



Résolution à base d'heuristiques du problème de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules

Rejab Hajlaoui

► To cite this version:

Rejab Hajlaoui. Résolution à base d'heuristiques du problème de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Bourgogne Franche-Comté, 2018. Français. NNT : 2018UBFCD047 . tel-02000974

HAL Id: tel-02000974

<https://theses.hal.science/tel-02000974>

Submitted on 1 Feb 2019

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

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

**THESE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
PRÉPARÉE A L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ**

Ecole doctorale n°37

Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques

Doctorat d'Informatique

Par

Rejab HAJLAOUI

**Résolution à base d'heuristiques du problème de routage
dans les réseaux ad hoc de véhicules**

Thèse présentée et soutenue à Besançon, le 18 décembre 2018

Composition du Jury :

SPIES FRANCOIS	Professeur à l'Université de Franche-Comté Montbéliard	Président
KRAJECKI MICHAEL	Professeur à l'Université de Reims Champagne- Ardenne	Rapporteur
LORENZ PASCAL	Professeur à l'Université de Haute Alsace Mulhouse	Rapporteur
ABOUAISSA ABDELHAFID	Maitre de conférence HDR à l'Université de Haute Alsace Mulhouse	Examineur
GUYENNET HERVÉ	Professeur à l'Université de Franche-Comté Besançon	Directeur de thèse
MOULAH TAREK	Maitre-assistant à l'Université de Kairouan, Tunisie	Codirecteur de thèse

Remerciements

Je tiens à exprimer ici ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont directement ou indirectement participé à l'accomplissement de ce travail.

*Je tiens tout d'abord à témoigner ma reconnaissance à mon directeur de thèse, monsieur **Hervé GUYENNET**, Professeur en Informatique à l'université de Franche Comté – Besançon. France, pour avoir su guider ce travail. Je lui adresse mes plus sincères remerciements pour sa disponibilité, sa générosité, la somme d'enseignements prodigués et ses recommandations toujours fructueuses.*

*J'avance avec gratitude ma profonde reconnaissance à monsieur **Tarek MOULAH** maître-assistant en Informatique à la Faculté des Sciences et Techniques de Sidi Bouzid. Tunisie, pour la co-direction qu'il a bien voulu assurer, pour ses conseils prodigieux ainsi que pour son aide précieuse à l'aboutissement de ce travail.*

Je tiens également à témoigner ma reconnaissance aux membres du laboratoire DISC pour l'accueil chaleureux qu'ils m'ont réservé durant les périodes de séjour et pour leurs conseils pertinents dans l'abord cognitif de ce travail.

*Je tiens aussi à remercier les professeurs **Pascal LORENZ** et **Michael KRAJECKI** qui se sont intéressés à mon travail et qui ont accepté de l'évaluer en tant que rapporteurs. Leurs conseils et suggestions ont contribué à la clarification du manuscrit de la thèse. Je remercie également le professeur **François SPIES** et le maître de conférence **Abdelhafid ABOUAISSA** qui ont accepté d'être membres du jury de cette thèse.*

Table des matières

Liste des figures.....	1
Liste des tableaux.....	4
Introduction générale.....	5

Chapitre 1 : Les réseaux véhiculaires : caractéristiques, défis et verrous

1.1. Introduction.....	8
1.2. Caractéristiques des réseaux de véhicules.....	9
1.2.1. Forte mobilité.....	9
1.2.2. Environnements de routage et modèle de mobilité.....	9
1.2.3. Capacité de traitement et puissance de la batterie.....	10
1.2.4. Échange fréquent d'informations.....	10
1.2.5. Communication sans fil.....	10
1.2.6. Temps critique.....	10
1.2.7. Mobilité prévisible.....	10
1.3. Défis de sécurité dans les réseaux véhiculaires.....	11
1.4. Composants d'un réseau VANET.....	12
1.4.1. OBU (On -Board Unit)	12
1.4.2. RSU (Road Side Unit)	12
1.4.3. TA (Trusted Authority)	12
1.5. Architecture des VANETs.....	13
1.5.1. Communication véhicule à infrastructure (V2I)	13
1.5.2. Communication véhicule à véhicule (V2V)	13
1.5.3. Communication hybride (HVC)	14

1.6. Technologies de communication véhiculaire.....	14
1.6.1. Technologie à courte portée.....	14
1.6.2. Technologies a portée moyenne.....	16
1.6.3. Technologies à longue portée.....	17
1.7. Applications des réseaux de véhicules.....	19
1.7.1. Applications de sécurité.....	19
1.7.2. Applications de confort.....	19
1.7.3. Applications de gestion du trafic routier.....	20
1.8. Le routage dans les réseaux de véhicules.....	20
1.8.1. Définition.....	20
1.8.2. Types de messages.....	20
1.8.3. Classification des protocoles de routage.....	21
1.8.3.1. Routage basé sur la topologie.....	21
1.8.3.2. Routage basé sur la position.....	23
1.8.3.3. Routage basé sur les clusters.....	23
1.8.3.4. Routage basé sur la diffusion.....	23
1.8.3.5. Routage à base geocast.....	23
1.9. Principaux projets.....	24
1.10. Conclusion.....	28

Chapitre 2 : Routage à base d'heuristiques dans les réseaux véhiculaires

2.1. Introduction.....	29
2.2. Les Meta heuristiques.....	30
2.2.1. Présentation.....	30
2.2.2. Classification des heuristiques.....	31
2.2.2.1. Métaheuristique inspirée ou non de la nature.....	31
2.2.2.2. Métaheuristique à solution unique Vs. Métaheuristique à population.....	31
2.2.2.3. Fonction objectif dynamique Vs. fonction objectif statique.....	31
2.2.2.4. Nombre de structures de voisinages utilisées.....	31
2.2.2.5. Métaheuristique avec ou sans mémoire.....	32
2.2.3. Métaheuristiques hybrides.....	32

2.3. Algorithme et complexité.....	33
2.3.1. Définition.....	33
2.3.2. Les classes de complexité.....	34
2.4. Utilisation des métaheuristiques dans les réseaux de véhicules.....	34
2.4.1. Optimisation par essaims particulaires (PSO)	35
2.4.2. Optimisation par algorithmes génétiques (AG)	38
2.4.3. Optimisation par algorithmes de fourmis (ACO)	40
2.5. Etude comparative.....	44
2.5.1. Métriques de performances.....	44
2.5.1.1. Taux de livraison des paquets (PDR)	44
2.5.1.2. Le délai de bout en bout (E2ED)	44
2.5.1.3. Débit.....	44
2.5.1.4. Bande passante (BP)	44
2.5.2. Performances des métaheuristiques dans les VANETs.....	48
2.5.3. Degré de performance des heuristiques sur différents scénarios.....	48
2.6. Conclusion.....	50
DEUXIEME PARTIE: CONTRIBUTIONS.....	52
Chapitre 3 : Routage clustérisé pour les réseaux VANETs	
3.1. Introduction.....	54
3.2. Travaux existants.....	55
3.3. Fondements théoriques du modèle proposé(AKCA)	58
3.3.1. La clustérisation.....	58
3.3.1.1. Intérêt et coût de la clustérisation.....	58
3.3.1.2. Méthodes de clustérisation.....	59
3.3.2. L'algorithme K-medoids.....	60
3.4. Description du modèle proposé (AKCA)	61
<i>Contribution 1. Initialisation.....</i>	<i>63</i>
<i>Contribution 2. Formation des clusters.....</i>	<i>65</i>

<i>Contribution 3. Maintenance de clusters.....</i>	<i>66</i>
3.5. Résultats expérimentaux et analyse.....	70
3.6. Conclusion.....	77

Chapitre 4 : Amélioration du modèle de routage AKCA

4.1. Introduction.....	79
4.2. Travaux antécédents.....	80
4.3. Fondements théoriques du modèle amélioré (E -AKCA)	82
4.3.1. La recherche tabou (RT)	82
4.3.2. L'algorithme génétique (AG)	83
4.3.3. Le modèle hybride (AG-RT)	84
4.4. Approche proposée.....	87
4.4.1. Problématique.....	87
4.4.2. Mise en œuvre.....	88
4.5. Simulation et évaluation.....	92
4.5.1. Configuration de la simulation.....	92
4.5.2. Résultats des simulations.....	93
4.5.2.1. Métriques de connectivité.....	94
4.5.2.2. Métriques de performance.....	98
4.5.2.3. Métriques de stabilité.....	101
4.6. Conclusion.....	103

Chapitre 5 : Amélioration du modèle AKCA basée sur la recherche par dispersion

5.1. Introduction.....	106
5.2. Modèle hybride «recherche par dispersion-recherche tabou»	106
5.2.1. La recherche par dispersion (RD)	107
5.2.2. Modèle proposé.....	107
5.2.3. Application de la recherche par dispersion.....	108
A. Initialisation.....	108
B. Génération de l'ensemble de référence.....	108

<i>C. Evaluation</i>	108
<i>D. Génération de sous-ensemble</i>	109
<i>E. Méthode de combinaison</i>	110
<i>F. Méthode d'amélioration</i>	112
5.2.4. Résultats expérimentaux et analyse.....	113
5.3. Système d'alerte à base d'Arduino Uno	114
5.4. Conclusion	114
Conclusion générale et perspectives.....	115
Liste des publications personnelles.....	118
Bibliographie.....	119
Annexe A : Système d'alerte à base d'Arduino Uno.....	129-136

Liste des figures

Figure 1.1. Attaques dans les VANETs.....	11
Figure 1.2. Types de communication dans les réseaux véhiculaires.....	13
Figure 1.3. Classification des Technologies de communication.....	14
Figure 1.4. Protocoles de routage dans les VANETs.....	21
Figure 1.5. Composants des voitures autonomes.....	24
Figure 1.6. Aperçu de la voiture intelligente de Google.....	24
Figure 1.7. Estimation du nombre de voitures autonomes (2015-2020).....	25
Figure 2.1. Techniques de recherche des métaheuristiques.....	30
Figure 2.2. Taxonomies des métaheuristiques hybrides.....	32
Figure 2.3. Classes de complexité.....	35
Figure 2.4. Fonctionnement des essaims particuliers.....	36
Figure 2.5. Algorithme génétique.....	39
Figure 2.6. Processus de colonie de fourmis.....	41
Figure 2.7. Comparaison des approches heuristiques.....	49
Figure 2.8. Performances des heuristiques dans le scénario urbain.....	49
Figure 2.9. Performances des heuristiques dans le scénario autoroute.....	50
Figure 3.1. Structure hiérarchique du modèle proposé (AKCA).....	55
Figure 3.2. Exemple de clustérisation.....	59
Figure 3.3. Types de clustérisation.....	60
Figure 3.4. L'algorithme k-medoids.....	61
Figure 3.5. Processus de clustérisation du modèle AKCA.....	62
Figure 3.6. Déploiement de véhicules dans un scénario autoroutier réel.....	63
Figure 3.7. Variation de la taille des clusters et de la transmission utilisée en fonction de la densité.....	64

Figure 3.8. Taille des clusters Vs. Densité.....	64
Figure 3.9. CHs initiales.....	65
Figure 3.10. Initialisation.....	65
Figure 3.11. Valeur de la métrique direction en fonction de la vitesse.....	67
Figure 3.12. Effet de la FDN sur le choix du CH.....	68
Figure 3.13. Flow chart du modèle AKCA.....	69
Figure 3.14. Modèle de trafic de l'autoroute A10.....	70
Figure 3.15. PDR vs Densité.....	71
Figure 3.16. E2ED vs Densité.....	72
Figure 3.17. Débit vs Densité.....	73
Figure 3.18. Durée de vie du CH vs Vitesse.....	74
Figure 3.19. Durée de vie du cluster vs Vitesse.....	75
Figure 3.20. Degré moyen de dépendance spatiale.....	76
Figure 4.1. Organigramme de la recherche tabou.....	82
Figure 4.2. Croisement.....	83
Figure 4.3. Mutation.....	84
Figure 4.4. Implémentation OMNeT++.....	85
Figure 4.5. Qualité des solutions générées par les méthodes (AG, PSA, ACO et GA-RT).....	85
Figure 4.6. Délais de convergence des méthodes heuristiques.....	86
Figure 4.7. Scénario de clustérisation dans un scénario autoroutier.....	87
Figure 4.8. Modèle E-AKCA.....	88
Figure 4.9. Représentation chromosomique du modèle E-AKCA.....	89
Figure 4.10. Sélection par tour de roulette.....	90
Figure 4.11. Croisement.....	91
Figure 4.12. Mutation.....	92
Figure 4.13. Le modèle de mobilité RMM.....	93
Figure 4. 14. Durée de liens.....	94
Figure 4. 15. Changements d'état de lien.....	96
Figure 4. 16. Stabilité du lien.....	97
Figure 4. 17. PDR vs Vitesse.....	98

Figure 4. 18. Délai de bout en bout Vs Vitesse.....	100
Figure 4. 19. Débit Vs Vitesse.....	101
Figure 4. 20. Durée de vie du CH Vs Vitesse.....	102
Figure 4. 21. Durée de vie des CMs Vs Vitesse.....	103
Figure 5.1. Résultat de la clustérisation suivant le modèle AKCA.....	108
Figure 5.2. Génération de sous-ensemble.....	109
Figure 5.3. Valeurs de similarités des nœuds frontaliers.....	110
Figure 5.4. Application de la méthode PR.....	111
Figure 5.5. Flow chart du modèle proposé.....	112
Figure 5. 6. PDR avec SS et sans SS.....	113
Figure 5.7. E2ED avec SS et sans SS.....	113
Figure 5.8. Throughput avec SS et sans SS.....	113
Figure A.1. Conditions de la route.....	128
Figure A.2. Description du système.....	129
Figure A.3. Composants du robot.....	130
Figure A.4. Scenario 1: détection d'obstacles.....	133
Figure A.5. Test du scenario 1.....	134

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Différents environnements de VANET.....	10
Tableau 1.2. Comparaison des Technologies de communication.....	17
Tableau 1.3. Comparaison des systèmes cellulaires.....	18
Tableau 1. 4. Types de routages basés sur la topologie.....	23
Tableau 1. 5. Résumé des projets importants de VANET.....	26
Tableau 2.1. Utilisation des heuristiques dans MANET et VANET.....	35
Tableau 2.2. Utilisation de l'optimisation par essaim particulaires pour le routage véhiculaire.....	46
Tableau 2.3. Utilisation des algorithmes génétiques pour le routage véhiculaire..	47
Tableau 2.4. Utilisation des algorithmes de fourmis pour le routage véhiculaire..	48
Tableau 4.1. Environnements VANET.....	79
Tableau 4.2. Valeurs de similarité et de dissemblance des nœuds de bordure.....	90
Tableau 4.3. Configuration de la simulation.....	93

Introduction générale

Selon l’OMS, les accidents de la route deviendront à l’horizon 2030, la septième cause de décès dans le monde. Près de 1,3 million de personnes meurent chaque année de ce fléau. De même, entre 20 et 50 millions souffrent de blessures graves et d’handicaps permanents. Dans la plupart des pays, ces accidents coûtent près de 3% du produit intérieur brut (PIB). Dans ce contexte, les réseaux ad hoc de véhicules, appelés VANETs, peuvent être déployés pour sauver les vies et offrir plus de confort aux passagers. En effet, les VANETs appartiennent à une classe des réseaux ad hoc mobiles (MANET) avec des caractéristiques spécifiques. Chaque véhicule est considéré comme un nœud équipé de capteurs et de caméras pour la collecte des données. A travers des logiciels dédiés, ces données seront traitées pour identifier les obstacles, les accidents, les stations- services, les signalisations routière, etc. Ensuite, ces informations extraites seront transmises d’un véhicule à un autre via des émetteurs sans fil pour former un réseau véhiculaire. Sachant que la portée de transmission de chaque véhicule est limitée à quelques centaines de mètres, une communication multi-sauts est nécessaire pour que les messages soient diffusés vers les zones éloignées.

Dans les VANETs, la grande mobilité des nœuds conduit à des changements fréquents dans la topologie du réseau. Cette mobilité est limitée par les types de routes et les règles de circulation. Sous ces conditions, les constructeurs automobiles et les chercheurs ont lancé plusieurs projets et recherches pour développer des systèmes de transport intelligents robustes et fiables. L’idée de base de ces solutions est de permettre aux véhicules l’échange des messages d’alerte sur les accidents et les conditions de circulation afin d’aider les conducteurs à prendre des décisions proactives.

Malgré la variété des approches proposées et le développement des technologies de communication, les algorithmes exacts ne peuvent pas résoudre le problème de routage dans les VANETs en un temps polynomial. Sur la base de cette remarque, nous proposons dans cette thèse des solutions basées sur les métaheuristiques.

En effet, les algorithmes heuristiques permettent de trouver des solutions faisables ayant une complexité spatiale et temporelle acceptable. C'est une technique pour améliorer le temps de détermination d'une solution optimale pour les problèmes NP- difficile.

Tout d'abord, nous analysons les heuristiques applicables pour les problèmes NP-difficiles. Nous détaillons les performances et les caractéristiques de chacune. Ensuite, nous utilisons les plus appropriées pour le problème de routage véhiculaire.

Le reste de ce rapport de thèse est organisé comme suit.

Chapitre 1

Ce chapitre introduit les notions de base liées aux réseaux VANETs. Au début nous présentons les caractéristiques, les composants, les technologies de communication ainsi que les architectures mises en place dans ce type de réseau. Ensuite, nous détaillons les particularités du problème de routage. Enfin nous présentons les principaux projets conçus pour développer des systèmes d'assistance aux conducteurs.

Chapitre 2

Ce chapitre décrit le contexte de notre travail de thèse. On commence ce chapitre par une explication des notions de base telles que les métaheuristiques, la complexité et l'optimisation multi objectifs. Puis, nous présentons les travaux étroitement liés à cette thèse. Enfin, à la base de ces travaux connexes, nous évaluons l'efficacité des métaheuristiques pour résoudre ce type de problème.

Chapitre 3

Ce chapitre contient deux contributions dont l'idée de base est d'ajuster l'algorithme de clustérisation « K-medoids » pour résoudre le problème de routage dans les réseaux véhiculaires. Le nouveau modèle proposé est nommé AKCA (Adjusted K-medoids Clustering Algorithm). Il permet d'améliorer la stabilité du réseau et d'augmenter la durée de vie de tous les liens établis.

Chapitre 4

Dans ce chapitre, nous hybridons la recherche tabou avec l'algorithme génétique pour améliorer la phase de maintenance des clusters dans le modèle AKCA. Nous nous concentrons sur les nœuds frontaliers appartenant aux zones de chevauchements. Le modèle amélioré est appelé « Enhanced AKCA » (E-AKCA). D'après les résultats obtenus par simulation, E-AKCA permet plus de stabilité et de robustesse par rapport à l'algorithme original (AKCA) et à d'autres protocoles conçus pour le même objectif.

Chapitre 5

Au début de ce chapitre, nous sommes confrontés au problème de routage avec l'algorithme de recherche par dispersion. Cette méthode permet de dériver de nouvelles solutions à partir de la combinaison des précédentes. Enfin, en Annexe, nous avons réalisé une implémentation réelle d'un réseau de trois robots mobiles. Chaque robot dispose d'une carte à base de microcontrôleur de type ARDUINO UNO R3, d'un module Bluetooth (maitre – esclave) de type HC-12 et d'un module accéléromètre / Gyroscope GY521. Le but est de prouver qu'il est possible de faire une communication non coûteuse entre les nœuds isolés. De cette manière on obtient un réseau plus étendu et plus stable.

Chapitre 1

Les réseaux véhiculaires : caractéristiques, défis et verrous

Sommaire

1.1.	Introduction.....	8
1.2.	Caractéristiques des réseaux de véhicules (VANETs).....	9
1.3.	Défis de sécurité dans les réseaux de véhicules.....	11
1.4.	Composants d'un réseau VANET.....	12
1.5.	Architecture des VANETs.....	13
1.6.	Technologies de communication véhiculaire.....	14
1.7.	Applications des réseaux de véhicules.....	19
1.8.	Le routage dans les réseaux de véhicules.....	20
1.9.	Principaux projets.....	24
1.10.	Conclusion.....	28

1. 1 Introduction

VANET est la forme abrégée de «Vehicular Adhoc NETwork». C'est une sous-classe du réseau mobile MANET dont les nœuds ne sont pas soumis à des limitations de stockage d'informations et de puissance de calcul. C'est un réseau de communication sans fil autonome et auto-organisé, où les nœuds s'impliquent en tant que serveurs et / ou clients pour échanger et partager des informations [1]. Cependant, les VANETs sont différents des autres réseaux ad-hoc en raison de la mobilité élevée des nœuds, de la densité variable et de l'environnement de communication imprévisible. Les véhicules et les routes sont équipés de dispositifs de communication sans fil tels que les unités embarquées (OBUs) dans les véhicules et les nœuds stationnaires appelés unités de bord (RSUs) déployées le long des routes. A partir de ces unités, il existe trois scénarios de communication : véhicule à véhicule (V2V) (c'est-à-dire entre les OBUs), véhicule à route (V2R) (entre OBU et RSU) et hybride (HVC) [2].

Les VANET sont considérés comme une partie importante des Systèmes de Transport Intelligents (STIs) pour assurer la sécurité routière, le confort de la conduite et la diffusion d'informations actualisées sur les routes.

Par exemple, en cas d'accident, les véhicules envoient des messages d'avertissement aux conducteurs pour prendre les bonnes décisions avant d'entrer dans la zone du crash. De même, les conditions de circulation peuvent être communiquées pour faciliter la conduite en empruntant de nouveaux chemins en cas de congestion.

Le présent chapitre présente les concepts liés aux réseaux ad hoc de véhicules. Il met l'accent sur les techniques de propagation de l'information dans les STIs. Ce chapitre se compose de dix sections ; la première introduit les caractéristiques et les défis liés aux VANETs. La seconde section présente les différents composants ainsi que les architectures mises en place dans ce type de réseau. La troisième section détaille les technologies de communication véhiculaire et les normes de standardisations reliées. Dans les sections qui suivent, on traite le problème de routage, ainsi que les tendances futures. La dernière section présente les principaux projets lancés par les constructeurs automobiles pour développer des systèmes d'assistance aux conducteurs.

1.2 Caractéristiques des réseaux de véhicules

Les VANETs sont des réseaux auto-organisés et distribués, où les véhicules se déplacent avec des vitesses variables suivant des trajectoires prédéfinies. Ces réseaux ont des caractéristiques saillantes (forte mobilité, énergie illimitée, mouvements prédéfinis, sécurité limitée) qui le distinguent des autres réseaux ad hoc.

1.2.1 Forte mobilité

La vitesse des nœuds dans un réseau ad hoc de véhicules peut atteindre 140 km/h. Cette mobilité affecte négativement la connectivité et diminue la durée de vie des liens établies. Par conséquent, n'importe quel véhicule peut entrer ou quitter le réseau dans un très court délai [3].

1.2.2 Environnements de routage et modèles de mobilité

En raison de la grande vitesse des véhicules, la transition d'un environnement à un autre est inattendue. Chaque environnement diffère des autres par sa densité et la vitesse de ses nœuds (tableau 1.1). Pour cela, il est très difficile de trouver un protocole pratique à toutes les situations possibles.

Tableau 1.1. Différents environnements de VANET.

Environnements	Densité	Mobilité	Vélocité
Centre-Ville	Très haute	Faible	0-50 Km/h
Zone résidentielle	Haute	Moyenne	30-60 Km/h
Urbain	Moyenne	Haute	50-90 Km/h
Autoroute	Faible	Très haute	60-120 km/h

1.2.3 Capacité de traitement et puissance de la batterie

Contrairement aux autres types de réseaux qui ont des problèmes d'alimentation et de stockage, les nœuds dans VANET n'ont aucune limitation en termes d'énergie et de mémoire. En roulant chaque véhicule produit une énergie électrique continue permettant une capacité de traitement élevée [4].

1. 2.4 Échange fréquent d'informations

La nature ad hoc des réseaux véhiculaires motive les nœuds pour recueillir des informations auprès des unités de bord de la route et des autres véhicules. Ainsi l'échange d'informations entre les nœuds devient très fréquent [5].

1.2.5 Communication sans fil

Dans les VANETs, l'échange des données entre les nœuds est sans fil. Par conséquent, la sécurité des messages transmis est un défi majeur qui doit être pris en compte lors de la conception des protocoles de communication [6].

1.2.6 Temps critique

Les informations circulant dans un réseau véhiculaire doivent être transmises avec une limite de temps afin que les nœuds puissent prendre les décisions proactives et effectuent l'action en conséquence.

1.2.7 Mobilité prévisible

Contrairement aux autres réseaux mobiles, les véhicules suivent des mouvements restreints aux voies de circulation. Les informations routières sont souvent disponibles à partir d'une carte géographique et d'un système de positionnement comme le GPS (Global Positioning System). En effet, compte tenu de la direction, de la trajectoire de route et de la vitesse moyenne, on peut prédire la position future d'un véhicule.

1. 3 Défis de sécurité dans les réseaux de véhicules

Les réseaux véhiculaires sont vulnérables à de nombreuses menaces [7]. Le but de ces attaques est de créer un problème d'accès au système ou d'hameçonnage de certaines informations. En raison du caractère hautement sensible des informations diffusées, toutes les applications destinées au réseau véhiculaire doivent être protégées contre les manipulations malveillantes. Nous énumérons ci-dessous certaines attaques possibles dans les VANETs :

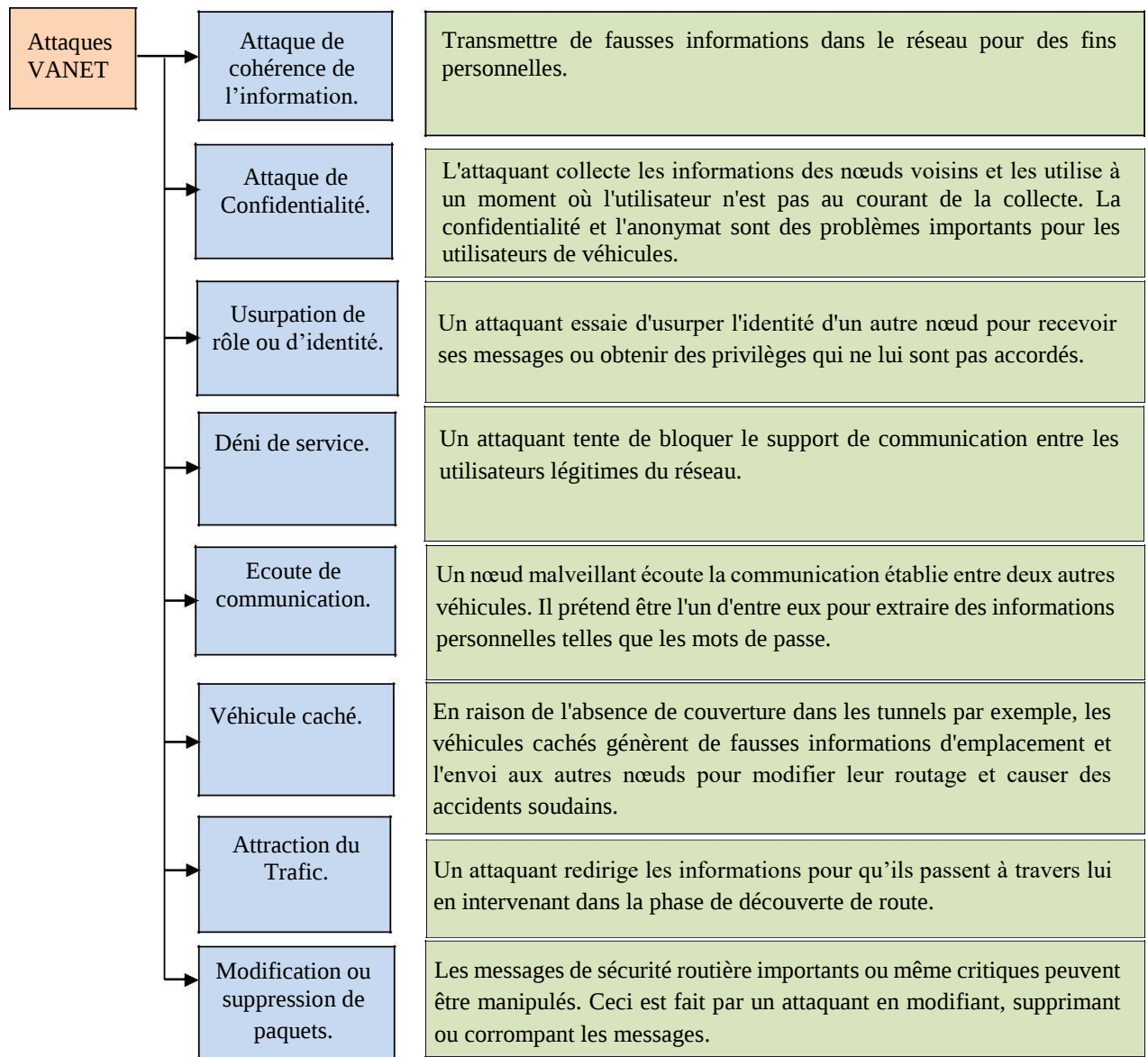


Figure 1.1 Attaques dans les VANETs.

1.4 Composants d'un réseau VANET

Un réseau ad hoc de véhicules est constitué de trois composants de bases décrits ci-dessous :

1.4.1 OBU (On Board Unit)

Ce sont des unités montées sur les véhicules intelligents, utilisées pour communiquer avec les unités latérales de la route ou avec d'autres véhicules. En plus d'un processeur de commande de ressource, chaque OBU contient des composants logiciels et matériels de hautes technologies (radar, GPS, capteurs, caméras et autres). Ces composants permettent le routage géographique, le contrôle de la congestion et la diffusion des informations sur le réseau. Ce sont des émetteurs-récepteurs responsables de la connexion du véhicule au réseau.

