [162], *WD'13* [47]

5. Conclusions et perspectives de recherche

Les travaux conduits durant une quinzaine d'années m'ont permis d'aborder une grande diversité de thématique toujours selon la même approche : compréhension du problème réel, sa modélisation, son optimisation et l'évaluation de ses performances dans des contextes réels ce qui crée le terrain idéal pour proposer des solutions adaptées et dotées d'un degré de réalisme élevé. Je vais d'abord commencer par faire la synthèse de mes contributions, et je terminerai en développant quelques perspectives à court et moyen termes.

5.1. Bilan

Dans le champ de la planification de *WLAN*, nous avons proposé une méthode de résolution basée sur une approche algorithmique d'optimisation combinatoire où le problème de planification traite conjointement le problème d'*ACP* et le problème d'*AFP*. Le principal apport de cette approche est le traitement simultané des problèmes d'*ACP* et d'*AFP*. L'approche algorithmique est générique et peut prendre en compte un ou plusieurs critères à optimiser soit en mono-objectif soit en multi-objectif. S'agissant du critère de *QoS*, nous avons mis en œuvre un algorithme d'optimisation mono-objectif utilisant une recherche à voisinage variable

aléatoire qui a montré de bonnes performances par rapport à d'autres algorithmes de la littérature. La *QoS* reste le critère le plus pertinent pour un usage traditionnel du *WLAN*. Cependant, lorsqu'il s'agit d'exploiter une infrastructure existante pour fournir des services, autre que le débit, à savoir la position de l'utilisateur pour lui transmettre une information sur le lieu où il se trouve. Dès lors, un critère supplémentaire d'erreur de localisation peut être pris en compte pour planifier le *WLAN*. A partir des travaux sur la planification de *WLAN*, et selon la même démarche, nous avons proposé un algorithme d'optimisation mono-objectif utilisant une recherche à voisinage variable hybridé avec une recherche Tabou, ainsi qu'une adaptation en une version multi-objectif. Ces deux algorithmes ont également permis d'obtenir des solutions de bonne qualité. En particulier, la méthode d'optimisation multiobjectif fournit un ensemble de solutions ayant chacune un compromis différent entre le critère de débit et d'erreur de localisation, ce que ne permet pas la méthode d'optimisation mono-objectif car les coefficients de pénalité sont fixés à l'avance.

Dans le champ de la mobilité dans les réseaux véhiculaires, nous nous sommes intéressés à la modélisation et la simulation des réseaux véhiculaires, à l'étude de la connectivité radio et des performances des protocoles et mécanismes de routage dans le cadre des *VANET*. Nous avons montré l'influence d'une modélisation réaliste de la mobilité et de la propagation radio sur la fiabilité des résultats. Tout d'abord, un modèle de mobilité véhiculaire a été proposé, il prend en compte les caractéristiques spatio-temporelles de l'environnement. Notre modèle utilise des informations géographiques et socioéconomiques sur les caractéristiques variables des infrastructures de l'environnement et sur les habitudes des individus, permettant de définir des schémas de mobilité les plus réalistes. Ensuite, nous avons proposé un modèle de propagation radio réaliste qui reproduit le plus fidèlement possible l'effet des obstacles de l'environnement sur la qualité des signaux. Pour la prédiction de l'affaiblissement, le modèle de propagation radio s'appuie sur des données précises concernant les caractéristiques du terrain dans lequel se propagent les signaux. L'affaiblissement d'un signal transmis par un véhicule à destination d'un autre véhicule est calculé en tenant compte du type et de la densité des obstacles situés entre les deux véhicules. Ces deux modèles ont été intégrés dans une architecture logicielle avec l'objectif d'étudier et d'analyser la connectivité radio dans les *VANET* et les performances des protocoles et mécanismes de routage spécifiques à cette catégorie de réseaux. Pour garantir la fiabilité des résultats obtenus, nous avons réalisé des tests de simulation dans un environnement réel, et utilisé les traces générées par nos deux modèles comme données d'entrée du simulateur de réseaux *ns-2*. L'étude de la connectivité radio et des performances des mécanismes de routage dans les *VANET* a permis d'une part de dégager les propriétés des réseaux véhiculaires et d'autre part de souligner les problèmes auxquels doivent répondre les protocoles de routage. Les conclusions et résultats auxquels nous avons abouti peuvent être utilisés pour la conception d'algorithmes de routage plus appropriés pour les *VANET*.

Dans le champ de l'optimisation en ligne des réseaux *LTE*, nous avons proposé des modèles et des algorithmes pour l'optimisation des *SON*. Nous avons proposé 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. La formalisation du problème d'optimisation 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 ; 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. 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. Nous avons étudié 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 résoudre le problème d'optimisation, nous avons d'abord proposé un algorithme glouton qui a permis de démontrer la pertinence de l'optimisation robuste. Ensuite, trois autres algorithmes basés sur les méthodes de recherche Tabou ont été proposés. L'algorithme basé sur la recherche Tabou meilleur voisin est la méthode qui a donné les meilleurs résultats sur les scénarios considérés. Enfin, nous avons étudié différentes stratégies d'optimisation des *SON* pour apporter une réponse aux objectifs : quand et où optimiser le réseau ? L'application de la méthode *TMV* dans des contextes croisés d'optimisation robuste et d'optimisation non robuste d'une part, et l'optimisation journalière et l'optimisation par période d'autre part nous a permis de construire un ensemble de préconisations quant à l'optimisation en ligne dans le cadre du *SON*.

5.2.Perspectives

La poursuite de mes activités de recherche peut être envisagée de deux manières différents : soit aborder une activité sous l'angle du défi sociétal soit aborder une activité sous l'angle de la technologie sous-jacente. En regardant de plus près toutes ces années d'activité scientifique, on peut s'apercevoir qu'il y a convergence des thématiques et des technologies.

D'un côté, en abordant des thématiques telles que la localisation indoor, les services géolocalisés ou la mobilité intelligente, nous sommes en lien direct avec les défis de la stratégie nationale de la recherche parmi lesquels, la ville intelligente et l'internet des objets [159]. De l'autre, les standards *IEEE 802.11* et les réseaux mobiles haut débit *4G* sont également en liaison directe les défis de la stratégie nationale de la recherche tels que les transports et systèmes urbains durables et la société de l'information et de la communication.

Historiquement, chaque évolution technologique a été à l'origine d'un ou plusieurs paradigmes. Depuis le début des systèmes distribués, nous avons assisté à l'avènement de l'informatique distribuée, de l'informatique ubiquitaire, du Cloud Computing et du Big Data. Aujourd'hui, un nouveau paradigme a volé la vedette à tous les autres : il s'agit de l'internet des objets (*IoT*) ou l'internet de tout (*IoE*) qui ne sont rien d'autre que des systèmes distribués multi-échelles. En effet, les équipements sont de plus en plus petits, voire miniaturisés, les systèmes sont déployés en nombre à plus ou moins large échelle et des technologies complexes et variées cohabitent (*HetNets*). D'ailleurs, l'*IoT* a été identifié comme l'un des chantiers prioritaires dans le livre blanc de l'*ARCEP* [22] ; toutes les études prévoient une explosion du volume des objets connectés dans le monde d'ici 2020.

Pour transformer une ville en une « ville intelligente », il est nécessaire de déployer une infrastructure de communications adaptée qui permet de connecter les objets et les individus. La ville intelligente s'appuie sur des technologies de communications radio pour fournir divers services, par exemple des services d'assistance médicale, de sécurité routière, de gestion du trafic en temps réel, etc. [4, 60]. Dans la ville intelligente, chaque objet pourra être connecté à Internet via la technologie *IoT*, cette interconnexion devient possible notamment avec le déploiement du protocole *IPv6* [22, 66, 95]. Enfin, le futur standard *5G* sera le support de l'*IoT* et de la ville intelligente. Force est de constater que les deux thématiques de géolocalisation et de mobilité restent entières dans un contexte de ville intelligente, de plus, une nouvelle thématique apparaît, l'exploitation des grandes masses de données générées.

