

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ORDONNANCEMENT DES TRANSMISSIONS DANS UN RÉSEAU  
VÉHICULAIRE UTILISANT DES SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN INFORMATIQUE

PAR  
WASSIM SELLIL ATOUI

JANVIER 2017

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.10-2015). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je remercie vivement mes Directeurs de mémoire, le Professeur Wessam Ajib et le Professeur Mounir Boukadoum, de m'avoir permis d'effectuer ce travail. Leur soutien, leur confiance et leur disponibilité m'ont permis de m'épanouir sereinement tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier le docteur Mohammad Ali Salahuddin pour sa disponibilité et ses judicieux conseils.

Merci aussi à tous ceux qui de près ou de loin m'ont accompagné et soutenu durant mon parcours d'étude, je pense notamment à A. Sadsaoud, N. Nouaouria, A. Ameri et K. Azzoug

J'adresse évidemment mes remerciements à ma famille et mes amis pour leur soutien durant cette importante étape de ma vie.



## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX . . . . .	IX
TABLE DES FIGURES . . . . .	XI
RÉSUMÉ . . . . .	XIII
ABSTRACT . . . . .	XV
CHAPITRE I	
INTRODUCTION . . . . .	1
1.1 Mise en contexte . . . . .	1
1.2 Motivation . . . . .	3
1.3 Problématique . . . . .	5
1.4 Méthodologie . . . . .	6
1.5 Contribution . . . . .	7
1.6 Organisation de l'ouvrage . . . . .	8
CHAPITRE II	
VUE D'ENSEMBLE DES RÉSEAUX VÉHICULAIRES MOBILES . . . . .	11
2.1 Communication dans les réseaux véhiculaires . . . . .	11
2.1.1 Communication inter-véhicules ( <i>V2V communication</i> ) . . . . .	11
2.1.2 Communication véhicules-RSUs ( <i>V2I communication</i> ) . . . . .	12
2.1.3 Communication inter-RSUs ( <i>I2I communication</i> ) . . . . .	12
2.2 Caractéristiques des réseaux véhiculaires . . . . .	12
2.3 Normes et standards de communication . . . . .	14
2.3.1 Le standard DSRC ( <i>Dedicated Short Range Communication</i> ) . . . . .	14
2.3.2 Pile protocolaire WAVE ( <i>Wireless Access in Vehicular Environment</i> ) . . . . .	15
2.3.3 CALM ( <i>Communications, Air-interface, Long and Medium range</i> ) . . . . .	16

2.4	Domaines d'application des réseaux véhiculaires . . . . .	17
2.4.1	Application de divertissements . . . . .	17
2.4.2	Applications de gestion du trafic . . . . .	17
2.4.3	Applications de sécurité routière . . . . .	18
2.5	Les défis dans les réseaux véhiculaires . . . . .	19
CHAPITRE III		
ÉTAT DE L'ART . . . . .		21
3.1	Stratégies de placement des RSUs pour réduire le nombre d'unités déployées . . . . .	22
3.2	Stratégies d'économie d'énergie pour les RSUs . . . . .	24
3.3	Considération de l'énergie renouvelable . . . . .	27
CHAPITRE IV		
ENVIRONNEMENT D'ÉTUDE ET FORMULATION DU PROBLÈME . . . . .		31
4.1	Topologie du réseau . . . . .	31
4.2	Modèle de communication . . . . .	32
4.3	Modèle d'ordonnancement . . . . .	33
4.4	Complexité . . . . .	35
CHAPITRE V		
SOLUTIONS PROPOSÉES . . . . .		39
5.1	Algorithme glouton ( <i>Greedy Algorithm</i> ) . . . . .	39
5.1.1	Complexité de l'algorithme glouton . . . . .	43
5.2	Optimisation par essaims de particules . . . . .	43
5.2.1	Algorithme PSO . . . . .	47
5.2.2	Complexité de l'algorithme PSO . . . . .	49
CHAPITRE VI		
ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS . . . . .		51
6.1	Résultats et discussions . . . . .	54
6.1.1	Impact du nombre de RSUs déployées sur le service des véhicules	54

6.1.2	Impact du nombre de RSUs déployées sur le délai de service des véhicules . . . . .	55
6.1.3	Impact de la quantité d'énergie récoltée sur le service des véhicules	56
6.1.4	Impact de la densité véhiculaire sur le service des véhicules .	57
6.1.5	Impact de la vitesse des véhicules sur le service . . . . .	58
6.1.6	Évaluation des performances de l'algorithme PSO . . . . .	59
CHAPITRE VII		
CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .		65
BIBLIOGRAPHIE . . . . .		67



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
6.1	Les paramètres par défaut pour le réseau véhiculaire . . . . .	53
6.2	Paramètres utilisés pour évaluer l'algorithme PSO . . . . .	61
6.3	Paramètres utilisés pour les différents scénarios . . . . .	63



## TABLE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Bande de fréquences allouée pour le DSRC . . . . .	14
2.2 Pile de protocoles WAVE . . . . .	15
3.1 Modèle de réseau pour la récolte d'énergie dans les RSUs (Atallah <i>et al.</i> , 2016) . . . . .	27
4.1 Une instance du réseau véhiculaire dans laquelle de multiples RSUs alimentées exclusivement d'une source d'énergie renouvelable sont déployées le long de la route . . . . .	32
5.1 Exemple de débordement d'énergie dans la RSU quand l'énergie récoltée est supérieure à l'énergie consommée . . . . .	41
6.1 Impact du nombre de RSUs déployées sur le service des véhicules	54
6.2 Impact du nombre de RSUs déployées sur le délai de service des véhicules . . . . .	55
6.3 Impact de la quantité d'énergie récoltée sur le service des véhicules	57
6.4 Impact de la densité véhiculaire sur le service des véhicules . . . .	58
6.5 Impact de la vitesse des véhicules sur leur service . . . . .	59
6.6 Nombre moyen d'itérations pour que l'algorithme PSO converge vers la solution optimale . . . . .	60
6.7 Durée d'exécution de l'algorithme PSO pour différentes instances d'exécutions . . . . .	61
6.8 L'impact de la taille des scénarios sur la convergence de l'algorithme	62



## RÉSUMÉ

La nécessité de réduire l'empreinte carbone et les dépenses de fonctionnement, d'installation et de maintenance des unités de bord de route dans les réseaux véhiculaires (communication entre les véhicules et des unités de bord de route), nous a conduit à étudier les performances de ce genre de réseau quand les unités de bord de route sont alimentées exclusivement par des sources d'énergie renouvelable. Ce mémoire propose un ordonnanceur de transmissions pour ces unités de bord de route qui vise à maximiser le nombre de véhicules servis. Nous commençons d'abord par formuler le problème par un modèle d'optimisation linéaire en nombres entiers et prouvons ensuite que ce modèle fait partie des problèmes NP-difficiles pour lesquels il n'existe pas de solution optimale dans un temps polynomial. De ce fait, nous proposons deux algorithmes sous optimaux pour le résoudre. Le premier algorithme repose sur une stratégie gloutonne qui vise à favoriser les communications avec une faible consommation d'énergie, tandis que le deuxième algorithme est une méta-heuristique basée sur un algorithme évolutionnaire qui vise à chercher itérativement le meilleur ordonnancement possible des communications des unités de bord de route. Nous comparons ensuite la performance de nos solutions avec celle d'un ordonnanceur proposé dans la littérature, qui a pour objectif d'économiser l'énergie liée aux communications des unités de bord de route quand elles sont alimentées par l'énergie conventionnelle. Les résultats des simulations montrent que notre mécanisme d'ordonnancement arrive à concurrencer celui qui est liée à l'économie d'énergie, non seulement en termes du pourcentage de véhicules servis mais aussi en termes du délai de services des véhicules.

**Mots-clés :** Réseau ad hoc véhiculaire, ordonnancement hors-ligne, unité de bord de route, communication en liaison descendante, récolte d'énergie.



## ABSTRACT

The use of renewable energy at roadside units (RSUs) in vehicular ad hoc networks is a great alternative to the electric grid, since it lowers the carbon footprint, and the cost of deployment and maintenance. This thesis proposes a scheduler for serving vehicles by RSUs that use energy harvesting, with the aim to maximize the number of served vehicles. We start by defining an integer linear programming model for finding the optimal offline schedule. The problem is shown to be NP-hard and hence we propose two near-optimal solutions in order to solve it. The first one is a greedy heuristic that aims to find the best schedule by prioritizing the assignments of vehicles based on their energy cost and the second one is a meta-heuristic that searches iteratively for the optimal assignments of vehicles. We compare the optimal solution and near-optimal offline solutions with an energy-efficient scheduler of RSUs. Our simulation results show that the proposed scheduler for energy harvesting RSUs can reduce the service delay of vehicles. It also provides good performance with respect to the percentage of served vehicles, in comparison to an energy-efficient scheduler in grid-powered RSUs.

**Keywords:** Vehicular ad-hoc networks, off-line scheduling, road side units, down-link communications, energy harvesting



## ACRONYMES

C2C	Consortium voiture-voiture ( <i>Car to Car Consortium</i> )
CALM	Communications, interface aérienne, longue et moyenne portée ( <i>Communications, Air-interface, Long and Medium range</i> )
CCH	Canal de contrôle ( <i>Control CHannel</i> )
CO <sub>2</sub>	Gaz carbonique ( <i>Carbon dioxide</i> )
DE-OLSR	Protocole de routage destiné aux réseaux multipoints - évolution différentielle ( <i>Differential Evolution - Optimized Link State Routing</i> )
DSRC	Communication dédiée à courte portée ( <i>Dedicated Short Range communication</i> )
GHz	GigaHertz
GSM	Système global pour la communication mobile ( <i>Global System for Mobile Communications</i> )
I2I	Communication inter-RSUs ( <i>Infrastructure to Infrastructure communication</i> )
IEEE	Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens ( <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> )
IP	Protocole Internet ( <i>Internet Protocol</i> )
IPv6	Protocole Internet version 6 ( <i>Internet Protocol version 6</i> )
ISO	Organisation internationale de normalisation ( <i>International Organization for Standardization</i> )

## XVIII

LpSolve	Résolveur de programmation linéaire ( <i>Linear programming Solver</i> )
LTE	Evolution à long terme ( <i>Long Term Evolution</i> )
MANET	Réseau sans infrastructure à stations mobiles ( <i>Mobile Ad hoc NETWORKS</i> )
MHz	MégaHertz
NEMO	Mobilité réseau ( <i>Network Mobility</i> )
NHTSA	L'agence fédérale des États-Unis chargée de la sécurité routière ( <i>National Highway Traffic Safety Administration</i> )
NP	Polynomial non déterministe <i>Non determinist Polynomial</i>
OBU	Unité de bord de route ( <i>On Board Unit</i> )
OLSR	Protocole de routage destiné aux réseaux multipoints ( <i>Optimized Link State Routing</i> )
PLNE	Problème d'optimisation Linéaire en Nombres Entiers
PSO	Optimisation par essaims particulaires ( <i>Particle Swarm Optimization</i> )
QoS	Qualité de Service ( <i>Quality of Service</i> )
RAM	Mémoire vive ( <i>Random Access Memory</i> )
RSU	Unité de bord de route ( <i>Road Side Unit</i> )
SCH	Canal de service ( <i>Service CHANNEL</i> )
TC	Comité technique ( <i>Technical Committee</i> )
TCP	Protocole de contrôle de transmissions ( <i>Transmission Control Protocol</i> )
UMTS	Système universel de télécommunications mobiles ( <i>Universal Mobile Telecommunications System</i> )

V2I	Communications véhicules-RSUs ( <i>Vehicle to Infrastructure</i> )
V2V	Communication inter-véhiculaires ( <i>Vehicle to Vehicle communication</i> )
VANET	Réseau ad hoc véhiculaire ( <i>Vehicular Ad hoc NETWORKS</i> )
VTC	Conférence sur la technologie véhiculaire ( <i>Vehicular Technology Conference</i> )
WAVE	Accès sans fil dans le contexte véhiculaire ( <i>Wireless Access in Vehicular Environment</i> )
WG	Groupe de travail ( <i>Work Group</i> )
WLAN	Réseau local sans fil ( <i>Wireless Local Area Network</i> )
WSMP	Protocole de messages courts d'onde ( <i>WAVE Short Messages Protocol</i> )

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte

À travers l'histoire, le progrès technologique a toujours joué un rôle important dans le développement des systèmes de transport. Les progrès récents dans les technologies de l'information et de la communication promettent d'améliorer la gestion des transports terrestres d'une manière qui n'aurait pas été concevable jusqu'à présent. Parmi les défis les plus urgents sur nos routes aujourd'hui auxquels ces technologies doivent apporter une solution, c'est de rendre le transport plus sécurisé, moins polluant et plus fluide.

Les systèmes de transport intelligent émergent comme une solution qui pourrait révolutionner la mobilité, c'est-à-dire changer la manière dont nous nous déplaçons et communiquons sur les routes et la façon dont nous concevons la législation des transports et la régulation des véhicules. Parmi les services offerts par ces systèmes, certains reposent sur la coopération des véhicules pour acheminer des informations liées à la sécurité ou à la gestion routière. Cette coopération est effectuée grâce à une architecture de réseaux véhiculaires sans fil appelée réseaux véhiculaires mobiles - *Vehicular Ad hoc NETWORKS* (VANETs).

Les réseaux véhiculaires mobiles sont un domaine de recherche qui connaît un grand essor ces dernières années. De nombreux académiciens, industriels et ins-

tances de standardisation tels que ISO (CALM, 2008), IEEE (IEEE802.11, 2007) et C2C(C2C-CC, 2007) ont contribué à son essor et avancement. Malheureusement, le déploiement des VANETs dans la vie réelle n'est pas aussi rapide que prévu. Cela est dû principalement à la parcellisation des efforts de développement, on peut trouver plusieurs normes de standardisation et plusieurs architectures de communications. De ce fait, les industriels ont été démotivés à investir dans leurs implémentations. Toutefois, quand ces réseaux seront déployés à large échelle, ils pourront avoir un grand impact dans notre société. Selon l'agence fédérale des États-Unis chargée de la sécurité routière (*National Highway Traffic Safety Administration*, NHTSA), ces réseaux pourraient « changer les règles du jeu » et prévenir potentiellement de 70 à 80 % des accidents de routes impliquant des conducteurs responsables (NHTSA, 2014).

La communication dans les réseaux véhiculaires devrait contribuer à améliorer la sécurité routière en fournissant des informations en temps opportun aux conducteurs afin qu'ils prennent des actions adéquates à des situations potentiellement dangereuses, et à faire du voyage des usagers un moyen plaisant et pratique. Afin d'assurer ces tâches, les réseaux véhiculaires sont contraints de respecter certains critères de performance. Par exemple, le délai d'acheminement des messages entre les véhicules est un critère important pour garantir la sécurité routière et éviter d'éventuelles collisions. En effet, une étude a montré qu'une collision en chaîne entre les véhicules pourrait être évitée ou sa gravité atténuée si les notifications d'avertissement étaient livrées dans un délai inférieur à 0,1 seconde (Biswas *et al.*, 2006). D'un autre côté, d'autres services moins critiques dans les réseaux véhiculaires, exigent d'autre forme de qualité de service pour satisfaire leurs usagers. Les services de divertissements, par exemple, nécessitent d'être disponibles en tout temps. Des interruptions fréquentes dans ce genre de service donneraient une mauvaise impression aux utilisateurs et les éloigneraient de leur utilisation. La

connectivité doit donc être un critère important pour ces services.

Malheureusement, les caractéristiques des communications inter-véhiculaires rendent difficile le fait de satisfaire certains critères de performance. En effet, les véhicules circulent à des vitesses relativement élevées, comparé à d'autres réseaux mobiles, et peuvent changer régulièrement de routes. Cela induit une variation très rapide dans la topologie du réseau et peut causer une interruption dans les liaisons de communications. Le routage devient alors un véritable défi pour localiser les véhicules et router leurs messages. Un grand nombre de chercheurs se sont penchés sur cette problématique et plusieurs contributions ont été effectués dans le but d'améliorer les protocoles de routages dans ces réseaux véhiculaires (Darisini et Kumari, 2013). Une des solutions pour surmonter les défis que présentent les communications inter-véhiculaires (*Vehicle to vehicle communications*, V2V) et d'améliorer les critères de performance consiste à utiliser un ensemble d'unités de bord de route (*Road Side Unit*, RSU) pour assister les véhicules dans leurs communications. Les RSUs sont des infrastructures immobiles déployées le long des routes et pouvant être connectées ensemble par un réseau à haut débit (filaire, satellitaire ou sans fil terrestre). Elles permettent de coordonner les actions avec les véhicules d'une manière centralisée ou distribuée et de partager et traiter plusieurs types d'informations. Elles peuvent aussi être utilisées pour effectuer plusieurs services tels que : la diffusion des données, la gestion du trafic, la localisation des véhicules, et la gestion de la sécurité (autorité de confiance) et de servir de passerelles vers d'autres types de réseaux à hauts débits comme l'internet ou les réseaux cellulaires.