1.4.2 RSU (Road Side Unit)

Installées au bord des routes, elles peuvent être principalement des lampadaires, des feux de signalisation ou autres. Chaque RSU est équipée d'un périphérique réseau pour une communication à courte portée. Les principales fonctions des RSUs sont les suivantes [8] :

- Étendre la couverture du réseau Ad Hoc pour permettre l'échange d'informations avec les OBUs communicants.
- Collecter et diffuser les informations.
- Aider les OBUs à se connecter à Internet.

1.4.3 TA (Trusted Authority)

Appelée autorité de confiance, c'est la composante sensée de la sécurité. Elle est responsable de l'enregistrement et de la gestion de toutes les entités du réseau (OBU et RSU). En effet, la mission de la TA est de connaître les vraies identités des véhicules et de les divulguer vers les entités du réseau [9]. En entrant dans le réseau chaque véhicule doit posséder une copie des informations d'identification des voisins sous la forme d'un certificat. L'autorité de certification (AC) fournit des véhicules avec des certificats signés universellement. Elle permet aussi en cas de besoin de retirer les certificats précédemment signés [10]. En cas de révocation, l'AC ajoute l'identification du certificat révoqué à une liste de révocation de certificats (LRC). Ensuite, l'autorité de certification annonce cette liste à tous les véhicules, en leur demandant de ne pas approuver le certificat révoqué. Les RSUs sont utilisées pour diffuser cette liste à toutes les unités mobiles du réseau.

1.5 Architecture des VANETs

VANET est un réseau de communication sans fil dans lequel tous les nœuds sont des véhicules qui se déplacent avec une grande vitesse. Généralement, cette communication est de trois types comme le montre la figure 1.2.

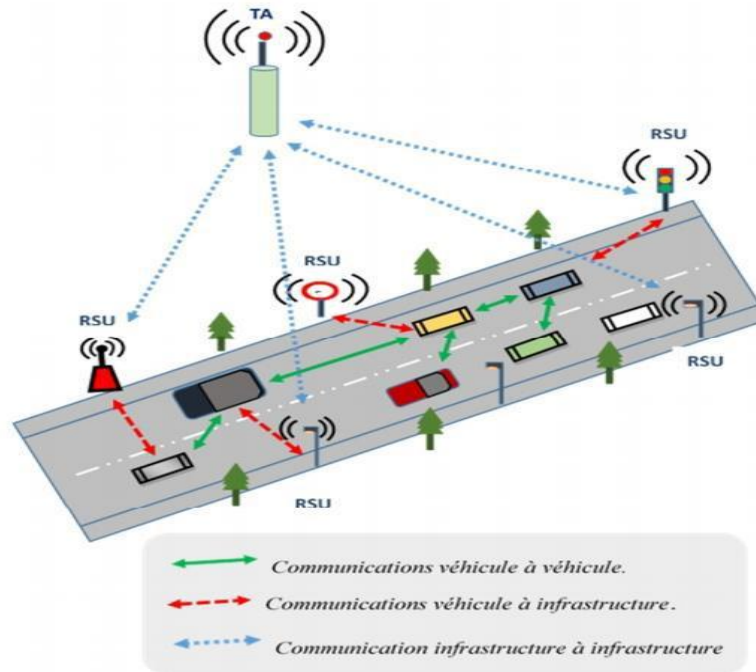


Figure 1.2. Types de communication dans les réseaux véhiculaire

1.5.1 Communication véhicule à infrastructure (V2I)

L'échange de messages entre véhicules et infrastructures peut offrir aux usagers de nombreux services supplémentaires sur de grandes surfaces (accès Internet, informations de stationnement, localisation des restaurants, etc.). Dans ce mode de communication, bien que la connectivité soit améliorée même dans un environnement à faible densité comme l'autoroute, l'installation et l'entretien des infrastructures le long des routes est une tâche coûteuse qui prend beaucoup de temps [11].

1.5.2 Communication véhicule à véhicule (V2V)

Dans ce cas, il n'y a pas besoin d'infrastructure routière. La communication a lieu directement entre deux voitures appartenant à la même zone radio, ou indirectement via des relais qui transmettent les messages en utilisant un protocole multi-sauts [12]. La communication V2V

est adaptée aux applications nécessitant des communications à courte distance. Elle est liée à la conduite coopérative et à la sécurité routière. Ce type de communication convient aux environnements fortement connectés avec une grande densité.

1.5.3 Communication hybride (HVC)

La combinaison des deux types cités ci-dessus (V2V et V2I) aboutit à un modèle hybride. Dans ce cas, les véhicules communiquent entre eux pour échanger des informations de trafic et avec la station de base pour demander des données spécifiques.

1. 6 Technologies de communication véhiculaire

Dans un réseau de véhicules, les nœuds utilisent différents technologies d'accès sans fil pour améliorer la gestion et la surveillance du trafic. Ces technologies permettent aux passagers et aux conducteurs d'accéder aux services de divertissement et aux informations de sécurité. Elles peuvent être classées en trois groupes en fonction de leurs couvertures comme indiqué dans la figure 1.3.

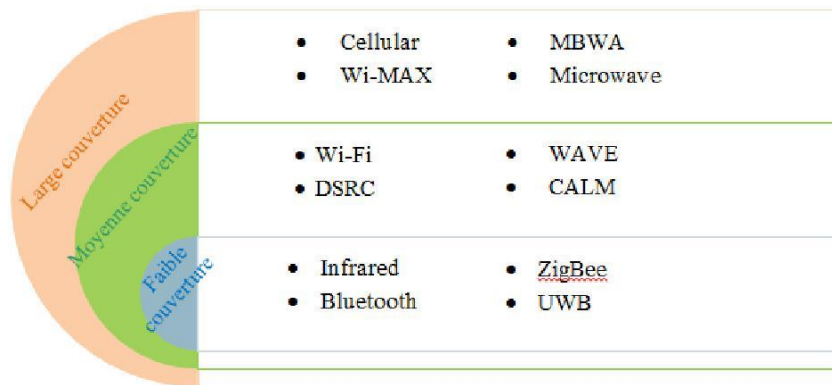


Figure 1. 3 Classification des Technologies de communication

1.6.1 Technologie à courte portée

a. Infrarouge

C'est une technique d'accès sans fil qui utilise une lumière invisible pour transférer des données. Elle fonctionne dans une bande de fréquence de 300 GHz à 400 THz. Ce spectre est divisé en trois sous-bandes : l'infrarouge lointain, le mi- infrarouge et le proche infrarouge. Il peut diffuser des données de 115 kbps à 4 Mbps. Parce que les signaux infrarouges sont affectés par des obstacles, ils sont utilisés pour les communications à courte distance [13].

Cette technique est capable de transmettre des informations vocales, des données et des vidéos de manière plus sécurisée.

b. ZigBee

ZigBee (IEEE 802.15.4) fonctionne à des fréquences de 868 MHz, 900 MHz et 2,4 GHz. Cette technologie utilise des signaux radio de faible puissance pour transférer des données jusqu'à 100 mètre en utilisant la modulation par changement de phase en quadrature (QPSK). Comme ZigBee utilise une faible puissance et une faible latence, elle est largement utilisée dans les télécommandes, les PAN (personal area network), les réseaux de capteurs et la surveillance du transport. Cette technique est moins consommatrice d'énergie que les normes Bluetooth et Wi-Fi. Elle peut être utilisée pour les applications V2I et V2V. Cependant, elle ne convient pas aux applications d'info divertissement à bande passante intensive telles que la navigation sur le Web ou la VoIP [14], [15].

c. Bluetooth

Le Bluetooth (IEEE 802.15.1) est basé sur les bandes radio ISM (Industrial Scientific and Medical). Il est utilisé pour transférer les données à un débit allant de 1 Mbps à 4 Mbps sur une distance de 10 mètre. Bluetooth fonctionne à une fréquence de 2,4 GHz et utilise la technique du spectre d'étalement de sauts de fréquence pour surmonter les interférences de signaux. Bien que Bluetooth 3 puisse fonctionner sur une bande de 6 GHz à 9 GHz, il utilise une bande de 2,4 GHz pour communiquer avec d'autres appareils. Aussi, le Bluetooth 4.0 utilise peu d'énergie lors d'une transmission, mais il n'est pas compatible avec les versions antérieures [16]. Outre la création des réseaux personnels (PAN), Bluetooth peut être utilisé pour prendre en charge les applications V2V et V2I. Par rapport aux autres normes Wi-Fi, il nécessite une faible puissance, mais il ne peut pas être utilisé pour construire des applications de sécurité en raison du taux de transfert lent, de la zone de couverture courte et de la vulnérabilité aux interférences d'air. Il ne convient pas aux informations de divertissement telles que la VoIP et la navigation Web.

d. UWB (Ultra Wide Band)

Ultra large bande est une technologie sans fil utilisée pour transmettre de grandes quantités de données numériques avec une très faible puissance sur une courte distance. Cette technologie peut non seulement transporter une grande quantité de données sur une distance allant jusqu'à 100 mètre à très faible puissance (moins de 0,5 milliwatts), mais elle est aussi capable de transporter des signaux à travers des obstacles tels que les portes. Dans les VANETs, elle peut

être utilisée pour éviter les collisions [17]. L'UWB diffuse des impulsions numériques bien chronométrées sur un signal porteur dans un très large spectre en même temps.

L'émetteur et le récepteur doivent bien coordonner pour envoyer et recevoir des impulsions avec une haute précision. L'ultra large bande a deux principaux types d'application :

- 1) Applications impliquant un radar, dans lesquelles le signal pénètre les surfaces proches mais réfléchit les surfaces les plus éloignées, ce qui permet de détecter les objets derrière les murs ou d'autres revêtements.
- 2) Transmission de voix et de données à l'aide d'impulsions numériques, permettant à un signal à très faible puissance et à coût relativement faible de transporter des informations à des débits très élevés dans une plage restreinte.

1.6.2 Technologies à portée moyenne

a. DSRC / WAVE

Le DSRC (Dedicated Short Range Communication) est une norme de communications de courte à moyenne portée conçue spécialement pour les communications V2V et V2I. DSRC fournit des transferts élevés de données avec une faible latence de communication dans les petites zones de communication. En 1999, la commission fédérale des communications du gouvernement des États-Unis a attribué un spectre de 75 MHz à 5,9 GHz à utiliser par le DSRC. Il a été approuvé pour être utilisé sur la base de la couche physique IEEE 802.11a et la couche MAC 802.11 [18]. Le spectre de DSRC est divisé en sept canaux avec une largeur de 10 MHz chacun. Le premier est conçu pour diffuser les données de sécurité. Deux canaux sont utilisés pour une utilisation future. Les canaux restants sont utilisés pour les services de divertissement ou les applications de sécurité [19].

b. CALM

Le concept CALM (Communication Architecture for Land Mobile) utilise un ensemble de protocoles, de procédures et d'actions de gestion. C'est une solution en couche développée pour fournir des communications de diffusion, de monodiffusion et de multidiffusion. Elle utilise multiples supports de télécommunications sans fil tel que 802.11, 802.11p, 802.15, 802.16e, 802.20, réseaux cellulaires 2G/3G/4G [20].

c. Normes WLAN / Wi-Fi

Wi-Fi désigne certains types de réseaux locaux sans fil qui utilisent les spécifications de la famille 802.11 (802.11a, 802.11ac, 802.11b, 802.11e, 802.11g et 802.11n). Ces normes sont utilisées pour créer des réseaux ad-hoc en raison de leurs faibles coûts, et de leurs taux élevés de transfert de données. Un réseau Wi-Fi utilise des ondes radio pour transmettre sans fil des informations sur un réseau local, dont la portée peut être étendue par un prolongateur d'autonomie Wi-Fi. Les normes Wi-Fi sont utilisées pour créer un ensemble de services de base indépendant dans VANET. Généralement, le Wi-Fi nécessite plus de points d'accès et fournit des communications moins sécurisées et non fiables pour les VANETs que les systèmes cellulaires. Wi-Fi est largement utilisé dans les agences, les entreprises, les foyers et les écoles comme une alternative à un réseau local câblé.

De nombreux hôtels, établissements et aéroports offrent un accès public aux réseaux Wi-Fi.

Ces emplacements sont connus sous le nom de hots spots [21].

Tableau 1.2 Comparaison des technologies de communication

Technologie	Fréquence	Débit théorique maximal
802.11ac wave2	5 GHz	1.73 Gbps
802.11ac wave1	5 GHz	866.7 Mbps
802.11n	2.4 or 5 GHz	450 Mbps
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps
802.11a	5 GHz	54 Mbps
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps
802.11	2.4 GHz	2 Mbps

1.6.3 Technologies à longue portée

a. WiMax

WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) : c'est un standard de communication sans fil utilisé comme système de transmission et d'accès à Internet à haut débit. Il couvre une distance allant jusqu'à 50 km avec une vitesse de 70 Mbps. Il peut offrir des débits de données en liaison descendante allant jusqu'à 63 Mbps et des débits de données en liaison montante de 28 Mbps [22].

b. MBWA

L'IEEE 802.20 ou MBWA (Mobile Broadband Wireless Access) conçu pour fournir un accès Internet sans fil à des nœuds fortement mobiles. Il fournit une faible latence avec un débit de données pouvant atteindre 4,5 Mbps. Ce standard fonctionne sous licence 3.5 GHz et est optimisé pour prendre en charge la transmission rapide des paquets IP [23].

c. Microwave

Cette norme utilise une fréquence de 300 MHz à 300 GHz. Elle transmet jusqu'à 16 Gbps de données sur de longues distances. Elle fournit une large bande passante avec un taux de transmission élevé utilisé dans les fours à micro-ondes, les RADARs et les communications par satellite. En outre, elle est utilisée pour construire un réseau local sans fil qui couvre plusieurs villes. La principale limitation des micro-ondes est qu'elle nécessite une communication de ligne de vue (LoS) [24].

d. Systèmes cellulaires (2 / 2,5 / 2,75 / 3G/4G)

La génération sans fil cellulaire (G) se réfère généralement à un changement de la nature du système, de la vitesse, de la technologie et de la fréquence. Chaque génération a des normes, des capacités, des techniques et de nouvelles caractéristiques qui la différencie de la précédente [25]. Les réseaux cellulaires sans fil sont développés depuis les premiers systèmes de téléphonie mobile. Depuis l'introduction du premier système 1G en 1981, les connexions mobiles ont atteint des milliards, avec une nouvelle génération mobile apparaissant tous les dix ans environ [26].

Tableau 1.3. Comparaison des systèmes cellulaires

	1 G	2 G	2.5 G	3 G	4 G	5 G
Période	1970–1980	1980-1990	2000-2003	2000	Début année 2010.	Début année 2015.
Standard	AMPS	• GSM • IS-95 • JDC • iDEN	GPRS et EDGE.	• UMTS (WCDMA) • CDMA 2000.	LTE-TDD et LTE-FDD.	• IP broadband LAN/WAN/PAN & WWW

Services	Voix	Voix	• Multimédia, WAP, MMS. • Jeux mobiles. • Visio-conférence.	• Téléphonie vocale sans fil. • Accès Internet haute vitesse. • Appels vidéo. • Chat et conférence. • Télémédecine. • Jeux et musiques mobiles.	• Accès Web mobile. • Téléphonie IP, services de jeux. • Télévision mobile haute définition. • Vidéo-conférence.	• Des services multiples et parallèles. • Education à distance. • Le diagnostic à distance. • Le suivi à distance. • La visualisation de l'univers, des galaxies, des planètes. • Détection rapide des catastrophes naturelle (tremblement de terre, etc.).
Vitesse	1kbps à 2,4 kbps.	14 kbps à 64 Kbps.	• 115kbps (GPRS) • 384kbps (EDGE)	• 384KBPS à 2MBPS.	• 100Mbps en mouvement. • 1Gbps en stationnaire.	• 1 à 10 Gbps.
Fréquence	800-900 MHz.	• 850-1900 MHZ (GSM) • 825-849 MHZ (CDMA)	• 850-1900 MHz	• Environ 8 à 2,5 GHz.		• 3 à 300 GHz.

1.7 Applications des réseaux de véhicules

Les applications véhiculaires peuvent être classées en trois catégories principales.

1.7.1 Applications de sécurité

Elles sont conçues pour avertir les passagers des routes de toute situation dangereuse. Par diffusion de messages d'alerte, les conducteurs auront une connaissance de l'état de la route et des véhicules voisins pour qu'ils prennent les mesures nécessaires pour éviter toute perte matérielle, humaine ou morale. Parmi ces applications nous citons les avertissements sur les conditions de la route, l'avertissement des collisions, l'assistance de changement de voie et de dépassement, etc. [27].

1.7.2 Applications de confort

Désigne les applications de confort des conducteurs tel que l'accès à l'Internet, le chat inter-véhicules, le téléchargement des vidéos et les jeux en réseaux. Il y a aussi d'autres services d'assistance au conducteur comme la localisation des stations de service à proximité, des parkings, des restaurants, etc.

1.7.3 Applications de gestion du trafic routier

Ces applications sont axées sur l'amélioration du flux de circulation des véhicules et l'assistance routière pour améliorer les conditions de circulation. En équilibrant la circulation sur les routes, ces applications permettent de réduire les embouteillages et les risques d'accidents.

1.8 Le routage dans les réseaux de véhicules

Les réseaux véhiculaires vont être déployés dans les années à venir pour devenir la forme la plus pertinente de réseaux mobiles ad hoc. Ils fournissent une communication sans fil entre les véhicules et les équipements installés au bord des routes. En effet, les protocoles de routage MANET ne permettent pas de gérer efficacement cet environnement véhiculaire [28].

1.8.1 Définition

Le routage permet le transfert d'un message depuis l'émetteur vers le receveur. C'est une stratégie qui permet, à n'importe quel moment de trouver le meilleur chemin entre deux nœuds du réseau.

1.8.2 Types de messages

Quatre types de messages peuvent circuler dans un réseau véhiculaire [29].

- *Messages d'avertissement ou d'urgence* : ils sont diffusés lorsqu'un évènement critique est détecté comme les accidents, le brouillard, le passage des véhicules d'ambulance, de la police ou d'incendie. Ces messages contiennent les paramètres des zones de retransmission et les coordonnées du lieu de l'accident. Les messages d'avertissements concernent les virages, la réparation des routes, la congestion du trafic, ...
- *Messages interpersonnels* : ces messages concernent les profils des conducteurs et des passagers de véhicule tel que les messages d'envoi des e-mails ou de transaction financière.
- *Messages de sécurité et de routage* : ce sont les messages informatifs, généralement générés à intervalle régulier. Ces messages nommés « beacons », contiennent la vitesse, la position, la direction ainsi que l'itinéraire du véhicule émetteur. Grâce à ces informations, les véhicules auront une vue de leurs voisinages. Ils peuvent donc prédire les accidents possibles et anticiper les congestions de la route pour avoir une communication sûre.

- *Messages d'information et de divertissement* : ces messages sont liés aux services répartis sur les bords des routes, tel que les messages indiquant les stations d'essence, les points d'alimentation, les restaurants, les points d'intérêt à proximité...

1.8.3 Classification des protocoles de routage

Comme écrit précédemment, le réseau VANET est un sous-groupe des réseaux MANET. Néanmoins, pour appliquer n'importe quel protocole de routage MANET à VANET, des modifications substantielles doivent être effectuées pour surmonter les problèmes d'inondation et de la grande mobilité des véhicules. Les protocoles spécifiques aux VANETs peuvent être classés de différentes manières suivant plusieurs critères [30], [31]. Par exemple, en fonction du mode de création et de maintenance des chemins, cinq classes de protocoles de routage sont représentées sur la figure 1.4.

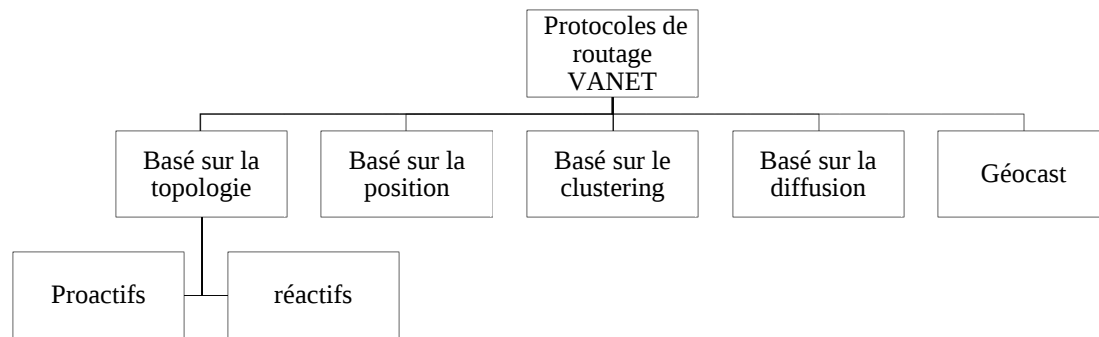


Figure 1.4 Protocoles de routage dans VANET.

Du fait de la grande mobilité des nœuds et de la diversité des environnements de routage (urbain, résidentiel, autoroute), les différents protocoles développés jusqu'à présent n'offrent pas une solution optimale en temps polynomial. Par conséquent, des efforts importants ont été faits pour trouver un système intelligent fiable qui assure un routage efficace des messages de la source vers la destination avec moins de problèmes de transmission.

1.8.3.1 Routage basé sur la topologie

Dans ce type de protocole, les nœuds ne disposent pas d'informations de localisation géographique concernant leurs positions ou la position de leurs voisins. La découverte et l'entretien des routes s'effectuent par des échanges périodiques de messages entre voisins. Cette classe englobe les protocoles réactifs, proactifs et hybrides.

a. Protocoles réactifs (ou à la demande)

Dans ce type de protocoles, une route est recherchée si un nœud a l'intention de transmettre une information à un autre. Le nœud source, qui cherche un chemin vers la destination, utilise l'inondation pour diffuser une requête dans le réseau. A la réception de cette requête, les nœuds intermédiaires envoient le chemin vers le nœud source, et sauvegardent la route dans la table envoyée. Une fois la destination atteinte, cette dernière utilise le chemin inverse pour envoyer la réponse. Par conséquent, un chemin full duplex va être établi entre la source et la destination. Lorsqu'un nœud intermédiaire possède déjà un chemin vers la destination, le temps de construction de route est considérablement réduit.

b. Protocoles proactifs

Les protocoles proactifs (appelés aussi approches pilotées par table) visent à maintenir à jour les informations de routage circulant dans un réseau. Chaque nœud garde une table contenant des informations de routage. Périodiquement, même s'il n'y a pas de données de trafic, tous les nœuds envoient des messages de routage pour créer ou mettre à jour les tables de routage. L'avantage majeur de ce type de protocoles est la réduction significative du temps de retard moyen par paquet. Les informations d'acheminement présentes dans la table de routage sont accessibles chaque fois que cela est nécessaire. Néanmoins, en maintenant ces informations à jour, les protocoles proactifs consomment une partie importante de la capacité du réseau. Cela rend de tels protocoles invalides aux réseaux ad hoc de forte mobilité. D'autre part, un autre gaspillage de la capacité du réseau se produit car la majorité des informations stockées ne seront pas utilisées avec la variation rapide de la topologie des réseaux. Ces protocoles nécessitent des messages de contrôle excessifs et consomment plus de bande passante [32], [33]. Dans les réseaux véhiculaires très dynamiques, les deux protocoles manquent d'efficacité, car les coûts de construction et de maintenance des routes augmentent lorsque la mobilité du réseau augmente. Plusieurs améliorations doivent être proposées pour ces protocoles afin de supporter les réseaux véhicules à forte mobilité.

c. Protocoles hybrides

Ils sont créés à partir de la combinaison des protocoles de routage proactifs et réactifs. Ils héritent des avantages de ces deux protocoles. En effet, le temps de retard lié au protocole de routage à la demande et l'énorme surcharge de routage de l'approche de routage proactif sont réduits.

Tableau 1. 4 Types de routages basés sur la topologie

Nom	Stratégie	Avantages	Inconvénients	Exemples
Réactif	Découverte de route uniquement en cas de besoin.	- Réduit le surcoût du message de contrôle. - Consomme peu de bande passante.	Retard lors de la création d'une route.	- DYMO - AODV - DSR - ABR
Proactif	Table de routage mise à jour régulièrement par diffusion continue de paquets de contrôle.	Pas de retard de découverte d'une nouvelle route.	- Haute consommation de bande passante. - Stockage inutile de certaines informations.	- DSDV - OLSR - FSR - DREAM
Hybride	- Division du réseau en des zones similaires selon divers critères. - Application de la stratégie réactive dans chaque zone et la stratégie proactive entre zones.	- Plus rapide que le réactif. - Moins coûteux que le proactif.	Création et maintenance des zones et une tâche complexe et coûteuse dans les réseaux mobiles.	- ZRP - TORA - WARP - HSLS

1.8.3.2 Routage basé sur la position

Dans ce type de protocole, chaque nœud possède des informations concernant sa position géographique ainsi que celle de la destination. Les coordonnées des nœuds peuvent être obtenues en utilisant un système de géolocalisation tel que le GPS.

1.8.3.3 Routage basé sur les clusters

Dans ce cas, les nœuds d'un réseau sont répartis en différents groupes géographiquement proches les uns des autres (Cluster). Dans chaque cluster, un nœud est élu pour assumer les fonctions essentielles dans le routage (tête de groupe). Il résume les informations de son cluster et les envoie aux têtes de cluster voisines à travers les passerelles. En effet, chaque cluster doit contenir trois types de nœuds "nœud ordinaire", "tête de cluster" et "passerelle".

1.8.3.4 Routage basé sur la diffusion

Dans ce type de protocole, la construction d'un chemin entre deux nœuds se fait en diffusant un message sur l'ensemble du réseau. Le message reçu pour la première fois par un nœud sera répété à tous les voisins, et ces voisins feront de même plus tard.

1.8.3.5 Routage à base Geocast

Dans ce type de protocole, la source délivre les messages uniquement à une zone géographique spécifique ; cette zone visée doit contenir la destination [34].

1.9 Principaux projets

La fabrication des voitures intelligentes a commencé au début du siècle dernier. En 1984, la première voiture intelligente a vu le jour grâce aux projets de la compagnie Auto Life et de l'université Carnegie Mellon [35]. En 1995, la société "Mercedes Benz" a fabriqué la voiture "W140 S". Cette voiture a pu rouler une distance de 1678 kilomètres entre Copenhague et Munich [36]. Depuis, plusieurs organisations de recherche et entreprises ont commencé à développer des modèles de véhicules autonomes capables de prendre les décisions appropriées en cas d'accidents imprévus. Il convient de noter que les systèmes d'assistance au conducteur actuellement utilisés reposent principalement sur des capteurs pour détecter les obstacles et les autres véhicules. Les constructeurs automobiles tentent d'accroître la sécurité des conducteurs et la sûreté en intégrant des dispositifs d'alertes permettant d'éviter l'accident avant qu'il ne survienne. Dans le même but, la société « Honda » a annoncé qu'elle s'est concentrée sur la création d'un conseil de recherche en intelligence artificielle afin de rivaliser avec d'autres constructeurs automobiles dans la recherche robotique tels que Volkswagen et BMW [37]. En outre, Toyota a fait un partenariat avec Microsoft pour collecter et analyser les données fournies par ses voitures. Le but de ce nouveau projet est de relier les voitures avec les maisons de leurs propriétaires pour identifier les conditions routières [38]. Comme le montre les figures 1.5 et 1.6, il existe de nombreux dispositifs dans les voitures intelligentes qui permettent l'auto-conduite [39], [40].

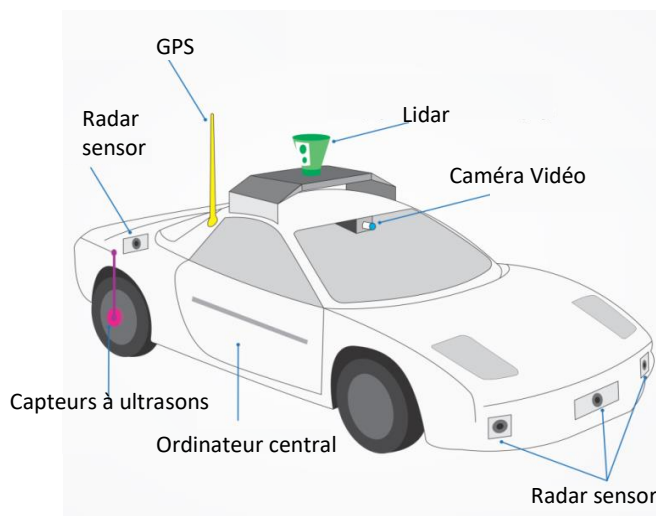


Figure 1.5 Composants des voitures autonomes

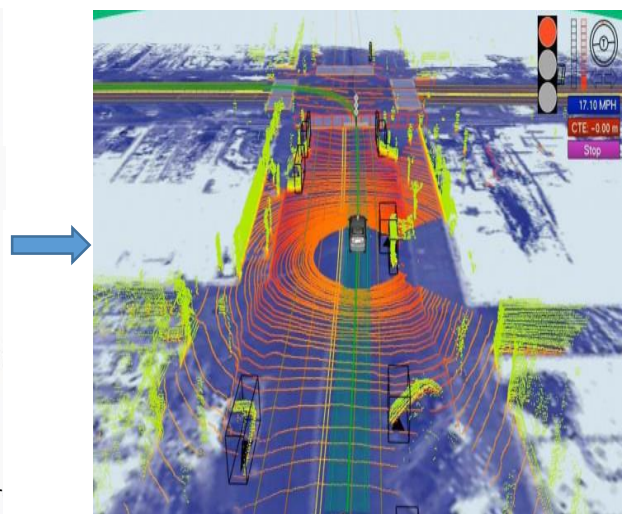


Figure 1.6 Aperçu de la voiture intelligente de Google

Capteurs à distance : permettent de capter des informations et de dessiner des cartes en trois dimensions pour indiquer les risques potentiels.

Caméra : permettent de filmer la zone autour de la voiture. Chaque caméra offre une résolution d'environ 30 mètres et un angle de vue de 50 degrés.