En matière de localisation, *indoor* ou *outdoor*, de nombreuses applications continuent de voir le jour dans la ville intelligente. On s'intéresse au déplacement de foule ou à la densité de personnes pour des questions d'aménagement du territoire ou de planification par les opérateurs de transport ; à la localisation de personnes dans les sites privés ouverts au public dans le but de caractériser la mobilité et les flux de personnes en termes de zones de passages,

d'origine/destination des visites, de temps de présence et de récurrence des visites, ou encore au monitoring de patient pour la e-santé. Les solutions actuelles de localisation indoor, utilisant la technique du *fingerprinting*, reposent essentiellement sur la redondance et la diversité d'informations d'un seul paramètre : ces solutions exploitent l'information de puissances reçues de plusieurs sources radio.

Une approche innovante consiste à exploiter les signaux multi-antennes multi-porteuses (*MIMO-OFDM*) des nouveaux standards radios comme le *802.11n*, le *802.11ac*, le *802.11ax* ou la *4G*. Avec la future *5G* et l'expansion des objets connectés basés sur le schéma *OFDM*, il sera possible d'exploiter l'information de l'état du canal (*CSI*). En effet, le signal *MIMO-OFDM* est porteur d'une information beaucoup plus riche qu'un simple paramètre de puissance reçue (*RSSI*). Un premier verrou à lever dans une telle approche consiste à identifier des paramètres pertinents de l'empreinte canal en relation avec le positionnement de l'objet considéré. Une telle solution ne nécessitera pas un chemin direct détectable (*LOS*) et de redondance des sources radio. Les algorithmes d'extraction de caractéristiques sont de très bons candidats pour l'identification de paramètres canal.

Les techniques de *fingerprinting* déterminent la position recherchée en établissant une corrélation entre les données mesurées et une base de données radio préalablement établie, ce qui implique un temps de calcul. Un deuxième verrou à lever concernera la conception de nouveaux algorithmes adaptés à ce contexte. Les solutions à proposer semblent s'orienter vers les techniques d'apprentissage automatiques (*Machine Learning*). L'utilisation d'algorithmes de *Machine Learning* permettront de prédire la position par rapport aux données connues en utilisant les caractéristiques de l'empreinte canal. Enfin, un dernier verrou concerne la construction de la base de données radio qui est une étape contraignante et gourmande en temps. Pour alléger la phase de sondage de l'environnement, un modèle de propagation indoor à base de techniques rayons peut servir à compléter la cartographie radio.

En matière de mobilité dans la ville intelligente, le plan d'action européen CAR 2020 appelle au développement des véhicules communicants (*ITS*) et verts (régulation des émissions de *CO2*) afin d'augmenter la sécurité routière, améliorer l'efficacité du trafic, contrôler la pollution, etc. Une nouvelle génération de transport intelligent est en préparation et verra le jour avec la prolifération des véhicules connectés [132]. Le standard *802.11p* a d'ailleurs été retenue comme moyen de transport des données ; Bien que cette technologie soit plébiscitée par les instances européennes, la dissémination de l'information à des fins de sûreté ne pourra certainement pas se limiter à cette technologie si on veut qu'elle soit efficace et qu'elle puisse concerner tous les acteurs/usagers du milieu d'étude considéré. Le réseau mobile de 4^e génération, le réseau *LTE*, peut être utilisé pour les communications avec les véhicules, il permet d'établir des communications *V2I* adapté aux applications de sécurité. La question de l'applicabilité du *LTE* aux communications *V2I* est pertinente, plusieurs études sur le débit ont montré l'intérêt de l'utilisation d'un réseau *LTE* [107, 124, 189].

Dans la ville intelligente, une flotte de véhicules communicants forme un réseau d'entités connectés qui échangent des informations à l'intérieur et vers l'environnement extérieur. Les véhicules connectés sont les composants du nouveau paradigme de l'Internet des Véhicules (*IoV*) qui correspond à l'intégration de trois réseaux : un réseau inter-véhicules, un réseau intra-véhicules et un réseau Internet mobile véhiculaire. L'*IoV* est finalement un système distribué large échelle qui échange des informations entre différents objets tels que les véhicules, les routes et Internet (*V2X*).

Un premier verrou à lever concerne la fiabilité des communications dans un environnement obstrué. Il est alors important de disposer de modèles de propagation réalistes, adaptées aux environnements d'évolution des véhicules, afin d'envisager les communications sur des bases réalistes et fiable ce qui permettra de proposer des améliorations des protocoles existants ou en

proposer des nouveaux. Une complexité supplémentaire provient de l'hétérogénéité des technologies de communications.

Comme tout système distribué, l'*IoV* est un système dynamique doté de moyens de communications mobiles, de collecte, de stockage et de traitement des données pour répondre aux besoins des utilisateurs, ouvrant la voie vers la nouvelle génération d'*ITS*. Le système se caractérise par une forte variabilité des vitesses de déplacement des véhicules, une topologie changeante et un environnement obstrué. Un deuxième verrou à lever porte sur la transmission des données. Pour augmenter le taux de données transmises, il serait opportun d'explorer toutes les possibilités offertes par un réseau hétérogène (des communications *V2X*) ainsi que l'usage du routage opportuniste.

Un troisième verrou à lever porte sur le traitement des données. En effet, les véhicules se déplacent selon un modèle de mobilité véhiculaire ainsi que des trajets origine/destination contraints. Les données collectées présentent des caractéristiques temporelles et des sémantiques différentes. Le champ de la gestion du trafic urbain connaît un développement permanent ; poursuivre l'investigation de ce domaine dans un contexte *IoV* en exploitant les données de mobilité peut faire émerger le besoin de traiter les données collectées en fonction de leur disponibilité et de leur validité. En raison de la variabilité des données, des méthodes statistiques et des algorithmes de Machine Learning seront privilégiés.

A plus long terme, le phénomène de l'*IoT*, qui est en pleine expansion, s'appuie sur les technologies machine-to-machine (*M2M*) pour intégrer une pléthore de capteurs et dispositifs intelligents. Aujourd'hui, le paysage *M2M* représente une diversité de solutions de connectivité disponibles qui, en raison de l'énorme enjeu économique de l'*IoT*, a besoin d'être harmonisé. La communauté scientifique doit relever plusieurs défis parmi lesquels on peut citer la planification et l'optimisation des ressources des réseaux de communication intégrant bien évidemment le paramétrage des stations de base mais aussi le placement de divers équipements tels que des passerelles, des répéteurs, des balises et autres capteurs en bordure de route, la garantie d'une connectivité fiable et robuste dans un contexte de réseaux hétérogènes et en fonction de l'environnement considéré (*indoor* ou *outdoor*), des moyens de stockage et de traitement d'une grande masse de données et la conception d'algorithmes adaptés.