## 1.2 Motivation

Le déploiement des RSUs dans les réseaux véhiculaires est une tâche qui peut coûter très chère financièrement. Le nombre de RSUs à déployer est relatif à la taille

du réseau routier. Les RSUs peuvent s'étendre sur des dizaines voire des centaines de kilomètres. Il faudra ainsi non seulement prendre en considération les coûts liés à l'aménagement de la structure physique pour alimenter ces RSUs mais aussi les coûts nécessaires pour les faire opérer. La réduction des coûts de déploiements des RSUs est une problématique qui suscite l'attention de la communauté scientifique. Les principales contributions ont visé à réduire le nombre de RSUs du réseau grâce à des stratégies de placement. Ces contributions cherchent à installer un nombre minimal de RSUs dans des endroits adéquats, de sorte qu'une certaine qualité de service soit respectée dans le réseau. D'autre part, ces contributions visent à réduire directement la consommation électrique dans les RSUs par l'ordonnancement optimal des transmissions ou l'allocation optimale des ressources. Nous discutons, en détail, de ces travaux dans le chapitre III.

Dans le but de réduire le coût de déploiement des RSUs, nous étudions dans ce mémoire une autre approche qui n'a pas été suffisamment envisagée dans les réseaux véhiculaires. Nous considérons que les RSUs sont alimentées exclusivement par des sources d'énergie renouvelable. Cela permettrait d'alléger les coûts de déploiement en réduisant les dépenses liées à la consommation électrique et à l'installation de l'infrastructure d'alimentation le long des routes. En effet, l'utilisation de sources d'énergie renouvelable ne nécessiterait pas de câblage électrique, ces sources d'énergie peuvent être récoltées directement de l'environnement entourant les RSUs. Aussi, elles sont inépuisables à l'échelle du temps humain, et en particulier ne dépendent pas d'énergies fossiles. On peut citer parmi ces sources d'énergie, l'énergie solaire qui est récoltée par la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs, l'énergie éolienne qui est générée grâce au mouvement mécanique des éoliennes par le vent ou l'énergie piézoélectrique qui provient de la conversion des vibrations causées par le passage des voitures en électricité.

Notre étude contribue aussi aux efforts collectifs qui visent à diminuer les émissions de gaz carbonique ( $CO_2$ ) et à protéger notre planète. Effectivement, le réchauffement climatique constitue aujourd'hui un des défis les plus importants pour notre planète. La production d'électricité à partir des sources d'énergies fossiles (charbon, gaz naturel ou pétrole) est une des causes principales du réchauffement climatique. En 2011, les émissions de  $CO_2$  aux États-Unis relative au secteur de l'électricité ont engendré environ 2166 millions tonnes soit 40% des émissions totales de  $CO_2$  (UEPA, 2007). Il faudrait donc prendre au sérieux ce problème et essayer de trouver des solutions alternatives même pour les réseaux véhiculaires.

### 1.3 Problématique

Dans ce mémoire, nous évaluons la performance des RSUs quand elles sont alimentées exclusivement par une source d'énergie renouvelable. Ces sources d'énergie sont de nature instable dans leur disponibilité. La quantité et le temps de disponibilité de cette énergie dépendent du climat et des conditions géographiques et cette énergie n'est pas disponible ni partout, ni tout le temps. Il faut prévoir des dispositifs de stockage pour accumuler l'énergie et l'utiliser en cas d'interruption.

L'incertitude sur la disponibilité d'énergie fait que les RSUs ne peuvent pas prévoir la quantité d'énergie à utiliser lors de la communication. Cela influe beaucoup sur la performance du réseau. En effet, quand les RSUs décident d'économiser l'énergie, elles risquent alors de servir un nombre relativement réduit de véhicules. Aussi, elles peuvent retarder le délai de service vu qu'une telle stratégie privilégie les communications avec les véhicules proches des RSUs, ce qui réduit le coût en termes d'énergie. D'un autre côté, si les RSUs décident d'exploiter l'énergie disponible dans leur dispositif de stockage afin d'améliorer la performance du réseau, elles risquent d'épuiser leur énergie de stockage dans le cas où elles ne pourront pas récolter assez d'énergie dans le futur. Cette stratégie n'est donc pas

efficace à long terme. De même pour l'économie d'énergie, les RSUs risquent de gaspiller l'énergie dans le cas où cette dernière est disponible en abondance.

La décision à prendre par les RSUs lors de la communication doit prendre en considération non seulement l'état d'énergie disponible mais aussi la tendance des RSUs à récolter de l'énergie dans le futur. Les RSUs peuvent ainsi adapter leur stratégie d'ordonnancement des communications en fonction de ces paramètres dans le but d'optimiser la performance du réseau.

Pour évaluer les solutions potentielles d'ordonnements qui peuvent être implémentées dans ce contexte du réseau véhiculaire, on doit d'abord avoir une idée de la solution idéale. Ceci nous permettra alors de pouvoir estimer l'efficacité des solutions potentielles. Généralement, il est impossible de calculer la solution optimale en temps réel, car elle dépend de plusieurs variables inconnues. L'arrivée des véhicules dans la route et la prochaine quantité d'énergie récoltée par les RSUs, sont un parfait exemple. Il faudra ainsi supposer un environnement parfait où on connaît à priori tous les paramètres du réseau pour pouvoir calculer cette solution optimale. Dans ce mémoire, nous nous penchons donc sur cette problématique qui sera une étape nécessaire pour l'évaluation en temps réel de la performance des RSUs.

#### 1.4 Méthodologie

Dans le but d'évaluer la performance des RSUs en mode hors ligne, c'est-à-dire en possédant des connaissances a priori sur les événements à venir dans le réseau, nous définissons d'abord l'environnement de l'étude afin de décrire la manière dont les véhicules joignent le réseau et la quantité d'énergie récoltée par chaque RSU, à chaque instant. Aussi, nous précisons le modèle de communication entre les RSUs et les véhicules ainsi que la quantité d'énergie à dépenser par une RSU afin de satisfaire les besoins d'une communication.

Nous formulons ensuite la problématique de l'ordonnancement en un problème d'optimisation dont l'objectif est de maximiser la performance du réseau, tout en respectant les contraintes de communication et de causalité d'énergie (la quantité d'énergie consommée à un instant donné doit être déjà disponible dans la RSU). Dans cette étude, nous considérons le service des véhicules comme un critère de performance principal. Pour cela, nous supposons que tous les véhicules possèdent la même priorité et pourront être servis par n'importe quelles RSUs. L'ordonnanceur doit ainsi sélectionner un ensemble optimal de véhicules pour la communication. Nous analysons après cela la complexité de cet ordonnanceur afin de déterminer sa faisabilité et nous proposons deux heuristiques pour tenter de trouver une solution proche de l'optimal pour cet ordonnancement.

La performance de l'ordonnanceur et les solutions proposées sont évaluées et comparées avec celle d'un ordonnanceur pour des RSUs alimentées par une source d'énergie continue. La stratégie de ce dernier ordonnanceur vise à économiser au maximum l'énergie consommée tout en servant l'ensemble des véhicules. L'objectif de la comparaison est de voir si notre ordonnanceur est capable de rivaliser en termes de performance de transmission avec un système qui dispose continuellement d'énergie. Cela nous donnera une idée sur le potentiel de la récolte d'énergie et si elle peut être considérée comme une solution alternative à l'énergie continue. Il est aussi important de mentionner qu'il n'existe pas encore (à notre connaissance) dans la littérature un ordonnanceur pour des RSUs alimentées exclusivement par des sources d'énergie renouvelable.

## 1.5 Contribution

La nécessité de réduire l'empreinte carbone et les dépenses de fonctionnement, d'installation et de maintenance des RSUs, nous mène à étudier la performance des RSUs quand elles sont alimentées exclusivement par une source d'énergie

renouvelable. Nos contributions sur cette problématique peuvent être résumées comme suit :

- Nous étudions la solution en mode hors ligne du problème d’ordonnancement de transmission des RSUs quand elles sont alimentées exclusivement par une source d’énergie renouvelable, avec l’objectif de maximiser le nombre de véhicules servis. Le problème est formulé sous forme d’optimisation linéaire en nombres entiers (PLNE).
- Nous analysons la complexité du problème en termes du temps de calcul et nous prouvons qu’il s’agit d’un problème NP-difficile, pour lequel il n’existe pas d’algorithmes pouvant être exécutés par une machine déterministe en un temps raisonnable.
- Nous proposons un algorithme heuristique glouton qui trouve une solution proche de l’optimal en temps polynomial.
- Nous proposons aussi une méta-heuristique d’optimisation par essais particuliers comme solution alternative à l’algorithme glouton.
- Nous analysons la performance des solutions proposées. Ensuite, nous les comparons avec celle d’un ordonnanceur qui vise à réduire la consommation d’énergie des RSUs dans un scénario où ces dernières sont alimentées par une source d’énergie continue.

## 1.6 Organisation de l’ouvrage

Nous commençons d’abord, au chapitre II, par discuter brièvement les réseaux véhiculaires, leurs caractéristiques, leurs architectures de communication, les types de services qui peuvent être implémentés avec des exemples et les défis qui doivent être surmontés par ces réseaux. Au chapitre III, nous présentons des travaux dans la littérature qui ont considéré le problème de réduction des coûts de déploiement

des RSUs ainsi que ceux qui ont considéré la récolte d'énergie comme source d'alimentation pour les RSUs. Ensuite nous présentons au chapitre IV notre environnement d'étude, ainsi que la formulation du problème d'ordonnancement des RSUs lorsqu'elles sont alimentées exclusivement par énergie renouvelable. Au chapitre V, nous proposons deux solutions pour servir un nombre maximal de véhicules et au chapitre VI, nous évaluons les performances de nos solutions et nous les comparons avec celle d'un mécanisme d'ordonnancement déjà étudié dans la littérature. Nous analysons dans ce même chapitre les résultats de cette évaluation. Finalement, nous présentons nos conclusions au chapitre VII.

La publication suivante est pertinente pour ce mémoire :

W. S. Atoui, M. A. Salahuddin, W. Ajib and M. Boukadoum, "*Scheduling Energy Harvesting Road side Units in Vehicular Ad hoc Networks*," dans les actes de la conférence *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Septembre 2016, Montréal, Canada.



## CHAPITRE II

### VUE D'ENSEMBLE DES RÉSEAUX VÉHICULAIRES MOBILES

#### 2.1 Communication dans les réseaux véhiculaires

Les réseaux véhiculaires sont composés principalement de nœuds mobiles (les véhicules). Ces derniers sont équipés d'une unité de communication (*On Board Unit*, OBU) qui leur permet de transmettre des données via des signaux sans fil vers d'autres nœuds mobiles ou des nœuds fixes attachés aux infrastructures (RSU) le long des routes. Il existe, principalement, trois types de scénarios de communication dans les réseaux véhiculaires :

##### 2.1.1 Communication inter-véhicules (*V2V communication*)

Une communication inter-véhiculaire est une communication ad hoc entre les véhicules, similaire à ce qu'on voit dans les réseaux mobiles MANET (*Mobile Ad hoc NETWORKS*). La communication est basée sur l'échange de données avec les véhicules situés dans la zone de couverture radio du véhicule émetteur. La communication fonctionne dans un environnement décentralisé sans l'assistance des RSUs. Elle est principalement utilisée pour la diffusion rapide d'informations liées au service de sécurité routière. Cependant, la connectivité n'est pas permanente entre les véhicules car la topologie varie constamment.

### 2.1.2 Communication véhicules-RSUs (*V2I communication*)

Une communication véhicules-RSUs permet aux véhicules de communiquer avec les RSUs, principalement pour relayer des messages ou collecter des données. Les RSUs offrent une meilleure connectivité et permettent l'accès à divers services (internet, infodivertissement, réseaux cellulaires, etc.)

### 2.1.3 Communication inter-RSUs (*I2I communication*)

C'est une communication entre les RSUs. Elle est utilisée pour coordonner les activités dans le réseau (localiser un véhicule, relayer un message ou centraliser la gestion dans le réseau, etc.). L'interconnexion entre les RSUs peut être filaire avec un haut débit, qui permettrait de diminuer le délai de communication entre les véhicules.

## 2.2 Caractéristiques des réseaux véhiculaires

Les réseaux véhiculaires se distinguent des autres réseaux (sans fil, mobiles, etc.) par un certain nombre de caractéristiques spécifiques. Parmi ces caractéristiques, on peut citer :

- Contraintes énergétiques : contrairement aux réseaux sans fil traditionnels où la contrainte d'énergie représente un facteur important, les nœuds mobiles dans les réseaux véhiculaires disposent d'une capacité énergétique suffisante qu'ils peuvent générer à partir du système d'alimentation des véhicules. Même en cas d'immobilité, les véhicules peuvent toujours utiliser l'énergie stockée dans la batterie. Cette dernière est souvent caractérisée par une capacité importante bien supérieure au besoin énergétique de la communication sans fil. Ainsi, les réseaux véhiculaires peuvent prendre avantage de cette caractéristique pour supporter plusieurs interfaces de communication

et effectuer des calculs plus lourds. Par contre, les RSUs sont dépendantes d'une infrastructure électrique pour être alimentées. La consommation énergétique, dans ce cas, est toujours accompagnée d'un coût financier.

- L'environnement de communication : l'environnement est très varié dans les réseaux véhiculaires. Par exemple les véhicules peuvent traverser un environnement urbain caractérisé par de nombreux obstacles à la propagation des signaux à un environnement rural présentant des caractéristiques totalement différentes. Les conditions météorologiques peuvent aussi influencer la communication. La diversité environnementale impose aux réseaux véhiculaires de prendre en compte l'instabilité de la propagation radio (par ex. *multi-path fading, shadowing, path loss, etc.*).
- La taille du réseau : étant donnée l'ampleur de la surface sur laquelle ces réseaux opèrent, on peut s'attendre à un parc très élevé de véhicules. La taille du réseau devient donc une caractéristique importante qu'il faut considérer lors de déploiement des services et des mécanismes de routage.
- Topologie hautement dynamique : le mouvement des véhicules est caractérisé par des vitesses très élevées et des changements fréquents de directions. Ceci peut avoir des répercussions sur la qualité et la durée de vie des liens radio entre les véhicules. Les déconnexions sont donc très fréquentes dans le réseau, particulièrement quand la densité des véhicules est faible.
- Mobilité prédictive : le mouvement des véhicules est restreint par la topologie de la route, la signalisation routière ainsi que par le comportement et la mobilité des autres véhicules. De ces faits, la trajectoire et le déplacement des véhicules peuvent être prédits dans une certaine mesure.

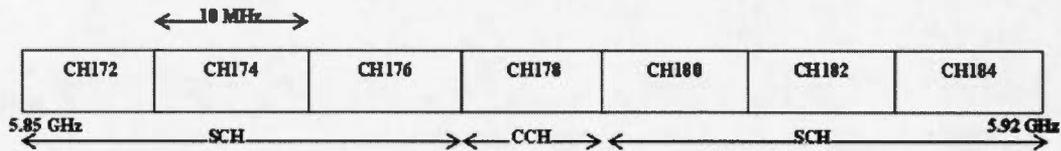


FIGURE 2.1 Bande de fréquences allouée pour le DSRC

### 2.3 Normes et standards de communication

Les normes simplifient le développement de nouveaux services et permettent d'harmoniser l'activité entre tous les acteurs industriels et académiques dans le domaine des réseaux véhiculaires.

Il existe plusieurs normes de réseaux sans fil disponibles pour fournir l'accès radio aux réseaux véhiculaires. On présente brièvement dans ce qui suit les principales normes utilisées dans les réseaux véhiculaires.

#### 2.3.1 Le standard DSRC (*Dedicated Short Range Communication*)

C'est un standard dédié aux réseaux véhiculaires (FCC, 1999). Il définit les canaux de communication sans fil sur lesquels les protocoles de communication peuvent opérer. Aux États-Unis, 75 MHz de spectre dans la bande de fréquences de 5,9 GHz a été alloué pour les applications DSRC. Dans ce spectre, 5 MHz est réservé en tant que bande de garde et sept canaux de 10 MHz. Comme illustré dans la Figure 2.1, un de ces canaux est réservé pour la réalisation de courts messages de haute priorité ou des données de gestion (*Control CHannel, CCH*), tandis que les autres canaux sont utilisés pour la transmission des données des utilisateurs (*Service CHannel, SCH*).