Capteurs à ultrasons : sont montés dans les roues du véhicule pour détecter les autres voitures dans le parking.

L'ordinateur central : installé à l'intérieur de la voiture. Il analyse toutes les données collectées par les capteurs pour donner des ordres, tels que le ralentissement et l'accélération.

GPS : c'est un système global de navigation par satellite. Il utilise des signaux radio émis par des satellites spécialisés. L'utilisation commune du GPS consiste à trouver la position à un instant donné [41].

Comme le montre la figure 1.7, il a été estimé que le nombre de voitures autonomes atteindra 10 millions au début de l'année 2020 [42].

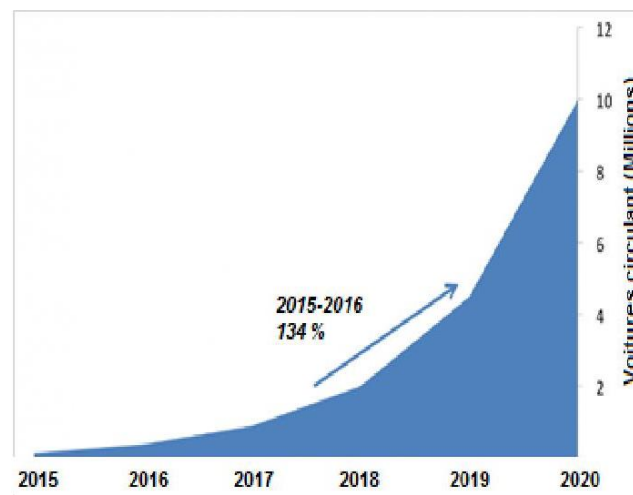


Figure 1.7 Estimation du nombre de voitures autonomes (2015-2020)

Tableau 1. 5. Résumé des principaux projets de VANET.

	Nom du projet	Description	Participants	Date limite	Références
1	AdaptIVe (Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles)	Réalise un système de conduite automatisé plus efficace et plus sûr. Le projet développe et teste des fonctions de conduite automatisées pour les camions et les voitures. La recherche couvre plusieurs scénarios y compris le milieu urbain, les autoroutes, et les manœuvres à courte distance.	• Commission européenne.	2017	https://www.adaptive-ip.eu/
2	Amsterdam Group	Est une alliance stratégique du consortium de communication V2V pour développer et déployer des STI coopératifs en Europe.	• CEDR • ASECAP • POLIS • C2C-CC.	2017	https://amsterdamgroup.mett.nl/default.aspx
3	COMPASS4D	Mise en place de services coopératifs sur les unités routières et les feux de circulation et sur les véhicules.	• Bordeaux, • Copenhague • Helmond • Newcastle • Thessaloniki • Verona • Vigo	2016	http://www.compass4d.eu/
4	DRIVE C2X	C'est un projet européen qui planifie, organise et évalue des tests opérationnels sur terrain pour des systèmes coopératifs utilisant la communication V2X.	• Europe	2014	www.drive-c2x.eu/project
5	PRESERVE Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems	Le but est de sécuriser la communication V2X et garantir la confidentialité des utilisateurs.	• Pays-Bas • France • Suède • Allemagne	2015	www.preserve-project.eu/
6	Project Titan	C'est un projet qui vise à développer des voitures électriques avec un système de conduite autonome.	• L'équipe d'Apple	2020	https://www.theguardian.com/technology/2015/aug/14/apple-

					self-driving-car-project-titan-sooner-than-expected
7	Self-driving research project	Ce projet cherche à remplacer le contrôle humain par l'intelligence artificielle.	• Baidu • BMW	2019	https://www.theguardian.com/technology/2015/jun/10/baidu-could-beat-google-self-driving-car-bmw
8	BMW iNEXT	Le but est de créer une plate-forme ouverte basée sur des standards pour concevoir des voitures entièrement autonomes.	• BMW • Intel • Mobileye	2021	https://arstechnica.com/cars/2016/01/bmw-uses-ces-to-show-its-autonomous-i8-concept-to-the-world/
9	Twin Self-Driving Teslas	Bosch dispose de deux équipes l'une en Allemagne et l'autre en Californie. Ces équipes travaillent sur la technologie de conduite autonome avec des plates-formes identiques. Les deux équipes partagent leurs résultats concernant l'électrification et l'automatisation pour transformer la voiture Tesla "Model S" en un véhicule entièrement autonome.	• BOSH • Google, • Tesla • Porsche	2020	http://www.forbes.com/sites/dougnewcomb/2015/06/12/forget-auto-pilot-bosch-builds-twin-self-driving-teslas/#1c4b93a53be5
10	Platooning trucks	En utilisant la technologie intelligente, ce projet vise à développer de nombreux camions connectés par des signaux sans fil, l'un suit l'autre.	• DAF • Daimler • Iveco • MAN • Scania • Volvo	2016	http://www.bbc.com/news/technology-33675934
11	Ford Smart Mobility LLC	Ce projet évalue l'efficacité des nouveaux produits. Il teste tous type de véhicules autonomes sur différents conditions tel que la neige.	• Ford	2025	https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2016/03/11/ford-smart-mobility-llc-established--jim-

					hackett-named-chairman.html
12	V-Charge project	Le but est de permettre aux voitures de trouver des places de parking ouvertes dans un garage sans intervention humaine.	• Volkswagen	2019	http://www.v-charge.eu/
13	Intellisafe	Offre un ensemble de technologies d'assistance de conduite, aidant à prévenir les accidents et à vous protéger en cas de danger.	• Volvo	2020	http://www.volvocars.com/au/about/innovations/intellisafe/autopilot

1.10 Conclusion

Les progrès significatifs des technologies de communication sans fil et de l'industrie automobile ont généré un intérêt de recherche considérable dans le domaine des VANETs. Ce type de réseau consiste en des communications V2V, V2I et V2X prises en charge par des technologies d'accès sans fil telles qu'IEEE 802.11p. Cette innovation dans la communication sans fil a été exploitée pour améliorer la sécurité routière dans un avenir proche grâce au développement des systèmes de transport intelligents (STIs). Par conséquent, les gouvernements, les industries des automobiles et les universités sont des partenaires dans plusieurs projets de recherche en cours. L'ensemble des domaines d'application typique des VANET, tels que l'alerte en cas de collision de véhicules et la diffusion d'informations sur le trafic, ont fait des réseaux VANETs un domaine très dépendant des communications sans fil.

Ce chapitre a donné un aperçu des communications véhiculaires en expliquant les défis et les solutions possibles dans ce domaine. Il a résumé les nouvelles orientations de recherche ainsi que les principaux projets lancés à ce jour. Pour de nombreuses raisons, le routage dans les réseaux de véhicules peut être réduit à un problème d'optimisation et de recherche de la meilleure solution. Par conséquent, la nécessité d'atteindre la solution optimale avec un coût raisonnable conduit les chercheurs à utiliser des méthodes approchées appelées méta heuristiques. Dans le chapitre suivant nous discuterons les utilisations de ces méthodes pour réaliser un routage efficace dans les réseaux ad-hoc véhiculaires.

Chapitre 2

Routage à base d'heuristiques dans les réseaux véhiculaires

Sommaire

2.1. Introduction.....	29
2.2. Les métaheuristiques.....	30
2.3. Algorithme et complexité.....	34
2.4. Utilisation des métaheuristiques dans les réseaux de véhicules.....	35
2.5. Etude comparative.....	44
2.6. Conclusion.....	51

2.1 Introduction

Il a été montré que le routage dans les réseaux véhiculaires est un problème NP-difficile avec plusieurs objectifs contradictoires [43]. Par conséquent, le temps mis par une méthode exacte pour trouver une solution optimale est exponentiel et parfois inapplicable. Pour cette raison, ce défi peut être réduit à un problème d'optimisation à résoudre avec des méthodes approximatives appelées métaheuristiques [44]. Ainsi on trouve un grand nombre de contributions publiées dans les journaux et les revues spécialisées.

On commence ce chapitre par les concepts de base nécessaires pour le reste de cette thèse. Il inclut dans les premières sections une description des approches heuristiques les plus utilisées dans la résolution des problèmes d'optimisation multi objectifs. Puis, on présente les contributions les plus récentes à base d'heuristiques. Enfin, sur la base de ces travaux on fait une comparaison des métaheuristiques de routage dans les réseaux véhiculaires.

2.2 Les Métaheuristiques

Une métaheuristique est un cadre algorithmique général qui peut être appliqué à un large éventail de problèmes d'optimisation. Avec peu de modifications, une métaheuristique peut être adaptée à un problème spécifique pour trouver des solutions de haute qualité. [45].

2.2.1 Présentation

Les métaheuristiques utilisent deux approches principales pour résoudre un problème. La première est nommée "approche à population". Elle désigne les algorithmes qui traitent plusieurs solutions à la fois (Algorithme Génétique (AG), Algorithme de fourmis (ACO), Optimisation par Essaim Particulaire (PSO), ...). La seconde est nommée "approche de trajectoire". Elle représente les algorithmes qui font évoluer une fonction objectif unique à chaque itération (Recherche Tabou (RT), Recuit Simulé (RS), ...) [46].

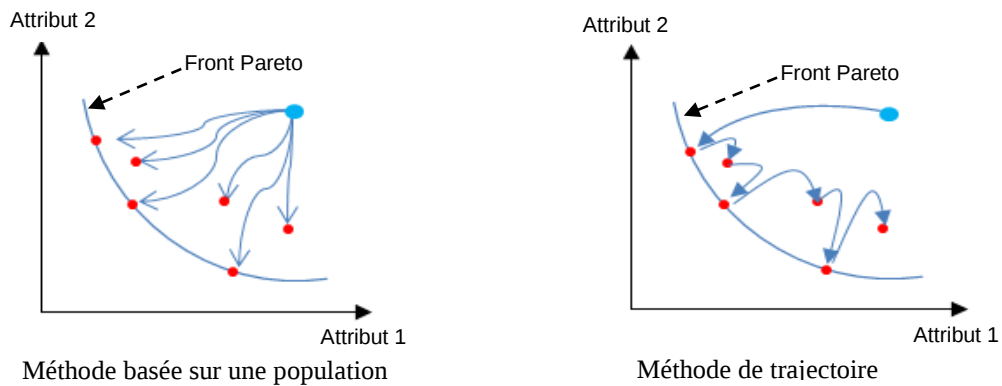


Figure 2.1 Techniques de recherche des métaheuristiques

Pour améliorer l'efficacité de ces méthodes, deux mécanismes principaux ont été proposés :

1. *Intensification ou exploitation* : utilise une mémoire à moyen terme. Elle permet de viser une zone limitée de l'espace de recherche dans l'espoir d'améliorer une solution "S" actuelle. Cette opération revient alors à intensifier la recherche au voisinage de S [47].
2. *Diversification ou exploration* : utilise une mémoire à long terme. Elle consiste à explorer une plus grande partie de l'espace de recherche dans l'espoir de trouver d'autres solutions prometteuses qui n'ont pas encore été découvertes. Cette opération revient donc à diversifier la recherche afin d'éviter d'être piégé dans un optimum local [48].

2.2.2 Classification des métaheuristiques

Les métaheuristiques peuvent être classées en fonction des caractéristiques et des objectifs [49].

2.2.2.1 Métaheuristique inspirée ou non de la nature

Classer les méthodes en fonction de l'origine de l'algorithme est le moyen le plus intuitif. Il existe des algorithmes inspirés de la nature, comme les algorithmes de fourmis et les algorithmes génétiques, et d'autres qui ne sont pas inspirés de la nature, tels que la recherche locale itérative et la recherche tabou. Cette classification est limitée pour deux raisons. Tout d'abord, nous ne pouvons pas dire que les algorithmes hybrides ne correspondent à aucune classe ou qu'ils s'adaptent aux deux classes en même temps. Deuxièmement, pour certains algorithmes, il est difficile de les attribuer à l'une des deux classes. Par exemple, nous ne pouvons pas dire que la mémoire dans la recherche tabou est inspirée ou non de la nature [50].

2.2.2.2 Métaheuristique à solution unique Vs. Métaheuristique à population

Une autre manière utilisée pour distinguer les métaheuristiques est le nombre de solutions manipulées en une itération. En effet, un algorithme évoluant une solution unique est appelé méthode de trajectoire et désigne une des métaheuristiques basées sur la recherche locale. On peut citer le recuit simulé, la recherche à voisinage variable et la recherche tabou. Au contraire, les métaheuristiques à population, maintiennent et améliorent plusieurs solutions candidates en même temps. Elles comprennent les algorithmes génétiques, les algorithmes de fourmis, l'optimisation par essais particuliers, etc.

2.2.2.3 Fonction objectif dynamique Vs. fonction objectif statique

Les métaheuristiques peuvent être classées selon la manière dont elles traitent la fonction objectif. Lors de la recherche, certaines méthodes dites statiques travaillent directement sur la fonction objectif sans modification. D'autres algorithmes dits dynamiques comme la recherche locale guidée (GLS), ajoutent de nouvelles composantes permettant d'échapper aux minima locaux. En conséquence, ces informations incorporées permettent de modifier le paysage de l'espace des solutions.

2.2.2.4 Nombre de structures de voisinages utilisées

Certains algorithmes utilisent une seule structure de voisinage, d'où la topologie du paysage de remise en forme ne change pas au cours de l'évolution. D'autres, telles que VNS (Variable Neighbourhood Search), utilisent un ensemble de structures de voisinage qui permettent de diversifier la recherche en passant d'un paysage de fitness à un autre.

2.2.2.5 Métaheuristique avec ou sans mémoire

Quelques métaheuristiques utilisent une mémoire pour enregistrer l'historique de la recherche au cours de l'évolution. En effet, il existe des mémoires à court terme et d'autres à long terme. La première garde temporairement les décisions prises y compris les traces des mouvements récentes et les solutions visitées. La seconde permet d'accumuler les informations synthétiques de la recherche. D'autres algorithmes sans mémoires n'ont aucune information du passé et peuvent revenir à des solutions déjà examinées. Ces algorithmes dits « aveugles » sont considérés comme des processus markoviens puisque la décision à prendre est entièrement déterminée par la situation en cours.

2.2.3 Métaheuristiques hybrides

L'hybridation signifie la conjonction de diverses idées algorithmiques de différentes branches de la recherche opérationnelle, de l'intelligence artificielle et de l'informatique. Le but de cette hybridation est d'obtenir des systèmes plus puissants qui combinent et exploitent les avantages des stratégies originaires individuelles. Bien que l'hybridation signifie la combinaison d'une métaheuristique avec d'autres techniques d'optimisation comme la programmation dynamique, la recherche opérationnelle, etc. [51]. Dans cette section, nous allons seulement donner un aperçu de l'intégration des métaheuristiques entre elles. Le lecteur intéressé peut trouver d'autres revues sur les métaheuristiques hybrides dans [52], [53]. En effet, il existe plusieurs types d'hybridation qui ont fait leurs preuves à plusieurs reprises. Voir la figure 2.2.

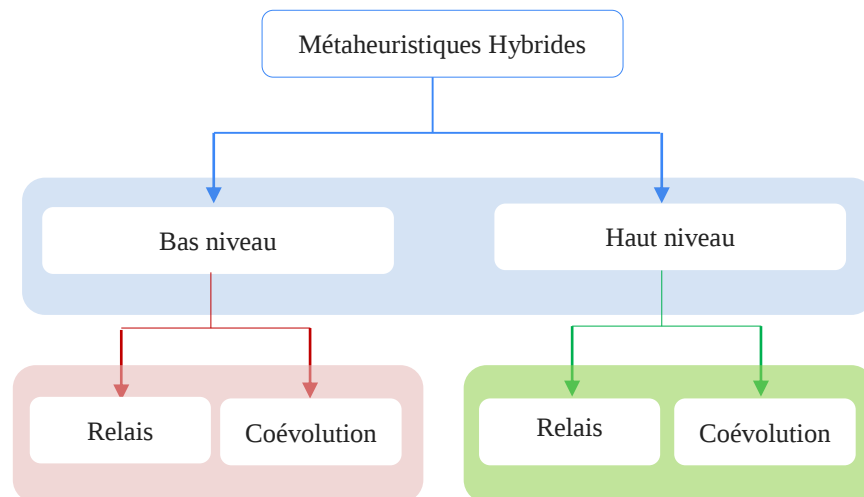


Figure 2.2 Taxonomies des métaheuristiques hybrides.

a. Haut niveau : couplage faible

1. Les algorithmes gardent leurs propres propriétés.
2. Pas de relation directe du fonctionnement interne des algorithmes.

b. Bas niveau : couplage fort

1. Forte dépendance entre algorithmes.
2. Echange des composants individuels et des fonctions entre algorithmes.

c. Relais

Les métaheuristiques sont appliquées l'une après l'autre, chacune utilise la sortie de la précédente comme une entrée.

d. Coévolution

Désigne les modèles d'optimisation coopératifs, où chaque approche utilise des agents coopérants ensembles.

2.3 Algorithme et complexité

2.3.1 Définition

Généralement, la complexité temporelle désigne le temps mis par un algorithme pour s'exécuter et donner un résultat. Par contre, la complexité spatiale mesure la quantité de mémoire ou d'espace utilisée par l'algorithme pour s'exécuter. En effet, ces deux notions (complexité du temps et de l'espace) dépendent de divers facteurs tels que le système d'exploitation, les processeurs, le matériel, etc. En effet, la complexité d'un algorithme est représentée avec la notation $O(f)$, appelée notation asymptotique ou «Big O notation» [54]. Sachant que f est la fonction de la taille des données d'entrée, la complexité de calcul asymptotique $O(f)$ indique la valeur des ressources consommées par l'algorithme en terme de temps CPU, de mémoire, etc. Ainsi, le temps qu'il faut à un algorithme pour atteindre une solution optimale et réalisable dépend de deux paramètres : la taille des données d'entrée nécessaires et la puissance de l'ordinateur utilisé. En supposant que chaque instruction est exécutée dans un laps de temps constant, la complexité d'un algorithme peut être exprimée en fonction de la quantité d'instructions dont l'ordinateur aura besoin pour résoudre le problème [55].

2.3.2 Les classes de complexité

a. La classe P

Un problème est dans P s'il peut être résolu par un algorithme en un temps polynomial [56].

b. La classe NP

Un problème de décision est dans NP (Non-déterministe Polynômial) si une solution donnée du problème peut être vérifiée en un temps polynomial. Donc, il n'est pas nécessaire qu'une solution soit calculable en un temps polynomial. Il est seulement nécessaire que nous puissions vérifier la solution du problème en un temps polynomial. Par conséquent, $P \subseteq NP$ est valide.

c. La classe NP-difficile

Un problème est appelé NP-difficile s'il est au moins aussi difficile que n'importe quel problème dans NP. C'est-à-dire que chaque problème dans NP peut y être réduit. L'approche classique pour traiter les problèmes NP-difficiles consiste à rechercher de bons algorithmes d'approximation.

d. La classe NP-complet

Un problème est NP-complet si et seulement si, il est à la fois NP-difficile et NP.

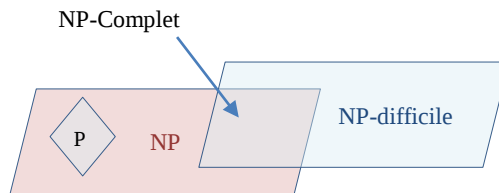


Figure 2.3 Classes de complexité.

2.4 Utilisation des métaheuristiques dans les réseaux de véhicules

Le problème de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules est classé NP-complet [57]. En raison de cette complexité, les chercheurs ont utilisé les métaheuristiques pour trouver la solution optimale dans un temps polynomial. Afin de limiter notre étude aux métaheuristiques les plus utilisées, nous avons adopté un échantillon de 142 papiers scientifiques [58]. Ces travaux contiennent les solutions les plus récentes et les plus pertinentes à base d'heuristiques pour le problème de routage dans les réseaux mobiles et les réseaux véhiculaires. Le tableau ci-dessus présente ces métaheuristiques ainsi que leur nombre d'utilisations.

Tableau 2.1 Utilisation des heuristiques dans MANET et VANET

Métaheuristique	Nombre d'utilisations	
	MANETs	VANETs
Recherche tabou (RT)	5	2
Recuit simulé (RS)	4	1
Optimisation par essaim particulière (PSO)	<u>19</u>	<u>12</u>
Algorithme génétique (AG)	<u>37</u>	<u>14</u>
Colonie de fourmis (ACO)	<u>35</u>	<u>13</u>
<u>Total</u>	100	42

Selon le tableau 2.1, dans plus de 90% des travaux, les chercheurs ont utilisé les métaheuristiques à population (AG, ACO et PSO). En plus de leurs popularités, ces approches ont prouvé leur efficacité à réduire les défis dans les réseaux à forte mobilité. Par conséquent, dans les sections suivantes, nous allons présenter et comparer les plus récentes contributions à base d'heuristiques à population, utilisées pour développer des protocoles de routage véhiculaire.

2.4.1 Optimisation par essaims particuliers (PSO)

A. Définition

Cette méthode est inspirée du comportement social des poissons et du flockage des oiseaux. C'est une approche de descente stochastique qui compare pour chaque itération la solution courante avec tous ses voisins [59], [60]. La position d'une particule de l'essaim se déplaçant à l'intérieur de l'espace de recherche est réglée en fonction de trois composantes (sa vitesse actuelle V_a , sa meilleure position précédente P_p et la meilleure position précédente de l'ensemble de l'essaim P_g). Cela donne l'équation de mouvement suivante [61], [62].

$$V_{a+1} = \omega V_a + b_1(P_p - X_a) + b_2(P_g - X_a) \quad (2.1)$$

$$X_{a+1} = X_a + V_{a+1}$$

Avec :

ω désigne l'inertie.

b_1 tiré aléatoirement dans $[0, \varphi_1]$.

b_2 tiré aléatoirement dans $[0, \varphi_2]$.

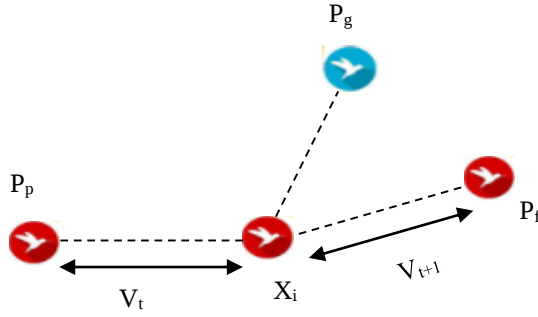


Figure 2.4 Fonctionnement des essaims particulaires

B. Positionnement bibliographique

Sachant que la performance et la robustesse de tout algorithme dépendent du bon choix de la configuration des paramètres, Sharma et al. [63] ont suggéré une méthode de réglage basée sur l'algorithme PSO pour trouver la configuration optimale des paramètres du protocole DSDV (Destination Sequenced Distance Vector). L'algorithme proposé contient deux phases :

- *Phase d'optimisation* : à l'aide de la fonction de remise en forme (2.2), le PSO est utilisé pour trouver la meilleure configuration des paramètres.

$$F = W1 * NRL + W2 * AEED - W3 * PDR \quad (2.2)$$

- *Phase d'évaluation* : chaque solution générée en phase 1 passera en entrée pour le protocole DSDV.

Dans [64], Lobiyal et al. tentent d'optimiser les paramètres du protocole AOMDV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector). En raison du grand nombre de combinaisons possibles, les auteurs transforment ce défi en un problème d'optimisation combinatoire résolu en utilisant le PSO. Le modèle proposé contient deux phases.

- *Phase d'optimisation* : utilise le PSO pour sélectionner les meilleures valeurs des paramètres du protocole AOMDV.
- *Phase d'évaluation* : mesure la qualité de service du protocole proposé sur la base de trois métriques (PDR, AE2ED et NRL)

Dans [65], Z. A. Zukarnain et al. ont utilisé l'optimisation par essaims particulaires pour adapter le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) aux réseaux VANETs. La solution proposée (M-OLSR) permet de minimiser la consommation de la bande passante et le délai de bout en bout. Comme indiqué dans l'équation (2.3), les auteurs ont utilisé trois métriques de performance pour calculer la fonction de coût (F) des nouvelles configurations.

Cette valeur de F est utilisée par l'algorithme PSO pour générer des paramètres optimaux utilisés par le protocole OLSR.

$$F = 0.2 * PL + 0.3 * E2ED + 0.2 * NRL - 0.3 * PDR/4 \quad (2.3)$$

Où

- PL : perte de paquets.
- $E2ED$: délai de bout en bout.
- NRL : charge de routage normalisée.
- PDR : ratio de livraison de paquets.

De même, A. Bandi et al. [66] ont affiné les paramètres du protocole OLSR en utilisant l'AG avec le PSO. Le travail réalisé contient quatre étapes.

- *Etape 1* : développer un scénario de circulation routière réaliste.
- *Etape 2* : utiliser la politique d'optimisation pour trouver les paramètres de configuration potentiels affinés du protocole OLSR.
- *Etape 3* : construire le protocole de routage OLSR à l'aide de PSO.
- *Etape 4* : comparer le résultat obtenu avec l'AG.

Dans [67], afin d'éviter le contrôle centralisé dans les réseaux véhiculaires entraînant un lent transfert de données, Kalambe et al. ont proposé un modèle hybride combinant le protocole réactif SIFT (Simple Forwarding over Trajectory) avec l'algorithme d'inondation restreinte DREAM (Distance Effect Routing Algorithm for Mobility). Dans ce modèle, SIFT n'envoie aucun type de message de contrôle mais il est utilisé pour résoudre les problèmes de surcharge du réseau. Pour rendre cette combinaison plus efficace, les auteurs ont utilisé l'optimisation par essaim particulaires pour générer des décisions de navigation réduisant ainsi à la fois la congestion et le retard.

Dans [68], Kaiwartya et al. ont traité le routage géocast. Ainsi, la plupart des applications des STIs nécessitent l'envoi d'informations à tous les véhicules appartenant à une zone géographique donnée. Pour limiter l'effet négatif de cette diffusion, les auteurs ont utilisé l'optimisation par essaims particulaires (GeoPSO) pour sélectionner les meilleurs nœuds relais. Les résultats empiriques montrent que GeoPSO surperforme les techniques traditionnelles telles que le diagramme de voronoï en termes de charge réseau et de livraison de paquets.

2.4.2 Optimisation par algorithmes génétiques (AG)

A. Définition

Les algorithmes génétiques sont inspirés de l'évolution des espèces. Certains individus peuvent s'adapter et évoluer au fil du temps en transmettant leurs caractéristiques à leurs progénitures. Les autres disparaissent progressivement [69]. En effet, l'AG est un algorithme de temps polynomial conçu pour trouver la meilleure solution pour les problèmes d'optimisation difficiles. Pour améliorer la qualité des individus, cet algorithme évolue une population initiale pour un nombre prédéterminé d'itérations [70]. À chacune, quelques individus seront éliminés de la population et d'autres seront insérés pour améliorer la qualité des solutions possibles. Comme indiqué dans la figure 2.5, cinq étapes caractérisent cette approche.

1. Création de la population initiale.
2. Evaluation et sélection des individus.
3. Création de nouveaux individus en appliquant le croisement et la mutation.
4. Insertion de nouveaux individus dans la population.
5. Réitération du processus jusqu'à une condition d'arrêt est satisfaite.

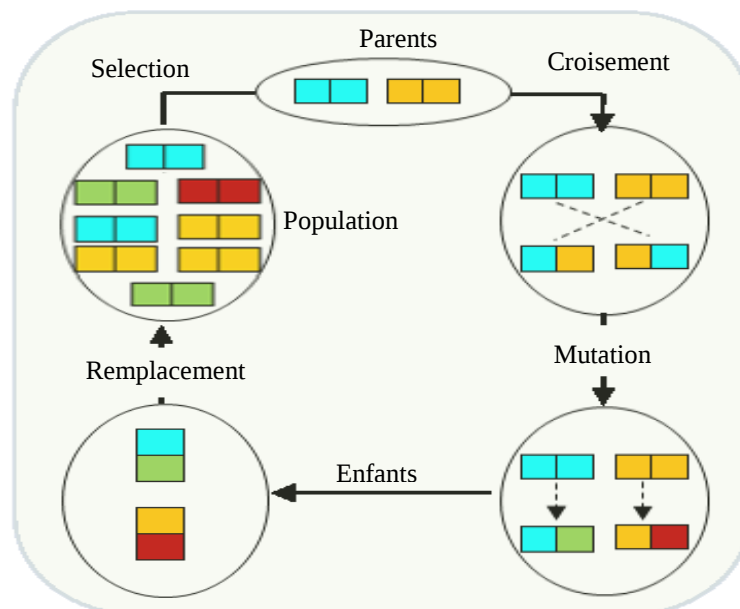


Figure 2.5 Algorithme génétique.

B. Positionnement bibliographique

Les AGs sont largement utilisés pour résoudre le problème de routage dans les réseaux véhiculaires. Par exemple, pour obtenir une diffusion de données précise, rapide et opportune, E. S. Cavalcante et al. [71] proposent un déploiement des unités de bord de routes (RSU), permettant de couvrir le maximum de véhicules circulants. Le modèle développé contient deux phases :

- *Phase1* : formuler le déploiement des RSUs en un problème de maximisation de couverture avec seuil.
- *Phase2* : résoudre ce problème d'optimisation en utilisant l'AG.

Dans le même contexte, H. Cheng et al. [72] ont développé un modèle qui permet un déploiement efficace des RSUs tout en tenant compte la géométrie de la route, la mobilité des véhicules et la contrainte des ressources. Pour maximiser la qualité de la couverture tout en respectant le budget, trois phases sont proposées.

- *Phase 1* : diviser le réseau routier en différents hot spots à partir des fichiers de trace historiques.
- *Phase 2* : lancer une opération de mise en mémoire tampon pour s'adapter aux différents types de topologie routière.
- *Phase 3* : transformer le problème de la couverture budgétaire pour le réseau routier en un problème de maximisation à résoudre avec l'AG.