Références

- [1] 3GPP TS 32.521 V9.0.0 (2009-07), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Telecommunication Management; Self-Optimization OAM; Concepts and Requirements (Release 9), July 2009.
- [2] T. F. Abdelzaher, K. G. Shin, N. Bhatti. "User-level QoS-adaptive resource management in server end-systems". In *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 52, Issue 5, pp. 678-685, May 2003. doi: 10.1109/TC.2003.1197134
- [3] F. A. Agelet, A. Varela, L. Alvarez-Vazquez, A. Formella. "Optimization methods for optimal transmitter locations in a mobile wireless system". In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 51, Issue 6, pp. 1316-1321, 2002.
- [4] E. Ahmed, M. I. Razzak, M. Guizani, A. Rayes, J. Lloret, G. Han, W. Guibene. "Enabling Mobile and Wireless Technologies for Smart Cities: Part 2". *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, Issue 3, pp. 12-13, 2017.
- [5] K. Ait Ali. "Modélisation et étude de performance dans les réseaux VANET". *PhD Thesis, UTBM, Belfort*, 2012.
- [6] K. Ait Ali, O. Baala, A. Caminada, "On the spatio-temporal traffic variation in vehicles mobility modeling", *IEEE Transactions on Vehicular Technology (TVT)*, Vol. 64, No2, Pages 652-667, February 2015. doi: 10.1109/TVT.2014.2323182.
- [7] K. Ait Ali, O. Baala, A. Caminada, "Revisiting Vehicular Radio Connectivity with propagation model", *Telecommunication Systems, Springer*, Vol. 52, No4, Pages 2585-2597, April 2013. doi: 10.1007/s11235-011-9591-4.
- [8] K. Ait Ali, O. Baala, A. Caminada, "Routing Mechanisms Analysis in Vehicular City Environment", *IEEE 73th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Pages 2238-2242. Budapest, Hungary, May 2011. doi: 10.1109/VETECS.2011.5956673
- [9] K. Ait Ali, O. Baala, A. Caminada, M. Lalam, "Evaluating Vehicular Radio Connectivity with Environment-Based Metrics", *3rd Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, Pages 1-6, Budapest, Hungary, October 2010. doi: 10.1109/WMNC.2010.5678751
- [10] K. Ait Ali, M. Lalam, L. Moalic, O. Baala, "V-MBMM: Vehicular Mask Based Mobility Model", *9th International Conference on Networks (ICN)*, Pages 243-248, Mennieres, France, April 2010. doi: 10.1109/ICN.2010.46
- [11] S. Al-Sultan, M. M. Al-Doori, A. H. Al-Bayatti, H. Zedan. "A comprehensive survey on vehicular ad hoc network". In *Journal of network and computer applications*, Vol. 37 pp. 380-392, 2014.
- [12] S. Allio. "Méthodes avancées pour une ingénierie WLAN multi-standards". *PhD thesis, INSA Rennes*, 2007.
- [13] Z. Altman, H. Dubreil, R. Nasri, O. B. Amor, J. M. Picard, V. Diascorn, M. Clerc, "Auto-tuning of RRM parameters in UMTS networks." *Understanding UMTS Radio network modelling, planning and automated optimisation: Theory and practice*, p. 405, 2006.
- [14] Z. Altman, J. M. Picard, S. B. Jamaa, B. Fourestie, A. Caminada, T. Dony, S. Mourniac. "New challenges in automatic cell planning of UMTS networks". In *56th IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 951-954, 2002. doi: 10.1109/VETECS.2002.1040741
- [15] E. Amaldi, A. Capone, M. Cesana, F. Malucelli, F. Palazzo. "WLAN coverage planning: optimization models and algorithms". In *IEEE 59th Vehicular Technology Conference*, Vol. 4, pp. 2219-2223, *VTC Spring*, 2004. doi: 10.1109/VETECS.2004.1390668
- [16] 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.

- [17] H. R. Anderson, J. P. McGeehan. "Optimizing microcell base station locations using simulated annealing techniques". In *IEEE 44th Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 858-862, Stockholm, 1994. doi: 10.1109/VETEC.1994.345212
- [18] O. Andrisano, R. Verdone, M. Nakagawa. "Intelligent transportation systems: the role of third generation mobile radio networks". In *IEEE Communications Magazine*, Vol. 38, Issue 9, pp. 144-151, Sep 2000. doi: 10.1109/35.868154
- [19] M. S. Anwer, C. Guy. "A survey of VANET technologies". In *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, Vol. 5, Issue 9, pp. 661-671, 2014.
- [20] G. Araniti, C. Campolo, M. Condoluci, A. Iera, A. Molinaro. "LTE for vehicular networking: a survey". In *IEEE Communications Magazine*, Vol. 51, Issue 5, pp. 148-157, May 2013. doi: 10.1109/MCOM.2013.6515060
- [21] J. P. L. Araújo, J. C. Rodrigues, S. G. Fraiha, H. Gomes, G. P. Cavalcante, C. R. Francês. "A WLAN planning proposal through computational intelligence and genetic algorithms hybrid approach". In *Proceedings of the International Conference on Mobile Technology, Applications, and Systems*. ACM, Sept. 2008.
- [22] ARCEP. "Préparer la révolution de l'internet des objets". Livre blanc, Document N°1 – Une cartographie des enjeux. 7 Novembre 2016.
- [23] M. M. Artimy, W. Robertson, W. J. Phillips. "Connectivity in inter-vehicle ad hoc networks". In *Proc. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 293-298, Canada, May 2004.
- [24] A. Awada, B. Wegmann, I. Viering, A. Klein. "Optimizing the radio network parameters of the long term evolution system using Taguchi's method". In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, Issue 8, pp. 3825-3839, 2011.
- [25] O. Baala, Y. Zheng, A. Caminada, "Toward Environment Indicators to Evaluate WLAN-based Indoor Positioning System", *7th IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, pp. 243–250, Rabat, Morocco, May 2009. doi: 10.1109/AICCSA.2009.5069332
- [26] O. Baala, Y. Zheng, A. Caminada, "The impact of AP placement in WLAN-based Indoor Positioning System", *8th International Conference on Networks (ICN)*, Pages 12-17, Cancun, Mexico, March, 2009. doi: 10.1109/ICN.2009.50
- [27] O. Baala, A. Caminada, "WLAN-based Indoor Positioning System: experimental results for stationary and tracking MS", *IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Pages 1-4. Guilin, China, November 2006. doi: 10.1109/ICCT.2006.341742
- [28] O. Baala, A. Caminada, "Location Precision in indoor positioning system", *IEEE International Conference on Innovations in Information Technology (IIT)*, Pages 1-5, Dubai (UAE), November 2006. doi: 10.1109/INNOVATIONS.2006.301877
- [29] O. M. Badawy, M. A. B. Hasan. "Decision Tree Approach to Estimate User Location in WLAN Based on Location Fingerprinting". In *24th National Radio Science Conference*, pp. 1-10, Cairo, 2007. doi: 10.1109/NRSC.2007.371395
- [30] P. Bahl, V. N. Padmanabhan. "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system". In *IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol. 2, pp. 775-784, Tel Aviv, March, 2000. doi: 10.1109/INFCOM.2000.832252
- [31] A. Bahri, S. Chamberland. "On the wireless local area network design problem with performance guarantees". In *Computer Networks*, Vol. 48, Issue 6, pp. 856-866, 19 August 2005, ISSN 1389-1286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2004.11.009>
- [32] F. Bai, T. El Batt, G. Holland, H. Krishnan, V. Sadekar. "Towards Characterizing and Classifying Communication-based Automotive Applications from a Wireless Networking Perspective". In *First IEEE Workshop on Automotive Networking and*