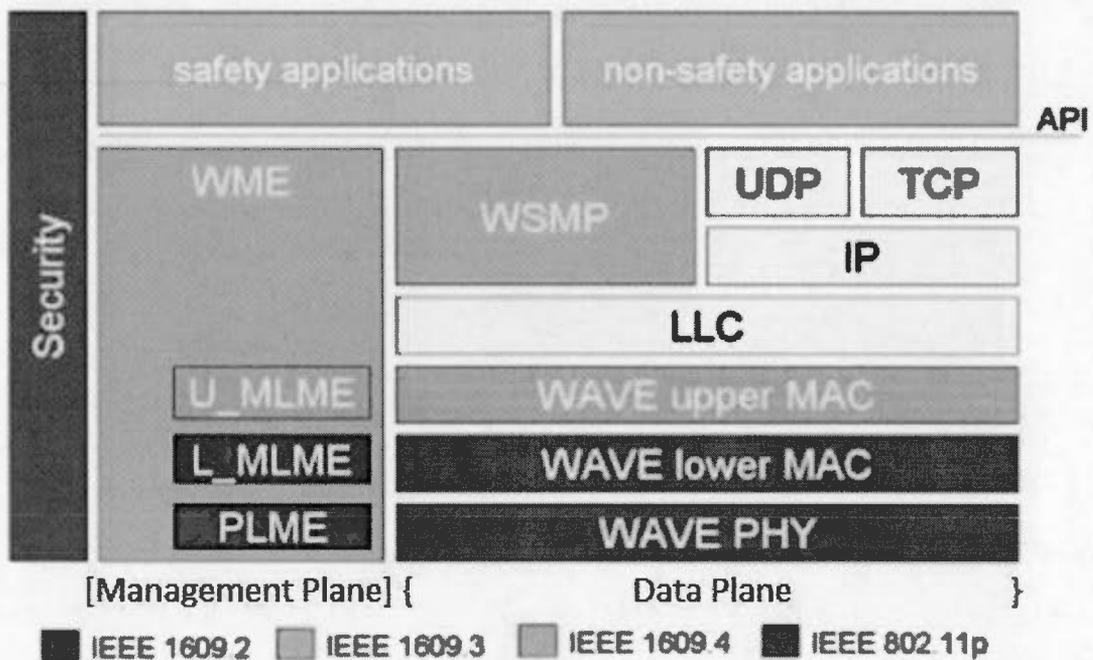


FIGURE 2.2 Pile de protocoles WAVE

### 2.3.2 Pile protocolaire WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environment*)

IEEE a introduit une pile de protocoles dédiée spécialement aux réseaux véhiculaires et l'a nommée WAVE (IEEE802.11, 2007), accès sans fil dans un environnement véhiculaire. Il y a six protocoles qui appartiennent à la famille de IEEE 1609. Chaque protocole gère une fonctionnalité différente liée à une couche particulière. La Figure 2.2 donne un aperçu de ces protocoles et leurs relations à l'égard du modèle de couche TCP/IP.

- IEEE 1609.1 détaille les activités de gestion nécessaire au bon fonctionnement des applications.
- IEEE 1609.2 décrit les considérations pour sécuriser les communications.
- IEEE 1609.3 détaille un protocole nommé WSMP (*Wave Short Messages*

*Protocol*), utilisé pour faciliter la communication entre les véhicules et minimiser la latence des services de sécurité routière.

- IEEE 1609.4 définit la coordination entre différents canaux du spectre.
- IEEE 1609.5 considère la gestion des couches.
- IEEE 1609.6 offre une couche intermédiaire supplémentaire entre la couche de transport et la couche application. Son objectif est de faciliter les traitements dans la couche d'application.

### 2.3.3 CALM (*Communications, Air-interface, Long and Medium range*)

CALM est en cours d'élaboration par le groupe de travail 16 (WG16, *Work Group 16*) du comité technique 204 (TC204, *Technical Committee 204*) d'ISO (CALM, 2008). Cette norme est destinée à assurer une communication continue et transparente à travers plusieurs standards de communication et d'interfaces réseaux. Elle peut utiliser plusieurs types de support de communication tels que : les réseaux locaux WLAN dans les bandes de fréquences des 5 GHz, les réseaux cellulaires, les réseaux infrarouges dans les bandes de fréquences des 60 GHz et les réseaux de communication par satellites. Ces supports peuvent être sélectionnés en fonction de l'emplacement et du type de l'OBU du véhicule. Pour des courtes distances, les ondes millimétriques sont sélectionnées. Les micro-ondes sont utilisées pour des distances moyennes, tandis que pour des longues distances, les systèmes cellulaires et satellitaires sont plus appropriés. La norme CALM est aussi capable de fournir des services Internet sans interruption grâce à IPv6, avec des fonctionnalités de mobilité comme NEMO (*Network Mobility*), et de gérer les transferts des médias d'une manière plus efficace que la norme WAVE.

## 2.4 Domaines d'application des réseaux véhiculaires

Les réseaux ad hoc véhiculaires offrent plusieurs types d'applications qui peuvent être classés dans trois catégories : les applications d'infotainment et de divertissement, les applications de gestion du trafic et les applications de sécurité routière, sachant que chaque catégorie exige un niveau de performance et une qualité de service différente. Nous détaillons dans ce qui suit les caractéristiques de ces applications et nous donnons des exemples pratiques pour illustrer leurs fonctionnalités.

### 2.4.1 Application de divertissements

Ce type d'applications vise principalement à améliorer le confort des conducteurs et des passagers. Il est utilisé pour diffuser l'état et les conditions des routes aux usagers, comme par exemple l'état du trafic, les conditions météorologiques, les stations de repos les plus proches et les limitations de vitesses. Aussi, pour offrir des services auxiliaires à la transportation comme l'accès à Internet, streaming multimédia ou communication entre les usagers dans les réseaux routiers.

### 2.4.2 Applications de gestion du trafic

Ces applications ont pour but de gérer le trafic routier et d'améliorer la fluidité de la circulation des véhicules sur les routes. Elles peuvent contribuer à diminuer la pollution engendrée par les véhicules et à économiser du carburant. Elles sont souvent assistées par des technologies de localisations afin d'aider les véhicules à éviter d'éventuels embouteillages ou incidents sur les routes et à sélectionner un trajet adéquat qui minimise le temps de voyage des usagers. On peut citer, comme exemples, de ces applications :

- Régulation des vitesses : cette application assiste les conducteurs à réguler leur vitesse de circulation, pour permettre une conduite fluide sans la néces-

sité de faire des arrêts inutiles, spécialement dans des endroits achalandés.

- Navigation coopérative : ce type d'application est utilisé pour augmenter la fluidité de la circulation par une gestion coopérative du trafic, soit d'une manière distribuée avec une communication inter-véhiculaire ou d'une manière centralisée avec une communication V2I.
- Déplacement des véhicules d'urgences : il permet aux véhicules prioritaires (polices, ambulances, pompiers, etc.) de circuler d'une manière efficace sur les routes en avertissant les autres véhicules de leur céder le passage.

### 2.4.3 Applications de sécurité routière

Les applications de sécurité routière représentent la première raison pour laquelle les réseaux véhiculaires ont été introduits. Elles visent à réduire les risques d'accidents routiers en fournissant aux conducteurs des informations pertinentes qui leur permettent de prendre une décision adéquate à temps. En effet, les véhicules collectent d'abord des données sur l'état de la route, après ils les analysent pour avoir une idée sur la situation courante. Si un risque d'incident ou de collision est détecté, alors le véhicule diffuse un message d'alerte aux autres véhicules présents dans son environnement afin de les avertir de cette situation. Le délai de propagation de ces messages joue un rôle crucial pour ce type d'applications. Un délai trop long risque d'exposer le véhicule en question dans un accident. Il existe de nombreuses situations couvertes par ce genre d'application. Nous discutons dans ce qui suit quelques exemples :

- Avertissement de collision dans les intersections : le risque de collisions pour les véhicules qui s'approchent des intersections est évalué par les RSUs. S'il y a un risque d'accident, un avertissement est signalé aux véhicules concernés pour ralentir ou prendre une décision adéquate.
- Assistance pour le changement de voie : le véhicule est assisté lorsqu'il s'en-

gage à changer de voie. Il diffuse alors un avertissement aux autres véhicules pour signaler son intention. Cela est aussi le cas pour le dépassement.

- Avertissement coopératif de collision : les véhicules acheminent des alertes d'un potentiel obstacle ou incident sur la route afin d'éviter une collision en chaîne des véhicules sur la route.
- Atténuation de l'impact des accidents : ces applications considèrent dans ce cas qu'un accident est inévitable et aura lieu. Les véhicules échangent alors des informations comprenant des données sur la position et les dimensions précises du véhicule afin de les utiliser pour réduire l'impact de l'accident et actionner des équipements de protection adéquat. Ces équipements peuvent être des coussins gonflables, des ceintures de sécurité et des pare-chocs extensibles.
- Feu de stop électronique : des messages d'avertissements d'un éventuel freinage sont diffusées aux autres véhicules.
- Avertissement d'un contre-sens : avertissement aux véhicules qui roulent dans la mauvaise direction.
- Avertissement d'un véhicule en panne sur la route : dans ce cas, tout véhicule qui est immobilisé sur la route, en raison d'un accident, de panne ou toute autre raison, informe les autres véhicules et les RSUs à propos de cette situation.
- Avertissement de l'état du trafic : tout véhicule qui détecte une évolution rapide du trafic, informe les autres véhicules et les RSUs à propos de cette situation.

## 2.5 Les défis dans les réseaux véhiculaires

Les caractéristiques particulières des réseaux véhiculaires compliquent le déploiement des services de transport intelligent. Il est difficile dans certains cas de res-

pecter les exigences de performance dans le réseau. Nous discutons dans cette partie de quelques défis qui sont essentiels à considérer lors de la conception des applications pour les réseaux véhiculaires.

- Adressage géographique : les véhicules doivent être identifiés par une adresse logique dans le réseau. Le problème c'est que dans les communications intervéhiculaires, il est difficile de connaître la position des véhicules pour acheminer leurs messages. L'adresse doit donc exprimer aussi la position physique du véhicule ou sa région géographique. La mobilité rend le suivi et la gestion de ces adresses géographiques "géo-adresses" extrêmement difficiles.
- Authenticité des données : pour de nombreuses applications véhiculaires l'authenticité des données est plus importante que celle de l'identité de l'émetteur (véhicule source). Il faudra donc fournir des moyens plus efficaces pour sécuriser les applications véhiculaires et assurer que l'information communiquée est digne de confiance et que le récepteur pourra vérifier l'intégrité des informations reçues et d'être protégé de la falsification et de l'usurpation d'identité.
- Anonymat, vie privée et responsabilité : les véhicules qui communiquent des informations vers d'autres véhicules ou d'autres entités dans le réseau doivent être en mesure de faire confiance à ces entités. En effet, il faut protéger le contenu de ces informations pour qu'ils ne nuisent pas à la vie privée des usagers (divulgaration de l'identité ou localisation des véhicules). Un des principaux défis est donc de trouver un compromis entre l'authentification, la confidentialité et la responsabilité des entités dans le réseau.

## CHAPITRE III

### ÉTAT DE L'ART

La réduction des coûts d'installation, de maintenance et de fonctionnement des RSUs est une problématique qui a suscité beaucoup d'attention dans la littérature. Les travaux qui ont été menés dans cette perspective peuvent être classés en deux catégories. La première englobe les efforts qui visent à réduire le nombre de RSUs déployées le long des routes. Généralement, ce sont des stratégies de placement qui cherchent à déployer un nombre minimal de RSUs tout en maximisant un ou plusieurs critères de performance. Tandis que la deuxième catégorie concerne les techniques qui visent à réduire la consommation d'énergie des RSUs.

Bien que les problèmes liés à la récolte d'énergie soient étudiés dans d'autres réseaux sans fil tel que les réseaux cellulaires ou les réseaux de capteurs, à notre connaissance, après une recherche bibliographique exhaustive, peu de travaux ont considéré cette problématique dans les réseaux véhiculaires, relativement aux communications des RSUs. Dans ce qui suit, nous exposons les contributions qui sont liées à la réduction des coûts de déploiement des RSUs, que ce soit pour la minimisation du nombre des unités déployées ou pour la réduction de leur consommation d'énergie. Ensuite, nous discutons de quelques travaux qui ont étudié la récolte d'énergie comme source d'alimentation pour les RSUs dans les réseaux véhiculaires.

### 3.1 Stratégies de placement des RSUs pour réduire le nombre d'unités déployées

Les auteurs de (Mehar *et al.*, 2015) [1] ont étudié une méthode de placement des RSUs pour les applications de sécurité routière qui vise à améliorer le délai de bout en bout entre les véhicules et à réduire le nombre de RSUs déployées. Ils ont pris en considération dans leur étude les communications inter-véhiculaire pour relier davantage les messages entre les véhicules quand ils ne sont pas dans la zone de couverture des RSUs. Les auteurs ont aussi formulé le problème par un modèle d'optimisation et ont proposé une solution basée sur l'algorithme génétique et l'algorithme de Dijkstra. La performance est ensuite évaluée avec différents scénarios de mobilité afin de voir l'influence du trafic véhiculaire sur le délai. Les résultats montrent alors que leur méthode de placement peut réduire jusqu'à 84% le délai de bout en bout entre les véhicules et aussi de réduire jusqu'à 23% le nombre de RSUs déployées.

(Li *et al.*, 2015) ont aussi considéré le délai d'acheminement comme critère de performance lors du déploiement des RSUs. Cependant, l'objectif de leur étude n'est pas de minimiser le nombre de RSUs déployées mais bien d'utiliser des RSUs moins onéreuses à mettre en œuvre à leurs places. Ces dernières ne nécessitent pas d'interconnexions filaires pour être interconnectées. Elles peuvent communiquer entre elles de manière sans fil. Leur étude vise alors à minimiser le délai d'acheminement des messages dans le réseau en déployant le moins possible de RSUs, particulièrement celles qui nécessitent des connexions filaires. En effet les interconnexions filaires sont parfois nécessaires vu que les interconnexions sans fil engendrent parfois des détériorations dans la performance du réseau, car elles peuvent être perturbées par des conditions environnementales et nécessitent de se faire à l'intérieur d'une certaine zone de communication, à défaut de quoi elles sont interrompues. Ils ont ainsi étudié la performance du réseau pour trouver un

compromis entre le coût de déploiement et le délai d'acheminement des messages. Le problème est formulé alors par un modèle d'optimisation qu'ils ont résolu par une méthode heuristique.

Dans (Wu *et al.*, 2012), les auteurs ont étudié la performance d'une stratégie de placement des RSUs qui vise à maximiser le débit de transmission dans le réseau tout en réduisant le nombre de RSUs. Ils ont considéré dans leur modèle un scénario de route rapide dans lequel il y a plusieurs voies avec des sorties et des intersections le long de la route. Ils ont aussi considéré que chaque véhicule est capable de communiquer avec la RSU de deux manières : soit directement, si le véhicule est dans le rayon de transmission de la RSU, soit indirectement via une communication inter-véhiculaire. Le problème est formulé sous forme d'un problème d'optimisation linéaire en nombres entiers (PLNE) avec des contraintes impliquant d'autres facteurs tels que l'interférence sur le signal, la densité et la vitesse des véhicules. Les résultats montrent que la stratégie de placement proposée conduit à de meilleure performance comparées à d'autres stratégies telles que le placement uniforme ou le placement à base de densité de trafic. Ces résultats indiquent aussi que la stratégie de placement peut atteindre un débit total maximal dans le réseau avec un nombre réduit de RSUs.

Les auteurs de (Brahim *et al.*, 2014) ont pris pour objectif l'amélioration de la fiabilité et de la connectivité dans le réseau avec un nombre minimal de RSUs, inférieur ou égal au budget de déploiement. Ils ont considéré un scénario fondé sur un modèle de mobilité tiré de la réalité et ils ont proposé deux algorithmes pour la sélection optimale des endroits de placement des RSUs. Les résultats montrent que la performance du réseau est bien meilleure qu'avec d'autres méthodes de placement.

Les auteurs de (Vageesh *et al.*, 2014) ont proposé une méthode de placement dans

un scénario où les RSUs sont alimentées à la fois par une source d'énergie conventionnelle et une source d'énergie solaire. L'objectif est de trouver un placement des RSUs qui minimise conjointement le nombre de RSUs déployées et l'énergie consommée. Ils ont proposé à cet effet une solution basée sur un algorithme optimisant l'ordonnancement et le placement des RSUs. Les résultats montrent qu'en effet la méthode de placement diminue à la fois l'énergie consommée en sélectionnant des endroits de placements favorables à la récolte de l'énergie et aussi le nombre de RSUs déployées en atteignant la performance souhaitée avec un nombre réduit de RSUs.

### 3.2 Stratégies d'économie d'énergie pour les RSUs

Les auteurs de (Feng et Elmirghani, 2009) ont étudié la performance des réseaux véhiculaires pour l'économie d'énergie et ont proposé un modèle d'optimisation du rayon de transmission des RSUs selon le trafic routier. La performance est étudiée en considérant un scénario de trafic véhiculaire réaliste. Les résultats montrent que leur modèle permet d'économiser plus d'énergie comparé à d'autres modèles d'ordonnancement.

Dans (Toutouh et Alba, 2011), les auteurs ont abordé la consommation d'énergie et la qualité de service dans le routage des paquets dans les réseaux véhiculaires. Ils ont proposé une amélioration du protocole de routage OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) pour réduire la consommation d'énergie. Ils ont nommé leur version DE-OLSR. Les résultats montrent que leur version surpasse clairement la version standard (OLSR) en termes de consommation d'énergie, tout en offrant une qualité de service comparable.