Dans [73], Raghu et al. ont utilisé l'AG pour déterminer les véhicules les plus appropriées à générer la cognition à partir des données recueillies. Ce modèle permet de minimiser la consommation de la bande passante en diminuant le nombre de voitures impliquées dans la génération et le transport des données.

Dans [74], Lochert et al. ont développé un système d'agrégation de données dans les réseaux routiers en deux étapes.

- *Etape 1* : développer un schéma d'agrégation spécifique au moyen d'une hiérarchie multicouche afin de minimiser la bande passante globale requise.
- *Etape 2* : utiliser l'AG pour identifier les bons emplacements des unités statiques de bord de route pour faire face à la nature hautement cloisonnée de VANET.

Dans [75], pour choisir le meilleur véhicule relais qui va transporter les données d'une partie à une autre, les auteurs ont suggéré un protocole intelligent basé sur l'algorithme génétique. Pour pallier l'échec des deux modes traditionnels d'acheminement (gourmand et périmétrique)

dans les réseaux déconnectés et clairsemés, le protocole proposé a intégré un acheminement tolérant aux retards comme un troisième mode. L'algorithme génétique est utilisé pour calculer l'impact de chaque paramètre dans la sélection des nœuds relais. De même, dans [76], Lochert et al. ont proposé une stratégie de routage basée sur l'AG pour trouver le meilleur chemin ayant un délai minimum de la source à la destination. Cette approche contient trois phases.

- *Phase 1* : utiliser l'AG pour trouver le meilleur chemin de la source vers la destination et pour construire la matrice de poids contenant les valeurs de fitness de tous les nœuds.
- *Phase 2* : à la base de la matrice générée ci-dessus, créer l'arbre de récupération pour supprimer les liens provoquant des boucles.
- *Phase 3* : transformer tous les liens de l'arbre couvrant en des nœuds dans l'arbre de routage.

Dans [77], les auteurs ont proposé un protocole de clustérisation pondéré adaptatif, conçu pour les réseaux de véhicules. Ce protocole prend en compte la direction, l'identification de la route, la position, le nombre de voisins et la vitesse pour optimiser le routage des données. Au début, un problème multi-objectif est défini pour maximiser le taux de livraison des données et réduire les frais généraux de regroupement. Ensuite, ce problème multi-objectif est abordé avec la version 2 de l'algorithme génétique non trié (NSGA-II).

Le travail dans [78] concerne un protocole de routage pour les réseaux véhiculaires, nommé G-NET. Cette contribution est basée en partie sur le protocole DSR. Elle utilise l'algorithme génétique pour la maintenance et l'optimisation des routes. Le G-NET conserve non seulement la caractéristique réactive du DSR, mais effectue également des mises à jour périodiques sur les routes prenant comme base les fonctionnalités de recherche inapte présentes dans les AGs.

2.4.3 Optimisation par algorithmes de fourmis (ACO)

A. Définition

L'algorithme de fourmis est une métaheuristique à population inspirée du comportement collectif des fourmis. Elle est utilisée pour trouver des solutions approximatives à des problèmes d'optimisation difficiles. Les fourmis communiquent à travers les phéromones qu'elles déposent en se déplaçant. Ensuite, en fonction de la quantité de phéromones déposée précédemment, les meilleurs chemins à suivre sont préférés et les autres sont ignorés. Quatre étapes décrivent le comportement des fourmis pour trouver le plus court chemin [79].

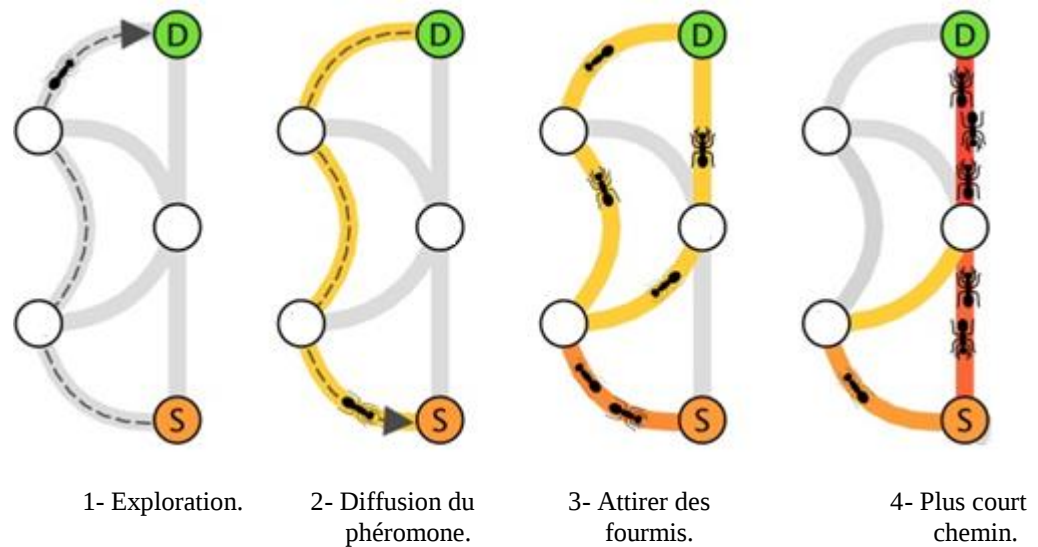


Figure 2.6 Processus de colonie de fourmis

B. Positionnement bibliographique

Le routage consiste à transférer les données et les informations du nœud source vers la destination avec un coût minimum exprimé en termes de délai, débit, fiabilité Donc, l'algorithme de routage doit établir des chemins réalisables entre les nœuds et envoyer le trafic le long de la route sélectionnée avec de bonnes performances. Ainsi, l'algorithme de fourmis semble le plus approprié pour trouver les meilleurs chemins. Par exemple, en 2016, Oranj et al. [80] ont proposé un algorithme de routage couplant le protocole DYMO (DYnamic Manet On-demand) avec l'optimisation par algorithme de fourmis. Ce modèle utilise les deux mécanismes (Explorer Ant et Search Ant) pour créer le chemin optimal de la source vers la destination. Au début, le RREQ (Route REQuest) du protocole DYMO est amélioré par l'utilisation d'une nouvelle stratégie de recherche qui prend en compte la quantité de phéromone dans chaque chemin. Ensuite, le chemin découvert est évalué et sélectionné en fonction de sa fiabilité et de sa durée de vie.

Dans [81], pour améliorer la QoS du protocole AODV, les auteurs ont essayé de trouver la meilleure configuration des paramètres en deux étapes.

- *Etape 1* : appliquer l'ACO pour affiner la couche réseau du protocole AODV.
- *Etape 2* : utiliser les cartes de villes pour avoir des simulations réelles.

De même, dans [82], la nouvelle stratégie de routage proposée permet de chercher l'itinéraire le plus optimal possible entre deux nœuds. Cette idée combine la théorie des graphes avec l'optimisation par colonies de fourmis. Ce modèle répond rapidement aux changements fréquents de la topologie du réseau et évite les encombrements. Trois composantes majeures caractérisent le modèle.

- *Forward-ants* : collectent les informations concernant la qualité du réseau au cours d'un voyage.
- *Backward-ant* : reconnaît la validité du chemin qui est stocké dans le "forward-ant".
- *Table de routage* : cette table doit être maintenue et mise à jour par le nœud lui-même.

Un peu similaire au travail précédent, l'algorithme proposé dans [83] utilise l'ACO pour trouver des routes considérant le meilleur compromis entre le plus court chemin et la plus faible probabilité de déconnexion. En outre, pour surmonter le problème des obstacles qui affectent négativement la communication entre les véhicules, Silva et al. ont amélioré l'algorithme AntSensor pour trouver des routes alternatives. Cet algorithme contient deux étapes de base.

- *Etape 1* : trouver tous les voisins de chaque véhicule dans le réseau.
- *Etape 2* : sélectionner le meilleur itinéraire en fonction de son niveau de phéromone, de son nombre de sauts et de la distance euclidienne entre les véhicules.

Une autre amélioration est présentée dans [84], où Rana et al. ont développé un modèle de routage hybride basé sur l'algorithme de fourmis. L'ACO est utilisé pour trouver plusieurs routes entre deux nœuds afin de surmonter les échecs de liaison. Au début, le réseau est divisé en différentes zones, où chaque véhicule doit appartenir à deux zones maximum. Ensuite, l'approche proactive est utilisée pour trouver les itinéraires dans une zone et l'approche réactive pour trouver les itinéraires entre les zones.

En 2011, Correia et al. [85] ont utilisé l'optimisation par algorithme de fourmis pour améliorer les performances du protocole réactif DYMO. Le modèle proposé (ACO-DYMO) contient deux phases :

- *Phase 1* : intégrer des informations supplémentaires (position et vitesse) dans le message « Hello » du protocole DYMO. Cette tâche permet à chaque véhicule de prédire la position de ses voisins à un instant t donné. Le message « Hello » ne sera pas envoyé régulièrement, mais en cas de besoin seulement.

- *Phase 2* : sélectionner le meilleur chemin à partir de la table de routage en fonction de son niveau de phéromone, ceci est mesuré par l'application des deux mécanismes de l'ACO (dépôt des phéromones et évaporation des phéromones).

Dans [86], Sahoo et al. ont proposé un modèle de clustérisation basé sur le concept de confiance et sur les algorithmes de fourmis. Pour ce faire, trois étapes sont conçues afin de créer des clusters et élire les têtes des clusters.

- *Etape 1 : formation de groupe* : pour rejoindre un groupe donné, un véhicule doit avoir la même direction que tous les autres appartenant à ce groupe, et sa vitesse doit être égale ou inférieure à la valeur d'un seuil donné.
- *Etape 2 : sélection de la tête de cluster* : si le cluster contient une unité de bord de route, alors la tête de cluster est cette unité, sinon le nœud élu doit :
 - Être un nœud normal.
 - Être le plus lent dans le cluster.
 - Avoir la plus grande valeur de confiance.
- *Etape 3* : pour ne pas tomber sur des faux chemins, les véhicules malveillants doivent être détectés et leurs messages transmis doivent être retirés du réseau.

Dans le même contexte, Fathian et al. [87] combinent deux métaheuristiques (système immunitaire artificiel (SIA) et optimisation par algorithme de fourmis (ACO)) pour obtenir des algorithmes de clustérisation appropriés à l'environnement dynamique des réseaux VANETs. En effet, cinq processus sont déclenchés après l'initialisation et la création des clusters.

Processus 1 : diviser les clusters en sous-clusters.

Processus 2 : affecter les véhicules et les objets aux sous-groupes appropriés selon la cohérence des phéromones.

Processus 3 : fusionner les clusters présentant une forte similarité.

Processus 4 : supprimer les nœuds qui causent une grande dissemblance au sein des sous-clusters.

Processus 5 : le véhicule ayant une distance minimale de D_{mean} (T_m) est sélectionné comme tête de groupe. (D_{mean} est la distance moyenne entre tous les objets d'une fourmi m et le centre de son cluster).

2.5 Etude comparative

Dans cette section, nous allons mesurer et comparer l'efficacité des approches heuristiques utilisées. Nous allons utiliser plusieurs métriques à savoir le taux de livraison des paquets, le délai moyen de bout en bout, le débit et la charge du réseau [88], [89]. Nous présenterons également les avantages et les inconvénients des contributions citées auparavant.

2.5.1 Métriques de performances

Une métrique permet d'évaluer, de comparer et de suivre la qualité d'un processus spécifique.

2.5.1.1 Taux de livraison des paquets (PDR)

Utilisé pour évaluer le débit d'un réseau. C'est le rapport entre le nombre de paquets reçus avec succès et le nombre de paquets générés par les nœuds.

$$PDR = \frac{\Sigma \text{paquets reçus}}{\Sigma \text{paquets envoyés}} * 100 \quad (2.4)$$

2.5.1.2 Le délai de bout en bout (E2ED)

Est le délai moyen pour que les paquets de données atteignent le nœud de destination. Plus ce délai est faible, plus la performance est meilleure.

$$\text{Délai} = \frac{\Sigma (TRP - TTP)}{\Sigma PR} * 100 \quad (2.5)$$

* TRP : temps de réception des paquets.

* TTP : Temps de transmission des paquets.

* PR : paquet reçu.

2.5.1.3 Débit (Throughput)

Est le nombre total de paquets livrés avec succès vers la destination via un canal de communication

$$\text{Debit} = \frac{\Sigma \text{paquets recus}}{\text{unité de temps}} \quad (2.6)$$

2.5.1.4 Bande passante (Bandwidth, BW)

C'est le débit maximal possible sur le réseau.

Tableau 2.2 Utilisation de l'optimisation par essaim particulaires pour le routage vehiculaire.

Contribution	Algorithme	Modèle de mobilité	Métrique de performance				Avantages	Inconvénients	Simulateur
			E2ED	Debit	PDR	BW			
Choisir le meilleur nœud relai a chaque saut.	Geocast Protocol	Urbain	N/A	+	+	N/A	Efficace pour les environnements clairsemés.	Fortement influencé par l'échec des liens.	NS2
Optimiser les paramètres utilisés par le protocole OLSR.	M-OLSR	Urbain	+	N/A	+	+	Rendre le protocole OLSR plus approprié a VANET.	Affectation aléatoire des poids aux métriques de performances.	NS2
Minimisation du contrôle centralisé.	SIFT + DREAM	Urbain	+	+	N/A	+	Livraison efficace des données dans les réseaux à grande échelle.	Le modèle proposé n'est pas testé dans un environnement dense.	NS2
Optimiser les paramètres utilisés par le protocole OLSR.	OLSR	Autoroute	+	+	+	N/A	Convergence rapide vers une solution optimale.	Plus la densité augmente plus l'efficacité du modèle diminue.	NS2
Optimiser les paramètres utilisés par le protocole DSDV.	DSDV	Urbain Autoroute	+	+	+	N/A	Amélioration significative de la QoS de DSDV.	Aucune règle pour déterminer les poids W_1 , W_2 et W_3 .	NS2
Déterminer les valeurs optimales des paramètres du protocole AOMDV pour améliorer la QoS.	AOMDV	Urbain	+	+	+	N/A	Amélioration significative en terme de E2ED.	Le modèle proposé n'a pas été comparé avec aucun autre protocole compétitif.	NS2

Tableau 2.3 Utilisation des algorithmes génétiques pour le routage véhiculaire.

Contribution	Algorithme	Modèle de mobilité	Métrique de performance				Avantages	Inconvénients	Simulateur
			E2ED	Débit	PDR	BW			
Utilisation des AGs pour une mise à jour périodique des routes générées par le protocole DSR.	DSR	Urbain	+	+	+	N/A	Bonne réduction du temps de recherche des chemins.	L'efficacité du modèle dépend de la BW disponible.	NS3
Minimiser le délai de diffusion des messages en utilisant un algorithme génétique.	AODV MAODV	Autoroute	+	N/A	+	N/A	Trouver le plus court chemin de l'ensemble des chemins possibles.	Le chemin retourné est le plus court qui n'est pas obligatoirement le meilleur.	NS2
Réduire le nombre de véhicules utilisés pour générer la cognition à partir des données recueillies.		Urbain	+	+	+	+	Diminution significative de la consommation de la bande passante.	Le choix aléatoire des paramètres d'effet n'est pas convaincant.	N/A
Trouver le déploiement optimal des RSUs.		Urbain	+	N/A	N/A	+	Couverture maximale avec minimum de coût.	Chute brutale de la zone de couverture lorsque le nombre de RSU diminue.	NS2
Utilisation du NSGA II pour concevoir un nouveau protocole de routage clusterisé.		Autoroute	+	N/A	+	N/A	Haute livraison de données	Non efficace dans les zones denses.	Ns2
Optimisation du déploiement des RSUs.		Urbain	N/A	+	+	+	Exploitation optimale des unités de soutien.	Modèle testé avec des petites zones.	N/A
Optimisation du nombre et des emplacements des unités de route.		Urbain	+	+	+	N/A	Amélioration significative de la couverture des véhicules.	Moins efficace dans un réseau à très grande échelle.	VISSIM
Trouver le meilleur véhicule relais pour transmettre des données d'une partie à une autre.	GeoDTN + N/AV	Urbain	+	N/A	+	N/A	Plus efficace pour les réseaux tolérant au retards.		NS2

Tableau 2.4 Utilisation des algorithmes de fourmis pour le routage vehiculaire.

Contribution	Algorithme	Modèle de mobilité	Métrique de performance				Avantages	Inconvénients	Simulateur
			E2ED	Débit	PDR	BW			
Améliorer la performance du protocole DYMO.	DYMO	Urbain	+	+	+	N/A	Réduction significative de la congestion dans le réseau.	Génère beaucoup de trafic de contrôle.	NS2
Développer un algorithme multipath pour réduire la diffusion et la congestion.	AODV	Urbain	N/A	+	+	+	Exploitation optimale de la bande passante.	Moins adapté aux environnements clairsemés.	NS2
Améliorer le protocole DYMO pour faire face aux changements d'environnements.	DYMO	Urbain	+	+	+	N/A	Adapté aux environnements dynamiques.	Moins efficace dans un environnement dense.	NS2
Minimiser la connectivité intermittente du réseau.	Ant Sensor Algorithm	Urbain	N/A	+	+	N/A	Faible disconnectivité même en cas de forte mobilité.	Le long temps de traitement affecte négativement l'E2ED.	C++
Améliorer la QoS du protocole AODV.	AODV	Autoroute	+	+	+	N/A	Optimisation des paramètres du protocole AODV.	Non vérifié avec un scénario réel.	NS2
Utiliser l'Evolving Graph et l'ACO pour trouver le meilleur chemin.		Autoroute	+	+	+	N/A	Réponse rapide aux changements fréquents de la topologie.	La mise à jour de la table de routage est très couteuse.	OpNet
Clusterisation efficace avec élection optimale de la tête de cluster.		Autoroute	+	+	+	N/A	Assurer une communication efficace dans le scénario VANET.	L'utilisation des RSUs comme des têtes de clusters n'est pas justifié.	N/A
Proposer un modèle de clustérisation efficace aux environnements dynamiques.		Urbain	N/A	+	+	N/A	Les nœuds des clusters générés sont très similaires.	Nécessite plus de temps de traitement dans un scénario dense.	N/A

2.5.2 Performances des métaheuristiques dans les VANETs

Dans cette section, nous allons comparer les capacités des diverses heuristiques pour améliorer le routage dans le réseau véhiculaire.

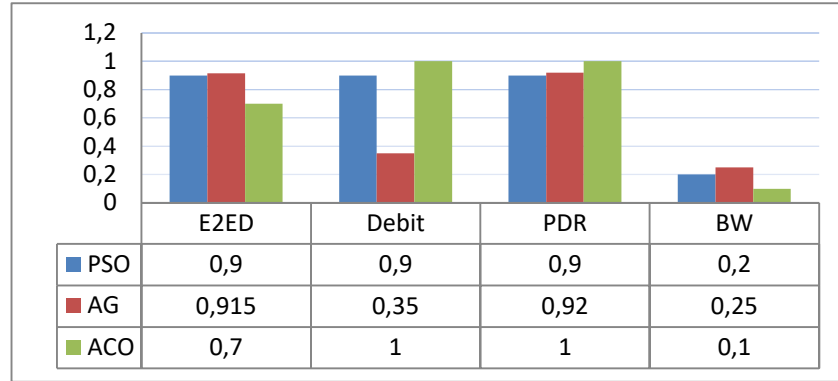


Figure 2.7 Comparaison des approches heuristiques.

Comme le montre la figure 2.7, les trois méthodes ont prouvé leur efficacité pour les paramètres E2ED, débit et PDR. Par exemple, en utilisant l'ACO, 70% des contributions ont réussi à minimiser le temps de livraison des paquets de l'expéditeur au destinataire (E2ED) ; 100% des contributions permettent d'alléger la charge du réseau, et 100% des contributions ont réussi à éviter la perte de données. En outre, on voit clairement que l'atteinte d'un tel succès se faisait au détriment de la bande passante pour toutes les méthodes.

2.5.3 Degré de performance des heuristiques sur différents scénarios

Dans cette section, nous allons comparer les performances des heuristiques PSO, GA et ACO dans les scénarios urbains et autoroutiers.

A- Scénario urbain

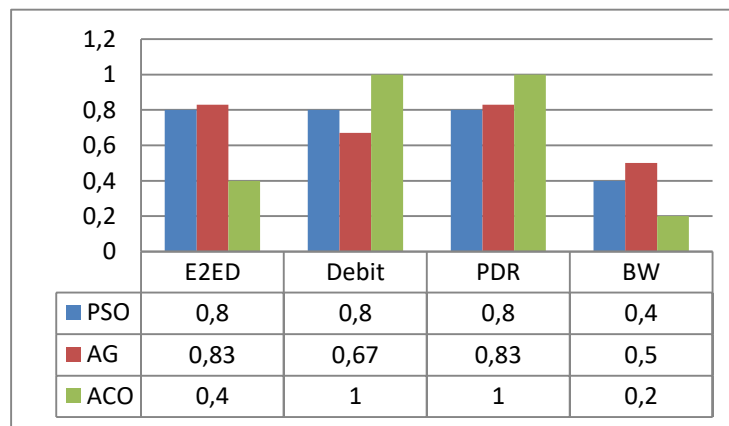


Figure 2.8 Performances des heuristiques dans le scénario urbain.

On voit clairement dans la figure 2.8 que l'utilisation des approches heuristiques dans le routage véhiculaire améliore toutes les métriques de performance à l'exception de la bande passante. Cette faiblesse est due à la densité des véhicules dans le milieu urbain, où l'utilisation rationnelle du canal devient le défi le plus important. Il est montré que la bande passante est un critère contradictoire par rapport aux autres métriques. Donc, une bonne utilisation de la bande passante améliore nécessairement les autres métriques.

B- Scénario autoroute

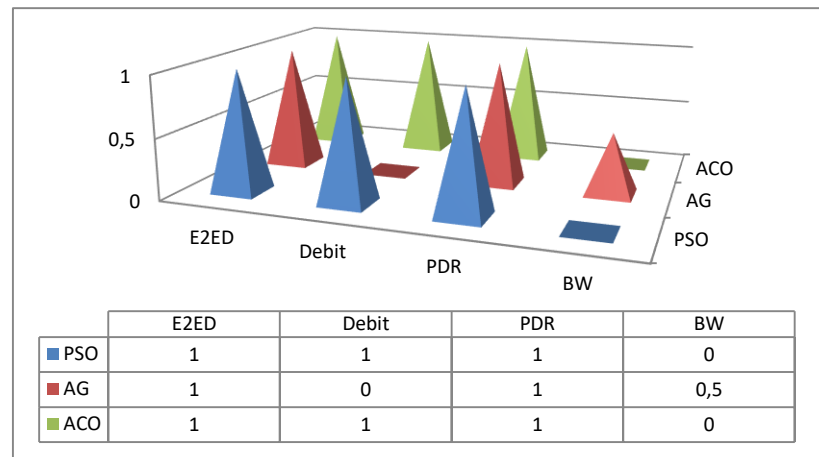


Figure 2.9 Performances des heuristiques dans le scénario autoroute.

De la figure 2.9, nous remarquons que le problème de la consommation de la bande passante persiste dans le scénario autoroutier. Par conséquent, il est à noter que l'efficacité des contributions dépend fortement de la bande passante disponible. En effet, deux cas se posent dans un réseau véhiculaire, consommant plus de bande passante.

Cas de stabilité : dans cette situation, les protocoles gaspillent de la bande passante en raison de l'envoi périodique des données de mise à jour.

Cas de mobilité : par exemple lorsqu'une panne survient dans le réseau, les protocoles introduisent des charges supplémentaires pour trouver un autre chemin ou pour supprimer un mauvais chemin du réseau.

A la fin de ce chapitre, la question fondamentale reste toujours :

Quelle quantité de bande passante le protocole de routage prend-il en cas de stabilité, et quelle est sa disponibilité maximum en réponse à un événement réseau majeur ?

2.6 Conclusion

Au cours des dernières années, le développement d'un système de transport intelligent qui prend en charge à la fois la sûreté et le confort a reçu beaucoup d'attention pour l'industrie automobile. Pour atteindre cet objectif et surmonter les défis de VANET, de nombreuses approches métaheuristiques ont été utilisées. Ce chapitre fournit une analyse sur les principales utilisations de ces méthodes. Dans cette étude, nous avons résumé les principales contributions apportées par les approches heuristiques les plus populaires (PSO, AG, ACO). Une étude comparative a été présentée pour lister les avantages et les inconvénients de ces approches en fonction de quatre paramètres de performance (E2ED, PDR, débit et bande passante).

DEUXIEME PARTIE : CONTRIBUTIONS

L'objectif de cette partie est de présenter nos contributions visant à résoudre le problème de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules. En combinant les avantages des techniques de clustérisation et des métaheuristiques, nous proposons des solutions compétitives pour assurer la sécurité routière, améliorer le confort de conduite et diffuser des informations actualisées sur les routes.

Chapitre 3

Routage clustérisé pour les réseaux VANETs

Sommaire

3.1.	Introduction.....	54
3.2.	Travaux existants.....	55
3.3.	Fondements théoriques du modèle proposé(AKCA).....	58
3.4.	Description du modèle proposé (AKCA).....	61
	<i>Etape 1. Initialisation.....</i>	63
	<i>Etape 2. Formation des clusters.....</i>	65
	<i>Etape 3. Maintenance de clusters.....</i>	66
3.5.	Résultats expérimentaux et analyse.....	70
3.6.	Conclusion.....	77

Résumé

Le problème de routage dans les VANETs est un thème de recherche récent et d'actualité. Malgré la variété des approches proposées et le développement des technologies de communication, il subsiste encore de nombreux défis. Selon une enquête à grande échelle, les protocoles de routage les plus appropriés aux réseaux VANETs sont conçus sur la base de l'approche de clustérisation [89]. Dans ce contexte, notre idée est d'ajuster l'algorithme de clustérisation « K-medoids » pour le problème de routage véhiculaire. L'objectif de notre modèle AKCA (Adjusted K-medoids Clustering Algorithm) est d'améliorer la stabilité du réseau et d'augmenter la durée de vie de tous les liens établis.

3. 1 Introduction

Bien que les fonctionnalités les plus importantes des VANETs soient en quelque sorte liées aux réseaux MANETs, le routage est très différent en raison de plusieurs paramètres. Par exemple, au lieu de se déplacer aléatoirement comme dans les MANETs, les véhicules se déplacent dans des routes prédéfinies avec de nombreuses réglementations (feux de circulation, directions et ralentissement). Dans les réseaux véhiculaires, de nombreux véhicules utilisent la technologie de la radio cognitive (RC) pour communiquer et créer un grand réseau [90]. Mais, en raison de la grande mobilité, certains véhicules deviennent rapidement hors de portée. Ce fait cause une connectivité intermittente et limite la livraison des données. Comme le routage dans les VANETs souffre de la grande vitesse des véhicules et des défaillances répétées dans les communications, il est nécessaire de trouver des technologies et des méthodes plus adaptées pour améliorer les performances du réseau. En 2016, les sociétés Intel et LG ont proposé une nouvelle technologie de communication basée sur le système de communication mobile de la cinquième génération (5G) [91]. Avec cette technologie 5G, la transmission de données est 33 fois plus rapide que la 4G actuelle. Ainsi, le temps de latence diminue considérablement même sur les autoroutes où les véhicules roulent à grande vitesse [92]. En plus de l'utilisation de ces nouvelles technologies, on note que les protocoles de routage les plus marquants sont conçus sur la base de l'approche de clustérisation. De même, le choix d'un algorithme centralisé ou décentralisé est un problème très sensible compte tenu de son effet sur la convergence, la robustesse et la bande passante utilisée [93]. Récemment, plusieurs études ont montré qu'un protocole de routage mixte combinant des approches centralisées et distribuées est le plus pertinent [94]. A partir de ces considérations, et en les adaptant à nos besoins, nous combinons le modèle centralisé et décentralisé pour bénéficier de leurs caractéristiques. Nous avons donc conçu un protocole dans lequel les points forts des topologies constitutantes sont maximisés tandis que leurs faiblesses sont neutralisées. Ainsi, notre schéma hiérarchique contient trois niveaux comme indiqué dans la figure 3.1.

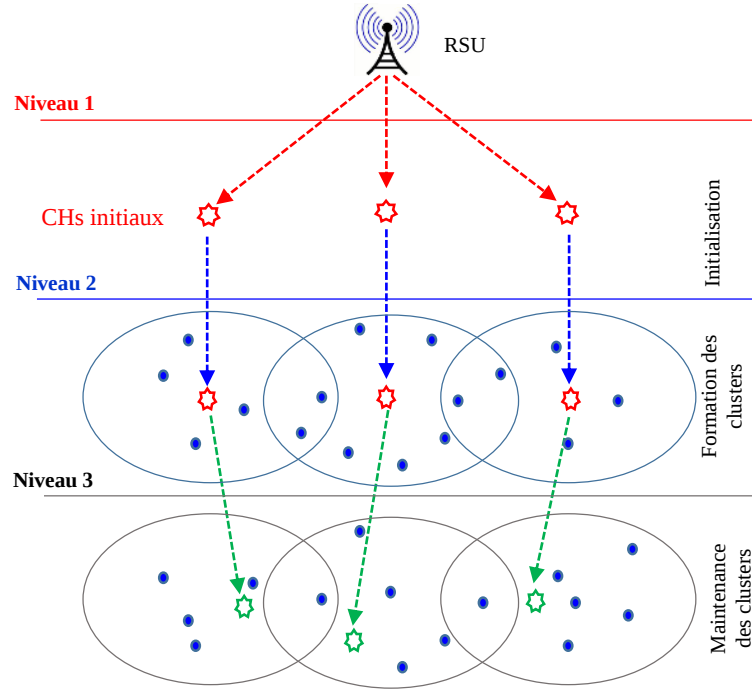


Figure 3.1 Structure hiérarchique du modèle proposé (AKCA)

Dans ce chapitre, la section 2 donne un aperçu des protocoles de routage clustérisés les plus récents dans les réseaux véhiculaires. La section 3 présente les fondements théoriques qui servent de base à notre contribution. La section 4 détaille le processus interne du modèle proposé AKCA. La section 5 évalue les performances du protocole proposé par des simulations approfondies incluant la robustesse, la stabilité et l'extensibilité.