- Applications (AutoNet 2006), co-located with IEEE Globecom, San Francisco, CA, USA, December 1, 2006.
- [33] F. Bai, B. Krishnamachari. "Spatio-temporal variations of vehicle traffic in VANETs: facts and implications". In *Proceedings of the sixth ACM international workshop on Vehicular InterNetworking*. ACM, pp.43-52, september 2009.
doi : 10.1145/1614269.1614278
- [34] F. Bai, N. Sadagopan, A. Helmy. "The IMPORTANT Framework for Analyzing the Impact of Mobility on Performance of Routing for Ad Hoc Networks". *AdHoc Networks Journal - Elsevier Science*, Vol. 1, Issue 4, pp. 383-403, November 2003.
- [35] A. Balachandran, G. Voelker, P. Bahl. "Wireless hotspots: current challenges and future directions". In *Mobile Networks and Applications*, Vol. 10, Issue 3, pp. 265-274, 2005.
doi: 10.1007/s11036-005-6421-5
- [36] J. Baliosian, H. Oliver ; A. Devitt ; F. Sailhan ; E. Salamanca ; B. Danev ; G. Parr. "Self-configuration for radio access networks". *Seventh IEEE International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks (POLICY'06)*, London, Ont., pp. 4 pp.-86, June 2006. doi: 10.1109/POLICY.2006.28.
- [37] S. Banerji, R. S. Chowdhury. "On IEEE 802.11: Wireless LAN Technology". In *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)*, Vol. 3, Issue. 4, 2013. doi: 0.5121/ijmnct.2013.3405
- [38] R. Barr, Z. J. Haas, R. Van Renesse. "Scalable Wireless Ad hoc Network Simulation". *Handbook on theoretical and algorithmic aspects of sensor, ad hoc wireless, and peer-to-peer networks*, Vol. 19, pp. 297-311, CRC Press, August 2005.
- [39] R. Battiti, A. Villani, T. L. Nhat. "Neural network models for intelligent networks: deriving the location from signal patterns". In *The First Annual Symposium on Autonomous Intelligent Networks and Systems*, UCLA, May 2002.
- [40] A. Ben-Tal, L. El Ghaoui, A. Nemirovski. "Robust Optimization", *Princeton Series in Applied Mathematics*. Princeton University Press, 2009.
- [41] G. Bianchi. "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function". In *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, Issue 3, pp. 535-547, March 2000. doi: 10.1109/49.840210
- [42] S. Bosio, A. Capone, M. Cesana. "Radio Planning of Wireless Local Area Networks". In *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 15, Issue 6, pp. 1414-1427, Dec. 2007.
doi: 10.1109/TNET.2007.896478
- [43] T. L. Casavant, J. G. Kuhl. "A taxonomy of scheduling in general-purpose distributed computing systems". In *IEEE Transactions on software engineering*, Vol. 14, Issue 2, pp. 141-154, 1988.
- [44] L. Chaigneaud, V. Guillet, R. Vauzelle. "A 3D ray-tracing tool for broadband wireless systems". In *54th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Fall*, Vol. 4, pp. 2043-2047, 2001. doi: 10.1109/VTC.2001.957103
- [45] N. Chan, H. Lars. "Introduction to Location-Based Services". *Lund University GIS Centre*, 2003.
- [46] A. Chariete, O. Baala, A. Caminada. "Radio Dataset Exploration for Dissecting the Network Dysfunctions Due to Handover". *High Performance Computing and Communications (HPCC), 2015 IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security (CSS), 2015 IEEE 12th International Conferen on Embedded Software and Systems (ICCESS), 2015 IEEE 17th International Conference on, New York, NY*, pp. 1673-1678, 2015. doi: 10.1109/HPCC-CSS-ICCESS.2015.202
- [47] A. Chariete, O. Baala, A. Caminada, "The impact of ground-surfaces on the traffic mobile using statistical methods", *IFIP Wireless Days (WD)*, Pages 1-3, Valencia, Spain, November 2013. doi: 10.1109/WD.2013.6686451.

- [48] A. Charnes, W. W Cooper, G. H Symonds. "Cost horizons and certainty equivalents: An approach to stochastic programming of heating oil". *Management Science*, Vol. 4, pp. 183-195, 1958.
- [49] S. Chatterjee, J. Sydir, B. Sabata, T. Lawrence. "Modeling applications for adaptive QoS-based resource management". In *Proceedings High-Assurance Systems Engineering Workshop*, Washington, DC, pp. 194-201, 1997.
doi: 10.1109/HASE.1997.648064
- [50] D. R. Choffnes, F. E. Bustamante. "An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks". In *Proc. of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, pp. 69-78, New York, 2005. doi: 10.1145/1080754.1080765
- [51] T. H. Clausen, P. Jacquet. "Optimized Link State Routing (OLSR)". RFC 3626, October 2003.
- [52] H. Conceição, M. Ferreira, J. Barros. "On the Urban Connectivity of Vehicular Sensor Networks". In *Proc. 4th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'08)*, pp 112-125, Greece, June 2008.
- [53] Q. Dai. "A Survey of Quality of Experience". In *Energy-Aware Communications: Proceedings of the 17th International Workshop, EUNICE 2011*, pp 146-156, Dresden, Germany, September 5-7, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-23541-2_16
- [54] G. B. Dantzig. "Linear programming under uncertainty". *Management Science*, Vol. 43, Issue 7 pp. 197-206, 1955.
- [55] D. Dao, C. Rizos, J. Wang. "Location-based services: technical and business issues". In *The Journal of GPS Solutions*, Vol. 6, Issue 3, pp 169-178, 2002.
doi: 10.1007/s10291-002-0031-5
- [56] K. Dar, M. Bakhouya, J. Gaber, M. Wack. "Evaluating Geographic Routing Protocols for Vehicular Ad-hoc Networks". In *3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, pp.1-5, December 2009.
- [57] A. Dey, J. Hightower, E. de Lara, N. Davies. "Location-Based Services" In *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 9, Issue 1, pp. 11-12, Jan.-March 2010.
doi: 10.1109/MPRV.2010.10
- [58] S. Dhar, U. Varshney. "Challenges and business models for mobile location-based services and advertising". *Communications of the ACM*, Vol. 54, Issue 5, pp. 121-128, 2011. doi: 10.1145/1941487.1941515
- [59] P. Dhruv, J. Ravi, E. Lupu. "Indoor location estimation using multiple wireless technologies". In *14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC*, Vol.3, pp. 2208-2212, 2003.
doi: 10.1109/PIMRC.2003.1259108
- [60] M. Dohler, C. Ratti, J. Paraszczak, G. Falconer. "Smart cities [Guest Editorial]," In *IEEE Communications Magazine*, Vol. 51, Issue 6, pp. 70-71, June 2013.
doi: 10.1109/MCOM.2013.6525597
- [61] K. Eckert. "Overview of wireless LAN based indoor positioning systems." *Mobile Business Seminar, University of Mannheim, Germany*, December 2005.
- [62] G. Edwards, A. Kandel, R. Sankar. "Fuzzy handoff algorithms for wireless communication". In *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 110, Issue 3, pp. 379-388, 2000.
ISSN 0165-0114, [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114\(98\)00094-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0114(98)00094-3).
- [63] G. Edwards, R.Shankar. "Microcellular Handoff using Fuzzy Logic Techniques". *Wireless Networks*, Vol. 4, Issue 5, pp. 401-409, 1998.
- [64] V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, R. Bianchi. "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments". In *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, Vol. 17, pp. 1205-1211, July1999.