Les auteurs de (Zou *et al.*, 2011) ont étudié un modèle d'ordonnancement des RSUs pour réduire la consommation d'énergie. Étant donné un ensemble de RSUs déjà déployées, l'objectif est de chercher un ordonnancement optimal qui permet

d'activer ou de mettre en veille les RSUs pour une durée déterminée, de sorte que la consommation globale d'énergie des RSUs soit minimisée et que la connectivité dans le réseau ne soit pas dégradée. Le problème est divisé en deux sous-problèmes. Le premier vise à déterminer le nombre minimum de RSUs à activer dans une instance particulière du réseau véhiculaire, alors que le deuxième sous-problème décide à quel instant faudra-t-il échantillonner le déroulement du scénario de réseau. Les auteurs ont montré que leur modèle arrive à faire fonctionner un nombre réduit de RSUs pour satisfaire les exigences de communication des véhicules et ainsi à réduire la consommation de l'énergie dans le réseau.

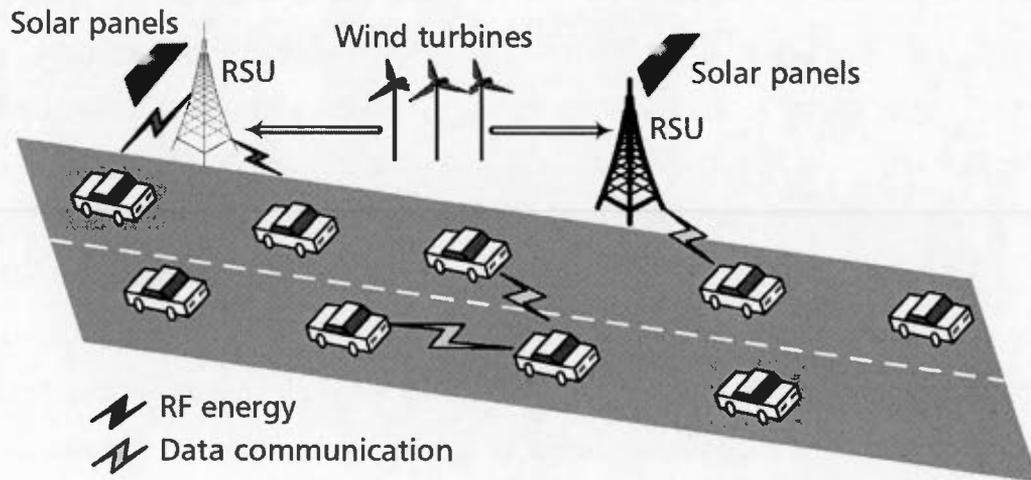
Les auteurs de (Zhang *et al.*, 2011) ont élaboré un modèle d'optimisation pour les communications V2I, à partir duquel une stratégie d'attribution de sous-porteuses est proposée. Cette stratégie vise à réduire la consommation d'énergie tout en garantissant un certain délai de communication. Les résultats expérimentaux révèlent que la stratégie proposée offre une performance supérieure à d'autres stratégies existantes pour l'allocation des ressources.

Dans (Wen et Zheng, 2015), les auteurs ont étudié le problème d'ordonnancement des RSUs dans un milieu à faible densité véhiculaire et ont considéré un mécanisme qui active et met en veille les RSUs dans le but de réduire la consommation énergétique. Un modèle analytique est alors dérivé pour l'ordonnancement. La performance est analysée en termes de probabilité d'acceptation des demandes et d'économie d'énergie des RSUs. Les résultats de simulation montrent l'efficacité du modèle proposé à réduire la consommation d'énergie.

Les auteurs de (Hammad *et al.*, 2013) ont considéré le problème d'ordonnancement d'une RSU pour économiser l'énergie de communication. Ils ont supposé que l'emplacement des véhicules sur la route pourrait être prédit avec précision, et la connaissance de cette information permettait à la RSU de réduire les coûts

énergétiques des communications vers les véhicules par la sélection du moment opportun pour établir la liaison. En effet, plus les véhicules se rapprochent de l'infrastructure, moins il est nécessaire aux RSUs de consommer d'énergie pour la communication. Ils ont d'abord formulé le problème en mode hors-ligne pour trouver la quantité d'énergie minimale qui permettait de servir l'ensemble des véhicules. Deux scénarios de communication ont été considérés. Le premier considère que la communication est divisée dans le temps et le deuxième suppose que la communication est à base de paquets. Les auteurs ont montré que le problème est NP-difficile et ont proposé une méthode à base d'un graphe de flux de coût minimum pour trouver une solution proche de l'optimal dans un temps polynomial. Ensuite, ils ont proposé trois ordonnanceurs qui opèrent en mode en-ligne. Les résultats d'après une variété de simulations, montrent que les algorithmes d'ordonnement proposés fonctionnent même dans un environnement où l'atténuation du signal est forte. En comparaison avec les bornes inférieures tirées de l'ordonnement en mode hors-ligne, les algorithmes en mode en-ligne sont très proches et peuvent même atteindre des résultats quasi-optimaux au détriment du temps de calcul.

Dans (Khezrian *et al.*, 2015), les auteurs ont étendu l'étude de (Hammad *et al.*, 2013) pour minimiser la consommation d'énergie sur l'ensemble des RSUs du réseau. L'objectif est alors d'équilibrer la charge d'utilisation des RSUs au lieu de réduire l'énergie individuellement pour chaque RSU. Les auteurs ont considéré dans cette étude deux scénarios : le premier envisage que le service des véhicules peut être réparti sur l'ensemble des RSUs alors que le deuxième scénario stipule que les véhicules ne doivent être servis que par une seule RSU. Le problème est d'abord formulé en mode hors-ligne pour trouver l'ordonnement optimal. Ils ont ensuite proposé plusieurs algorithmes en mode en ligne. Les résultats montrent que les algorithmes proposés peuvent donner des performances proches de l'opti-



**FIGURE 3.1** Modèle de réseau pour la récolte d'énergie dans les RSUs (Atallah *et al.*, 2016)

mal.

### 3.3 Considération de l'énergie renouvelable

Les auteurs de (Atallah *et al.*, 2016) ont présenté un aperçu général de la récolte d'énergie dans les réseaux véhiculaires (le modèle utilisée est montré à la figure 3.1). Ils ont examiné sa faisabilité et les différents défis auxquels peut être confrontée l'applicabilité de ces techniques dans un environnement véhiculaire. Ils ont aussi exposé quelques problèmes qui ont été posés dans la littérature liés à ce sujet et les différentes solutions envisagées.

L'auteur de (Ali, 2016) a étudié la procédure de conception et de gestion des circuits pour les RSUs qui récoltent de l'énergie. Il a suggéré un module de gestion de l'alimentation basé sur un réseau neuronal artificiel et un ordonnanceur qui économise de l'énergie. Cet ordonnanceur opère d'une manière centralisée et emploie trois algorithmes : un algorithme de prédiction du trafic routier, un algorithme qui

met en veille ou rallume les RSUs et un algorithme d'évaluation de performance. L'adoption de cet ordonnanceur réduit la consommation d'énergie des RSUs, ce qui prolonge la durée de vie de la batterie. Cependant, l'auteur n'a pas pris en considération le surplus d'énergie dans l'ordonnement, ce qui peut améliorer la performance du réseau.

Dans (Muhtar *et al.*, 2013), les auteurs ont étudié la performance des RSUs alimentées par une source d'énergie éolienne. Trois modèles d'ordonnement ont été alors proposés afin de déterminer si l'énergie éolienne disponible pouvait répondre à la demande énergétique des RSUs et satisfaire les exigences de qualité de service (QoS). La performance du système a été évaluée dans un scénario véhiculaire réel en termes des besoins énergétiques, des probabilités de blocage des paquets et du délai moyen d'acheminement des paquets. Les résultats ont montré que les besoins en énergie du réseau augmentent avec la densité véhiculaire, ce qui n'est pas inattendu vu que l'augmentation de la densité des véhicules correspond à une forte concentration des véhicules dans le rayon de couverture de la RSU. Pour augmenter le service des véhicules, la RSU doit ainsi prolonger sa période d'activité. Les auteurs ont montré ensuite que si les RSUs utilisent des batteries d'une capacité très grande, elles peuvent alors rivaliser avec un système alimenté en permanence par le réseau électrique. En effet, une grande batterie est capable de stocker suffisamment d'énergie, de sorte que le système peut se permettre de servir le même nombre de véhicules qu'un système alimenté par le réseau électrique. Les auteurs ont examiné enfin la performance du système lors de la réduction de la taille de la batterie en permettant la mise en veille des RSUs quand l'énergie éolienne ne suffit pas pour son fonctionnement. Ce modèle a causé de graves détériorations dans la performance en termes de probabilité de blocage de paquets et de délai moyen des paquets. Cependant, les auteurs n'ont pas considéré de stratégie qui permettait de maximiser le nombre de véhicules servis dans le cas où

la batterie est limitée. Ils ont seulement proposé l'utilisation d'un ordonnancement d'économie d'énergie dans un scénario de récolte d'énergie.



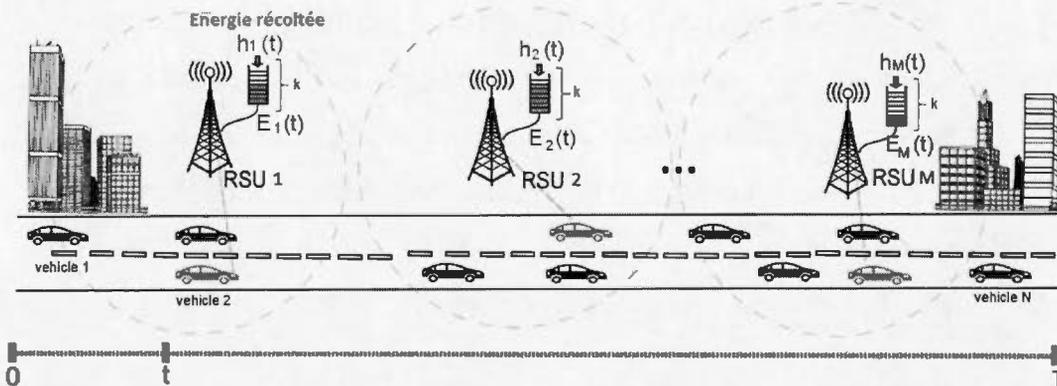
## CHAPITRE IV

### ENVIRONNEMENT D'ÉTUDE ET FORMULATION DU PROBLÈME

#### 4.1 Topologie du réseau

Nous considérons un scénario de réseau véhiculaire dans un segment de route fini dans lequel  $M$  RSUs sont déployées et alimentées exclusivement par une source d'énergie renouvelable (voir figure 4). On définit l'ensemble des RSUs par  $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ . La quantité d'énergie récoltée par chaque RSU est un processus stochastique dénoté  $h_m(t)$ , qui suit une loi de probabilité uniforme dans l'intervalle  $[0, h_{max}]$ , où  $t$  est un instant discret de temps. L'énergie est emmagasinée dans un dispositif de stockage (par exemple une batterie) de capacité finie homogène à toutes les RSUs. On utilise une file d'attente de taille  $k$  pour modéliser ce dispositif. Aussi, on dénote  $E_m(t)$  l'état d'énergie disponible dans la RSU  $m$  à l'instant  $t$ .

Les véhicules sont représentés par un ensemble  $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ , et leur position est supposée être uniformément distribuée le long de la route. Ils se déplacent dans le réseau avec des vitesses différentes d'un véhicule à l'autre mais constantes lors de la traversée. La vitesse suit une loi de probabilité normale avec une moyenne  $\mu$  et un écart-type  $\theta = 1$ , tronquée entre  $[\mu-5\theta, \mu+5\theta]$ .



**FIGURE 4.1** Une instance du réseau véhiculaire dans laquelle de multiples RSUs alimentées exclusivement d'une source d'énergie renouvelable sont déployées le long de la route

#### 4.2 Modèle de communication

Dans notre étude, nous supposons pour des raisons de simplicité que chaque RSU possède un seul canal de communication et que ce dernier est divisé dans le temps, chaque case temporelle (dit créneau de temps, en anglais time slot) peut être allouée à un seul véhicule. Les termes créneau de temps et instant du temps sont utilisés interchangeablement dans le reste du document. L'ensemble des créneaux de temps disponibles pour l'allocation à chaque RSU est représenté par  $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, T\}$ . On considère que chaque RSU peut réguler la puissance de sa transmission afin de transmettre un nombre constant de bits par créneau de temps,  $D$  bits/créneau de temps, indépendamment de la position des véhicules au sein de son rayon de couverture. D'un autre côté, chaque véhicule envoie des requêtes de service aux RSUs pour des données de  $D$  bits, afin qu'une seule transmission de RSU soit capable de satisfaire sa requête.

La quantité d'énergie nécessaire à la RSU  $m$  pour satisfaire les exigences d'un véhicule  $n$  est notée  $C_m(n, t)$ , tel que  $m \in \mathcal{M}$ ,  $n \in \mathcal{N}$  et  $t \in \mathcal{T}$ . Cette dernière

est dénommée coût énergétique et elle dépend de la distance entre la RSU et le véhicule. Clairement, plus les véhicules sont éloignés de la RSU, plus il est nécessaire d'augmenter la puissance de transmission pour les atteindre. Par conséquent, la RSU consomme plus d'énergie. Nous utilisons un modèle d'affaiblissement de propagation logarithmique pour estimer ce coût (Rong et Rappaport, 1996). Le modèle utilisé est décrit par l'équation 4.1 :

$$C_m(n, t) = P_{tx}(m, t) \cdot TS = \frac{P_{rx}(n, t)TS}{PT_0[\frac{d_0}{d_m(n, t)}]^\gamma} = \frac{N_0(2^{\frac{D}{B}} - 1)TS}{PT_0[\frac{d_0}{d_m(n, t)}]^\gamma} \quad (4.1)$$

où  $P_{tx}(m, t)$  est la puissance de transmission de la RSU  $m$  à l'instant  $t$ ,  $P_{rx}(n, t)$  est la puissance de réception pour le véhicule  $n$ ,  $d_0$  est une distance de référence,  $d_m(n, t)$  est la distance entre la RSU  $m$  et le véhicule  $n$  à l'instant  $t$ ,  $\gamma$  est l'exposant d'affaiblissement de la propagation,  $TS$  est la durée du créneau de temps,  $B$  est la bande passante du canal,  $N_0$  est la puissance de bruit le long du chemin entre la RSU  $m$  et le véhicule  $n$  et finalement  $PT_0$  est l'affaiblissement de propagation à la distance de référence.

### 4.3 Modèle d'ordonnancement

Le problème d'ordonnancement considéré dans ce document vise à planifier l'allocation des créneaux de temps aux RSUs de telle sorte qu'un nombre maximum de véhicules soit servi. Cet ordonnancement est supposé être centralisé et en mode hors-ligne, c'est-à-dire que l'ordonnanceur possède a priori des connaissances sur l'arrivée des véhicules et sur la quantité d'énergie récoltée par chaque RSU durant toute la durée de l'étude. Il est nécessaire d'évaluer la performance et développer des solutions hors-ligne afin de pouvoir développer et comparer des ordonnanceurs en mode en-ligne où dans ce cas l'information sur l'arrivée des véhicules et la quantité d'énergie récoltée dans les futurs créneaux de temps seront inconnus avant le début de l'ordonnancement. Le mode hors-ligne permet de trouver un

ordonnement optimal qui sera utilisé comme références pour les autres mécanismes d'ordonnements.

Dans le but de trouver une solution optimale, nous commençons par formuler le problème d'ordonnement des RSUs comme un problème d'optimisation linéaire en nombres entiers (PLNE). Cela permet de simplifier la description du problème et de dégager l'ensemble des contraintes nécessaire à l'aboutissement de l'objectif. Ainsi, il sera plus facile d'étudier la complexité du problème et d'évaluer le temps nécessaire pour la convergence vers la solution optimale. Nous notons ce problème d'optimisation **MaxVehicle**. Le problème est formulé mathématiquement comme suit :

$$\text{MaxVehicle : maximiser } \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{m,n,t} \quad (4.2)$$

Tel que :

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{m,n,t} \leq 1, \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (4.3)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} x_{m,n,t} \leq 1, \quad \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \quad (4.4)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} (x_{m,n,t} \cdot C_m(n, t)) \leq E_m(t), \quad \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \quad (4.5)$$

$$E_m(t+1) = \min (E_m(t) - \sum_{n \in \mathcal{N}} (x_{m,n,t} \cdot C_m(n, t))) + h_m(t, k), \quad \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \quad (4.6)$$

où  $x_{m,n,t}$  est une variable binaire qui est égale à 1 si le véhicule  $n$  est ordonné pour communiquer avec la RSU  $m$  à l'instant  $t$  et 0 dans le cas contraire. L'objectif

de la PLNE (4.2) est d'ordonnancer un nombre maximal de véhicules tout en respectant les contraintes (4.3-4.6) : la première contrainte (4.3) permet d'assurer qu'un véhicule est ordonnancé au plus une seule fois. La deuxième contrainte (4.4) garantit qu'un créneau de temps ( $t$ ) dans n'importe quelle RSU, ne peut être alloué qu'à un seul véhicule. La troisième contrainte (4.5) permet de respecter la causalité d'énergie de la communication entre la RSU et le véhicule, c'est-à-dire que l'énergie disponible doit être suffisante pour satisfaire la communication. La dernière contrainte quant à elle indique la mise à jour de l'état de l'énergie de chaque RSU, celle-ci est définie comme la différence entre ce qui a été récolté  $h_m(t)$  et ce qui a été dépensé  $C_m(n, t)$  durant l'instant précédent.