3.2 Travaux existants

Étant donné que la connectivité discontinue dans les VANETs est le problème majeur, un grand nombre d'approches ont été développées pour surmonter ce défi. En effet, la division de l'espace en plusieurs clusters facilite la gestion du réseau et réduit les messages de coordination échangés entre les nœuds. Dans cette section, nous examinons les solutions les plus récentes basées sur les algorithmes de clustérisation.

A. V. Sutagundar et al. [95], ont développé un protocole de clustérisation dynamique orienté stabilité (SOCDV) où les RSUs sont responsables des décisions de clustérisation. Les auteurs ont utilisé les métriques de mobilité, de densité, de direction et de connectivité pour améliorer la stabilité. Ce modèle SOCDV s'appuie entièrement sur les RSUs pour former des clusters en

fonction de leurs plages de communication disponibles et pour sélectionner le nœud qui se déplace dans la direction opposée en tant que CH initial.

Dans [96], les auteurs ont présenté un algorithme de clustérisation basé sur le backbone hybride pour une communication efficace et stable entre les véhicules. Ce schéma utilise le nœud ayant un degré de connectivité élevé et une vitesse relative faible pour la formation du cluster et pour l'élection du CH correspondant. Pour chaque véhicule, la vitesse relative agrégée (VRA) est calculée en respectant tous les voisins. Ensuite, le véhicule ayant une VRA minimale est élu en tant que CH. Lorsqu'il n'y a pas de voisins, le CH sera dans un état inconnu en attendant l'entrée de nouveaux voisins pour commencer le processus de ré-clustérisation.

Dans [97], M. Ren et al. ont proposé un algorithme de clustérisation prenant en compte trois paramètres (position, direction et estimation de la durée de vie des liaisons). L'essence de ce modèle se résume en quatre étapes :

1. Initialement, tout nouveau véhicule entrant est considéré comme un nœud non affecté. Si ce nœud ne parvient pas à rejoindre un cluster pendant une période de temps prédéterminée "p", il se revendique lui-même comme un CH temporaire et forme son propre cluster.
2. Pour réduire la connectivité intermittente, les nœuds de bordure ne sont pas autorisés à rejoindre n'importe quel CH même s'ils se trouvent dans sa portée de transmission. Ce processus est appelé "seuil de distance de sécurité".
3. Une fois le CH élu et son groupe formé, les deux nœuds les plus éloignés seront considérés comme des passerelles. Lorsque deux nœuds ont la même distance, les chercheurs ont utilisé un paramètre LIE (Link Lifetime Estimation) pour sélectionner le plus approprié.
4. Si la zone de chevauchement entre deux clusters augmente ou si la distance entre les deux CH correspondants devient inférieure à un seuil donné, une procédure de fusion de cluster est appelée pour la maintenance.

Dans [98], J-H. Kwon et al. ont proposé un schéma de regroupement pour les environnements urbains. Ce modèle contient deux processus.

1. *Clustérisation* : pour accélérer la formation des clusters et surmonter la connectivité intermittente, les chercheurs ont utilisé le changement moyen du nombre de voisins comme un signal pour déclencher une nouvelle élection du CH.

2. *Transmission classifiée* : pour réussir la transmission des messages d'urgence, les véhicules envoient leurs données de haute priorité à des intervalles de temps en utilisant un accès par canal basé sur l'interrogation.

Dans [99], les auteurs ont combiné les caractéristiques des protocoles de routage clustérisés et géographiques pour éliminer le processus de découverte d'itinéraire et pour former des clusters stables avec un débit élevé. Chaque segment est divisé en plusieurs clusters de taille égale à la moitié de la plage de transmission. À un moment donné, le véhicule ayant la durée de vie maximale est sélectionné comme un CH jusqu'à ce qu'il atteigne le point le plus éloigné du bord directionnel du cluster. A ce moment, une nouvelle élection du CH est déclenchée.

Une autre idée est proposée dans [100] dont le but est de minimiser le temps d'élection des CHs et de la formation des clusters. Cet algorithme est divisé en trois phases.

1. *Formation du cluster* : le véhicule le plus lent est désigné pour partitionner le réseau en fonction de la portée de transmission et de la densité.
2. *Choix du CH* : le CH est sélectionné sur la base d'une fonction d'attente multi-métrique compte tenu de la différence de vitesse et de la distance relative entre les nœuds voisins.
3. *Changement du CH* : lorsque le CH actuel est proche de quitter le cluster, un mécanisme de commutation appelé "Make Before Break" permet de sélectionner le nœud le plus proche de la position moyenne du cluster comme un nouveau CH.

Z. Khan et al. [101], ont utilisé l'algorithme de K-Means et de Floyd-Warshall pour développer un protocole de routage clustérisé (TCRP). Dans ce modèle, le nœud le plus stable est choisi comme un CH. En effet, ce modèle contient deux phases :

1. *Formation des clusters* : basée sur l'algorithme K-means, la route est divisée en trois grappes dans leurs plages de confiance de vitesse.
2. *Election du CH* : au départ, l'algorithme de Floyd-Warshall calcule la plus courte distance pour toutes les paires de véhicules. Ensuite, le nœud ayant la plus petite distance moyenne au reste des véhicules et la plus petite variance de vitesse sera sélectionné comme CH.

P. Huballi et al. [102], proposent un modèle de clustérisation dynamique où un agent est associé à chaque RSU. Cet agent est conçu pour former le cluster et pour sélectionner le CH en fonction du degré des véhicules, des plages de transmission disponibles et des positions des véhicules. Trois étapes sont considérées dans cette contribution.

1. *Formation des clusters* : en l'absence d'un ancien cluster, tous les véhicules couverts par la RSU sont confirmés pour former un nouveau cluster.
2. *Sélection du CH* : le véhicule le plus proche du centre du cluster est élu comme un CH. En cas d'égalité, le nœud avec la plus grande liste de voisins est favorisé.
3. *Maintenance du cluster* : pour tout véhicule entrant, si sa portée de communication est inférieure à celle du CH, alors il rejoint le cluster. Dès que ce nœud quitte le groupe, il sera supprimé de la liste des membres du cluster.

Dans [103], R. Mehra et al. ont utilisé la technique de clustérisation pour améliorer la performance du protocole OLSR. Ce schéma utilise la vitesse et la position du nœud pour former des clusters ayant une grande similarité entre la tête du cluster et les nœuds qui lui sont associés. L'objectif de cette contribution est d'augmenter la durée de vie du réseau, de réduire la taille de la table de routage et d'améliorer la qualité de service. Ces améliorations sont atteintes en impliquant uniquement les nœuds responsables de la formation du backbone lors du processus de transmission.

3.3 Fondements théoriques du modèle proposé(AKCA)

Dans cette section, nous allons présenter deux fondements théoriques qui servent de base à notre modèle, à savoir la clustérisation et l'algorithme K-medoid.

3.3.1 La clustérisation

Cette technique consiste à diviser la population en plusieurs groupes. Chacun doit inclure des objets avec des caractéristiques similaires. Le degré de similarité est calculé à l'aide d'un ensemble de variables mesurées sur tous les objets. Ainsi, il existe un grand nombre d'algorithmes de clustérisation et de nombreuses mesures de qualité. Le choix d'un algorithme et d'une mesure appropriée pour l'évaluation dépend de la tâche traitée et des objets manipulés [104].

3.3.1.1 Intérêt et coût de la clustérisation

Dans chaque cluster il existe un nœud particulier appelé "tête de cluster" (CH) qui organise les communications internes et peut agir comme une passerelle pour s'interconnecter avec d'autres groupes (figure 3.2). Lorsqu'un nœud modifie son cluster de rattachement, seuls les nœuds voisins résidant dans le cluster correspondant doivent mettre à jour leurs informations.

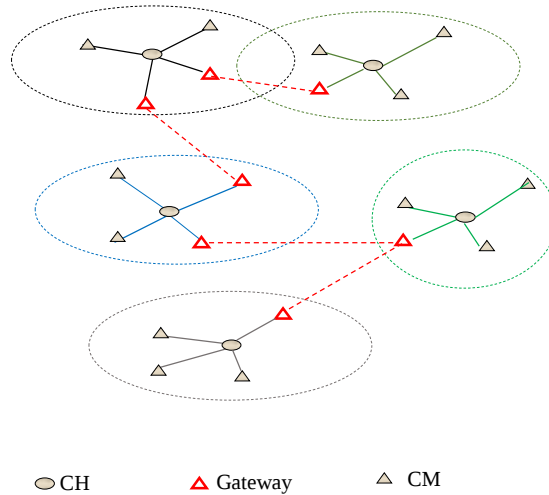


Figure 3.2 Exemple de clustérisation

Généralement, la clustérisation offre trois avantages fondamentaux. Premièrement, elle facilite la réutilisation spatiale des ressources pour augmenter la capacité du système. Cela signifie qu'en affectant un coordinateur à chaque cluster, on économise beaucoup de ressources utilisées pour la retransmission de données résultant d'une collision ou d'une perte [105]. Deuxièmement, l'ensemble des passerelles et des têtes de clusters forment un backbone virtuel où le routage est restreint dans cet ensemble de nœuds. Troisièmement, la structure en clusters réduit la taille du réseau, ce qui assure plus de stabilité et de robustesse.

Bien que plusieurs études ont prouvé l'efficacité de la clustérisation pour les grands réseaux et les réseaux mobiles, cette méthode a ses inconvénients. Par exemple, la construction et la maintenance d'une structure en clusters nécessitent généralement un coût supplémentaire par rapport à un réseau mobile à base plate [106].

3.3.1.2 Méthodes de clustérisation

Les méthodes de clustérisation peuvent être classées en plusieurs catégories comme indiqué dans la figure 3.3.

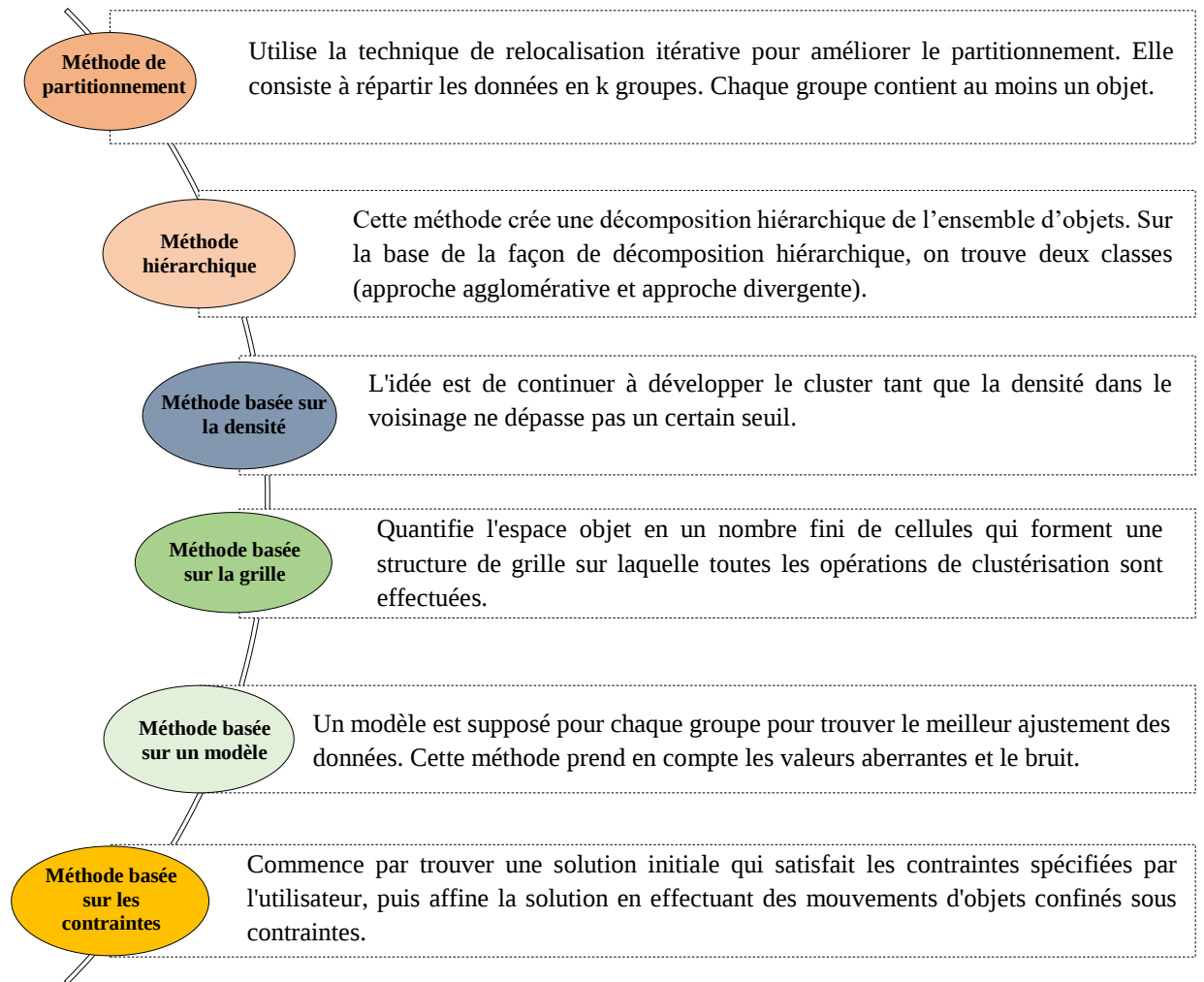


Figure 3.3 Types de clustérisation

3.3.2 L'algorithme K-medoids

Cet algorithme divise d'une manière optimale l'ensemble de données en k groupes avec une dissemblance intra-cluster minimale. Comme l'un des algorithmes de clustérisation les plus efficaces, la méthode k-medoids est moins influencée par les valeurs aberrantes et les valeurs de bruit [107]. L'algorithme commence par un ensemble de medoids (objet représentatif d'un cluster) choisis au hasard. Puis, itérativement, il remplace chaque médoid par un autre élément dans l'espoir de réduire les dissemblances [108]. Le processus de remplacement de l'objet représentatif par un autre non représentatif se poursuit jusqu'à ce que la qualité de la classification s'aggrave comme indiqué dans la figure 3.4.

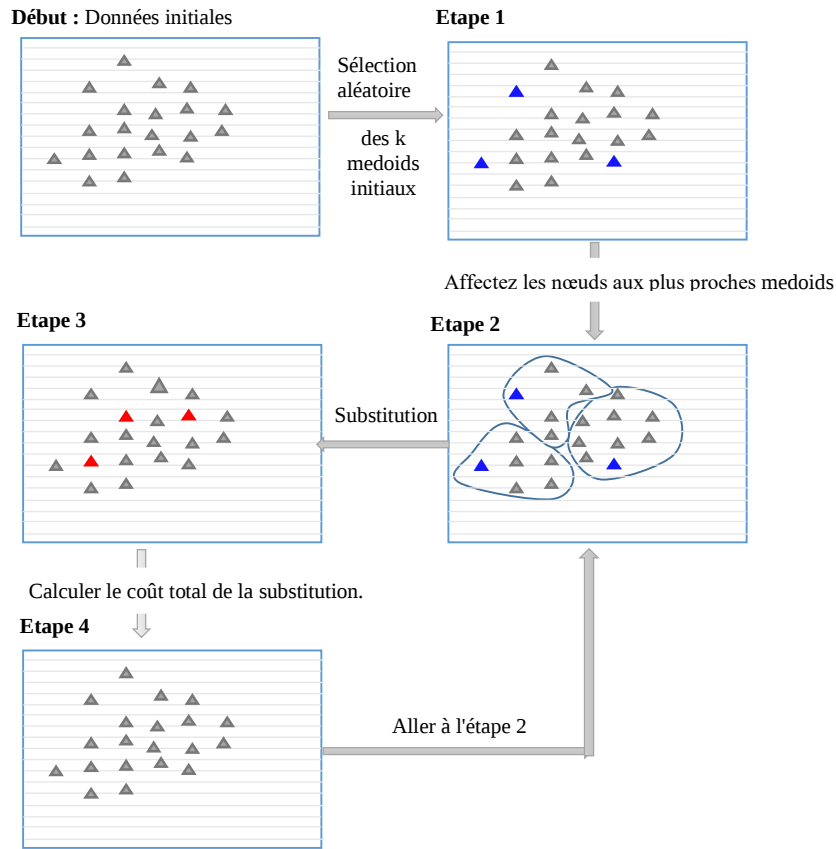


Figure 3.4 L'algorithme k-medoids

3. 4 Description du modèle proposé (AKCA)

La clustérisation dans un réseau véhiculaire présente trois avantages principaux. D'abord, elle réduit les coûts généraux des messages. Deuxièmement, la bande passante peut être partagée ou réservée d'une manière contrôlée dans chaque cluster. Troisièmement, l'algorithme à base de cluster est plus robuste aux changements topologiques causés par la mobilité, la défaillance, l'insertion ou la suppression des nœuds. Dans ce contexte, dans notre modèle proposé (AKCA), le réseau est divisé en plusieurs groupes. Chacun a sa propre tête de cluster (CH) qui effectue la collecte, le traitement et la transmission de données. Périodiquement, le CH diffuse son identité et la liste de ces membres (CMs) vers tous les voisins. Les CHs sont liés via des nœuds de passerelle (avant, arrière) pour fournir une connectivité réseau globale. La passerelle qui relie les clusters doit appartenir à une zone de chevauchement.

S'il y a plusieurs nœuds dans cette zone, nous choisirons celui ayant la plus grande similarité totale (similarité avec CH1 + similarité avec CH2). Un nœud devient un CH s'il a le poids le plus élevé sur la base de plusieurs métriques détaillées ci-dessous. Périodiquement, chaque nœud calcule et envoie son poids au CH. Ensuite, le nœud ayant un poids supérieur à celui du CH actuel sera annoncé comme un coordinateur substituant. Dans ce cas, la phase de maintenance du cluster sera déclenchée automatiquement. D'autre part, pour surmonter le problème de la tempête de diffusion périodique, chaque nœud communique seulement avec son CH. En cas de mutation sur n'importe quel état de nœud (position, direction, vitesse ...), le CH doit informer les membres de tels changements. Un nœud souhaitant envoyer des données doit ajouter ses informations dans l'entête du paquet avant l'envoi. Enfin, si un nœud quitte la zone de couverture de son CH, il doit en rejoindre un autre. Sinon, après un certain temps "t", ce nœud s'annonce comme un nouveau CH pour former son propre cluster. Le processus de clustérisation est détaillé dans le diagramme états-transitions dans la figure 3.5.

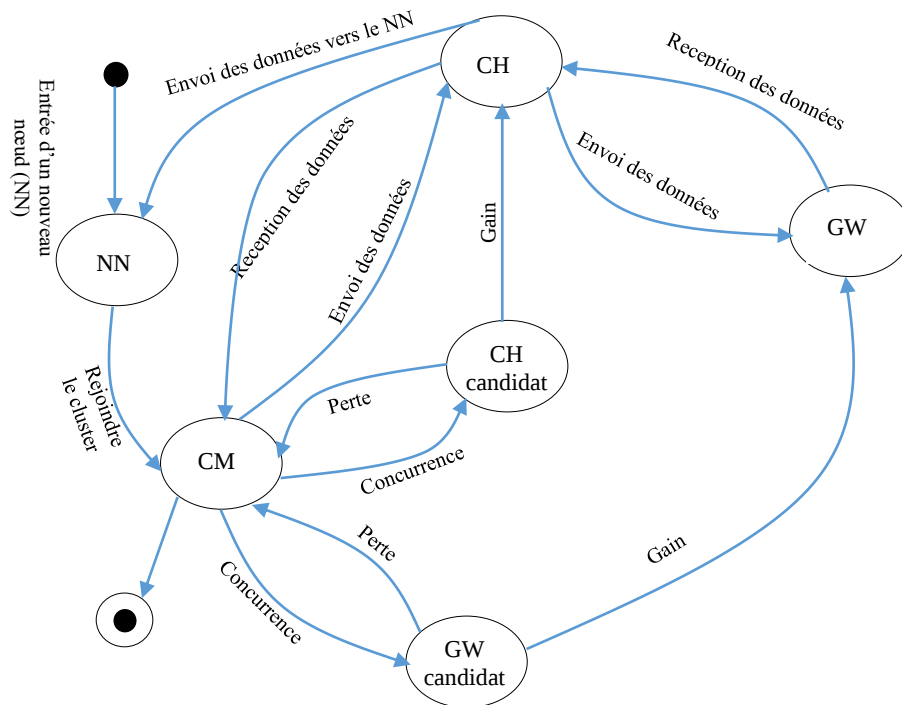


Figure 3.5 Processus de clustérisation du modèle AKCA.

Généralement, l'AKCA proposé se résume en trois contributions principales détaillées ci-dessous.

1. Etape 1. Initialisation

Cette étape consiste à calculer le nombre de clusters initiaux (k), leurs tailles et l'emplacement de leurs CHs. En effet, déterminer la meilleure valeur de k permet de trouver un équilibre entre le nombre de clusters et leurs densités. Il n'y a pas une règle générale qui s'applique à toutes les situations, mais cela dépend de la forme et de la distribution des observations. Nous traitons un scénario autoroutier réel où la congestion du trafic varie d'une zone à l'autre. En sortant de la ville (début de l'autoroute), on trouve généralement un grand nombre de véhicules ayant plusieurs destinations. En conduisant, un grand nombre de véhicules quittent à travers les sorties éparpillées le long de la route. Par conséquent, la densité à l'entrée et à la sortie de l'autoroute est plus grande que celle au milieu comme indiqué dans la figure 3.6.

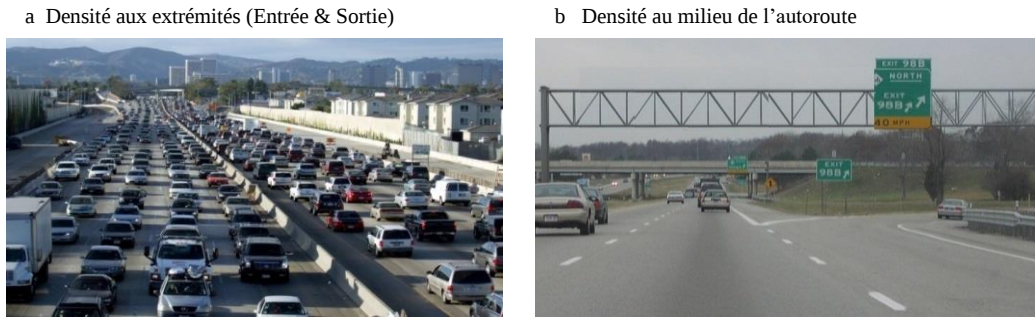


Figure 3.6 Déploiement de véhicules dans un scénario autoroutier réel [109].

A. Calcul du nombre de clusters initiaux

Avant de commencer le processus interne de l'algorithme de clustérisation k-medoids, nous calculons le nombre initial de clusters (k). Cette valeur de K ne sera pas choisie aléatoirement comme d'habitude, mais en utilisant une formule mathématique prenant en compte la longueur de l'autoroute (L) et les plages des transmissions disponibles (TRs) comme indiqué dans l'équation 3.1.

$$k = \left(L / \Sigma(TR) \right) * \text{nombre de plages de transmission utilisées.} \quad (3.1)$$

En adoptant cette méthode, nous garantissons que :

- Le nombre de clusters est suffisant pour couvrir toute la zone traitée de sorte qu'il n'y aurait pas de nœuds isolés.
- La taille du cluster et la plage de couverture utilisée varie inversement à la densité comme le montre la figure 3.7. En effet, plus la densité augmente, plus la taille du cluster diminue.

De même, lorsque la densité diminue, on utilise la plus grande plage de transmission disponible pour former de grands clusters.

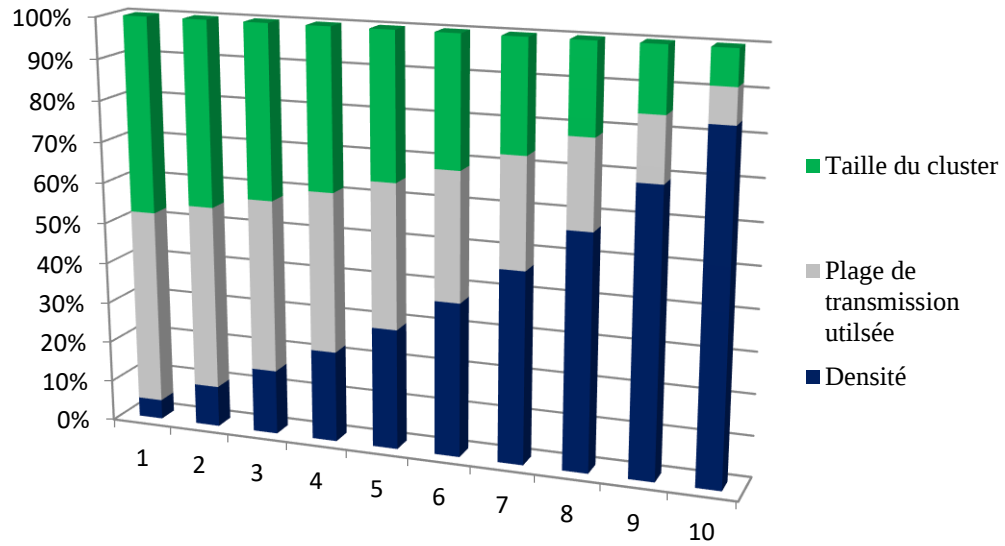


Figure 3.7 Variation de la taille des clusters et de la transmission utilisée en fonction de la densité.

B. Spécification de la taille des clusters initiaux

Pour atteindre la plus grande couverture sans tomber dans la congestion du réseau, nous avons utilisé de grands clusters au milieu de l'autoroute où la densité est faible. La taille de ces clusters est égale à la valeur de la plus grande plage de transmission disponible. Au contraire, en se déplaçant vers les extrémités, où la densité est forte, la taille des clusters diminue progressivement pour prendre la valeur de la plus petite plage de transmission. Voir la figure 3.8.

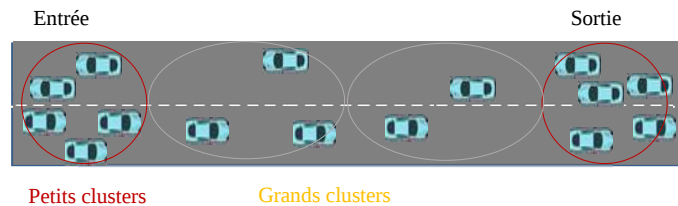


Figure 3.8 Taille des clusters Vs. Densité.

C. Spécifier les emplacements des CHs initiales

Après avoir calculé le nombre de clusters et déterminer leurs emplacements, les CHs initiaux ne seront pas sélectionnés aléatoirement. Mais, les nœuds les plus proches des centroïdes seront désignés des CHs initiaux comme indiqué dans la figure 3.9. Dans un cas égal, le nœud ayant la

plus grande plage de transmission est favorisé. De cette manière, on évite le début indéterminé de l'algorithme k-medoids et on augmente la possibilité de survie des CHs dans leurs clusters.

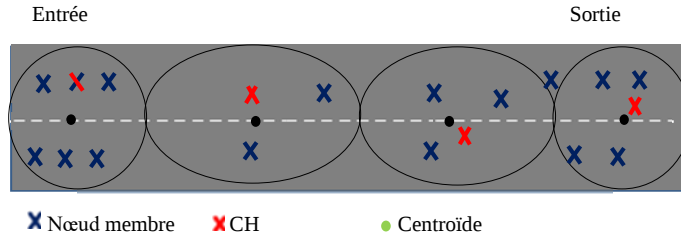


Figure 3.9 CHs initiaux.

Exemple illustratif

Considérons une autoroute de 2000 mètres avec des véhicules ayant des plages de transmission de 200 m, 300 m et 500.

- Calcul du nombre de clusters initiaux.

$$K = \frac{2000}{(200 + 300 + 500)} * 3 = 6 \text{ clusters.}$$

- Spécification des tailles des clusters initiaux.

On utilise de petits clusters de taille 200 m dans les zones denses et de grands clusters (500 m) dans les zones clairsemées.

- Spécifier les emplacements des CH initiaux.

Le centroïde de chaque cluster forme le CH initial comme indiqué dans la figure 3.10.

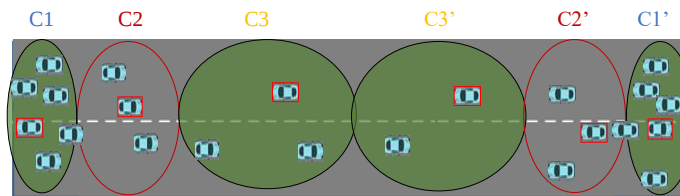


Figure 3.10 Initialisation

2. Etape 2. Formation des clusters

Avant d'affecter un nœud à un cluster, on calcule sa similarité par rapport à la tête de cluster correspondante. Cette valeur est une estimation de la durée pendant laquelle ce nœud peut survivre dans le cluster même lorsqu'un événement inattendu se produit (accélération, freinage, rupture, ...). Par conséquent, dans notre algorithme, la possibilité qu'un véhicule rejoigne un

groupe dépend de sa valeur de similarité (SV). Cette fonction est calculée en fonction de la direction (D), de la différence la vitesse (RS) et de la proximité(ΔP), comme indiqué ci-dessous.

$$SV = (w_1 * D) - \left(w_2 * \frac{RS}{Max(speed)} \right) - \left(w_3 * \frac{\Delta P}{Max(tr)} \right) \quad (3.2)$$

Dans lequel w_1 , w_2 et w_3 reflètent l'importance relative de D , RS et ΔP . Ces poids sont proposés par l'utilisateur suivant les caractéristiques de la route choisie.

1. Calcul de D : D est une variable booléenne utilisée pour déterminer si le véhicule a la même direction que le CH. Chaque véhicule connaît sa position, sa direction et sa vitesse grâce au GPS.