- [65] S. H. Fang, T. N. Lin, K. C. Lee. "A Novel Algorithm for Multipath Fingerprinting in Indoor WLAN Environments". *In IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.7, Issue 9, pp. 3579-3588, sept. 2008.
- [66] R. Fantacci, T. Pecorella, R. Viti, C. Carlini. "A network architecture solution for efficient IoT WSN backhauling: challenges and opportunities". *In IEEE Wireless Communications*, Vol. 21, Issue 4, pp. 113-119, August 2014.
doi: 10.1109/MWC.2014.6882303
- [67] M. J. Feeley, N. C. Hutchinson, S. Ray. "Realistic mobility for mobile ad hoc network simulation". *In ADHOC-NOW, Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Vol. 3158, pp. 324-329, 2004.
- [68] S. Feng, E. Seidel. "Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution". *Nomor Research GmbH*, Munich, Germany, May.2008.
- [69] S. Feng, E. Seidel. "Self-Organisation and Self-Configuration in Wireless Networks". *SOCRATES*, Project Period From 01/01/2008 to 31/12/2010, www.fp7-socrates.eu, May 2008.
- [70] M. Fiore, J. Härri. "The networking shape of vehicular mobility". *In Proceedings of the 9th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 261-272, May 2008. doi: 10.1145/1374618.1374654
- [71] M. Fiore, J. Harri, F. Filali, C. Bonnet. "Vehicular Mobility Simulation for VANETs". *In Proc. of the 40th IEEE Annual Simulation Symposium (ANSS'07)*, pp. 301-309, March, 2007. doi: 10.1109/ANSS.2007.44
- [72] M. Fiore, P. di Torino. "Mobility Models in Inter-Vehicle Communications Literature". *Politecnico di Torino*, Technical report, November 2006.
- [73] S. J. Fortune, D. M. Gay, B. W. Kernighan, O. Landron, R. A. Valenzuela and M. H. Wright. "WISE design of indoor wireless systems: practical computation and optimization". *In IEEE Computational Science and Engineering*, Vol. 2, N° 1, pp. 58-68, Spring 1995. doi: 10.1109/99.372944
- [74] H. T. Friis. "A Note on a Simple Transmission Formula". *In Proceedings of the IRE*, Vol. 34, Issue 5, pp. 254-256, may 1946.
- [75] G. M. Giaglis, P. Kourouthanassis, A. Tsamakos. "Towards a classification framework for mobile location services". *In Mobile commerce: technology, theory and applications*, Vol. 67, 2003.
- [76] C. Glaßer, S. Reith, H. Vollmer. "The complexity of base station positioning in cellular networks". *In Discrete Applied Mathematics*. Vol. 148, Issue 1, pp 1-12, 2005.
- [77] A. Gondran. "Modélisation et optimisation de la planification des réseaux locaux sans fil". *PhD Thesis, UTBM, Belfort*, 2008.
- [78] A. Gondran, O. Baala, H. Mabed, A. Caminada, "Hypergraph T-coloring for automatic frequency planning in wireless LAN", *IEEE 19th International symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Pages 1-5, Cannes, France. September 2008. doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699726
- [79] A. Gondran, O. Baala, A. Caminada, H. Mabed, "Interference management in IEEE 802.11 frequency assignment", *IEEE 67th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Pages 2238-2242, Singapore, May 2008. doi: 10.1109/VETECS.2008.498
- [80] A. Gondran, O. Baala, A. Caminada, H. Mabed, "3-D BSS Geometric Indicator for WLAN Planning", *15th IEEE International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Pages 1-5, Split, Croatia. September 2007. doi: 10.1109/SOFTCOM.2007.4446115.
- [81] A. Gondran, O. Baala, A. Caminada, H. Mabed, "Joint Optimization of Access Point Placement and Frequency Assignment in WLAN", *3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet (ICI)*, Pages 1-5, Tashkent, Uzbekistan. September 2007. doi: 10.1109/CANET.2007.4401670

- [82] A. Gondran, A. Caminada, J. Fondrevelle, O Baala. "Wireless LAN planning: a didactical model to optimize the cost and effective payback", *International Journal of Mobile Network Design and Innovation (IJMNDI)*, Inderscience Publishers, Vol. 2, No1, Pages 13-25, May 2007. doi: 10.1504/IJMNDI.2007.013800.
- [83] G. P. Grau, D. Pusceddu, S. Rea, O. Brickley, M. Koubek, D. Pesch. "Characterisation of IEEE802 .11p Radio Channel for Vehicle-2-Vehicle Communications using the CVIS Platform". *In Internal Report Centre for Adaptive Wireless Systems Cork Institute of Technology*, September 2009.
- [84] Y. Gwon, R. Jain, T. Kawahara. "Robust indoor location estimation of stationary and mobile users". *IEEE INFOCOM*, pp. 1032-1043 vol. 2, 2004. doi: 10.1109/INFCOM.2004.1356990
- [85] J. Häerri, F. Filali, C. Bonnet. "Performance comparison of AODV and OLSR in VANETs urban environments under realistic mobility patterns". *In 5th IFIP Mediterranean Ad-Hoc Networking Workshop*, pp. 14-17, Lipari, Italy, June 2006.
- [86] P. Hansen, N. Mladenović. "An Introduction to Variable Neighborhood Search". *In Book Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, pp. 433-458, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [87] P. Hansen, N. Mladenović, J. A. M. Pérez. "Variable neighbourhood search: methods and applications". *Annals of Operations Research*, Vol. 175, Issue 1, pp. 367-407, 2010. doi=10.1007/s10479-009-0657-6
- [88] J. Harvey. "Service quality: a tutorial". *In Journal of Operations Management*, Vol. 16, Issue 5, pp. 583-597, ISSN 0272-6963, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963\(97\)00026-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963(97)00026-0)
- [89] M. Hata. "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services". *In IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 29, Issue 3, pp. 317-325, Aug. 1980.
- [90] S. He, S. H. G. Chan. "Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons". *In IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18, Issue 1, pp. 466-490, Firstquarter 2016. doi: 10.1109/COMST.2015.2464084
- [91] J. Hightower, G. Borriello. "Location systems for ubiquitous computing". *In Computer*, Vol. 34, Issue 8, pp. 57-66, Aug 2001. doi: 10.1109/2.940014
- [92] V. Honkavirta, T. Perala, S. Ali-Loytty, R. Piche. "A comparative survey of WLAN location fingerprinting methods". *In 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp. 243-251, Hannover, 2009. doi: 10.1109/WPNC.2009.4907834
- [93] J. Hou, 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, Issue 1, pp. 176-185, Jan. 2006. doi: 10.1109/TWC.2006.1576541
- [94] D. Hutchison, G. Coulson, A. Campbell *et al.* "Quality of service management in distributed systems". *In Network and Distributed Systems Management, Vol. 1, Issue 13*, pp. 273-303, 1994.
- [95] Internet Society. "The Internet of Things: an overview, Understanding the issues and challenges of a more connected world". October 2015.
- [96] International Standards Organization – ISO, "Information technology – Quality of Service: Framework". ISO/CEI 13236:1998, ISO/IEC JTC 1/SC 6, ICS: 35.020; 35.100.01, 48 pages.
- [97] K. Jaffrès-Runser, J-M. Gorce, S. Ubéda. "Mono- and multiobjective formulations for the indoor wireless LAN planning problem". *In Computers & Operations Research. Vol. 35, Issue 12*, Pages 3885-3901, ISSN 0305-0548, December 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2007.02.011>
- [98] S. Jaap, M. Bechler, L. Wolf. "Evaluation of routing protocols for vehicular ad hoc networks in typical road traffic scenarios". *In Proc of the 11th EUNICE Open European Summer School on Networked Applications*, pp. 584-602, 2005.