#### 4.4 Complexité

Il est facile de constater que MaxVehicle possède un nombre exponentiel de contraintes, ce qui rend difficile sa solution en un temps raisonnable. Par conséquent, nous évaluons la complexité de l'ordonnancement en termes de temps de calcul, quand un algorithme de recherche exhaustive est employé pour résoudre le problème.

*Lemme 4.1* : La complexité temporelle d'un algorithme de recherche exhaustive pour un ordonnancement optimal est de l'ordre de  $O\left(\binom{|\mathcal{M}| \cdot |\mathcal{T}|}{|\mathcal{M}|} \log\left(\binom{|\mathcal{M}| \cdot |\mathcal{T}|}{|\mathcal{M}|}\right)\right)$

*Preuve* : Il existe  $(M \cdot T)$  créneaux de temps qui peuvent être alloués à l'ensemble des véhicules. Cela constitue l'espace de recherche de notre problème. Il faut ainsi trouver un ordonnancement qui associe un sous-ensemble maximal de véhicules ( $N' \subseteq N$ ) dans cet espace de recherche, tel que l'ensemble des contraintes soit respecté. Une recherche exhaustive va tester toutes les combinaisons possibles des véhicules et sélectionner un nombre maximum parmi eux qui respectent l'ensemble des contraintes. Par conséquent, il y aura un nombre de  $\binom{|\mathcal{M}| \cdot |\mathcal{T}|}{|\mathcal{M}|}$  solutions à tester. Après cela, l'algorithme va trier ces solutions et garder la solution optimale.

Cette opération pourra être effectuée dans l'ordre de  $O\left(\frac{|\mathcal{M}| \cdot |\mathcal{T}|}{|\mathcal{M}|} \log\left(\frac{|\mathcal{M}| \cdot |\mathcal{T}|}{|\mathcal{M}|}\right)\right)$ . Ceci correspond à une complexité totale de l'ordre de  $O\left(\frac{|\mathcal{M}| \cdot |\mathcal{T}|}{|\mathcal{M}|} \log\left(\frac{|\mathcal{M}| \cdot |\mathcal{T}|}{|\mathcal{M}|}\right)\right)$ .

Ce problème d'ordonnancement correspond à une variante du problème d'affectation généralisée (General Assignment Problem, GAP) (Sahni et Gonzalez, 1976). Étant donné que les variantes décisionnelles et fonctionnelles de ce dernier sont prouvées appartenir aux classes des problèmes NP-hard (Sahni et Gonzalez, 1976) et APX-hard (Chekuri et Khanna, 2000), MaxVehicle peut lui aussi être classé comme un problème NP- hard.

*Lemme 4.2* : MaxVehicle est une variante du problème général d'affectation.

*Preuve* : Dans un scénario où il y a qu'un seul créneau de temps à allouer par chaque RSU et où la récolte d'énergie est nulle, alors le problème d'ordonnancement de MaxVehicle est équivalent à une variante de GAP où les profits d'affectations sont homogènes.

Nous définissons plus en détail GAP afin d'éclaircir le Lemme. Le problème général d'affectation consiste à planifier un ensemble d'agents  $\mathcal{J}$  pour exécuter un ensemble de tâches  $\mathcal{I}$ . Chaque agent  $j \in \mathcal{J}$  possède un budget  $b(j)$  à ne pas dépasser et pourra être affecté à n'importe quelle tâche  $\forall i \in \mathcal{I}$ , encourageant un coût  $l(i, j)$  et un profit  $p(i, j)$ . L'objectif est de maximiser le profit des affectations. Ainsi, le problème pourra aussi être formulé par le PLNE suivant :

$$\text{GAP : maximize } \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{i \in \mathcal{I}} p_{i,j} x_{i,j} \quad (4.7)$$

Tel que :

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} x_{i,j} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (4.8)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} x_{i,j} \cdot l(i,j) \leq b(j) \quad \forall j \in \mathcal{J} \quad (4.9)$$

La première contrainte garantit qu’une tâche peut être affectée au plus à un seul agent, tandis que la deuxième contrainte assure que le coût des tâches affectées à un agent ne dépasse pas son budget.

Le problème GAP a été largement étudié dans la littérature. Cependant, aucun algorithme de solution optimale dans un temps polynomial n’a encore été trouvé à ce jour. Néanmoins, plusieurs contributions ont été faites pour proposer des solutions qui se rapprochent de l’optimal. Parmi ces contributions, dans (Chekuri et Khanna, 2000), les auteurs ont proposé un algorithme  $1/2$ -approché de l’optimal, en se basant sur les travaux de (Shmoys et Tardos, 1993), pour lequel les auteurs ont considéré la version de minimisation de GAP. D’un autre côté, les auteurs de (Nutov *et al.*, 2006) ont résolu une variante de GAP pour laquelle les profits des allocations sont homogènes avec un algorithme  $(1-1/e)$ -approché de l’optimal.

Malheureusement, les contraintes de MaxVehicle compliquent davantage le problème et rendent difficile l’adaptation des solutions proposées pour GAP. En effet, le facteur temporel et la récolte d’énergie ajoutent des dimensions de calcul supplémentaires au problème. Même une solution basée sur la décomposition ne semble pas être facile, car ces dimensions sont dépendantes de façon non linéaire. Pour voir cela, supposons qu’il y a une seule RSU déployée sur la route. Alors dans ce cas le problème peut se réduire à un problème du sac à dos temporel, une variante du problème du sac à dos dont il ne connaît pas une solution optimale dans un temps polynomial par une machine déterministe.

Pour des scénarios de réseaux véhiculaires de taille réduite, nous appliquons des techniques d’optimisation combinatoire pour résoudre MaxVehicle, comme par

exemple la séparation et l'évaluation (A. H. Land, 1960). Ces techniques sont déjà implémentées dans des outils d'optimisation linéaire telle que LpSolve (Berkelaar *et al.*, 2004). Mais pour des scénarios de grande taille, ces techniques ne peuvent pas trouver de solution optimale, vu la complexité du problème. Pour cela, nous proposons dans ce qui suit deux algorithmes qui tentent de trouver une solution proche de l'optimal dans un temps raisonnable.

## CHAPITRE V

### SOLUTIONS PROPOSÉES

#### 5.1 Algorithme glouton (*Greedy Algorithm*)

Dans cette section, nous présentons un algorithme glouton en mode hors-ligne qui vise à trouver une solution proche de l'optimal pour MaxVehicle. L'algorithme prend comme paramètre d'entrée l'ensemble de toutes les allocations possibles des créneaux de temps, et en sortie, il sélectionne un sous-ensemble de ces allocations qui peuvent servir un nombre de véhicules proche de l'optimal.

Le principe de fonctionnement de l'algorithme glouton est détaillé dans (Algorithme 1). Il se déroule en deux étapes. Dans la première étape, les allocations potentielles des véhicules sont triées selon l'énergie effective, définie comme étant la différence entre l'énergie récoltée et l'énergie consommée à un instant donné ( $a_m(n, t) = C_m(n, t) - h_m(t)$ ). Soit  $S$  l'ensemble trié des allocations des véhicules :  $S = \{C_m^1(n, t), \dots, C_m^{M.N.T}(n, t)\}$ , tel que  $S = \{C_m^i(n, t) \mid C_{m_1}^i(n_1, t_1) - h_{m_1}(t_1) \leq C_{m_2}^{i+1}(n_2, t_2) - h_{m_2}(t_2)\}$ .  $(m_1, n_1, t_1)$  et  $(m_2, n_2, t_2)$  sont deux instances de paramètre différentes. Le but de cette étape est de donner la priorité aux véhicules qui consomment le moins d'énergie, afin de sélectionner un nombre maximal de véhicules. En effet, en servant d'abord les véhicules qui nécessitent le moins d'énergie, on permettra aux RSUs de servir davantage de véhicules.

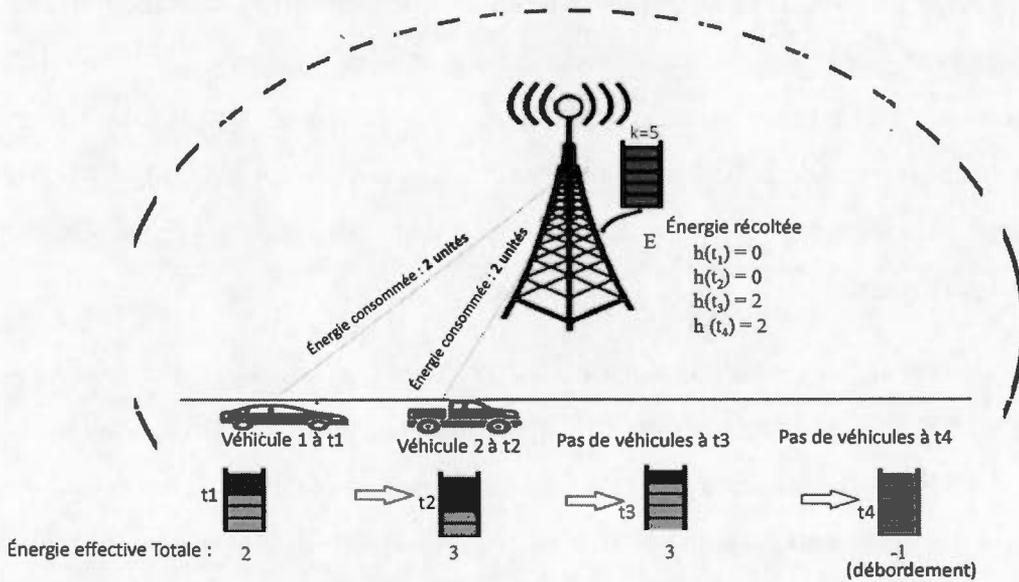
Nous différencions entre les allocations qui ont le même coût d'énergie effective

en considérant la vitesse des véhicules comme critère additionnel de sélection. Les véhicules ayant une vitesse plus élevée sont prioritaires, ce qui garantit qu'ils soient sélectionnés de façon opportuniste en premier, car ils pourront quitter rapidement la zone de couverture de la RSU. Les autres véhicules auront d'autres opportunités d'être servis dans les futurs créneaux de temps, vu que les RSUs pourront récolter d'avantage d'énergie.

Dans la deuxième étape, l'algorithme construit itérativement un ensemble d'allocations  $\phi \in S$ . Cet ensemble contiendra après le déroulement de l'algorithme, un nombre maximal d'allocations des créneaux de temps qui peuvent être déduits de  $S$ , tel que les contraintes soient respectées (voir Chapitre IV). L'ensemble d'allocations sera retourné comme résultat final par l'algorithme.  $\phi$  est défini comme étant un ensemble qui inclut  $M$  sous-ensembles d'allocations  $\phi = \{\phi_1, \dots, \phi_M\}$ , où chaque sous-ensemble  $\phi_m$  englobe seulement les allocations des créneaux de temps concernant la RSU  $m$ . À chaque itération, l'algorithme vérifie une allocation  $C_m^*(n, t)$  selon son ordre dans  $S$ . L'allocation en vérification sera acceptée dans  $\phi_m$ , seulement si elle respecte la causalité d'énergie définie par l'équation (5.1) :

$$\sum_{i=1}^t (C_m(n, i) - h_m(i)) \leq k, C_m(n, i) \in \phi_m \cup C_m^*(n, t). \quad (5.1)$$

La somme des coûts d'énergie effective doit être inférieure à l'énergie disponible dans la RSU. Notons que la somme est effectuée sur tous les créneaux de temps jusqu'à  $t$ , même pour ceux qui ne sont pas encore alloués. On considère ainsi que le coût d'énergie consommée est nul quand la RSU ne communique pas avec des véhicules à l'instant  $t$  ( $C_m(., t) = 0$ ). Cependant, cette équation ne prend pas en considération le cas où l'énergie récoltée est supérieure à l'énergie consommée ; en d'autres mots, quand la somme est négative. Cela pourra créer un débordement



**FIGURE 5.1** Exemple de débordement d'énergie dans la RSU quand l'énergie récoltée est supérieure à l'énergie consommée

dans le dispositif de stockage quand la quantité d'énergie récoltée est plus grande que la capacité disponible (voir exemple dans la figure 5.1). On introduit dans ce cas une fonction récursive qui permet de réguler la quantité d'énergie dans les RSUs à chaque fois qu'elles dépassent la capacité de stockage. Soit  $f$  la fonction récursive, définie comme suit :  $f(\phi_m, t) = \max(f(\phi_m, t - 1), 0) + (C_m(n, t) - h_m(t))$  et  $f(\phi_m, 1) = (C_m(n, 1) - h_m(1))$ . L'équation de causalité d'énergie est ainsi reformulée et indiquée par l'équation (5.2) :

$$E_m(0) - \max(f(\phi_m \cup C_m^i(n, t), t), 0) \geq 0, \forall m \in \mathcal{M}. \quad (5.2)$$

Pour garantir que les allocations sélectionnées dans  $\phi$  respectent les contraintes posées dans MaxVehicle (voir chapitre 3), il faudrait que chaque nouvelle allocation acceptée ( $C_m^*(n, t)$ ) dans  $\phi$  respecte ces deux conditions :

*Condition 1* : Le créneau de temps ne doit pas être déjà alloué dans  $\phi_m$  :

$\forall C_m^j(n', t') \in \phi_m$  alors  $t \neq t'$ .

*Condition 2* : Le véhicule ne peut pas être servi plus qu'une fois par l'ensemble des RSUs :  $\forall C_m^j(n', t') \in \cup_{m \in \mathcal{M}} \phi_m$  alors  $n \neq n'$ .

L'algorithme continue à allouer les créneaux de temps à partir de  $S$ , jusqu'à ce que toutes les RSUs soient saturées. Dans ce cas :

$$E_m(0) - \max(f(\phi_m, T), 0) < 0, \forall m \in \mathcal{M}. \quad (5.3)$$

---

**Algorithm 1** Algorithme glouton pour l'ordonnancement des RSUs

---

1: *Données d'entrée* : Toutes les allocations possibles des créneaux de temps,  
 $C_m(n, t), \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}, t \in \mathcal{T}$

2: *Résultats de sortie* :  $\phi \subset \mathcal{S}$ , Un ensemble des allocations de créneaux de temps.  
 //Étape 1 : Trier l'ensemble des allocations selon l'énergie effective et la  
 vitesse des véhicules

3:  $\mathcal{S} \leftarrow \text{Tri}(\text{Données\_entrées})$

4:  $S \leftarrow \{C_m^1(n, t), \dots, C_m^{M.N.T}(n, t)\}$

5:  $i \leftarrow 1$   
 //Étape 2 : Rechercher un sous ensemble d'allocations dans  $S$

6: **tant que** (Eq. (5.3) n'est pas satisfaite ) **et** ( $i \leq M.N.T$ ) **faire**

7:   **si** ( $\phi_m \cup C_m^i(n, t)$  satisfait Eq.(5.2)) **alors**

8:      $\phi_m \leftarrow C_m^i(n, t)$

9:   **sinon**

10:     *Allocation impossible*

11:      $i++$

12:   **fin si**

13: **fin tant que**

---

### 5.1.1 Complexité de l'algorithme glouton

*Lemme 5.1* : Dans le pire des cas, l'algorithme glouton s'exécutera dans un temps de calcul de l'ordre de  $O(M \cdot N \cdot T \cdot \log(M \cdot N \cdot T))$ .

*Preuve* : Dans la première étape de l'algorithme, le tri des données d'entrée pourra être effectué dans un temps d'exécution de l'ordre de  $O((M \cdot N \cdot T) \log(M \cdot N \cdot T))$ . Dans la deuxième étape, l'algorithme effectue seulement un temps d'exécution de l'ordre de  $O(M \cdot N \cdot T)$  pour traverser l'ensemble  $S$  et extraire l'ensemble  $\phi$ . Au total, on pourra dire que l'algorithme glouton peut s'exécuter dans un temps de l'ordre de  $O(M \cdot N \cdot T \cdot \log(M \cdot N \cdot T))$ .

## 5.2 Optimisation par essais de particules

L'optimisation par essais de particules (en anglais *Particle Swarm Optimization*, PSO) est une méta-heuristique qui a été initialement proposée par Kennedy et Eberhart en 1995 (Kennedy et Eberhart, 1995). Le terme essaim désigne toute collection d'entités communicantes : une volée d'oiseaux est un essaim d'oiseaux ; un système immunitaire est un essaim de cellules, etc. La technique PSO s'inspire du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. En effet, il s'avère que ces comportements se caractérisent par des dynamiques de déplacements relativement complexes, différentes du comportement individuel. Les individus d'un groupe en mouvement ont la capacité de conserver une distance optimale entre eux et de suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux de leur voisinage.