2. Calcul du RS : RS reflète la différence de vitesse entre le nœud i et son CH à un instant donné " t ".

Soit $\vec{V}_i(t)$ le vecteur de vitesse du nœud i à l'instant " t ". La valeur du RS est défini comme suit.

$$RS(i, ch, t) = |\vec{V}_i(t) - \vec{V}_{ch}(t)| \quad (3.3)$$

Où la mobilité de n'importe quel nœud (v) est calculée selon l'équation (3.4) [110].

$$M_v = \frac{1}{T} * \sum_{t=1}^T \sqrt{(X_t - X_{t-1})^2 - (Y_t - Y_{t-1})^2} \quad (3.4)$$

3. Calcul de ΔP : ΔP reflète la proximité du nœud au CH.

Où la distance entre deux nœuds A (X_a , Y_a) et B (X_b , Y_b) à un instant donné " t " est calculée comme suit :

$$AB = \sqrt{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2} \quad (3.5)$$

3. Etape 3. Maintenance de clusters

Dans un scénario autoroutier, les nœuds se déplacent à grande vitesse, cette mobilité provoque des déconnexions intermittentes et, par conséquent, des coûts supplémentaires. Pour résoudre ce problème, on a divisé la phase de maintenance du cluster en deux étapes (commutation du CH et ré-clustérisation).

A. Commutation de la tête du cluster

Pour de nombreuses raisons, la tête du cluster doit être remplacée de temps en temps. Ainsi, une vérification régulière est nécessaire pour trouver le meilleur nœud substituant. Dans AKCA, le comportement du CH doit être le plus proche possible du comportement de tous les nœuds membres. Par conséquent, sur la base de plusieurs métriques, le nœud ayant le plus grand poids

devient le nouveau CH (équation 6). De même, pour maximiser la durée de vie du nouveau CH, nous voulons exclure les nœuds ayant un comportement volatile et suspect en raison de leurs impacts négatifs sur la stabilité du cluster. A notre connaissance, notre modèle est le premier qui intègre une nouvelle métrique appelée "fréquence de déconnexion du nœud" (FDN). Cette métrique permet de filtrer les nœuds en fonction de leur comportement précédent.

$$W = \alpha * D - \partial \Delta S + \beta * Tr - \delta FDN + \mu PM \quad (3.6)$$

Où α , ∂ , β , δ et μ reflètent l'importance relative de D , ΔS , Tr , FDN et PM .

1. **Direction (D)** : fondamentalement, le véhicule ayant la même direction que la majorité des nœuds dans la même zone est plus susceptible d'être le leader.

Aux entrées sorties des autoroutes et aux stations de péage par exemple, la vitesse diminue considérablement. Coïncidant avec cette baisse de vitesse, l'importance de la métrique direction doit diminuer et même atteindre zéro lorsque les véhicules s'arrêtent. Pour ce faire, on a exprimé D en fonction de la variable " γ ". De cette manière ($D = D * \gamma$), lorsque la vitesse diminue, γ diminue et l'effet de la métrique "direction" sera réduit.

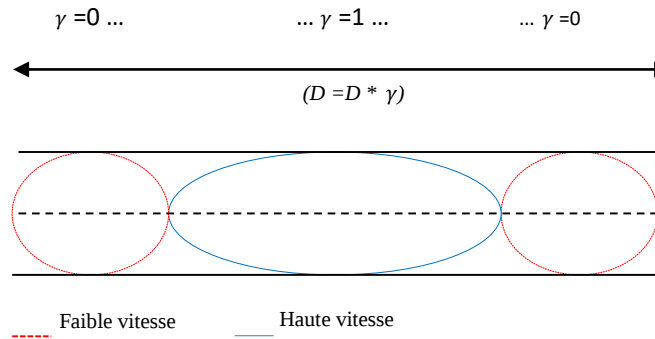


Figure 3.11 Valeur de la métrique direction en fonction de la vitesse.

2. **Vitesse (ΔS)** : représente la différence de vitesse d'un nœud par rapport aux autres nœuds du même cluster [111]. En effet, le nœud dont la vitesse est la plus proche de la vitesse moyenne de tous les membres du cluster sera le plus favorisé.

$$\text{Où : } - \text{La vitesse moyenne } \overline{RS} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T RS(i,j,t)}{P} \quad (3.7)$$

– P est le nombre de tuples (i, j, t) , avec $RS(i, j, t) \neq 0$.

3. **Plage de transmission (Tr)** : pour couvrir un grand nombre de véhicules dans des zones clairsemées, le nœud ayant une grande portée de transmission est privilégié. Par contre, dans

une zone dense, le cluster doit avoir une petite taille, ainsi tous les nœuds peuvent jouer le même rôle. Cela signifie que l'effet de "Tr" diminue progressivement en se déplaçant vers une zone dense. Pour cela, on applique la même règle et on calcule Tr en fonction de « γ_2 » qui exprime la densité : ($Tr = Tr * \gamma_2$).

- 4. Fréquence de Déconnexion du Nœud (FDN) :** la fréquence de déconnexion d'un nœud reflète sa stabilité dans le cluster. Fondamentalement, plus le comportement d'un nœud est proche du comportement des autres nœuds membres, plus il est qualifié pour être un CH. Cela signifie que si la FDN augmente, la probabilité d'être un CH diminue (figure 3.12). En effet, si on réussit à sélectionner le nœud le plus stable comme un CH, on garantit une diffusion efficace des données et par conséquent moins de retards et moins de coûts généraux.

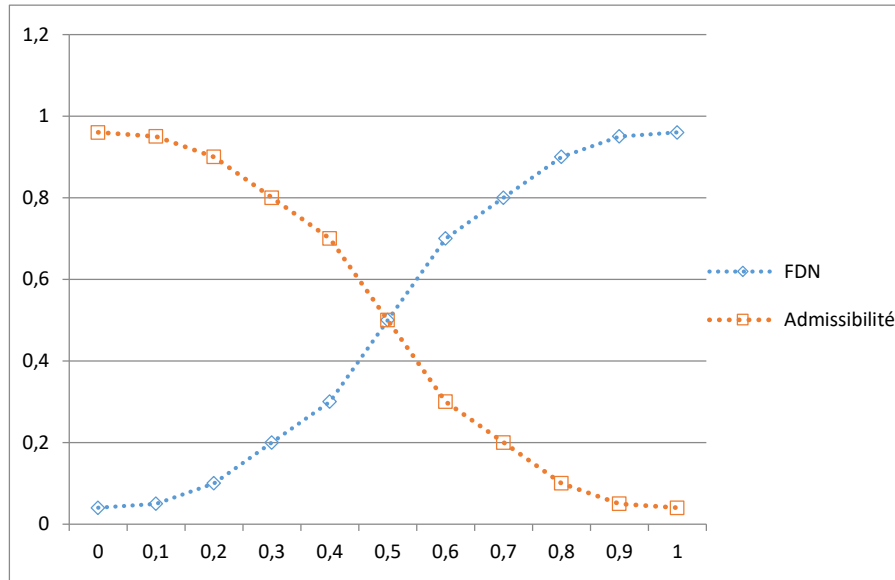


Figure 3.12 Impact de la FDN sur le choix du CH.

- 5. PM : Proximité moyenne :** désigne la distance moyenne D_{moy} du nœud candidat "nc" par rapport à tous les membres du cluster [112]. Elle peut être calculée en utilisant l'équation 8. En effet, plus le nœud est distant par rapport aux autres (isolé), moins il est admissible à être un CH.

$$D_{moy} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N D_{nc,i} \quad (3.8)$$

Où $D_{nc,i}$ est la distance entre le nœud candidat "nc" et le nœud i.

B. Re-clusterisation

Tant que le réseau n'atteint pas la stabilité, la phase de re-clusterisation doit être déclenchée automatiquement avec toute commutation du CH. En effet, l'organigramme dans la figure 3. 13 décrit le processus du modèle proposé AKCA.

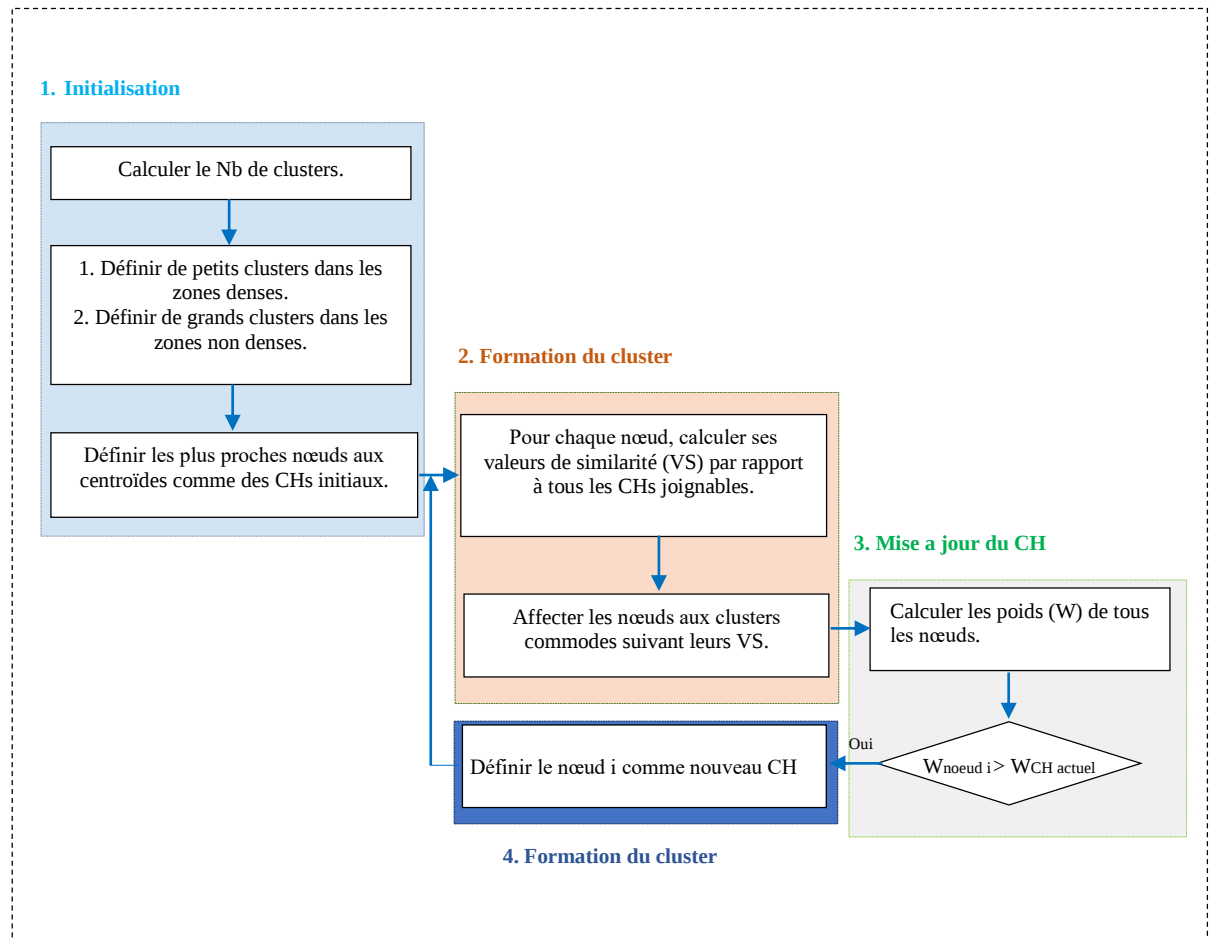
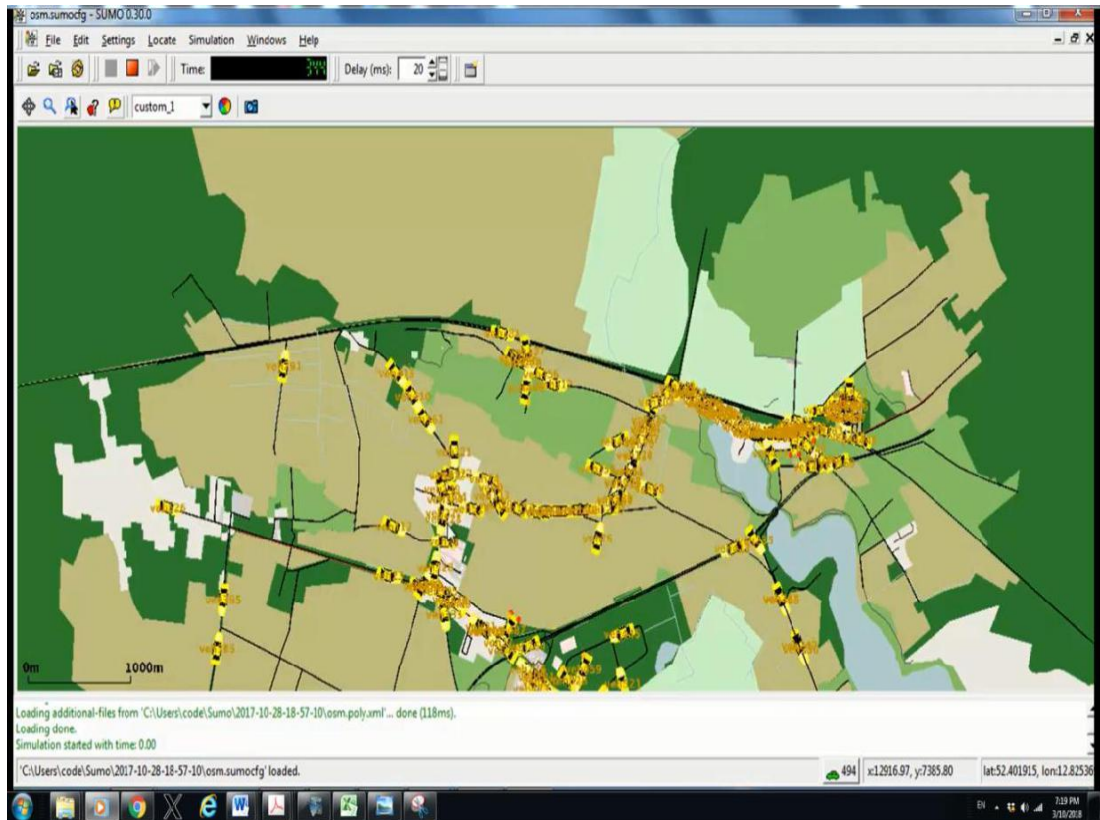


Figure 3.13 Flow chart du modèle AKCA.

3.5 Résultats expérimentaux et analyse

Pour évaluer la performance de notre protocole, des simulations ont été effectuées avec OMNeT ++ 5.0 [113]. Nous avons mené des expérimentations dans un scénario autoroutier en faisant varier la densité et la vitesse. Comme indiqué dans la figure 3.14, nous avons utilisé la carte des rues ouvertes (open street map) pour créer un modèle de trafic réel de l'autoroute A10. Cette autoroute s'étend sur 549 km entre l'A6 au sud de Paris et l'A630 à Bordeaux [114].



3.14 Modèle de trafic de l'autoroute A10.

Nous avons effectué une analyse minutieuse en fonction de plusieurs métriques. Notre contribution est comparée à la fois aux protocoles centralisés et distribués conçus pour le même objectif : SOCDV (Stability Oriented Cluster Dynamism Protocol) [95] et OLSR-C (Optimized Link State Routing Clustering) [103].

a. **Le taux de livraison des paquets (PDR) :** c'est le rapport des paquets livrés avec succès à la destination par rapport au nombre de paquets envoyés par la source [115].

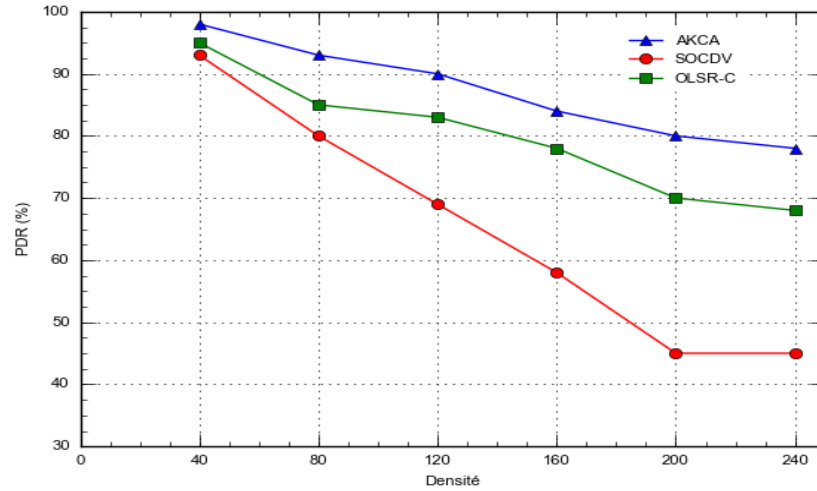


Figure 3.15 PDR vs Densité.

La figure 3.15 montre le taux de livraison des paquets pour différentes densités. Comme observé, notre modèle surpasse à la fois le SOCDV et l'OLSR-C en terme de PDR. Cette efficacité est due à l'ajustement automatique de la taille du cluster et la portée de transmission utilisée en fonction de l'état de la route. En effet, pour SOCDV et OLSR-C, la densité élevée crée un flot de messages supplémentaire pour trouver le meilleur chemin de la source vers la destination. Cette profusion de diffusion entraîne une congestion importante, d'où de nombreux paquets seront abandonnés par le nœud maître. Par exemple, pour SOCDV et OLSR-C, la perte dépasse respectivement 50% et 30% dans les zones denses. En contrepartie AKCA maintient sa performance indépendamment de l'état du réseau, et le taux des paquets abandonnés ne dépasse pas 22% dans le pire des cas.

b. **Délai de bout en bout** : c'est le temps nécessaire pour envoyer des paquets de la source à la destination [116].

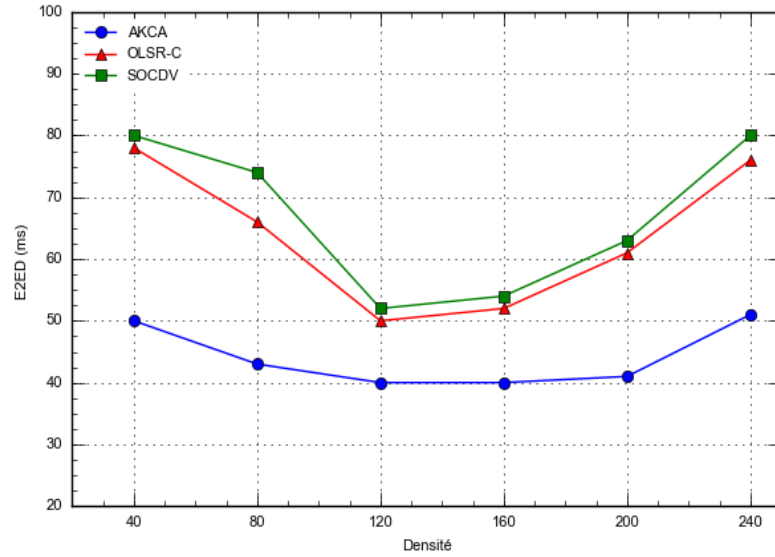


Figure 3.16 E2ED vs Densité.

La figure 3.16 présente une comparaison entre les protocoles AKCA, SOCDV et OLSR-C en termes de délai de bout en bout. Le résultat montre que notre protocole offre moins de temps de propagation quel que soit la densité. Dans les zones denses, le nombre important de nœuds relais entre la source et la destination provoque une utilisation de bande passante élevée avec une augmentation automatique du délai de retransmission. En retour, AKCA a surmonté cette difficulté en s'appuyant sur de petits clusters avec moins de nœuds membres. Par exemple, lorsque la vitesse diminue et que la densité devient le principal défi, le délai dans SOCDV et OLSR-C augmente pour atteindre respectivement 80 et 76 ms. AKCA maintient une bonne performance et le retard ne dépasse pas 50 ms.

Dans les zones clairsemées, la connectivité intermittente causée par la haute vitesse affecte les performances de tous les modèles. Pour atténuer cet impact négatif, AKCA utilise la vitesse des véhicules comme un support pour accélérer la transmission des données

c. **Débit** : c'est le taux de données délivrées avec succès sur un canal de communication [117].

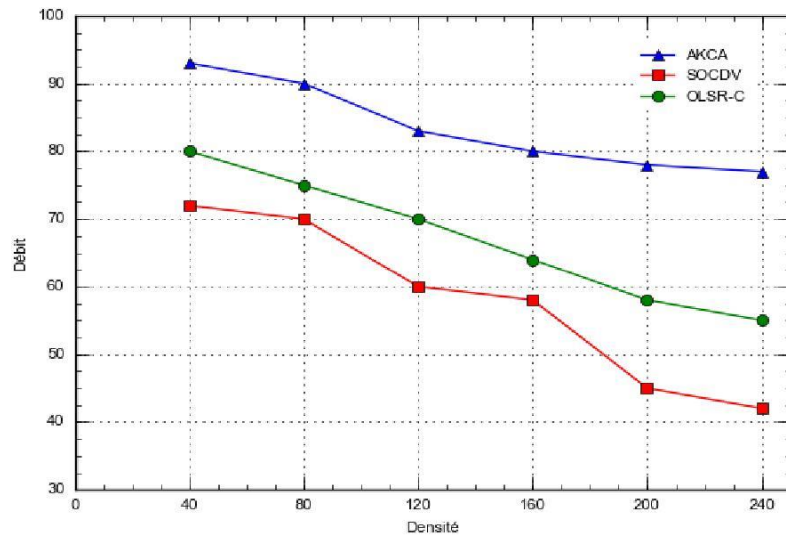


Figure 3.17 Débit vs Densité.

La figure 3.17 compare l'impact de la densité sur le débit pour tous les modèles. En effet, les protocoles SOCDV et OLSR-C ont les débits les plus faibles notamment dans les zones denses en raison de l'incapacité de la bande passante disponible à faire face au grand nombre de paquets de contrôle. Pour surmonter ce défi de densité, AKCA forme plusieurs clusters avec des coordinateurs séparés. Cette procédure va réduire l'encombrement vers le réseau principal et chaque CH prend la responsabilité d'échanger les paquets de données entre les véhicules voisins. Généralement, l'encombrement du trafic est une fonction non linéaire. Par conséquent, toute réduction du flux de trafic réduit les collisions et permet une augmentation significative du débit. Avec les meilleures conditions routières, la situation évolue rapidement et le taux de réussite des messages délivrés sur un canal de communication augmente progressivement. Par exemple, en réduisant la densité de 240 à 120 véhicules, les débits de SOCDV et d'OLSR-C sont améliorés respectivement de 18% et 15%. Comme observé sur le même graphique, AKCA s'avère le plus performant avec une différence moyenne de performance de 17% par rapport à OLSR-C et de 26% par rapport à SOCDV.

d. **Durée de vie du CH** : c'est le temps continu pendant lequel un nœud agit comme un CH. Il indique la stabilité du modèle de clustérisation. En effet, plus la durée de vie est longue, plus le réseau est stable [118].

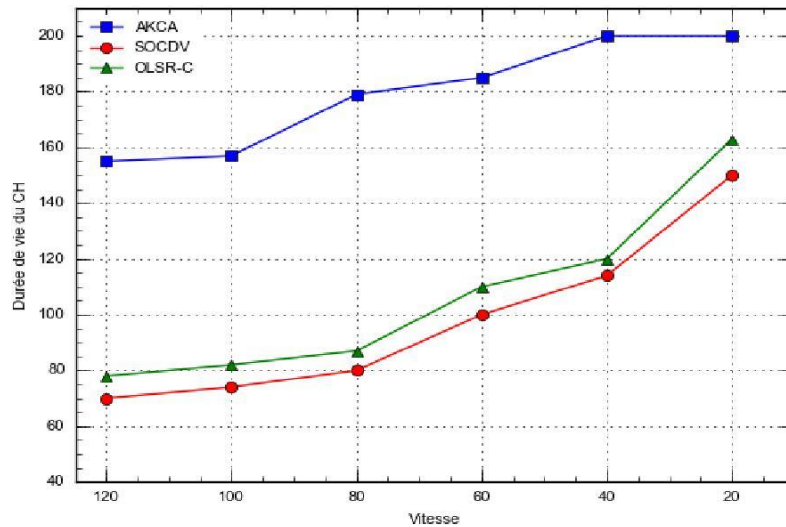


Figure 3.18 Durée de vie du CH vs Vitesse.

La figure 3.18 compare la durée de vie du CH de notre modèle avec celles de SOCDV et d'OLSR-C. En variant la vitesse de 20 à 120 km/h, on voit que la durée de vie du CH diminue à mesure que la vitesse du véhicule augmente. La raison de ce comportement est que, en coïncidant avec une grande vitesse, la topologie du réseau devient plus dynamique et le CH perd plusieurs connexions avec ses voisins. On voit qu'AKCA atteint une durée de vie du CH plus longue dans toutes les situations. Par exemple, avec une vitesse de 120 km/h, AKCA surpasse les autres modèles d'environ 50%. D'autre part, la légère diminution de la durée de vie du CH de notre protocole prouve sa capacité à maintenir la stabilité même dans une zone clairsemée où la vitesse peut dépasser 120 km/h. Cette distinction est due au fait qu'avec une vitesse élevée, le nœud ayant la plus grande portée de transmission est conçu comme un CH pour couvrir un nombre maximal de voisins. Par exemple, lorsque la vitesse passe de 20 km/h à 80 km/h, nous utilisons la plus grande plage de transmission disponible et la durée du CH ne diminue que de 2%, alors que les autres modèles perdent environ 50% de leurs performances.

e. **Durée de vie des CMs** : c'est la durée de vie moyenne des nœuds dans un cluster avant de quitter ou devenir un CH. Elle est exprimée en secondes et dépend fortement de la façon dont les clusters sont formés [119].

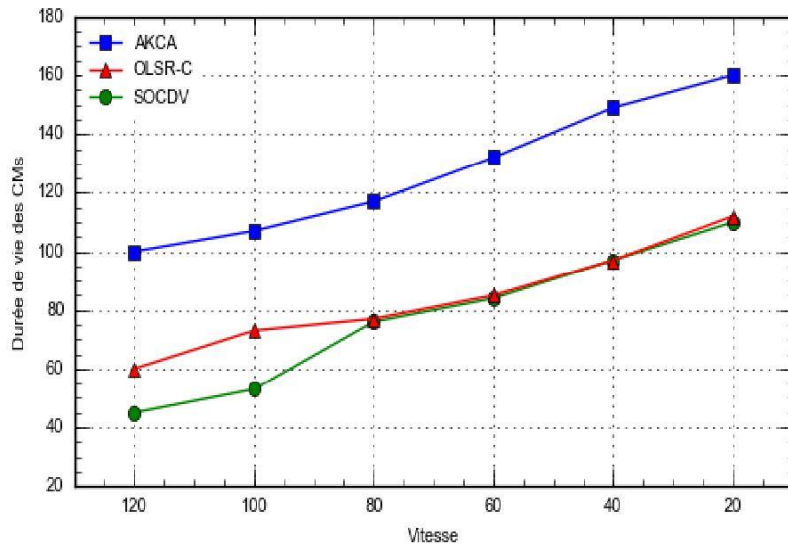


Figure 3.19 Durée de vie du cluster vs Vitesse.

D'après les résultats décrits dans la figure 3.19, on observe que l'algorithme AKCA surpasse les autres approches en termes de durée de vie moyenne des CMs pour différentes vitesses. En effet, la durée de vie des CMs diminue lorsque la vitesse des véhicules augmente. Ce comportement est une conséquence inévitable de la perte du CH de certaines de ses relations avec les voisins et de son incapacité à maintenir sa propriété en tant que coordinateur. En effet, la transition d'un coordinateur à un nœud ordinaire conduit à une modification du backbone du cluster. Cette modification déclenche automatiquement la phase de maintenance, ce qui donne à tous les CMs la possibilité de rejoindre un autre cluster. Ainsi, la grande vitesse d'un nœud ordinaire lui permet d'entrer dans la plage d'un autre CH et donc la possibilité de fusionner avec lui. En effet, la survie d'un nœud au sein de son cluster est directement affectée par son statut et par le statut du CH. Ainsi, il sera difficile pour un nœud de conserver son appartenance à un cluster spécifique pendant longtemps. Pour éviter ce défi provoqué par les transitions fréquentes des CHs en des CMs, nous avons introduit une nouvelle métrique appelée "Fréquence de déconnexion des nœuds". Sur la base de cette mesure, les nœuds instables ne seront pas élus comme CHs. Par conséquent, leurs comportements suspect et volatile n'affectent pas la stabilité globale du réseau. Suite à cette procédure, la performance d'AKCA dépasse celles des autres approches d'environ 30% dans toutes les situations. Par exemple, à une vitesse de 120 km/h, AKCA atteint une durée de vie moyenne

des CMs de 100 secondes, tandis que la durée de vie des CMs dans les autres modèles ne dépasse pas 50 secondes. De plus, lorsque la vitesse diminue et atteint 20 km/h, notre modèle garde sa supériorité et la différence de stabilité reste d'environ 50 secondes.

f. Degré moyen de dépendance spatiale (DMD_{spatiale}) :

C'est une métrique de mobilité, elle mesure l'impact de la mobilité sur les performances des protocoles de routage. En effet, DMD_{spatiale} est la moyenne arithmétique du degré de dépendance de toutes les paires de nœuds du réseau [112]. Plus les nœuds ont un comportement similaire, plus cette valeur est grande.

- $DMD_{spatiale} = Moyenne (somme(DD_{spatiale}(i, j, t))) \quad (3.9)$

Ou $DD_{spatiale}(i, j, t)$ est le degré de dépendance spatiale entre deux nœuds i et j .