- [99] A. Jardosh, E. M. Belding-Royer, K. C. Almeroth, S. Suri. "Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks". In *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, pp. 217-229, 2003.
- [100] D. Johnson, D.A. Maltz, Y.C. Hu. "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)". IETF Internet Draft, work in progress, draft-ietf-manet-dsr-09.txt, April 2003.
- [101] C. Joumaa. "Spatiotemporal Characterization of Evolutive Data Analysis and Mobility Stochastic Modeling - Application for Urban Planning". *Ph.D. thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France*. November 2010.
- [102] I. A. Junglas, R. T. Watson. "Location-based services". In *Communications of the ACM*. Vol. 51, Issue 3, March 2008, pp. 65-69. doi=<http://dx.doi.org/10.1145/1325555.1325568>
- [103] J. Karedal, N. Czink, A. Paier, F. Tufvesson, A. Molisch. "Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, Issue 1, pp. 323-328, 2011.
- [104] O. Kariv, S. L. Hakimi. "An algorithmic approach to network location problems. II: The p-medians". In *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol. 37, Issue 3, pp. 539-560, 1979.
- [105] R. M. Karp. "Reducibility Among Combinatorial Problems". Miller, R.E. and Thatcher, J.W. (eds). In *Complexity of Computer Computations*, Plenum Press, 1972, pp. 85-103. doi: 10.1007/978-1-4684-2001-2_9
- [106] Y. Khaled, M. Tsukada, J. Santa, J. Choi, T. Ernst. "A Usage Oriented Analysis of Vehicular Networks: from Technologies to Applications". In *JCM*, Vol. 4, Issue 5, pp. 357-368, 2009. doi: 10.4304/jcm.4.5.357-368
- [107] M. Kihl, K. Bür, P. Mahanta, E. Coelingh. "3GPP LTE downlink scheduling strategies in vehicle-to-infrastructure communications for traffic safety applications". *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 448-453, Cappadocia, 2012. doi: 10.1109/ISCC.2012.6249337
- [108] O. Klopfenstein. "Optimisation robuste de réseaux de télécommunications". *PhD Thesis, France Telecom*, 2008.
- [109] T. Kohonen, J. Hynninen, J. Kangas, J. Laaksonen, K. Torkkola. "SOM-PAK : The Self-Organizing Map Program Package". *Lab. Comput. Inform. Sci., Helsinki Univ. Technol., Espoo*, 1996.
- [110] 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.
- [111] E. Kuehn, A. Ambrosi, D. Hofmann, C. Gerlach, M. Litzengerger. "Self-Optimization and Self Configuration of 4G radio access Networks". *Alcatel Lucent R&D*, Stuttgart, Germany, 2007.
- [112] J. Kunisch, J. Pamp. "Wideband Car-to-Car Radio Channel Measurements and Model at 5.9 GHz". In *the IEEE 68th Vehicular Technology Conference, VTC2008-Fall*, pp. 1-5, Canada, September 2008. doi: 10.1109/VETECEF.2008.64
- [113] J. Laiho, K. Raivio, P. Lehtimäki, K. Hatonen, O. Simula. "Advanced analysis methods for 3G cellular networks". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 4, Issue 3, p. 930-942, May.2005. doi: 10.1109/TWC.2005.847088
- [114] L. Lamport. "Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system". In *Communications of the ACM*, Vol 21, Issue 7, pp. 558-565, July 1978. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/359545.359563>
- [115] F. Lassabe, O. Baala, P. Canalda, P. Chatonnay, F. Spies, "A Friis-based calibrated model for WiFi terminals positioning", *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Pages 382-387, Taormina, Italy, June 2005. doi: 10.1109/WOWMOM.2005.2

- [116] F. Lassabe, Y. Zheng, O. Baala, A. Caminada, "Comparison of measurement-based and simulation-based indoor Wi-Fi positioning, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) – short papers, posters and demos*, ISBN: 978-972-8692-63-6, Pages 1-4. Guimarães, Portugal, September 2011.
- [117] A. Le Maître. "Optimisation robuste d'une migration de matériel dans un réseau en décroissance de clients". *PhD Thesis, CNAM*, 2008.
- [118] Y. Lee, K. Kim, Y. Choi. "Optimization of AP placement and channel assignment in wireless LANs". In *27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, LCN*, pp. 831-836, 2002. doi: 10.1109/LCN.2002.1181869
- [119] P. Lehtimäki, P. K. Raivio, O. Simula. "Mobile radio access network monitoring using the self-organizing map". European Symposium on Artificial Neural Network, Bruges, Belgium, pp. 231-236, 2002.
- [120] W. Liang, Z. Li, H. Zhang, S. Wang, R. Bie. "Vehicular ad hoc networks: architectures, research issues, methodologies, challenges, and trends". In *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 11, Issue 8, pp. 745303:1-11, 2015. doi: 10.1155/2015/745303
- [121] A. Liefvooghe. "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/arnaudliefvooghe/research/phd>, 2009.
- [122] X. Ling, K. L. Yeung. "Joint access point placement and channel assignment for 802.11 wireless LANs". In *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 5, Issue 10, pp. 2705-2711, Oct. 2006. doi: 10.1109/TWC.2006.04003
- [123] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, H. Fussler, D. Hermann, M. Mauve. "A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments". In *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 156-161, June 2003. doi: 10.1109/IVS.2003.1212901
- [124] N. Lu, N. Cheng, N. Zhang, X. Shen, J. W. Mark. "Connected Vehicles: Solutions and Challenges". In *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 1, Issue 4, pp. 289-299, Aug. 2014. doi: 10.1109/JIOT.2014.2327587
- [125] M. K. Luhandjula, M. M. Gupta. "On fuzzy stochastic optimization". *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 81, Issue 1, pp. 47-55, 1996.
- [126] N. A. Lynch. "Distributed algorithms". *Morgan Kaufmann*, 1996.
- [127] A. Mahajan, N. Potnis, K. Gopalan, A. Wang. "Modeling vanet deployment in urban settings". In *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, pp.151-158, Greece, October 2007.
- [128] S. Marinoni, H. H. Kari. "Ad Hoc Routing Protocol Performance in a Realistic Environment". *International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies*, pp. 96-96, April 2006. doi: 10.1109/ICNICONSMCL.2006.39
- [129] F. J. Martinez, C. K. Toh, J. C. Cano, C. T. Calafate, P. Manzoni. "Realistic radio propagation models (RPMs) for VANET simulations". In *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Budapest, Hungary, pp. 1-6, April 2009. doi: 10.1109/WCNC.2009.4917932
- [130] R. Mathar, T. Niessen. "Optimum positioning of base stations for cellular radio networks". In *Wireless Networks*, Vol. 6, Issue 6, pp. 421-428, 2000. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1019263308849>
- [131] W. Meng, J. Wang, L. Peng, Y. Xu. "ANFIS-based wireless LAN indoor positioning algorithm". In *Proceedings of the 5th International Conference on Wireless communications, networking and mobile computing*, pp. 5146-5149, Beijing, 2009. doi: 10.1109/WICOM.2009.5302859

- [132] H. Menouar, I. Guvenc, K. Akkaya, A. S. Uluagac, A. Kadri, A. Tuncer. "UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for the Smart City: Applications and Challenges". In *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, Issue 3, pp. 22-28, March 2017. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600238CM
- [133] N. Mezani. "Algorithmes approchés aléatoires". *PhD Thesis, Université Paris 9*, 2005.
- [134] M. Miernik. "Application of 2G Spatial Traffic Analysis in the Process of 2G and 3G Radio Network Optimization". In *IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC-Spring*, pp. 909-913, April 2007.
- [135] A. Molisch, F. Tufvesson, J. Karedal, C. Mecklenbrauker. "A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels". In *IEEE Wireless Communications*, Vol. 16, Issue 6, pp. 12-22, December 2009. doi: 10.1109/MWC.2009.5361174
- [136] R. Nagel, S. Eichler. "Efficient and Realistic Mobility and Channel Modeling for VANET Scenarios using OMNet++ and INET-Framework. OMNeT++". In *Proceedings of the 1st International Workshop on OMNeT++* (hosted by SIMUTools, 2008).
- [137] V. Naumov, R. Baumann, T. Gross. "An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces". In *Proc. 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, May 2006.
- [138] NEC Corporation. "Self-Organizing Network: NEC's proposals for next-generation radio network management". *NEC Corporation Technical white paper*, February 2009.
- [139] J. Oishi, K. Asakura, T. Watanabe. "A Communication Model for Inter-vehicle Communication Simulation Systems Based on Properties of Urban Areas". In *International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 6, Issue 10, pp. 213-219, October 2006.
- [140] A. Ouorou. "Robust Capacity Assignment in Telecommunications". *Journal Computational Management Science*, Vol. 3, Issue 4, pp. 285-305, 2006.
- [141] M. Park, C. Cordeiro, E. Perahia and L. L. Yang. "Millimeter-wave multi-Gigabit WLAN: Challenges and feasibility". In *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Cannes, 2008, pp. 1-5, 2008. doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699890
- [142] C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das. "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing". RFC 3561, July 2003.
- [143] M. Portmann, A. A. Pirzada. "Wireless Mesh Networks for Public Safety and Crisis Management Applications". In *IEEE Internet Computing*, Vol. 12, Issue 1, pp. 18-25, Jan.-Feb. 2008. doi: 10.1109/MIC.2008.25
- [144] P. Prasithsangaree, P. Krishnamurthy, P.K. Chysanthi. "On indoor position location with wireless LANs". In *13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol 2, pp. 720 - 724, 15-18 sept. 2002. doi: 10.1109/PIMRC.2002.1047316
- [145] C. Prehofer, C. Bettstetter. "Self-organization in communication networks: principles and design paradigms". In *IEEE Communications magazine*, Vol. 43, Issue 7, pp. 78-85, 2005.
- [146] A. Prekopa. "Stochastic Programming". *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, 1995.
- [147] C. Prommak, J. Kabara, D. Tipper, C. Charnsripinyo. "Next generation wireless LAN system design". In *Proceedings MILCOM*, Vol. 1, pp. 473-477, 2002. doi: 10.1109/MILCOM.2002.1180488
- [148] B. Ramakrishnan, Dr. R. S. Rajesh, R. S. Shaji. "Analysis of Routing Protocols for Highway Model without Using Roadside Unit and Cluster". *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 2, Issue 1, pp. 1-9, 2011.
- [149] T. S. Rappaport, J. H. Reed, B. D. Woerner. "Position location using wireless communications on highways of the future". In *IEEE Communications Magazine*, Vol. 34, Issue 10, pp. 33-41, Oct 1996. doi: 10.1109/35.544321R.