Par analogie, la PSO correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est définie par sa position dans l'espace de recherche qui représente une solution du problème et sa vitesse qui caractérise son déplacement. Ces particules possèdent une mémoire leurs permettant de conserver la meilleure

performance atteinte individuellement et celle atteinte par les voisines (appelées groupe d'informatrices). À chaque itération, les particules se déplacent dans l'espace de recherche dans le but d'atteindre la solution optimale ou une solution proche de l'optimal. Pour converger vers cette solution, les particules modifient leur vitesse en se basant sur leur propre expérience de déplacement et sur celle des particules voisines. L'avantage principal de cette méthode est qu'elle n'est pas influencée par la taille et la non-linéarité du problème. Comparée à d'autres méthodes d'optimisation globale, telles que les algorithmes génétiques et le recuit simulé, la PSO converge rapidement vers la solution optimale ou une solution proche de l'optimal.

Dans notre étude, nous utilisons l'algorithme PSO comme alternative à l'algorithme glouton afin de maximiser le nombre de véhicules servis. Nous considérons une population de particules de taille  $P$ , telle que la position de chaque particule ( $p_i \in P$ ) est définie par une matrice binaire à trois dimensions  $p_i \in [M * N * T]$ . Chaque élément de la matrice  $p_i(m, n, t)$  est égal à 1 si la RSU  $m$  alloue le  $t^{ième}$  créneau de temps au véhicule  $n$ , sinon il est égal à 0. Par conséquent, chaque particule représente une solution éventuelle de l'ordonnancement des RSUs. Nous définissons une fonction d'évaluation ( $f_{PSO}(p_i)$ ) qui mesure la performance de cette position en dénombrant le nombre de véhicules servis. L'objectif de la PSO est ainsi de chercher des positions dans l'espace de recherche qui maximisent la fonction  $f_{PSO}$ , tout en respectant les contraintes définies dans MaxVehicle (voir chapitre IV). Pour converger vers cet objectif, l'algorithme PSO déplace itérativement les particules suivant une vitesse  $v_i$ , selon une trajectoire qui varie selon les meilleures positions déjà visitées. Nous définissons la vitesse de chaque particule comme étant aussi une matrice à trois dimensions  $v_i \in [M * N * T]$ , où chaque élément de la matrice est inclus dans cet intervalle  $[-v_{max}, v_{max}]$ . Cette matrice varie d'une itération à l'autre, selon la meilleure position locale déjà visitée et la

meilleure position trouvée par le groupe d'informatrices. L'équation (6.6) définit la variation de la vitesse après une itération.

$$v_i^{k+1}(m, n, t) = \omega^k v_i^k(m, n, t) + \rho_1 * rand_1 * (pbest_i^k(m, n, t) - x_i^k(m, n, t)) \\ + \rho_2 * rand_2 * (gbest_g^k(m, n, t) - x_i^k(m, n, t)) \quad (5.4)$$

où  $pbest$ ,  $gbest$ , sont respectivement la meilleure position atteinte localement par la particule  $i$  jusqu'à l'itération  $k$  et la meilleure position atteinte par le groupe d'informatrices  $g$  jusqu'à l'itération  $k$ . Les groupes d'informatrices sont formés selon les véhicules servis. Si deux particules possèdent en commun un sous-ensemble d'allocations pour les mêmes véhicules, alors elles peuvent rejoindre le même groupe. Pour simplifier cette opération, nous représentons les véhicules servis par l'ensemble des RSUs par un vecteur binaire de taille  $N$ , tel que l'élément de ce vecteur est égal à 1 si le véhicule correspondant est servi dans l'ordonnancement. Ainsi, nous pouvons regrouper les particules pour lesquelles la distance de Hamming est inférieure à un certain seuil  $\alpha$ . Cette distance permet de quantifier l'hétérogénéité du service des véhicules entre deux particules.  $\omega$  est un facteur d'inertie. Il définit l'aptitude d'exploration de la particule, c'est-à-dire il définit un compromis entre l'exploration globale et l'exploration locale de l'espace de recherche. Les paramètres  $\rho_1, \rho_2$  sont des facteurs de pondération. Ils pondèrent la tendance de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme. Finalement,  $rand_1, rand_2$  sont des valeurs aléatoires entre  $[0,1]$ .

La position de la particule est mise à jour en fonction de la nouvelle vitesse. Nous considérons qu'un élément de la matrice position  $p_i(m, n, t)$  est mis à 1 (c.-à-d. le véhicule  $n$  est servi par la RSU  $m$  à l'instant  $t$ ) seulement s'il respecte les trois conditions suivantes :

*Condition 1* : Le véhicule  $n$  n'a pas été déjà servi.

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{t \in \mathcal{T}} p_i^{k+1}(m, n, t) < 1, \quad \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T}. \quad (5.5)$$

*Condition 2* : La vitesse de cette allocation  $v_i^{k+1}(m, n, t)$  est plus grande que toutes les autres allocations pour la même RSU  $m$  et le même créneau de temps  $t$ .

$$v_i^{k+1}(m, n, t) = \max(v_i^{k+1}(m, n, t)), \quad \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T}. \quad (5.6)$$

Cette condition permet d'assurer qu'un seul véhicule est servi par la RSU  $m$  à l'instant  $t$ , car seule l'allocation qui a la vitesse la plus élevée est sélectionnée.

*Condition 3* : Soit  $\text{sig}(v_i^{k+1}(m, n, t))$  une fonction sigmoïde qui prend comme paramètre la vitesse de l'allocation. Le résultat retourné par cette fonction doit être inférieur ou égal à une valeur générée aléatoirement selon une distribution uniforme qui est définie entre  $[0, 1]$ . Si cette condition n'est pas respectée, un autre véhicule sera éligible pour satisfaire la deuxième condition. Cela permettra l'exploitation d'autres allocations possibles pour le créneau de temps ( $t$ ) et de la RSU ( $m$ ) dans le cas où les vitesses ne varient pas pendant les itérations.

$$\text{sig}(y) = \frac{1}{1 + e^{-y}}$$

$$\text{sig}(v_i^{k+1}(m, n, t)) < \text{random}[0, 1] \quad (5.7)$$

La mise à jour de la particule pourrait conduire à un ordonnancement non faisable des RSUs. Car même si les deux premières contraintes dans MaxVehicle ont été considérées, il reste que la causalité d'énergie n'a pas encore été vérifiée jusqu'à ce point. Nous introduisons ainsi une fonction  $f_{rep}(p_i^{k+1})$  qui permet de tester la faisabilité d'une particule dans le cas où elle ne respecte pas la causalité d'énergie. Elle

permet aussi de réparer la solution, en choisissant un sous-ensemble d'allocation dans  $p_i^{k+1}$  qui satisfait l'ensemble des contraintes.

Plusieurs approches peuvent être utilisées par la fonction  $f_{rep}$  pour satisfaire la causalité énergétique d'un ordonnancement. Par exemple, la fonction peut appliquer une simple élimination aléatoire des allocations dans  $p_i^{k+1}$  jusqu'à satisfaire la contrainte, ou utiliser une stratégie comparable à l'algorithme glouton pour sélectionner un sous ensemble d'allocations faisables. Le choix d'une méthode est surtout une question de complexité de calcul et de temps de convergence de la PSO. En effet, ces critères peuvent influencer sur le comportement de la PSO. Par exemple, une méthode optimale pour trouver le sous-ensemble d'allocation maximale, s'exécuterait dans un temps de calcul de l'ordre de  $O(2^n * T)$ , alors qu'une méthode de suppression aléatoire s'exécuterait dans un temps de l'ordre de  $O(N * T)$ . Un bon compromis entre ces deux critères de performance doit ainsi peser sur le choix de la méthode de réparation.

### 5.2.1 Algorithme PSO

Le déroulement de l'algorithme PSO peut être résumé par (Algorithme 2).

La première étape consiste à initialiser la vitesse des particules et la position. Les éléments de la matrice vitesse, sont initialisés aléatoirement selon une distribution uniforme avec des valeurs comprises entre  $[-v_{max}, v_{max}]$ . Concernant l'initialisation de la matrice position, deux approches sont considérées :

- La première approche consiste à initialiser les éléments de la matrice avec des valeurs aléatoires de sorte que le résultat respecte l'ensemble des contraintes spécifiées dans MaxVehicle.
- La deuxième approche prend en considération les résultats de l'algorithme glouton comme solution initiale à l'algorithme PSO. L'ensemble des par-

ticules est divisé en trois sous-ensembles. Un sous-ensemble qui comprend une solution générée aléatoirement, similaire à la première approche. Un sous-ensemble qui considère le résultat de l'algorithme glouton et un dernier sous-ensemble qui combine la solution de l'algorithme glouton avec une solution aléatoire. Le but de cette approche est d'accélérer la convergence de l'algorithme, d'une part, parce qu'on l'initialise avec une solution proche de l'optimal et d'autre part, parce que la combinaison entre l'initialisation aléatoire et l'initialisation avec l'algorithme glouton permet à l'algorithme PSO d'explorer plus rapidement les solutions dans l'espace de recherche et éviter de tomber dans les maximums locaux.

Nous notons que les deux approches d'initialisation sont nommées respectivement par «RandomPSO» et « GreedyPSO» .

La deuxième étape de l'algorithme consiste à chercher itérativement une solution qui maximise le nombre de véhicules servis. Elle s'arrête seulement si tous les véhicules sont servis ou que le résultat ne s'améliore pas après un certain nombre d'itérations. Une alternative qui est souvent utilisée dans les PSO comme condition d'arrêt, est de l'arrêter après avoir atteint un nombre maximal d'itérations. À chaque itération, l'algorithme calcule la vitesse de chaque particule. Ensuite, il met à jour la nouvelle position de la particule en se basant sur cette vitesse. Après, il applique une réparation sur l'ordonnancement dans le cas où ce dernier ne respecte pas la causalité d'énergie. Pour cela, il utilise une des méthodes décrites précédemment. À la fin de l'itération, l'algorithme sauvegarde la nouvelle position si cette dernière est la meilleure position atteinte par la particule. De même, il sauvegarde la meilleure position trouvée par le groupe d'informatrices si elle est meilleure que les autres positions déjà visitées.

### 5.2.2 Complexité de l'algorithme PSO

Nous analysons dans cette section la complexité en termes de temps de calcul de l'algorithme PSO. Premièrement, le calcul de l'étape d'initialisation est de l'ordre de  $O(M \cdot N \cdot T \cdot P)$  où  $P$  est le nombre de particules. En effet, dans cette étape, l'algorithme ne fait qu'ajouter des valeurs dans les matrices vitesse et position de chaque particule. Il n'y a ainsi que  $O(M \cdot N \cdot T)$  éléments à remplir pour chaque particule.

Dans la deuxième étape, la modification de la vitesse est exécutée dans un temps de calcul de l'ordre de  $O(M \cdot N \cdot T + N^2)$ . La complexité de cette opération est élevée en raison de la formation des groupes d'informatrices. Chaque particule calcule la distance de Hamming avec les autres particules pour former son groupe, ce qui induit une complexité de l'ordre de  $(N^2)$ . Ensuite, la mise à jour de la position est effectuée de l'ordre de  $O(M \cdot N \cdot T + O(f_{rep}))$ , où  $O(f_{rep})$  est l'ordre de complexité de la fonction réparatrice, qui dépend de la méthode utilisée.

La complexité totale de l'algorithme PSO est ainsi de l'ordre de  $O((M \cdot N \cdot T + O(f_{rep}) + N^2)I \cdot P)$  où  $I$  est le nombre d'itérations de l'algorithme.

---

**Algorithm 2** Algorithme PSO pour rechercher un ordonnancement optimal des RSUs

---

- 1: *Données d'entrée : une population de  $P$  particules*
  - 2: *Résultats de sortie : ( $\max(P_{g_{best}})$ ) une matrice à trois dimensions ( $|M| * |T| * |N|$ ) qui représente un meilleur ordonnancement des véhicules*
  - 3: Initialiser la matrice de vitesse pour chaque particule.
  - 4: Initialiser la matrice de position pour chaque particule selon RandomPSO ou GreedyPSO.
  - 5: Mettre à jour  $p_{best}_i^0$  et  $g_{best}_g^0$ .
  - 6: Initialiser le nombre d'itération  $k \leftarrow 0$
  - 7: **tant que** critère d'arrêt n'est pas satisfait **faire**
  - 8:     Mettre à jour la vitesse des particules selon l'équation 6.6
  - 9:     Mettre à jour la position des particules vis-à-vis des conditions (6.7, 6.8 et 5.7)
  - 10:     Réparer les particules au besoin
  - 11:      $k++$
  - 12: **fin tant que**
  - 13: **Retourner**  $\max(g_{best}_g^k)$
-

## CHAPITRE VI

### ÉVALUATION DES PERFORMANCES ET RÉSULTATS

Dans cette section, on compare la performance de l'ordonnancement des RSUs quand elles sont alimentées exclusivement par une source d'énergie renouvelable avec un ordonnancement où les RSUs sont alimentées par une source d'énergie continue telle que le réseau électrique. Aussi on compare les résultats des deux algorithmes proposés (glouton et PSO) pour voir leur performance vis-à-vis de la solution optimale.

L'objectif de cette évaluation est de tester l'impact de l'utilisation d'énergie renouvelable sur la performance du réseau. En effet, du fait de l'instabilité de l'énergie renouvelable, la gestion de l'énergie récoltée est une tâche essentielle pour maintenir la stabilité de performance du réseau. On focalise notre attention sur le service des véhicules et on étudie si l'énergie renouvelable peut rivaliser avec l'énergie continue en offrant des services comparables. Il est aussi à mentionner qu'à notre connaissance, il n'existe pas de modèle d'ordonnancement qui prend en considération la récolte d'énergie pour les VANETs. C'est d'ailleurs la motivation principale qui nous pousse à comparer notre modèle avec un ordonnanceur déjà étudié, qui vise à économiser l'énergie.

On considère MinCost, un modèle d'ordonnancement hors-ligne pour les RSUs quand ces dernières sont alimentés par une source d'énergie continue. Ce modèle

a été proposé initialement par (Khezrian *et al.*, 2015) dans le but de trouver la quantité d'énergie minimale qui peut servir l'ensemble des véhicules. Il est formulé par la PLNE suivante :

$$\text{MinCost : minimiser } \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{m,n,t} \cdot C_m(n,t) \quad (6.1)$$

Tel que :

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{t \in \mathcal{T}} x_{m,n,t} = 1 \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (6.2)$$

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} x_{m,n,t} \leq 1 \quad \forall m \in \mathcal{M}, t \in \mathcal{T} \quad (6.3)$$

L'objectif est de minimiser la somme des coûts des allocations (6.1). Là aussi,  $x_{m,n,t}$  est une variable binaire qui vaut 1 si le véhicule  $n$  est servi par la RSU  $m$  à l'instant  $t$ . Deux contraintes doivent cependant être respectées, la contrainte (6.2) assure que tous les véhicules soient servis et la contrainte (6.3) garantit qu'un créneau de temps soit alloué à au plus un véhicule. Il est clair que la contrainte (6.2) peut ne pas être respectée par MaxVehicle. Il faudra ainsi choisir un ensemble faisable de véhicules pour la comparaison, dans lequel il existe une solution d'ordonnancement où tous les véhicules soient servis.

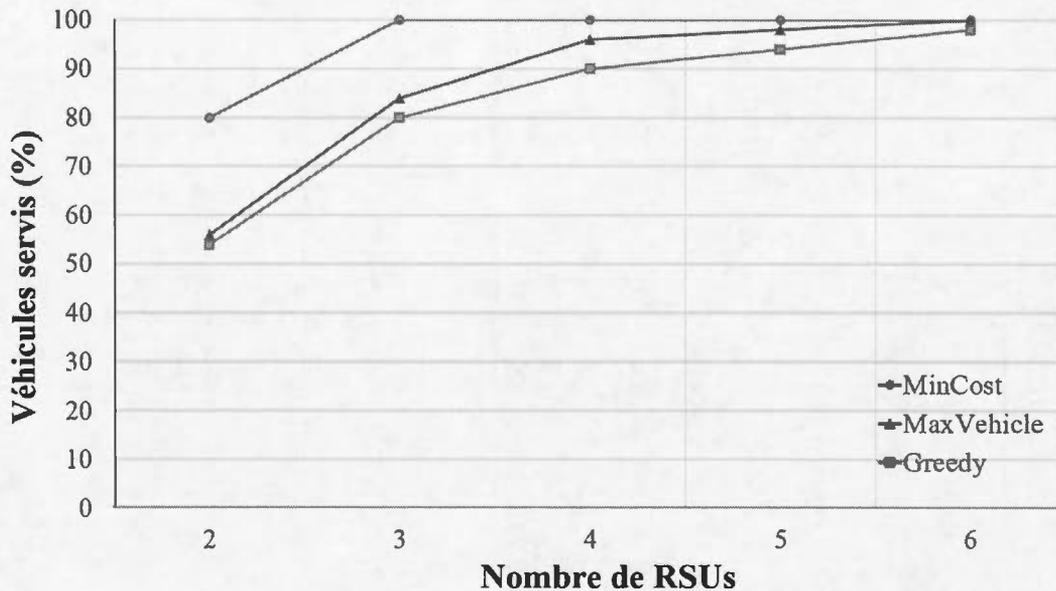
La performance est évaluée dans un scénario de réseau véhiculaire dont les paramètres sont détaillés dans Tableau 6.1. Le scénario est généré par un programme informatique qui prend comme paramètres trois fichiers afin de garder trace de chaque instance du scénario du réseau. Le premier fichier définit le mouvement des véhicules. Ces derniers sont uniformément distribués le long de la route et leur vitesse suit une loi normalisée de moyenne  $\mu$  et d'écart type  $\theta = 1$  tronqués entre  $[\mu-5, \mu+5]$ . Le deuxième fichier définit le déploiement des RSUs, leurs positions le long de la route et leurs rayons de couverture. Le dernier fichier quant à lui est

**Tableau 6.1** Les paramètres par défaut pour le réseau véhiculaire

Paramètres	Valeurs
Durée d'étude ( $T$ )	20 créneaux de temps
Durée d'un créneau de temps ( $TS$ )	1s
Taille de la route	2000m
Rayon de couverture d'une RSU	400m
Nombre de RSUs déployées ( $M$ )	3
Énergie maximale récoltée ( $h_{max}$ )	3 unités d'énergie
Capacité de file d'attente d'énergie ( $k$ )	100 unités d'énergie
Vitesse moyenne ( $\mu$ )	25m/s
Nombre de véhicules ( $N$ )	50 véhicules
État de l'énergie initiale ( $E_0$ )	$k$
Exigence de données des véhicules ( $D$ )	$10^6$ Bits
Bande passante du canal $B$	10MHz
Exposant d'évanouissement ( $\gamma$ )	3
Distance de référence ( $d_0$ )	1m
Évanouissement à $d_0$ ( $PL_0$ )	1
Puissance de bruit dans le récepteur ( $N_0$ )	1mW

utilisé dans le scénario où les RSUs sont alimentées exclusivement par une source d'énergie renouvelable. Il spécifie l'arrivée d'énergie dans l'instant de temps dans chaque RSU.