Avec

- $DD_{spatiale}(i, j, t) = RD(\vec{V}_i(t), \vec{V}_j(t)) * SR(\vec{V}_i(t), \vec{V}_j(t)) \quad (3.10)$

- $RD(\vec{V}_i(t), \vec{V}_j(t)) = \frac{\vec{V}_i(t) \cdot \vec{V}_j(t)}{|\vec{V}_i(t)| * |\vec{V}_j(t)|}$ désigne la direction relative entre les deux vecteurs $\vec{V}_i(t)$ et $\vec{V}_j(t)$.

- $SR(\vec{V}_i(t), \vec{V}_j(t)) = \frac{\min|\vec{V}_i(t)|, |\vec{V}_j(t)|}{\max|\vec{V}_i(t)|, |\vec{V}_j(t)|}$ désigne le rapport de vitesse entre les deux vecteurs $\vec{V}_i(t)$ et $\vec{V}_j(t)$.

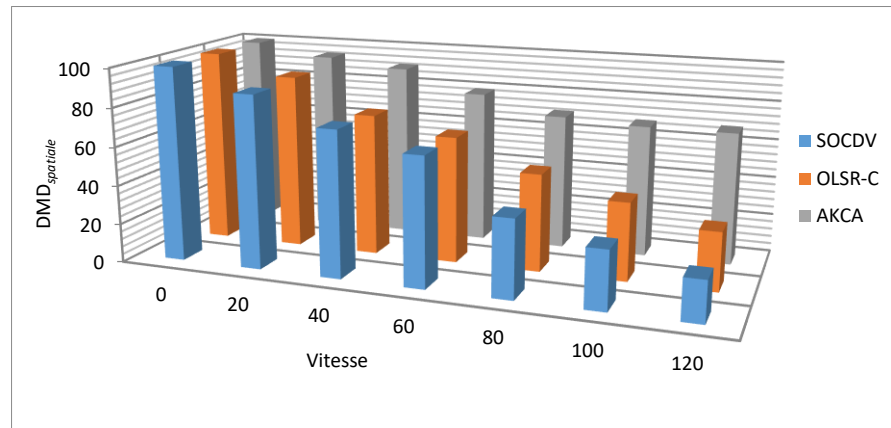


Figure 3.20 Degré moyen de dépendance spatiale.

Nous relevons dans la figure 3.20 que la vitesse affecte négativement la dépendance spatiale entre les nœuds. En cas d'arrêt (vitesse nulle), les nœuds ont le même comportement, dès lors que la vitesse augmente cette similarité diminue considérablement pour les deux modèles OLSR-C et

SOCDV. Avec une vitesse de 120 km/h, cette similarité du point de vue mobilité ne dépasse pas 30%. Cette corrélation faible entre les nœuds résulte une courte durée de vie des liens d'où une faible stabilité. Pour que les nœuds suivent globalement la même trajectoire, on a divisé le réseau en un ensemble de clusters de différentes tailles interagissant entre eux. Suivant divers métriques, chaque cluster contient les nœuds les plus similaires et donc la durée de vie des connexions sera plus élevée. Par exemple avec une vitesse de 100 km/h, notre modèle réalise une dépendance de 70% alors que celles d'OLSR-C et SOCDV ne dépassent pas respectivement 40% et 30%.

3. 6 Conclusion

En raison de la grande mobilité des nœuds et de la diversité des environnements de routage (urbain, résidentiel, autoroutier, ...), la stabilité du réseau est un défi majeur. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une nouvelle solution basée sur l'algorithme de clustérisation k-medoids. Notre modèle (AKCA) utilise un ajustement automatique de la taille des clusters en fonction des conditions de la route. Trois améliorations majeures ont permis à AKCA de persister quel que soit l'état du réseau.

Tout d'abord, le nombre de clusters et leurs CHs initiaux ne seront pas sélectionnés aléatoirement comme d'habitude, mais nous prenons en compte des métriques supplémentaires, y compris la longueur de l'autoroute et les plages de transmission. En évitant le démarrage en aveugle, le modèle proposé peut atteindre la stabilité du réseau dans un délai minimum.

Deuxièmement, à notre connaissance, AKCA est le premier modèle qui intègre une nouvelle métrique appelée «fréquence de déconnexion du nœud» en phase de commutation des CHs. Cette procédure donne un aperçu de la stabilité de n'importe quel nœud avant d'être élu en tant que nouveau CH. Si le comportement de ce nœud est caractérisé par une fluctuation ou un manque de stabilité, il sera automatiquement exclu.

Troisièmement, si le CH perd sa propriété en tant que coordinateur, un processus de maintenance du réseau est lancé automatiquement pour faire face à toutes les défaillances de liaison inattendues et pour fournir des solutions de remplacement.

Des simulations présentent une comparaison de notre modèle avec des algorithmes conçus par le même objectif (OLSR-C et SOCDV) sous différentes combinaisons de densité et de vitesse. Les résultats montrent que notre algorithme AKCA se comporte mieux dans toutes les situations.

Dans le chapitre suivant, nous allons améliorer le comportement de notre modèle en utilisant des métaheuristiques, en particulier lors de la formation des clusters et l'élection des CHs.

Chapitre 4

Amélioration du modèle de routage AKCA

Sommaire

4.1. Introduction.....	79
4.2. Travaux antécédents.....	80
4.3. Fondements théoriques du modèle amélioré (E -AKCA).....	82
4.4. Approche proposée.....	87
4.5. Simulation et évaluation.....	92
4.6. Conclusion.....	103

Résumé

Certaines caractéristiques des réseaux ad hoc de véhicules, telles que la grande mobilité et la connectivité intermittente, font du routage un problème NP-difficile [120]. Les protocoles développés jusqu'à présent ne parviennent pas à atteindre une stabilité satisfaisante pour tous les scénarios. Pour résoudre cette difficulté, les chercheurs divisent le réseau en plusieurs zones appelées clusters. Chaque cluster contient un sous-ensemble de nœuds qui communiquent via leurs coordinateurs élus (CHs). La détermination du cluster le plus approprié pour les nœuds frontaliers (appartenant aux zones de chevauchement), est la décision la plus délicate. En effet, une mauvaise affectation peut réduire l'efficacité de l'algorithme et perturber tous les résultats et les analyses. Dans ce chapitre, nous hybridons la RT avec l'AG pour améliorer la phase de maintenance des clusters dans notre modèle AKCA. L'idée de base est d'améliorer l'affectation des nœuds frontaliers aux clusters pour une communication efficace entre les véhicules et pour assurer une bonne stabilité dans l'architecture en cluster. Nous avons exploité la capacité de recherche globale de l'AG pour assurer la diversification, et la capacité de recherche locale de la RT pour permettre l'intensification. Cette hybridation garantit le balayage de tout l'espace de recherche et permet de trouver les meilleures solutions sans tomber dans les optima locaux. Sur la base de plusieurs

métriques, les résultats obtenus dans un jeu de simulation montrent que le modèle amélioré E-AKCA (Enhanced-AKCA) permet plus de stabilité et de robustesse par rapport à l'algorithme original (AKCA) et à d'autres modèles conçus pour le même objectif.

4. 1 Introduction

Dans les réseaux véhiculaires, les nœuds n'ont aucune limitation en termes d'énergie et de stockage. En roulant chaque véhicule produit une énergie continue permettant une capacité de traitement élevée [121]. Malgré ces avantages, la grande mobilité des nœuds affecte négativement la connectivité et provoque une transition inattendue d'un environnement à un autre [122]. Sachant que chaque environnement diffère des autres par sa densité et sa vitesse comme le montre le tableau 4.1, il est très difficile de trouver un protocole spécifique capable de faire face à cette variation rapide.

Tableau 4.1 Environnements VANET.

Environnement	Densité	Mobilité	Vitesse
Centre-ville	Très haute	Faible	0-50 km/h
Résidentiel	Elevée	Moyenne	30-70 km/h
Urbain	Moyenne	Élevée	50-90 km/h
Autoroute	Faible	Très haute	80-120 km/h

Pour les raisons citées ci-dessus, le routage dans les réseaux véhiculaires peut être réduit à un problème d'optimisation pour trouver la meilleure solution parmi tous les candidats possibles [123]. La nécessité d'atteindre l'optimum global avec un coût raisonnable, conduit les chercheurs à utiliser des méthodes approchées appelées métaheuristiques [124]. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, ces méthodes permettent d'explorer et d'exploiter l'espace de recherche pour trouver efficacement des solutions quasi optimales. Considérant l'équilibre entre l'intensification et la diversification, nous avons développé dans ce chapitre un modèle hybride pour améliorer la phase de maintenance des clusters dans notre algorithme de clustérisation AKCA. En effet, dans un réseau à haute densité, les zones de chevauchement contiennent plusieurs nœuds pouvant communiquer avec plus qu'un CH. Ce fait provoque une avalanche de messages de contrôle et consomme plus de ressources (bande passante). Notre contribution permet de mieux gérer ces zones afin de réduire la congestion des canaux et d'échanger les informations entre les clusters dans les meilleurs délais.

Le reste de ce chapitre est structuré comme suit. Une vue d'ensemble des travaux récents est présentée dans la section 2. La section 3 présente les fondements théoriques utilisés pour améliorer le modèle AKCA. La section 4 détaille le processus interne du nouveau modèle amélioré (E-AKCA). La section 5 décrit la configuration de la simulation et l'analyse des résultats. Enfin, la section 6 conclut le chapitre.

4. 2 Travaux antécédents

Au cours de la dernière décennie, de nombreux chercheurs ont abordé le problème de routage dans les réseaux ad hoc de véhicule. Mais en raison des défis qui y sont associés, les solutions proposées restent insatisfaisantes par certains aspects [125]. Pour cela, les chercheurs ont utilisé les métaheuristiques pour surmonter ces pénuries, et de nombreux articles ont été publiés dans des revues et des conférences [126]. Dans cette section, nous étudions les solutions combinant les métaheuristiques avec les techniques de clustérisation.

Par exemple, M. Fathian et al. [127] ont proposé un algorithme de clustérisation où chaque véhicule agit comme une fourmi. Cinq étapes résument ce modèle.

1. *Sous-clustérisation* : diviser chaque cluster en sous-clusters.
2. *Fusion des véhicules* : pour chaque sous-cluster, fusionner les véhicules les plus similaires
3. *Fusion des clusters* : fusionner les sous-clusters ayant une distance intra-cluster minimale.
4. *Filtrage* : chercher et supprimer les nœuds ayant une grande dissemblance par rapport à la collection.
5. *Sélection des CHs* : le véhicule le plus proche du centre du cluster est élu en tant que tête de cluster.

Dans [128], S. S. Kumar et al. ont utilisé l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles pour regrouper les nœuds dynamiquement à travers trois étapes.

1. *Formation des clusters* : les nœuds sont affectés aux clusters en fonction de leurs valeurs de similarité et de dissemblance.
2. *Formation des modèles* : les unités de bord de route (RSUs) regroupent les véhicules en trois différents modèles suivants les critères de distance, de vitesse et de voisinage. On trouve donc, le modèle de cluster basé sur la vitesse, le modèle de cluster basé sur la distance et le modèle de cluster basé sur le voisinage.
3. *Mesure de performance* : les clusters sont évalués en fonction de leurs distances inter et intra-cluster.

Dans [129], S. Harrabi et al. ont proposé un algorithme de clustérisation NCABAT (Novel Clustering Algorithm Based on Agent Technology for VANET) où chaque véhicule est remplacé par un agent avec des intérêts spécifiques (parking, alerte d'accident, jeux, ...). Ainsi, les nœuds sont regroupés en fonction du contexte de leurs informations. Ensuite, les messages seront envoyés uniquement vers les véhicules intéressés. Etant donné qu'un agent est caractérisé par sa capacité à réagir dynamiquement, le véhicule (l'agent) doit percevoir les routes et prendre une décision appropriée lorsqu'il reçoit un message. Pour atteindre cet objectif, les auteurs utilisent trois agents pour chaque cluster.

1. *Agent de tête de cluster* : établit les liens avec les voisins.
2. *Agent de contexte* : responsable de la collecte et de la classification des informations selon les intérêts des véhicules.
3. *Agent d'optimisation* : permet d'optimiser la communication entre les clusters adjacents.

Pour améliorer le fonctionnement du modèle NCABAT dans un environnement clairsemé où les véhicules roulent à grande vitesse, S. Harrabi et al. [130] ont introduit l'algorithme d'optimisation par essaims de particules. Cette métaheuristique est utilisée pour trouver les meilleurs CHs selon trois mesures (distance moyenne, vitesse et degré de nœud).

Dans le même contexte, M. Haddad et al. [131] ont développé un protocole de clustérisation pondéré adaptatif. Ce modèle utilise la position, la direction et la vitesse comme des informations clés. Au début, les auteurs utilisent l'algorithme de clustérisation pondéré WCA (Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks) [132] pour définir un problème d'optimisation multi-objectif. Ensuite, ce problème est traité par l'algorithme génétique trié non dominé 2 (Non Sorting Genetic Algorithm II). Le but est de diminuer le sur débit des clusters et augmenter le taux de livraison de données.

Dans [133], E. Moridi et al. ont proposé un protocole de routage multi-niveaux fiable basé sur la technique de clustérisation. Le but est d'avoir un réseau stable avec un minimum de perte de paquets et d'échec de liaison. Les auteurs ont considéré deux étapes comme suit.

1. Utiliser la logique floue pour assurer une communication fiable au sein des clusters.
2. Utiliser la recherche tabou pour trouver les meilleurs chemins entre les CHs sans tomber dans le piège de l'optimum local.

4.3 Fondements théoriques du modèle amélioré (E-AKCA)

Pour améliorer notre modèle AKCA, nous avons combiné la recherche tabou avec l'algorithme génétique. Les sections suivantes décrivent les concepts et les attributs de ces métaheuristiques.

4.3.1 La recherche tabou (RT)

La RT est une métaheuristique de recherche locale conçue pour résoudre des problèmes complexes de grande taille [134]. C'est une approche itérative qui commence par une solution initiale réalisable [135]. Ensuite, à partir d'une position donnée, la procédure évolue étape par étape pour explorer le voisinage et sélectionner celle qui minimise la fonction objectif. Le processus se poursuit jusqu'à ce que les critères d'arrêt soient satisfaits. Contrairement à d'autres méthodes, la RT utilise la mémoire adaptative pour surmonter le problème des optima locaux. En effet, les listes tabous permettent de sauvegarder les solutions qui sont temporairement interdites pour éviter les mouvements cycliques (backtracking) [136]. A chaque itération, l'algorithme choisit le meilleur voisin non tabou, même s'il dégrade la fonction de coût. Pour cette raison, la recherche tabou est connue comme une méthode agressive.

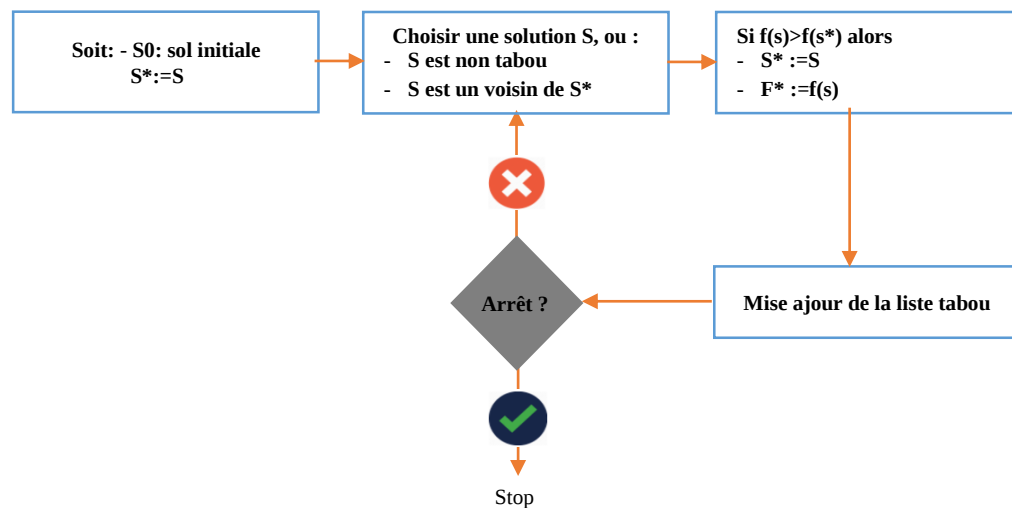


Figure 4.1 Organigramme de la recherche tabou.

4.3.2 L'algorithme génétique (AG)

C'est un algorithme d'optimisation stochastique qui commence par une population de n individus. À chaque itération, trois opérateurs différents (sélection, croisement et mutation) sont appliqués pour générer de nouveaux enfants.

a. La sélection

Cet opérateur permet aux individus d'une population de se reproduire, de survivre ou de mourir. Il y a plusieurs méthodes pour la sélection (tour de roulette, sélection par rang, élitisme, etc.). La méthode la plus populaire est le tour de roulette (Goldberg's (1989) [137]. A chaque individu de la population est associé un secteur d'une roue qui correspond proportionnellement à sa valeur de fitness. Chaque fois qu'on tourne la roue, on obtient un individu [138].

b. Croisement

Le principe est de permuter des informations entre les individus sélectionnés. Tout d'abord, il faut diviser chaque individu sélectionné en deux ou plusieurs segments. Ensuite, les segments des deux parents sont échangés pour fournir de nouveaux enfants [139].

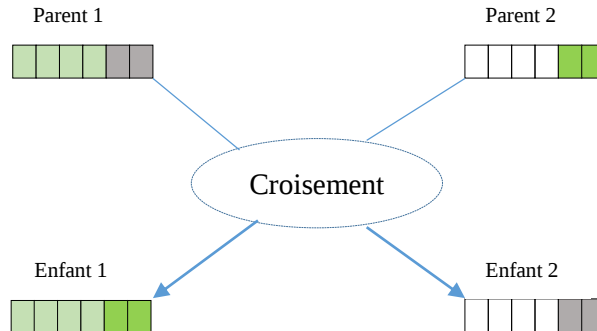


Figure 4.2. Croisement.

c. Mutation

Cet opérateur permet un changement aléatoire de certains individus de la population en modifiant un ou plusieurs gènes. L'individu muté ne sera pas nécessairement le meilleur, mais il offre des opportunités supplémentaires pour créer de bonnes solutions [140].

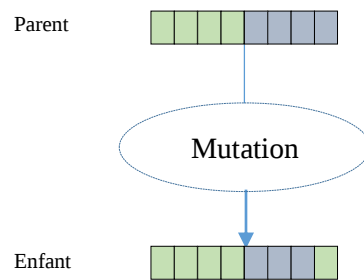


Figure 4.3 Mutation.

4.3.3 Le modèle hybride (AG-RT)

Parfois les méthodes approximatives (métaheuristiques), ne parviennent pas à fournir des solutions optimales dans les meilleurs délais. Par conséquent, les chercheurs ont recours à l'hybridation. Cette technique consiste à établir une coopération entre deux ou plusieurs méthodes pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation combinatoire. Dans ce contexte, nous utilisons un algorithme génétique qui s'hybride avec la recherche tabou pour trouver des solutions optimales et maintenir la diversité des populations. Les sections suivantes prouvent que cette hybridation a des performances supérieures par rapport aux métaheuristiques les plus populaires (AG, PSO et ACO) en termes de temps et de qualité des solutions retournées.

a. Mesure de qualité

Pour comparer la qualité des clusters retournés par certaines méthodes heuristiques dans un environnement véhiculaire, nous avons fait une simulation qui commence avec 50 nœuds distribués aléatoirement dans une zone de (100 x 100) m (figure 4.4.a).

En avançant dans le temps, ces nœuds circulent avec des vitesses et des directions différentes. Ensuite dans la figure 4.4.b, on voit que les CHs sont élus et que les clusters commencent à se former.

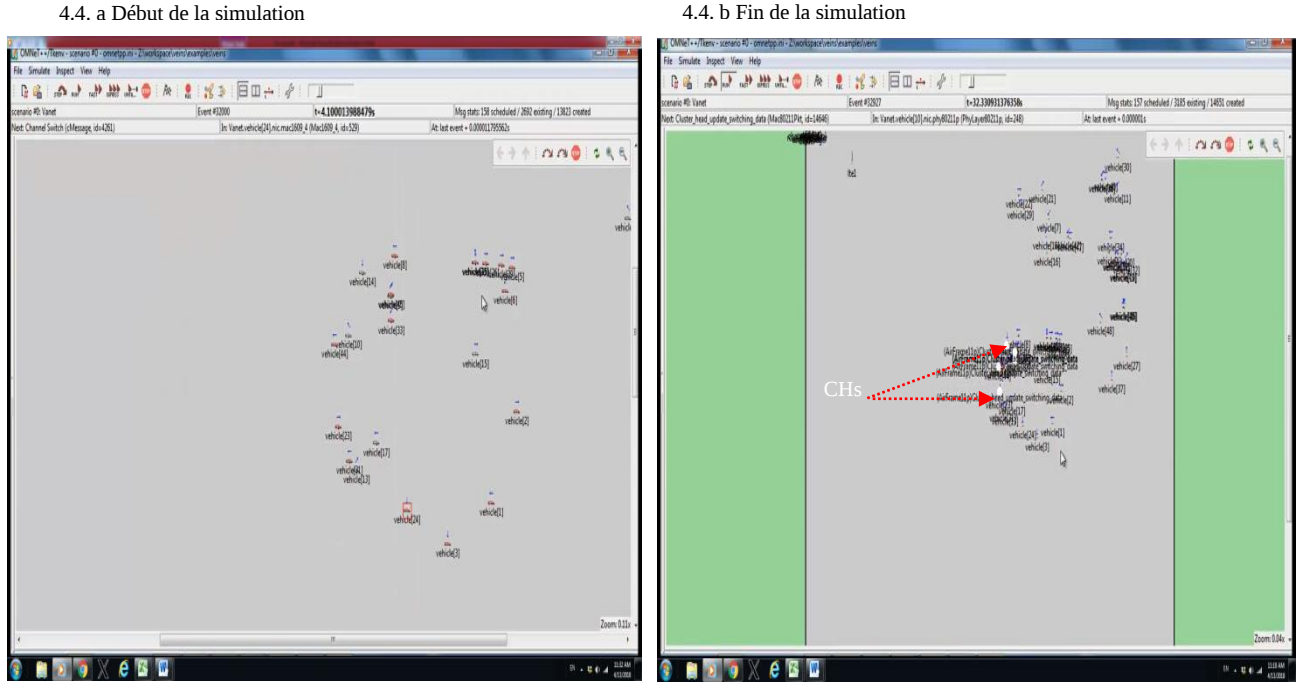


Figure 4.4 Implémentation OMNeT++.

Nous avons fait 50 simulations différentes de 120 s chacune. A chaque fois nous avons calculé la similarité intra clusters fournie par différentes méthodes (AG-RT, AG, PSO et ACO). Par souci d'équité, nous avons utilisé des scénarios de mobilité et de trafic identiques pour les différentes simulations. Puisqu'on cherche à maximiser la stabilité du réseau, il est clair que plus la valeur de similarité est élevée, plus la méthode est efficace.

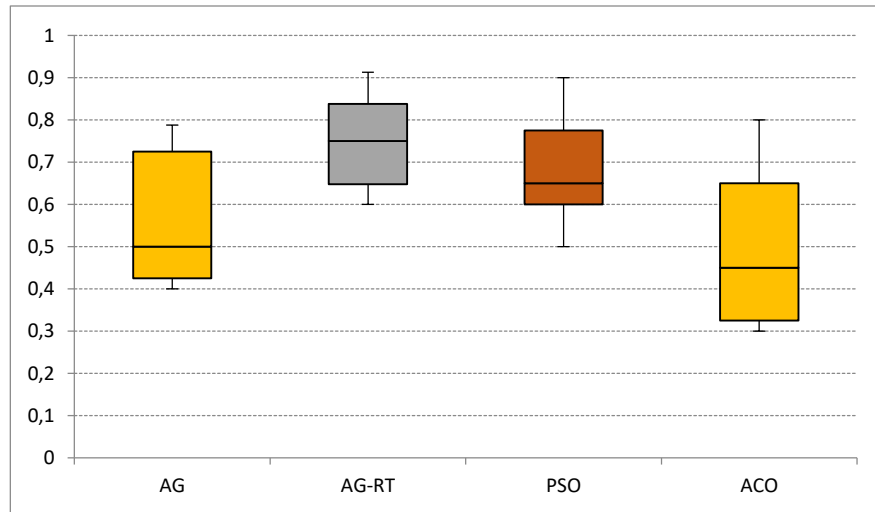


Figure 4.5 Qualité des solutions générées par les méthodes (AG, PSA, ACO et AG-RT).

La figure 4.5 montre dans une représentation boîte à moustache que lorsqu'on hybride l'AG avec la RT on obtient les meilleurs résultats avec une répartition très satisfaisante. Certains clusters retournés ont une similarité égale à 92%. De même, la similarité dans les mauvais clusters reste toujours supérieure à 60%. D'autres méthodes, telles que le PSO, donnent aussi de bonnes solutions avec une qualité de 90%, mais leurs représentations en boîtes indique qu'elles génèrent également des solutions de qualité inférieure à 50% avec une faible répartition. Cette supériorité est un résultat inévitable du compromis entre l'intensification et la diversification que suit notre méthode.

b. Délai de convergence.

Cette métrique détermine le temps mis par une méthode pour trouver la meilleure solution qu'elle peut réaliser.

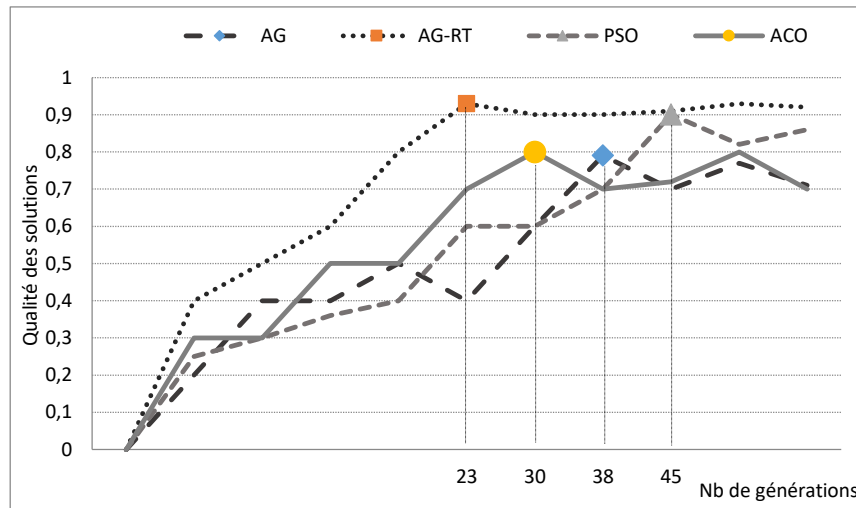


Figure 4.6. Délais de convergence des méthodes (AG, PSA, ACO et AG-R).

La figure 4.6 montre le nombre de générations nécessaires pour chaque méthode pour trouver la meilleure solution. On voit qu'en utilisant l'AG-RT, on peut trouver la meilleure solution uniquement après 23 générations. Contrairement aux autres méthodes ACO, AG et PSO, elles nécessitent respectivement 30, 38 et 45 générations. De même, leurs comportement n'est pas stable et la meilleure solution peut être perdue en avançant dans la simulation.

4. 4 Approche proposée

4.4.1 Problématique

Pour le modèle (AKCA) proposé dans le chapitre précédent, l'attribution d'un nœud à un cluster dépend de leur similarité (SVs). Cette valeur est calculée en fonction de plusieurs métriques (direction, proximité et différence de vitesse). Comme le montre la figure 4.7, dans le scénario autoroutier, deux cas sont possibles lors de la maintenance des clusters.

1. **Véhicule non frontalier** : le véhicule est dans la portée d'un seul CH. Dans ce cas, aucune action n'est autorisée et le véhicule doit rester dans le même cluster.
2. **Véhicule frontalier** : le véhicule appartient à une zone de chevauchement. Il peut être affecté à deux clusters différents. Dans ce cas, l'affiliation des nœuds aux clusters peut inévitablement augmenter l'efficacité de l'algorithme proposé et vice versa. Cela signifie que la présence d'un nœud ayant un comportement différent de celui de la collection peut considérablement réduire l'efficacité du modèle. Il suffit donc de faire des ajustements mineurs pour obtenir des résultats distinctifs.

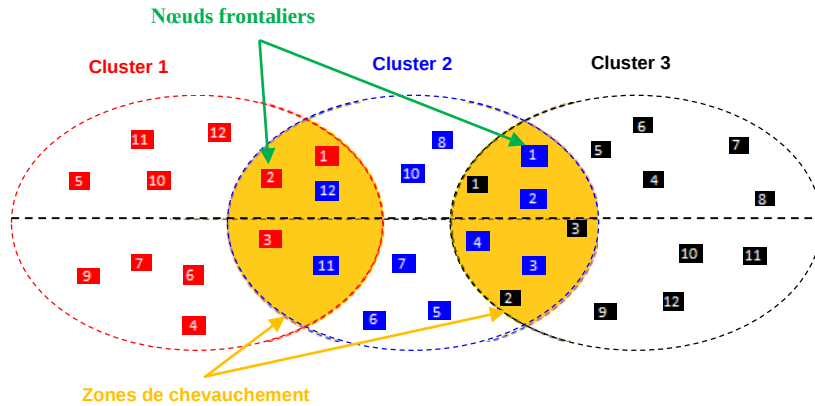


Figure 4.7 Scénario de clustérisation dans un scénario autoroutier

A partir de la figure 4.7, on note que la première zone de chevauchement contient trois nœuds du cluster 1 (1, 2, 3) et deux nœuds du cluster 2 (11, 12). De même, la deuxième zone de chevauchement est formée de quatre nœuds provenant du cluster 2 (1, 2, 3, 4) et trois nœuds du cluster 3 (1, 2, 3).

Puisque l'affectation des nœuds aux clusters est le principal défi dans le réseau ad hoc de véhicules, la question majeure dans cette situation est : comment trouver la meilleure solution réalisable qui conduit à une stabilité efficace du réseau compte tenu des contraintes particulières des réseaux VANETs ?