- [150] C. Rodrigues, G. R. Mateus, A. A. F. Loureiro. "On the design and capacity planning of a wireless local area network". In *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, NOMS*, pp. 335-348, Honolulu, HI, 2000.
doi: 10.1109/NOMS.2000.830394
- [151] B. Roy. "A propos de robustesse en recherche opérationnelle et aide à la décision, Flexibilité et robustesse en ordonnancement". *Paris, Lavoisier*, pp. 35-50, 2005.
- [152] K. Runser. "Méthodologies pour la planification de réseaux locaux sans-fil". *PhD Thesis, INSA Lyon*, 2005.
- [153] B. Sabata, S. Chatterjee, M. Davis, J. J. Sydir, T. F. Lawrence. "Taxonomy for QoS specifications". In *Proceedings of Third International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems*, Newport Beach, CA, pp. 100-107, 1997.
doi: 10.1109/WORDS.1997.609931
- [154] A. Saltelli, K. Chan, M. Scott. "Sensitivity Analysis". *John Wiley & Sons publishers, Probability and Statistics series*, 2000.
- [155] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola. "Global Sensitivity Analysis". *The Primer, John Wiley & Sons*, 2008.
- [156] L. Sochas. "A survey of quantitative and qualitative methods of sensitivity analysis for stochastic dynamic systems". *Probabilistic engineering mechanics*, Vol. 6, Issue 3-4, pp. 148-163, 1991.
- [157] D. Stamatelos, A. Ephremides. "Spectral efficiency and optimal base placement for indoor wireless networks". In *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, Issue 4, pp. 651-661, May 1996. doi: 10.1109/49.490416
- [158] S. Steiniger, M. Neun, A. Edwardes. "Foundations of Location Based Services". *CartouCHE, Lecture Notes on LBS*, 2008.
- [159] Stratégie Nationale de Recherche. France Europe 2020, Mars 2015.
- [160] SUMO - Simulation of Urban MObility, 2007. <http://sumo.sourceforge.net/>
- [161] N. Tabia. "Modèles et algorithmes pour l'optimisation robuste dans les Self-Organizing Networks (SON) des réseaux mobiles 4G (LTE)". *PhD Thesis, UTBM, Belfort*, 2013.
- [162] N. Tabia, A. Gondran, O. Baala, A. Caminada, "Self-Organizing Networks on LTE System: Antenna Parameters Configuration Effects On LTE Networks Coverage with Respect to Traffic Distribution", *The 3rd International Conference on Resource, Services and User (MOBILITY), "Best Papers" Award*, ISBN: 978-1-61208-313-1, Pages 1-9, Lisbon, Portugal, November 2013.
- [163] N. Tabia, A. Gondran, O. Baala, A. Caminada, "Interference model and antenna parameters setting effects on 4G-LTE networks coverage", *7rd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks (PM2HW2N)*, Pages 175-182, Paphos, Cyprus Island, October 2012.
doi: 10.1145/2387191.2387215
- [164] N. Tabia, A. Gondran, O. Baala, A. Caminada, "Frequency Robustness Optimization with Respect to Traffic Distribution for LTE System", *Applications of Evolutionary Computation (EvoApplications 2012: EvoCOMNET)*, Book Chapter LNCS, Vol. 7248, Springer, Pages 31-41, Malaga, Spain, April 2012. doi: 10.1007/978-3-642-29178-4_4
- [165] N. Tabia, A. Gondran, O. Baala, A. Caminada, "Interference Model and Evaluation in LTE Networks", *4th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, Pages 1-6, Toulouse, France. October 2011. doi: 10.1109/WMNC.2011.6097237
- [166] K-S. Tang, K-F. Man, S. Kwong. "Wireless communication network design in IC factory". In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, Issue 2, pp. 452-459, Apr 2001. doi: 10.1109/41.915425
- [167] A. S. Tanenbaum, M. Van Steen. "Distributed system: principles and paradigms". *Prentice-Hall*. 2nd Edition, 2007.
- [168] Task Group p. IEEE P802.11p. Wireless access in vehicular environments (WAVE). *IEEE Computer Society*, 2006.