Les résultats de l'algorithme PSO sont étudiés séparément car c'est un algorithme dont la performance dépend du nombre d'itérations. En effet, théoriquement il finira par atteindre à un moment donné la solution optimale. Il pourra ainsi trouver un ordonnancement similaire à MaxVehicle.

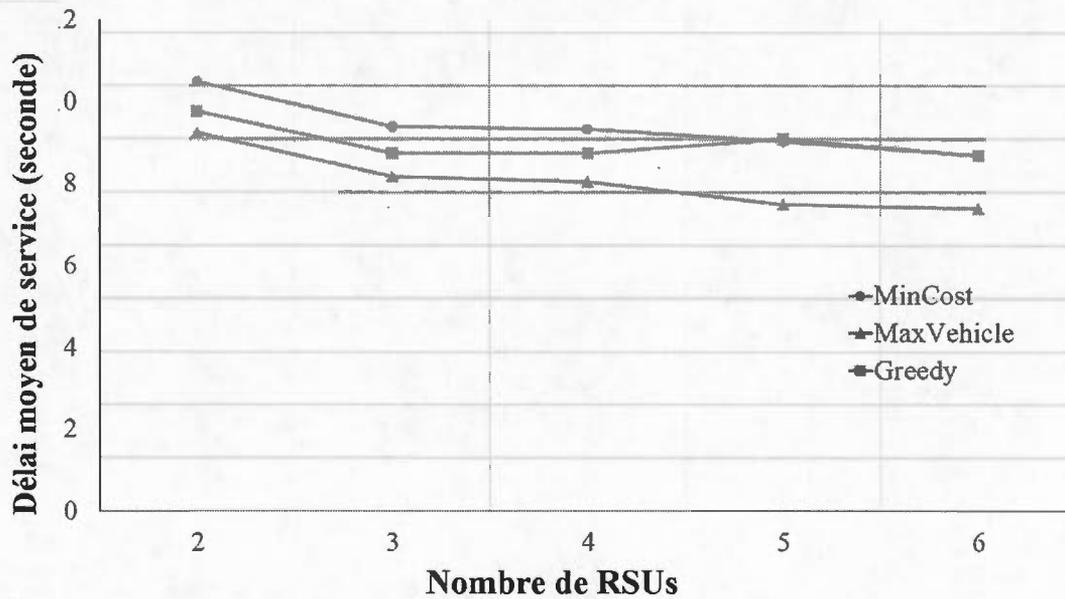


**FIGURE 6.1** Impact du nombre de RSUs déployées sur le service des véhicules

## 6.1 Résultats et discussions

### 6.1.1 Impact du nombre de RSUs déployées sur le service des véhicules

On remarque d'après la figure 6.1 qui présente l'impact du nombre de RSUs déployées sur le service des véhicules que le service des véhicules augmente quand le nombre de RSUs déployées est élevé. Cela est logique, car plus il y a de RSUs sur la route, plus le nombre de créneaux de temps à être alloué sera élevé. On note aussi que MinCost arrive à servir l'ensemble des véhicules avec juste trois RSUs déployées alors que MaxVehicle nécessite le double de ces RSUs pour aboutir au même résultat. Cela est dû au fait que les RSUs dans MaxVehicle n'ont pas récolté assez d'énergie pour servir le même nombre de véhicules que MinCost. Ainsi quand on déploie plus de RSUs dans le réseau, on augmente la quantité d'énergie disponible, parce que d'abord la charge des communications est distribuée sur l'ensemble des RSUs et ensuite parce que les RSUs auront plus d'opportunité pour



**FIGURE 6.2** Impact du nombre de RSUs déployées sur le délai de service des véhicules

récolter de l'énergie.

D'un autre côté on observe que l'algorithme glouton arrive à donner des résultats très proches de MaxVehicle pour plusieurs instances. Cela prouve qu'il est très performant et peut-être utilisé comme solution alternative à la résolution de MaxVehicle pour les instances où les paramètres sont très grands.

#### 6.1.2 Impact du nombre de RSUs déployées sur le délai de service des véhicules

On évalue dans cette partie la performance des ordonnanceurs vis-à-vis du délai de service. Ce dernier est défini comme étant la différence entre l'instant où le véhicule émet sa demande de service et l'instant où il est servi par la RSU. On remarque alors d'après la figure 6.2 que MaxVehicle arrive à servir plus rapidement les véhicules que MinCost. Cela peut s'expliquer par le fait que l'objectif de MaxVehicle est de servir seulement un nombre maximum de véhicules sans restriction

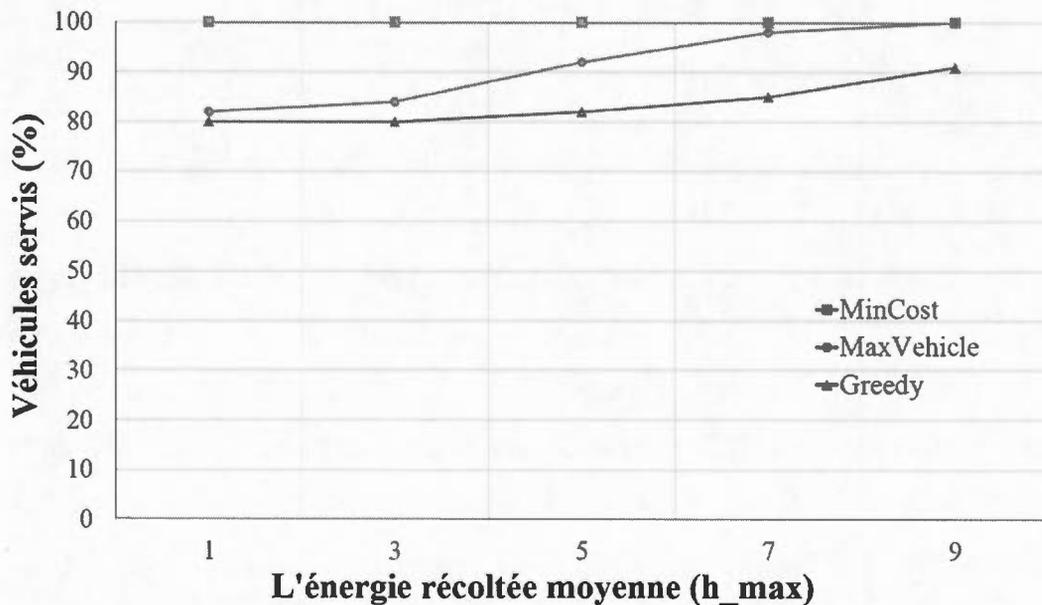
sur l'énergie consommée, alors que MinCost vise à minimiser la consommation énergétique des véhicules.

D'un point de vue pratique, l'ordonnancement dans MinCost tend à servir les véhicules les plus proches de la RSU, parce que cela induit un coût énergétique plus faible. D'un autre côté, l'ordonnancement dans MaxVehicle peut servir les véhicules dès qu'ils entrent dans le rayon de couverture de la RSU même si cela induit un coût élevé en énergie. En effet, afin de ne pas gaspiller l'énergie récoltée quand la batterie de la RSU est pleine, cette dernière peut se permettre alors de l'utiliser pour servir un maximum de véhicules, sachant qu'elle pourra être récupérée durant les prochains intervalles de temps.

On observe aussi dans la figure 6.2 que le délai de service de l'algorithme glouton est meilleur que celui de MaxVehicle. Cela est tout à fait normal, car l'algorithme glouton donne priorité à l'allocation avec un coût énergétique faible. Cette stratégie ressemble plus à MinCost, pourtant on remarque qu'elle offre un meilleur délai de service. Cela est dû au fait que l'algorithme glouton prend en considération l'énergie effective (c.-à-d. la différence entre l'énergie récoltée et l'énergie consommée) lorsqu'il trie les allocations.

### 6.1.3 Impact de la quantité d'énergie récoltée sur le service des véhicules

On s'intéresse ici à voir l'influence du taux d'arrivée de l'énergie sur la performance de MaxVehicle. On fixe pour cela le nombre de RSUs déployées dans la route à trois RSUs, car c'est ce qu'il faut pour servir l'ensemble des véhicules. Le nombre de véhicules servis dans MinCost est alors fixe, car les RSUs sont alimentées par une source d'énergie continue. On utilise alors MinCost comme un seuil dans le but de voir la performance de MaxVehicle. On remarque ainsi dans la figure 6.3 que la récolte d'énergie a un impact sur le nombre de véhicules servis. Quand les RSUs récoltent plus d'énergie, le réseau arrive à rivaliser avec la performance d'un



**FIGURE 6.3** Impact de la quantité d'énergie récoltée sur le service des véhicules

réseau où les RSUs sont alimentées par des sources d'énergie continue. On voit cela dans la figure 6.3 quand les RSUs récoltent en moyenne 9 unités d'énergie par intervalle, elles arrivent alors à donner la même performance que MinCost.

#### 6.1.4 Impact de la densité véhiculaire sur le service des véhicules

Nous étudions dans cette partie l'influence de la densité des véhicules sur la performance du réseau. On fixe aussi ici le nombre de RSUs déployées à trois et on teste la performance sur trois différents scénarios de densité véhiculaire. Dans le premier, la position initiale des véhicules est à l'intérieur du rayon de couverture de la première RSU. Cela permet d'engendrer une concentration des véhicules sur la route qui va modéliser une forte densité véhiculaire. Dans le deuxième scénario, on allège cette densité en considérant une position initiale des véhicules dans les deux premières RSUs. Le dernier scénario modélise un réseau véhiculaire allégé où les véhicules sont uniformément distribués le long de la route. On dénote

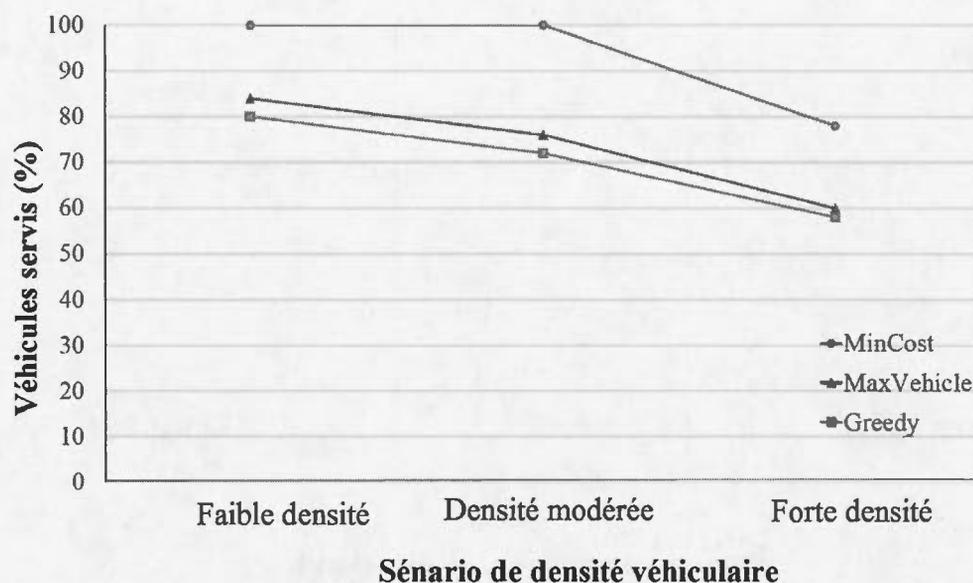


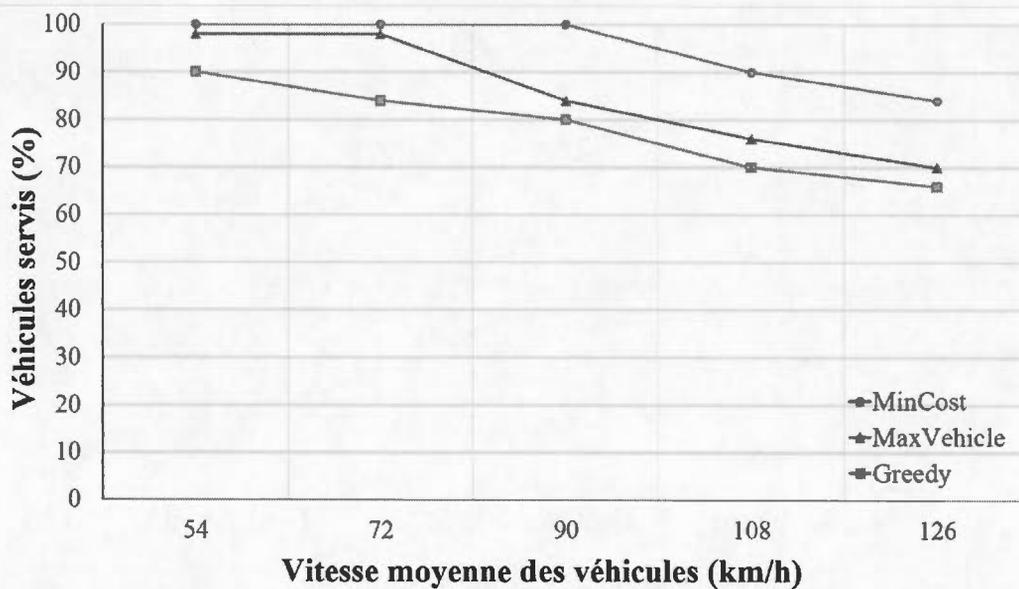
FIGURE 6.4 Impact de la densité véhiculaire sur le service des véhicules

respectivement les trois scénarios par forte densité, densité modérée et densité faible.

Les résultats de la figure 6.4 montrent que les trois ordonnancements offrent une performance de plus en plus faible quand la densité des véhicules augmente. Les véhicules dans un tel scénario sont proches les uns des autres, et donc ils envoient leurs requêtes presque aux mêmes moments. À cause de la contrainte qui oblige les RSUs à ne pas servir plus d'un véhicule durant un instant  $t$ , les véhicules auront moins d'opportunités d'être servis dans ce scénario quand ils sont pris par la même RSU durant le même intervalle de temps.

#### 6.1.5 Impact de la vitesse des véhicules sur le service

La vitesse est une des caractéristiques qui différencie les réseaux véhiculaires des autres réseaux ad hoc. On étudie dans cette partie l'influence de cette caractéristique sur la performance du réseau. On évalue pour cela le service des véhicules,



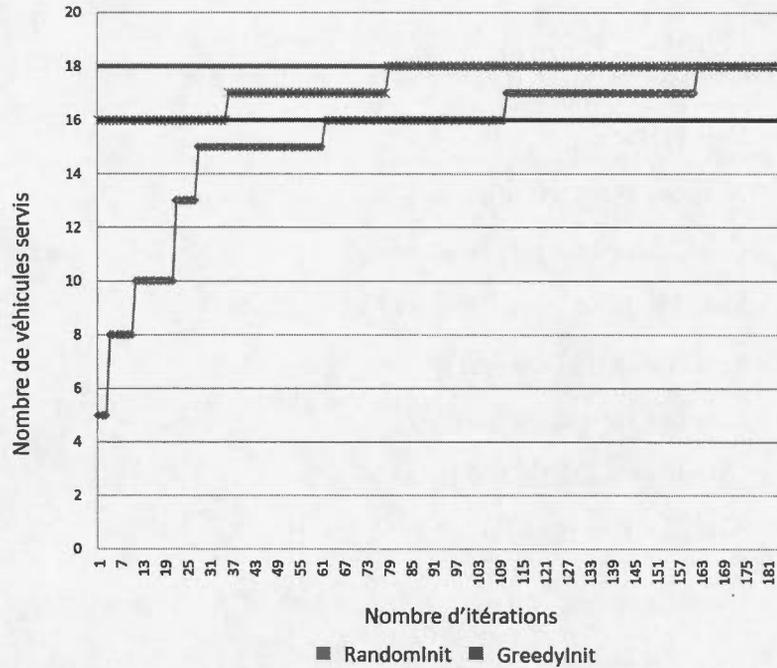
**FIGURE 6.5** Impact de la vitesse des véhicules sur leur service

en prenant en considération différentes moyennes de vitesse variant entre  $[54m/s, 126m/s]$ .

On remarque d'après les résultats dans la figure 6.5, que plus la vitesse moyenne des véhicules augmente, moins ils sont servis par les RSUs. Cela peut être justifié par le fait que les véhicules ont moins de chance d'être servis par les RSUs s'ils roulent à des vitesses élevées. En effet, la communication entre la RSU et les véhicules se fait par l'allocation des créneaux de temps. Si le véhicule passe moins de temps dans le rayon de couverture de la RSU, il aura moins d'opportunité qu'un créneau de temps lui soit alloué.

#### 6.1.6 Évaluation des performances de l'algorithme PSO

On évalue dans cette section la performance de l'algorithme PSO. Théoriquement, c'est un algorithme qui peut atteindre la solution optimale s'il est exécuté suffisamment longtemps. On doit donc mesurer sa vitesse de convergence pour



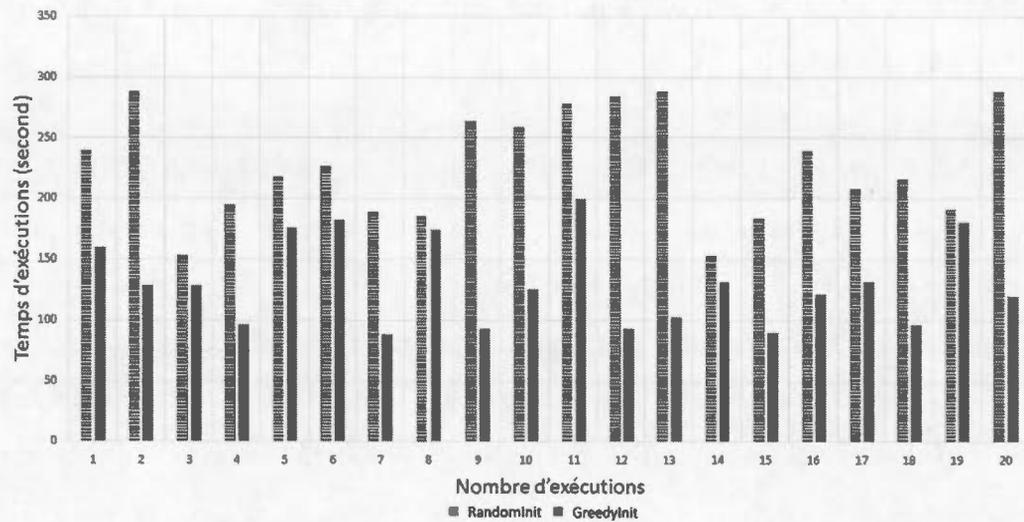
**FIGURE 6.6** Nombre moyen d'itérations pour que l'algorithme PSO converge vers la solution optimale

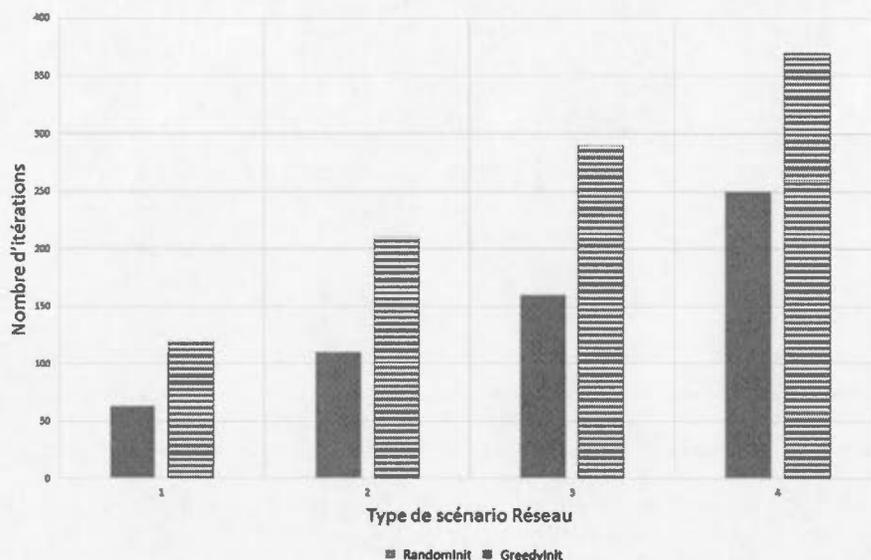
voir s'il peut atteindre la solution optimale dans un temps raisonnable. On commence d'abord par étudier le nombre d'itérations nécessaires à l'algorithme pour converger. On utilise les résultats de LPsolve (voir chapitre IV) comme seuil de performance. On compare aussi dans cette évaluation les deux modes d'initialisations de l'algorithme (décrits dans le chapitre V) afin d'analyser leur influence sur la convergence. Le tableau (6.2) décrit les différents paramètres utilisés pour l'évaluation.

Afin de rendre les résultats plus crédibles et plus cohérents, nous évaluons l'algorithme sur plusieurs instances d'exécutions et nous considérons la moyenne des résultats trouvés. La figure (6.6) montre que l'algorithme PSO arrive à atteindre la solution optimale après juste 85 itérations dans le cas où il est initialisé à partir

**Tableau 6.2** Paramètres utilisés pour évaluer l'algorithme PSO

Paramètres	Valeurs
Nombre de particules	$N$
Coefficients de pondération ( $\omega$ )	$1 * \text{Random} [0, 1]$
Seuil de la vitesse [ $\{V_{max}\} = \{-V_{min}\}$ ]	4
Seuil de voisinage ( $\alpha$ )	3
Nombre de véhicules ( $N$ )	20
Nombre de RSUs ( $M$ )	2
Nombre de créneaux de temps ( $T$ )	10

**FIGURE 6.7** Durée d'exécution de l'algorithme PSO pour différentes instances d'exécutions



**FIGURE 6.8** L'impact de la taille des scénarios sur la convergence de l'algorithme

de l'algorithme glouton (GreedyInit) et 162 itérations dans le cas où il est initialisé aléatoirement (RandomInit). Si on compare ce nombre d'itérations au nombre de possibilités qui existent dans l'espace de recherche, on peut alors s'apercevoir que l'algorithme arrive à atteindre son objectif avec un nombre relativement réduit d'itérations. On remarque aussi que l'évolution de l'algorithme se dégrade de plus en plus quand il se rapproche de la solution optimale. Cela est normal, car il est plus difficile d'améliorer le résultat quand il fait partie d'un maximum local. Il est nécessaire alors dans ce cas d'exploiter plus de solutions dans l'espace de recherche d'où le ralentissement de l'évolution.

L'initialisation aléatoire prend plus de temps à converger que l'initialisation à partir de l'algorithme glouton. Cette observation s'explique par le fait que les particules dans ce cas démarrent d'une solution qui peut ne pas être performante. Ceci les ralentit à converger vers la solution optimale, contrairement à l'autre initialisation où une partie des particules démarrent d'une solution proche de

**Tableau 6.3** Paramètres utilisés pour les différents scénarios

Scénario	$N$	$M$	$T$
Scénario 1	20	2	10
Scénario 2	50	2	30
Scénario 3	45	3	15
Scénario 4	60	4	10

l'optimal qui accélère l'évolution de l'algorithme. Là aussi, l'algorithme tire profit de l'aléatoire lors de l'initialisation des autres parties des particules en permettant aux particules d'explorer plus de solutions dans l'espace de recherche et sortir plus rapidement des maximums locaux.

Nous évaluons ensuite la performance en terme de temps d'exécution afin d'avoir une idée sur l'impact de la complexité de l'algorithme sur son déroulement. L'algorithme est exécuté sur une machine dotée d'un processeur Intel i7 et d'une mémoire RAM de 16 Go. Les résultats montrent d'après la figure (6.7) que la convergence de l'algorithme peut durer jusqu'à 2,5 heures pour atteindre la solution optimale. Cela n'est pas vraiment pénalisant vu que l'algorithme est en mode hors-ligne. La figure (6.8) montre l'évolutivité de l'algorithme vis à vis d'autres scénarios plus complexes. Les scénarios utilisés sont décrits dans le tableau (6.3). On remarque alors que le nombre d'itérations augmente avec les différents scénarios. Néanmoins, cet accroissement n'est pas exponentiel et reflète bien la caractéristique des algorithmes évolutionnaires à l'effet que les résultats ne dépendent pas vraiment de la taille des instances mais de leur manière d'évoluer dans l'espace de recherche.



## CHAPITRE VII

### CONCLUSION GÉNÉRALE

La consommation électrique des unités de bord de route (notées RSUs dans ce document) a un impact à la fois sur l'environnement et sur les dépenses financières nécessaire pour leur fonctionnement. Nous avons procédé ainsi dans ce mémoire à analyser les performances d'une approche potentielle pour alléger ces contraintes. La solution consiste à alimenter les unités de bord de route par des sources d'énergie renouvelable. En effet, l'énergie renouvelable constitue une meilleure alternative à l'énergie continue (réseau électrique) car elle est inépuisable sur l'échelle du temps et peut être récoltée directement depuis l'unité de bord de route. Cependant, la quantité et les arrivées d'énergie sont aléatoires et dépendent souvent des conditions climatiques et de la position géographique, ce qui nécessiter de prévoir des dispositifs de stockage pour l'accumuler et l'utiliser pour des opérations futures.

Nous avons étudié le problème de l'ordonnancement des unités de bord de route quand elles sont alimentées uniquement par une source d'énergie renouvelable. Notre objectif était de maximiser le nombre de véhicules servis sous les contraintes de la causalité d'énergie et du service exclusif des véhicules par une des unités de bord de route, sans que ces dernières servent plus qu'un véhicule à un instant donné. Nous avons formulé le problème sous forme d'optimisation linéaire en

nombres entiers et nous avons prouvé qu'il fait partie des problèmes NP-difficile, montrant ainsi qu'il n'existe pas d'algorithmes déterministes pour le résoudre dans un temps polynomial.

Nous avons proposé deux algorithmes alternatifs pour tenter de résoudre le problème d'ordonnement. Le premier est un algorithme glouton qui vise à servir en premier les véhicules qui consomment moins d'énergie lors de la communication avec les unités de bord de route. Le deuxième algorithme est la méta-heuristique d'optimisation par essaim de particules qui tente de rechercher itérativement la solution optimale pour l'ordonnement.

La performance du réseau a été évaluée et comparée à un modèle de référence qui considère un ordonnancement visant à économiser l'énergie consommée, dans un scénario où les unités de bord de route sont alimentées par l'énergie continue. Les résultats nous ont montré que la récolte d'énergie peut concurrencer l'alimentation par l'énergie continue en termes de pourcentage de véhicules servis et aussi qu'elle peut améliorer le délai de service comparativement à une stratégie d'économie d'énergie. Les algorithmes proposés quant à eux arrivent aussi à donner de bonnes performances et peuvent même, dans le cas de la méta-heuristique, atteindre la solution optimale au détriment du temps de calcul.

Nous envisagerons dans les futurs travaux à introduire dans notre modèle d'ordonnement des facteurs importants pour les réseaux véhiculaires, tels que le délai de service ou l'instabilité de la liaison de communication. Aussi, nous comptons utiliser ces résultats comme référence pour pouvoir étudier et comparer des modèles d'ordonnements en mode en ligne.

## BIBLIOGRAPHIE

- A. H. Land, A. G. D. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, 28(3), 497–520.
- Ali, Q. I. (2016). Event driven duty cycling : an efficient power management scheme for a solar-energy harvested road side unit. *IET Electrical Systems in Transportation*, 6(3), 222–235.
- Atallah, R., Khabbaz, M. et Assi, C. (2016). Energy harvesting in vehicular networks : a contemporary survey. *IEEE Wireless Communications*, 23(2), 70–77.
- Berkelaar, M., Eikland, K. et Notebaert, P. (2004). lp\_solve 5.5, open source (mixed-integer) linear programming system. Logiciel.
- Biswas, S., Tatchikou, R. et Dion, F. (2006). Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety. *IEEE Communications Magazine*, 44(1), 74–82.
- Brahim, M. B., Drira, W. et Filali, F. (2014). Roadside units placement within city-scaled area in vehicular ad-hoc networks. Dans *2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, 1010–1016.
- C2C-CC (2007). *Car to Car Communication Consortium Manifesto : Overview of the C2C-CC System*. Car to Car Communication Consortium, (tech. rep. version 1.1 éd.).
- CALM (2008). *Intelligent transport systems -Communications access for land mobiles (CALM)*. ISO/DIS 21217, (version 1.0 éd.). Rev. Stage : 40.60, TC 204, draft Standard (CALM).
- Chekuri, C. et Khanna, S. (2000). A ptas for the multiple knapsack problem. Dans *Proc. Ann. ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms*, SODA '00, 213–222., Philadelphia, PA, USA.
- Darisini, P. S. N. et Kumari, N. S. (2013). A survey of routing protocols for vanet in urban scenarios. Dans *Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering (PRIME), 2013 International Conference on*, 464–467.

- FCC (1999). *Intelligent transport systems -Communications access for land mobiles (CALM)*. Federal Communications Commission., (report no. et 99-5 éd.).
- Feng, W. et Elmirghani, J. M. H. (2009). Green ict : Energy efficiency in a motorway model. Dans *2009 Third International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, 389–394.
- Hammad, A. A., Todd, T. D., Karakostas, G. et Zhao, D. (2013). Downlink traffic scheduling in green vehicular roadside infrastructure. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(3), 1289–1302.
- IEEE802.11 (2007). *IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems- Local and Metropolitan Area Networks-Specific requirements - Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Std, (version 2007 éd.).
- Kennedy, J. et Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Dans *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, volume 4, 1942–1948 vol.4.
- Khezrian, A., Todd, T. D., Karakostas, G. et Azimifar, M. (2015). Energy-efficient scheduling in green vehicular infrastructure with multiple roadside units. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(5), 1942–1957.
- Li, P., Liu, Q., Huang, C., Wang, J. et Jia, X. (2015). Delay-bounded minimal cost placement of roadside units in vehicular ad hoc networks. Dans *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 6589–6594.
- Mehar, S., Senouci, S. M., Kies, A. et Zoulikha, M. M. (2015). An optimized roadside units (rsu) placement for delay-sensitive applications in vehicular networks. Dans *2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 121–127.
- Muhtar, A., Qazi, B. R., Bhattacharya, S. et Elmirghani, J. M. H. (2013). Greening vehicular networks with standalone wind powered rsus : A performance case study. Dans *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 4437–4442.
- NHTSA (2014). V2V : Cars communicating to prevent crashes, deaths, injuries. <https://www.transportation.gov/fastlane/v2v-cars-communicating-prevent-crashes-deaths-injuries/>. Accédé : 2016-09-29.

- Nutov, Z., Beniaminy, I. et Yuster, R. (2006). A  $(1-1/e)$ -approximation algorithm for the generalized assignment problem. *Oper. Res. Lett.*, 34(3), 283–288.
- Rong, Z. et Rappaport, T. (1996). *Wireless communications : Principles and practice* (1er éd.). Prentice Hall.
- Sahni, S. et Gonzalez, T. (1976). P-complete approximation problems. *J. ACM*, 23(3), 555–565.
- Shmoys, D. B. et Tardos, E. (1993). An approximation algorithm for the generalized assignment problem. *Math. Program.*, 62(3), 461–474.
- Toutouh, J. et Alba, E. (2011). An efficient routing protocol for green communications in vehicular ad-hoc networks. Dans *Proceedings of the 13th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '11*, 719–726., New York, NY, USA. ACM.
- UEPA (2007). *Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Vageesh, D. C., Patra, M. et Murthy, C. S. R. (2014). Joint placement and sleep scheduling of grid-connected solar powered road side units in vehicular networks. Dans *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt), 2014 12th International Symposium on*, 534–540.
- Wen, C. et Zheng, J. (2015). An rsu on/off scheduling mechanism for energy efficiency in sparse vehicular networks. Dans *Wireless Communications Signal Processing (WCSP), 2015 International Conference on*, 1–5.
- Wu, T. J., Liao, W. et Chang, C. J. (2012). A cost-effective strategy for road-side unit placement in vehicular networks. *IEEE Transactions on Communications*, 60(8), 2295–2303.
- Zhang, H., Ma, Y., Yuan, D. et Chen, H. H. (2011). Quality-of-service driven power and sub-carrier allocation policy for vehicular communication networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29(1), 197–206.
- Zou, F., Zhong, J., Wu, W., Du, D.-Z. et Lee, J. (2011). Energy-efficient road-side unit scheduling for maintaining connectivity in vehicle ad-hoc network. Dans *Proceedings of the 5th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication, ICUIMC '11*, 64 :1–64 :8., New York, NY, USA. ACM.