- [169] S. Tekinay. "Wireless Geolocation Systems and Services". In *IEEE Communications Magazine*, Vol. 36, Issue 4, pp. 28-28, April 1998.
doi: 10.1109/MCOM.1998.667408
- [170] G. Tel. "Introduction to distributed algorithms". Cambridge university press, 2000.
- [171] M. I. Tiwana, B. Sayrac, Z. Altman, "Statistical Learning for Automated RRM: Application to eUTRAN Mobility". *IEEE International Conference on Communications*, Dresden, pp. 1-5, 2009. doi: 10.1109/ICC.2009.5199489
- [172] M. Torrent-Moreno, M. Killat, H. Hartenstein. "The challenges of robust inter-vehicle communications". In *IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, VTC-2005-Fall*, pp. 319-323, 2005. doi: 10.1109/VETEFCF.2005.1557524
- [173] M. Trieber, A. Hennecke, D. Helbing. "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations". In *Physical Review E*, Vol. 62, Issue 2, August 2000.
- [174] M. Unbehau, M. Kamenetsky, "On the deployment of picocellular wireless infrastructure" In *IEEE Wireless Communications*, Vol. 10, Issue 6, pp. 70-80, Dec. 2003.
doi: 10.1109/MWC.2003.1265855
- [175] J. L. Van den Berg, R. Litjens, A. Eisenblätter, M. Amirijoo, O. Linnell, C. Blondia, T. Kuerner, N. Scully, J. Oszmiansky, L.C Schmelz. "Self-organisation in future mobile communication networks". In *Proceedings of ICT Mobile Summit*, 2008.
- [176] T. Vanhatupa, M. Hannikainen, T. D. Hamalainen. "Genetic Algorithm to Optimize Node Placement and Configuration for WLAN Planning". In *4th International Symposium on Wireless Communication Systems*, Trondheim, pp. 612-616, 2007.
doi: 10.1109/ISWCS.2007.4392413
- [177] U. Varshney. "The status and future of 802.11-based WLANs". In *Computer*, Vol. 36, Issue 6, pp. 102-105, June 2003. doi: 10.1109/MC.2003.1204381
- [178] VISSIM - State-of-the-Art Multi-Modal Simulation. ptv vision, 2009.
<http://www.ptvamerica.com/>
- [179] A. Vogel, B. Kerherve, G. von Bochmann, J. Gecsei. "Distributed multimedia and QOS: a survey". In *IEEE MultiMedia*, Vol. 2, Issue 2, pp. 10-19, Summer 1995.
doi: 10.1109/93.388195
- [180] S. Y. Wang. "The Effects of Wireless Transmission Range on Path Lifetime in Vehicle Formed Mobile Ad Hoc Networks on Highways". In *Proc. IEEE International Conference on Communication (ICC)*, pp. 3177-3181, Vol. 5, May 2005.
doi: 10.1109/ICC.2005.1495001
- [181] Y. Wang, X. Jia, H.K Lee. "An indoors wireless positioning system based on wireless local area network infrastructure". In *6th Int. Symp. On Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services*, Vol. 54, pp. 22-25, Melbourne, july 2003.
- [182] L. R. Welch, B. A. Shirszi. "A dynamic real-time benchmark for assessment of QoS and resource management technology". In *Proceedings of the Fifth IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium*, Vancouver, BC, pp. 36-45, 1999.
doi: 10.1109/RTTAS.1999.777659
- [183] P. Wertz, M. Sauter, F. A. Landstorfer, G. Wolfle, R. Hoppe, "Automatic optimization algorithms for the planning of wireless local area networks". *IEEE 60th Vehicular Technology Conference, VTC2004-Fall*. pp. 3010-3014 Vol. 4, 2004.
doi: 10.1109/VETEFCF.2004.1400613
- [184] S. Yousefi, M. S. Mousavi, M. Fathy. "Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs): Challenges and Perspectives". In *6th International Conference on ITS Telecommunications*, Chengdu, pp. 761-766, 2006. doi: 10.1109/ITST.2006.289012
- [185] M. A. Youssef, A. Agrawala, A. U. Shankar, S. H. Noh. "A probabilistic clustering-based indoor location determination system". *Technical Report CS-TR-4350 and UMIAACS-TR-2002-30*, University of Maryland, 2002.

- [186] M. A. Youssef, A. Agrawala. "The Horus location determination system". In *Wireless Networks*. Vol. 14, Issue 3, pp. 357-374, June, 2008.
doi=<http://dx.doi.org/10.1007/s11276-006-0725-7>
- [187] S. Zeadally, R. Hunt, Y. S. Chen, A. Irwin, A. Hassan. "Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges". In *Telecommunication Systems*, Vol. 50, Issue 4, pp. 217-241, 2012.
- [188] M. Zhang, S. Zhang, J. Cao. "Fusing Received Signal Strength from Multiple Access Points for WLAN User Location Estimation". In *International Conference on Internet Computing in Science and Engineering*, ICICSE, pp. 173-180, Harbin, 2008.
doi: 10.1109/ICICSE.2008.24
- [189] K. Zheng, Q. Zheng, P. Chatzimisios, W. Xiang and Y. Zhou. "Heterogeneous Vehicular Networking: A Survey on Architecture, Challenges, and Solutions". In *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 17, Issue 4, pp. 2377-2396, Fourthquarter 2015. doi: 10.1109/COMST.2015.2440103
- [190] Y. Zheng. "Models and algorithms for the combinatorial optimization of WLAN-based Indoor Positioning System". *PhD Thesis, UTBM, Belfort*, 2012.
- [191] Y. Zheng, O. Baala, A. Caminada, "A Multi-objective Approach to Design WLAN-based Indoor Positioning System ", *12ème Congrès de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'11)*, Saint-Etienne, Mars 2011.
- [192] Y. Zheng, O. Baala, A. Caminada, "A new approach to design a WLAN-based positioning system", *IEEE 4th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Pages 1-8. Gold Coast, Australia, December 2010.
doi: 10.1109/ICSPCS.2010.5709652
- [193] Y. Zheng, O. Baala, A. Caminada, "Efficient design of indoor positioning systems based on optimization model", *IFIP Wireless Days (WD)*, Pages 1-5, Venice, Italy, October 2010. doi: 10.1109/WD.2010.5657722
- [194] Y. Zheng, O. Baala, A. Caminada, "A New Model For Indoor WLAN Positioning System", *11ème Congrès de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF'10)*, Toulouse, Février 2010.
- [195] Y. Zheng, O. Baala, A. Caminada, "Optimization model for an Indoor WLAN-based Positioning System", *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Pages 1-7. Zurich, Switzerland. September 2010.
doi: 10.1109/IPIN.2010.5648064
- [196] Y. Zheng, O. Baala, A. Caminada, "Comparison of performance evaluation of several WLAN-based Indoor Positioning System", *10ème Journées Doctorales en Informatique et Réseaux (JDIR'09)*, Belfort, Février 2009.
- [197] S. Zirari, P. Canalda, F. Spies. "A Very First Geometric Dilution of Precision Proposal for Wireless Access Mobile Networks". In *First International Conference on Advances in Satellite and Space Communications*, pp. 162-167, Colmar, 2009.
doi: 10.1109/SPACOMM.2009.26
- [198] S. Zirari, P. Canalda, F. Spies. "Geometric and Signal Strength Dilution of Precision (DoP) Wi-Fi". *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, Vol. 3, pp35-44, August 2009.

Résumé :

Durant ces dernières décennies, nous avons assisté à l'avènement et la démocratisation des réseaux informatiques et de télécommunications à haut débit. Aujourd'hui, le numérique est omniprésent ; les utilisateurs friands de services et de loisirs sont à l'affut de débits de plus en plus importants. Les opérateurs rivalisent d'offres de services pour satisfaire leurs clients et proposent différents types d'accès à Internet soit via les réseaux sans fil soit via les réseaux cellulaires. Proposer ce type de services soulève deux problèmes majeurs, souvent antagonistes : la qualité de service offerte à l'utilisateur et l'optimisation des ressources de l'opérateur ; concilier ces deux critères est un défi permanent.

L'objet de mes recherches est la modélisation de systèmes de la réalité et le développement d'algorithmes d'optimisation des ressources et de la qualité des réseaux de communications. Plus particulièrement, l'enjeu consiste à définir des outils d'aide à la décision génériques et paramétrables permettant à l'expert du domaine traité de simuler son système avant de le déployer ou d'optimiser la configuration d'un système déjà déployé. Dans ce mémoire, j'aborde trois thématiques traitées durant mes travaux de recherche : la planification automatique de WLAN, la mobilité dans les réseaux véhiculaires et l'optimisation en ligne des réseaux LTE.

Mots-clés : Communications radio, Planification, Optimisation combinatoire, mobilité, VANET, SON

Abstract:

During these last decades, we attended the advent and the democratization of broadband networks. Today, the digital technologies are omnipresent; the users are great fans of services and leisure activities are on the lookout for great flow rates. The operators are competing in services to satisfy their customers and are proposing various access types through wireless networks or cellular networks. Providing such services raises two major, often conflicting issues: the quality of service provided to the user and the optimization of the operator resources; reconciling these two criteria is a permanent challenge.

The main goal of my researches is the modeling of real systems and then the development of algorithms dedicated to the optimization of the networks' resources and quality. Particularly, the stake consists in defining generic and settable decision-making tools allowing the expert of the considered domain to simulate its system before deployment or to optimize the configuration of an existing system. In this report, I address three topics that I was interested in during my research works: automatic planning of WLAN, mobility in vehicular networks and online optimization in LTE Networks.

Keywords: Radiocommunications, Planning, Combinatorial optimization, Mobility, VANET, SON

The logo for SPIM (École doctorale SPIM) features a blue horizontal bar on the left, followed by the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a large, white, sans-serif font.

■ 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