Dans la tentative de réponse, nous avons hybridé l'algorithme génétique avec la recherche tabou pour améliorer notre modèle AKCA. La RT est utilisée comme un opérateur de réparation pour améliorer la structure génétique d'une solution individuelle. L'objectif principal est de créer des clusters fiables et stables capables de durer longtemps. Les principales étapes de l'algorithme amélioré (E-AKCA) sont présentées dans la figure 4.8.

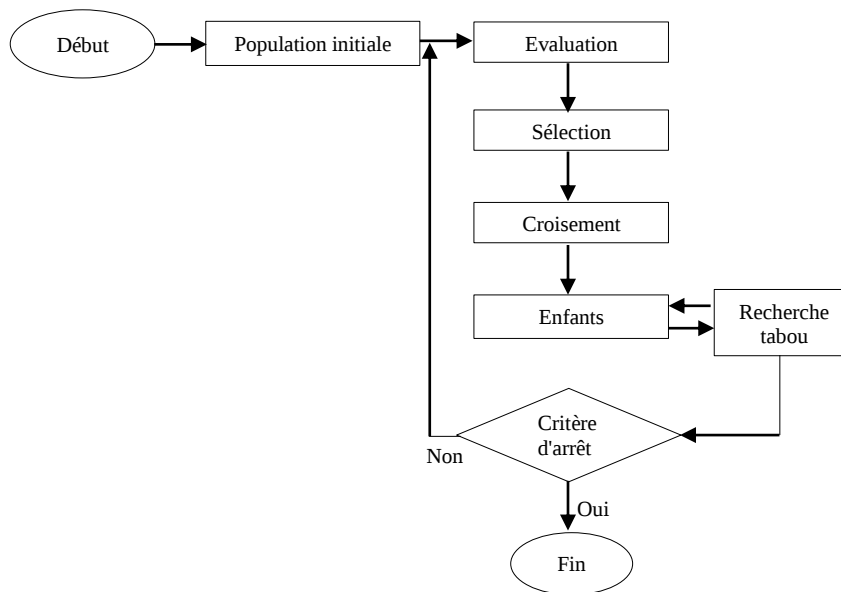


Figure 4.8 Processus d'amélioration du modèle AKCA.

4.4.2 Mise en œuvre

Au début, une population de solutions initiales est créée. Ensuite, la RT est intégrée en tant qu'un opérateur de mutation pour créer une nouvelle collection de solutions diversifiées. De ces solutions, la meilleure est choisie en fonction de sa valeur de fitness. Ce cycle est répété jusqu'à ce que la stabilité du réseau soit atteinte ou qu'un critère d'arrêt soit satisfait.

a. Population initiale et représentation chromosomique

La première étape de l'AG consiste à créer une population initiale de N individus. Chaque individu est représenté par un chromosome qui code un point dans l'espace de recherche. En effet, l'efficacité de l'AG dépend principalement du choix du codage chromosomique [141]. Pour notre modèle, comme le montre la figure 4.9, chaque chromosome (cluster) contient N gènes (nœuds).

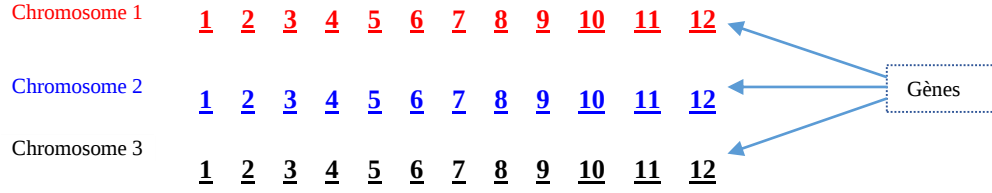


Figure 4.9 Représentation chromosomique du modèle E-AKCA.

b. Fonction de fitness

La fonction de fitness (F) est la mesure de performance utilisée pour déterminer les meilleurs individus de la population. En effet, plus F augmente, plus la connectivité intermittente diminue. Dans notre modèle, la qualité de tout chromosome dépend de l'éligibilité de ses gènes à lui appartenir.

$$F = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n SV_i \quad (4.1)$$

Où n est le nombre de véhicule dans un cluster donné.

c. Opérateur de sélection

Puisque nous nous intéressons aux nœuds de frontière, les clusters consécutifs doivent être traités séquentiellement deux à deux. En effet, les nœuds qui sont dans la couverture d'un seul CH conservent leurs affiliations et ne sont pas concernés par le processus de sélection. Les nœuds de frontière (couverts par deux CHs) sont concernés par le mécanisme de recombinaison pour reproduire des générations améliorées. Basé sur la méthode de sélection de roulette, nous associons un secteur à chaque nœud concerné. Ce secteur reflète les dissemblances des nœuds avec leur CHs. Par conséquent, plus la dissemblance augmente, plus la possibilité de changer ce nœud avec un de ses voisins augmente.

Exemple illustratif : A partir de la figure 4.7, il y a trois nœuds (1, 2, 3) du cluster 1 appartenant à la zone de chevauchement. Ces nœuds peuvent être sélectionnés et participer aux opérateurs de croisement et de mutation. Comme indiqué dans le tableau 4.2, chaque nœud a une valeur de similarité et de dissemblance avec son CH. Le secteur attribué à chaque nœud reflète son contraste avec son CH.

Tableau 4.2 Valeurs de similarité et de dissemblance des nœuds de bordure

Nœud	SV	$\overline{SV} = 100 - SV$	Secteur de la roue = $\frac{\overline{SV}}{\sum_{i=1}^n \overline{SV}_i}$
1	55%	45%	27%
2	60%	40%	24%
3	22%	78%	49%

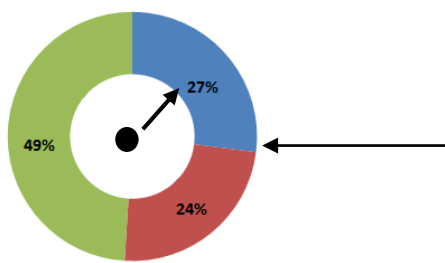


Figure 4.10 Exemple de sélection par tour de roulette.

d. Opérateur de croisement

Le croisement est l'un des opérateurs de base dans l'AG. Il est utilisé pour accoupler deux chromosomes de manière à générer de nouveaux descendants avec meilleures séquences de gènes [142].

Bien qu'il existe de nombreuses façons pour cet opérateur, nous avons appliqué le croisement à deux points sur les nœuds de bordure pour produire des solutions enfants. Un exemple est représenté sur la figure 4.11, où des nœuds de bordure du cluster 1 (11, 12) sont échangés avec des nœuds de bordure du cluster 2 (1, 2, 3).

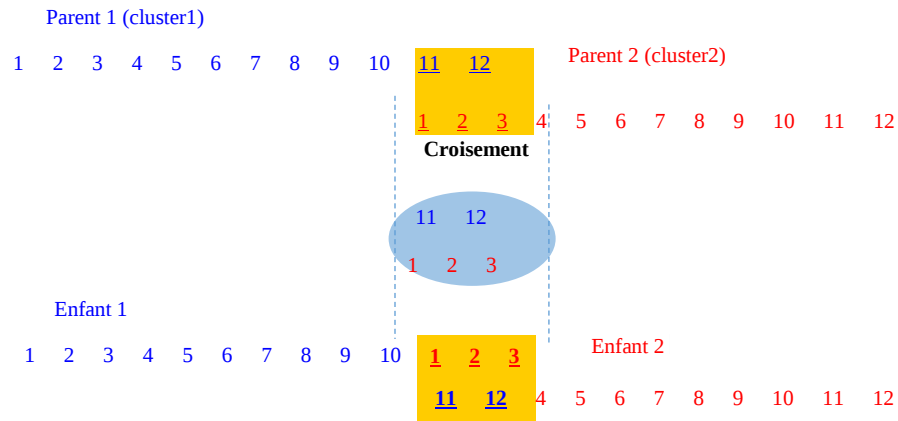


Figure 4.11 Croisement.

e. Opérateur de mutation

La mutation ajoute des effets d'exploration pour introduire la diversité génétique d'une génération à une autre. Pour atteindre cet objectif avec un équilibre d'intensification et de diversification, le nœud sélectionné par le tour de roulette sera amélioré en utilisant la méthode de RT. Ainsi, les nœuds de frontière (NF) les moins similaires à leur CH doivent quitter le cluster et rejoindre un autre plus approprié.

Comme illustré dans l'exemple précédent, après le croisement des nœuds de bordure des clusters 1 et 2, la RT est déclenchée pour améliorer l'attribution des nœuds. Les enfants générés vont remplacer les parents s'il y a une amélioration de la stabilité, sinon ils seront ignorés comme le montre la figure 4.12. De cette façon, nous avons fait une recherche intensifiée dans tout l'espace disponible, sans omettre les bonnes combinaisons.

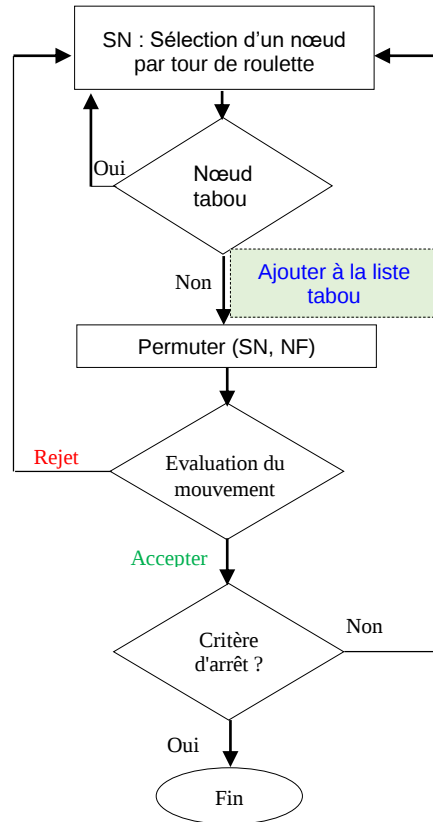


Figure 4.12 Mutation

4. 5 Simulation et évaluation

Dans cette section, nous utilisons OMNeT++ 5.0 pour évaluer notre contribution et la comparer avec d'autres algorithmes conçus pour le même objectif.

4.5.1 Configuration de la simulation

Pour valider notre contribution, nous avons utilisé le modèle de mobilité RMM (Revival Mobility Model) [143]. Dans ce modèle, les véhicules circulent dans des routes de deux voies au minimum définie par les cartes du GPS qui est équipé dans les véhicules. La distribution des véhicules est soit aléatoire, soit ajustée au début de la simulation. Dans notre cas, les véhicules ont été placés à des endroits spécifiques, puis ils se déplacent dans deux sens avec des vitesses variables vers de nouveaux emplacements. La distance de sécurité entre les véhicules circulant dans la même voie devrait être prise en compte.

Le dépassement est possible puisque les nœuds bougent à des vitesses différentes. L'échange des messages se fait entre les véhicules circulant dans les deux sens comme le montre la figure ci-dessous.

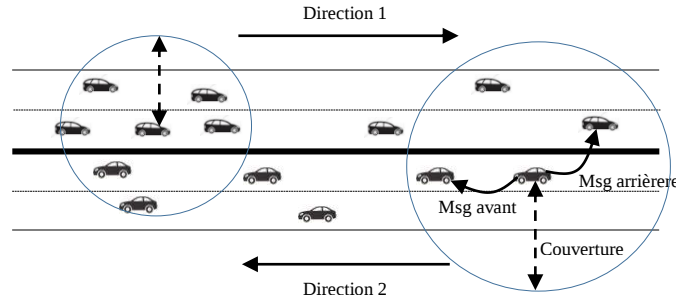


Figure 4.13 Le modèle de mobilité RM

Pour comprendre l'impact de la mobilité et de la densité sur les performances des protocoles étudiés, nous avons varié la vitesse des véhicules de 20 km/h à 120 km/h. De même, nous avons varié la densité d'une zone à une autre. Nous avons mené des expérimentations en considérant différentes conditions de circulation routière comme indiqué dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 configuration de la simulation

Paramètres	Valeurs
Simulateur	OMNeT++ 5.0
Scénario	Autoroute
Nombre de voies	Deux voies
Densité par Km	40 - 240
Vitesse	20-120 Km/h
Couverture	200, 300, 500 m
Temps de simulation	600 s
MAC Protocol	IEEE 802.11
Type de trafic	CBR (débit constant)
Modèle de mobilité	Revival Mobility Model

4.5.2 Résultats des simulations

Au moyen des métriques de connectivité, de performance et de stabilité, nous avons comparé l'E-AKCA avec l'algorithme original AKCA et avec l'algorithme MSCA (Mobility based and Stability based Clustering Algorithm) [97].

4.5.2.1 Métriques de connectivité

Appelées aussi métriques de mobilité, elles utilisent les informations de positionnement et de vitesse pour évaluer la connectivité du réseau [111].

a. Durée du lien

C'est la durée où le lien entre deux nœuds est actif. Cette métrique, mesure la stabilité d'une connexion dans le temps [144]. La durée du lien est un facteur expressif et efficace pour juger la qualité des protocoles de routage.

Soient " t_e ", le moment d'établissement du lien entre deux nœuds (x et y) et " t_r ", l'instant de rupture de ce lien.

- La durée du lien $DL_{(x,y)} = t_r - t_e$.
- La durée moyenne des liens ($\overline{DL}$) est la valeur de $DL_{(x,y)}$ moyennée sur tous les paires du réseau.

$$\overline{DL} = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=y+1}^N DL(x, y)}{P} \quad (4.2)$$

Où P est le nombre de paires (x, y).

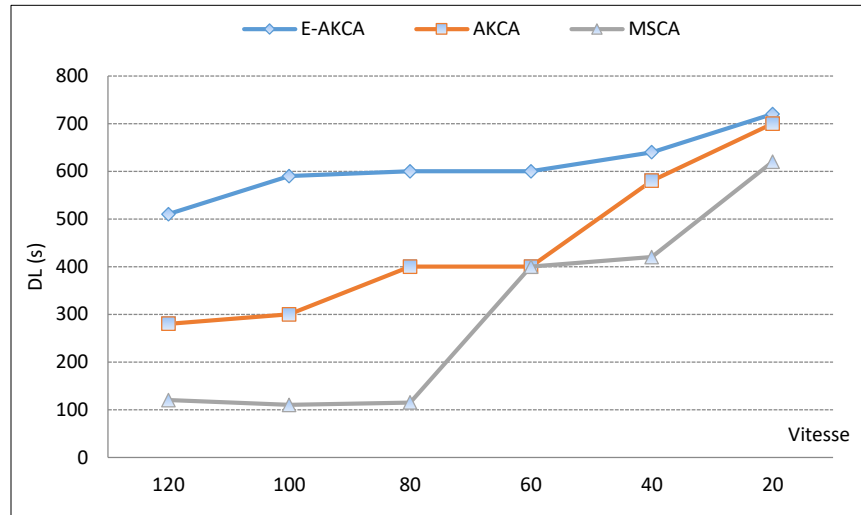


Figure 4. 14 Durée de lien.

La durée du lien est principalement basée sur la qualité des chemins établis. De même, il est recommandé que le nombre de nœuds relais entre la source et la destination soit aussi bas que possible, car la rupture ou la panne de l'un de ces nœuds provoque la défaillance du chemin. Dans ce cas, un nouveau chemin doit être configuré pour recommencer la communication. Cet événement nécessite du temps et des coûts généraux et donc, dégrade les performances des protocoles. Pour contrôler la durée des chemins dans les VANETs, les nœuds frontières sont l'une des meilleures clés d'efficacité. En effet, ces nœuds ont plus de chance de quitter le cluster et causer la rupture des liens. Pour limiter cet effet négatif, certains chercheurs évitent la participation de ces nœuds lors de l'acheminement des informations. D'autres transmettent les paquets aux nœuds de bordure les plus proches de la destination dans le but de minimiser le nombre de sauts [97]. Les résultats montrent un déficit important surtout avec la forte mobilité. C'est le cas du modèle MSCA, qui perd 75% de ses performances en passant de 60 à 80 km/h et la durée du lien chute de 400 s à 100 s.

De la figure 4. 14 qui montre la durée moyenne des liens par rapport à la vitesse, on voit que l'E-AKCA est le plus efficace. Cette supériorité devient claire lorsque la vitesse dépasse 60 km/h. Par exemple, avec une vitesse de 100 km/h, l'E-AKCA fait un avantage de 300 s par rapport à AKCA et 500 s par rapport à MSCA. Cette efficacité est une conséquence de notre utilisation des heuristiques pour extraire les nœuds de frontières ayant des comportements aberrants. Ensuite, nous les avons remplacés par d'autres plus robustes. Cette procédure permet d'atteindre plus de continuité des nœuds au sein de leurs clusters et donc prolonger la durée de vie des liens.

b. Changements d'état de lien

Un lien entre deux nœuds (x et y) est soit dans un état de rupture ($C(x, y)=0$) soit dans un état de fonctionnement ($C(x, y)=1$). Lorsque la communication entre deux nœuds mobiles est établie ou perdue, la métrique doit être incrémentée de un. Soient :

- $CL(x, y)$ est le nombre de changements de lien pour une paire de nœuds X et Y pour une période "T".

$$CL(x, y) = \sum_{t=1}^T C(x, y, t) \quad (4.3)$$

- $\overline{CL}$ est le nombre moyen de changements de lien : c'est la valeur de CL moyennée sur tous les paires de nœuds du réseau [145].

$$\overline{CL} = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=y+1}^N CL(x, y)}{P} \quad (4.4)$$

Où P est le nombre de paires (x, y).

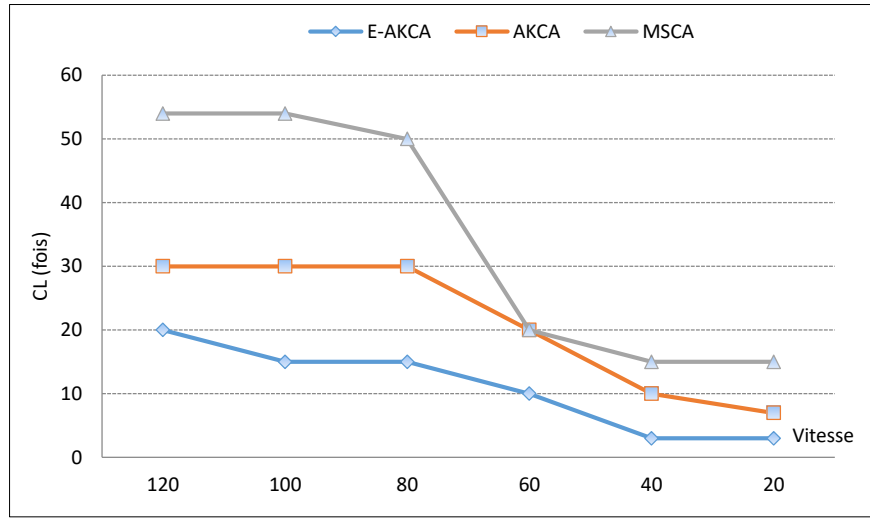


Figure 4. 15 Changements d'état de lien.

Nous avons pris des véhicules avec des vitesses variables, puis nous avons vérifié le nombre moyen de changements de lien comme indiqué dans la figure 4.15.

L'E-AKCA donne une meilleure performance de connectivité par rapport à AKCA et MSCA. On remarque que le nombre moyen de changement de lien d'E-AKCA est plus petit par rapport aux autres modèles simulés. Ce nombre augmente légèrement au fur et à mesure que la vitesse augmente. Mais pour MSCA le changement de lien est brutal. Par exemple lorsque la vitesse passe de 60 km/h à 80 km/h, le nombre de changement de lien est augmenté de 150% et on passe de 20 à 50 changements. De même, pour une vitesse de 80 km/h, l'E-AKCA marque une amélioration de 100% par rapport à AKCA et 330% par rapport à MSCA. Cela montre que le schéma proposé est le plus résilient et offre une connectivité plus élevée. Ce qui prouve que les nœuds relais qui forment le chemin ont un comportement similaire.

c. Stabilité du lien

Cette métrique permet aux véhicules d'estimer la durée de vie résiduelle du lien et de prendre des décisions intelligentes en rapport avec la stabilité. C'est la meilleure métrique indicative pour améliorer les performances d'un protocole de routage.

$$SL = \frac{DL}{CL} \quad (4.5)$$

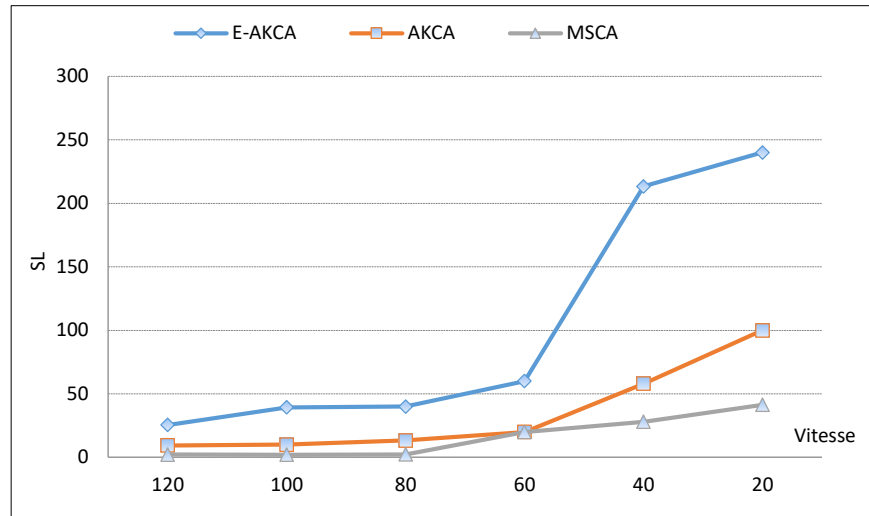


Figure 4. 16 Stabilité des liens.

Il est clairement évident qu'E-AKCA offre une stabilité de liaison élevée par rapport à AKCA et MSCA. La figure 4.16 montre que cette stabilité diminue avec l'augmentation de la vitesse. En effet, la forte mobilité empêche les nœuds de garder leur communication. Cela cause la rupture et, par conséquent, les liens deviennent moins stables et la durée de vie du réseau diminue. De plus, l'existence des nœuds frontières provoque en réalité la mort prématurée des liaisons. L'élimination de ces nœuds, comme dans le cas de MSCA, oblige le CH à accepter des nœuds relais ayant de faibles similarités. Aussi, la non prise en compte de ces nœuds lors de la recherche des chemins génère des coûts généraux supplémentaires et donc moins de stabilité et plus de consommation de la bande passante.

Par exemple, avec une vitesse de 40 km/h, les liens établis par l'E-AKCA ont une stabilité moyenne de 215 s. En contrepartie, cette stabilité ne dépasse pas 60 s et 30 s respectivement pour les modèles AKCA et MSCA.

4.5.2.2 Métriques de performance

Les métriques de performances mesurent la qualité de service d'un réseau tel que vu par les utilisateurs [146]. Ces mesures sont influencées par les paramètres de topologie du réseau tels que le nombre de connexions et le nombre de nœuds. Ils sont aussi influencés par les paramètres de mobilité tels que le temps de pause et la vitesse des nœuds.

Dans les sections suivantes, nous allons évaluer les performances de routage des protocoles E-AKCA, AKCA et MSCA dans un environnement VANET clusterisé où la vitesse varie de 20 à 120 km/h. Nous allons mesurer le taux de livraison des paquets, le débit et le délai de bout en bout.

a. Le taux de livraison des paquets (PDR)

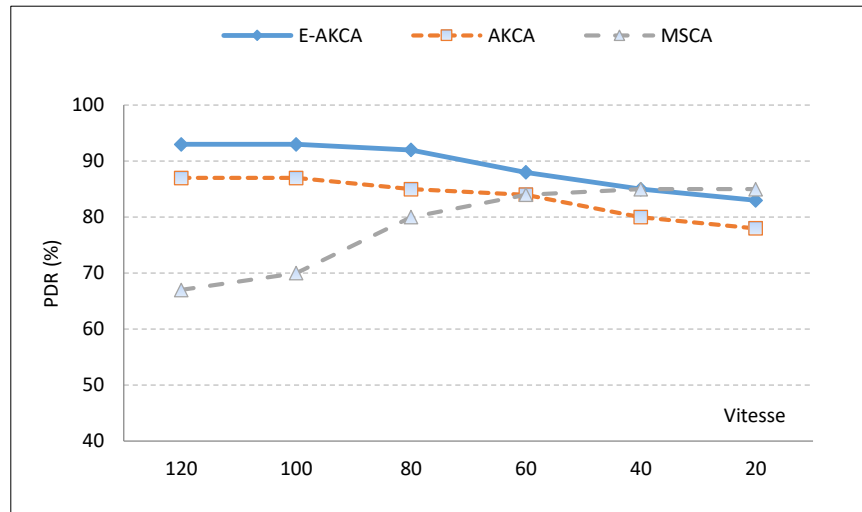


Figure 4. 17 PDR vs Vitesse.

Selon la figure 4.17, notre algorithme E-AKCA donne les meilleures performances en termes de PDR. En effet, plus de 84% des paquets envoyés atteignent leur destination même en mauvaise situation. Cette supériorité est due au filtrage des nœuds aberrants par rapport à l'ensemble et à l'affectation de ces nœuds à d'autres clusters plus similaires. On observe que les deux modèles AKCA et E-AKCA ont un taux de livraison plus élevé lorsque la vitesse augmente. Par contre, le protocole MSCA a un taux de livraison plus faible et 34 % des informations sont perdues avec une vitesse de 120 km/h. Une raison plausible pour cette observation peut être la suivante : Avec MSCA, les nœuds frontières ne sont pas autorisés à

joindre des clusters, cette procédure s'appelle « seuil de distance de sécurité ». Le but est de diminuer la connectivité intermittente. Mais en négligeant ces nœuds, et en cas d'une forte mobilité, ce modèle ne réussit pas à établir des liens entre les clusters, qui entraînera à son tour une charge supplémentaire pour trouver des itinéraires alternatifs. Par conséquent, une grande partie de la bande passante sera réservée par les données de contrôles.

Au lieu de négliger ces nœuds frontières, l'AKCA, utilise des clusters de très grandes tailles. Avec cette grande couverture, plus de 85% des messages atteignent leurs destinations. On conclut donc que la portée de transmission et le taux de paquets livrés sont fortement corrélés. Pour bénéficier des avantages des deux modèles précédents (AKCA et MSCA), nous avons proposé l'algorithme E-AKCA. Dans ce modèle, nous avons gardé l'utilisation de grands clusters dans les zones de faible densité (haute vitesse), De même, nous avons utilisé des métaheuristiques pour maximiser la similarité des nœuds de bordure avec leurs CHs. De cette manière, les nœuds peuvent rester stables pendant une période de temps plus longue. Les nœuds sont susceptibles de se déplacer ensemble et les coûts généraux de contrôle sont plus faibles car peu d'efforts sont nécessaires pour réparer les liens cassés. Comme vu dans le graphique, l'E-AKCA, a le même comportement que le protocole d'origine AKCA, mais avec une amélioration de 10%. Il offre plus de solutions pour transférer les paquets vers leurs destinations et plus de 90% des messages arrivent à leurs destinations même avec une forte mobilité.

b. Délai de bout en bout

Généralement, deux cas peuvent augmenter le délai de bout en bout.

1. Lorsque le nombre de paquets de contrôle augmente. Dans ce cas, le flux de messages circulant entraîne une congestion du réseau, ce qui entraîne un retard supplémentaire.
2. Lorsque la vitesse augmente, la connectivité intermittente augmente. Dans ce cas, la recherche des itinéraires alternatifs entraîne plus de retards. Et même si le mécanisme de correction démarre, le nombre de nœuds relais existants est toujours insuffisant.

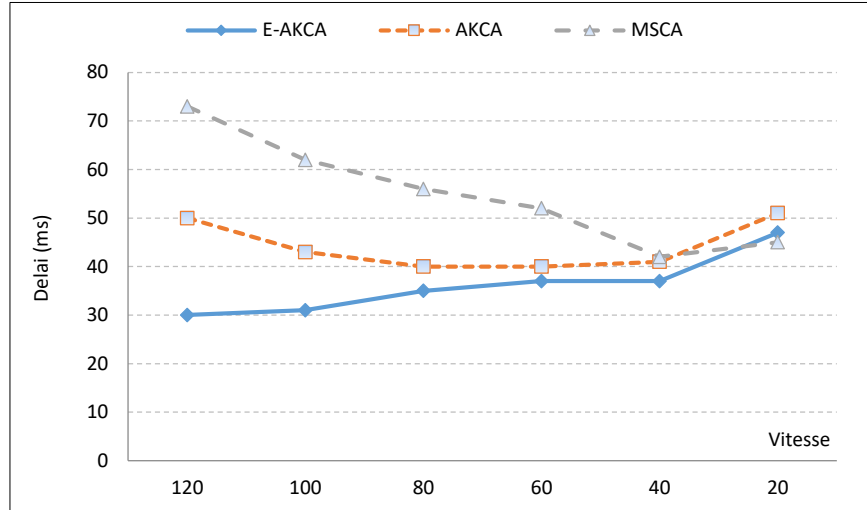


Figure 4. 18 Délai de bout en bout vs Vitesse.

Sur la figure 4.18, le délai moyen de bout en bout d'E-AKCA est le meilleur parmi les autres. De même, ce délai augmente à mesure que la vitesse des véhicules augmente. Cela est dû au fait que dans les réseaux à haute vitesse, le nombre de nœuds est faible, et donc il n'y a pas suffisamment de relais vers la destination. Dans ce cas, nous avons utilisé de larges clusters. Cela permet de profiter de la grande vitesse des véhicules pour transmettre les paquets à leurs destinations rapidement. Les autres protocoles ont un délai plus long car le processus de recherche d'itinéraire nécessite plus de temps. Par exemple MSCA marque un très grand délai, et sa performance se dégrade dès que la vitesse dépasse 40 km/h.

On remarque que l'augmentation du nombre de nœuds dans les zones de chevauchements augmente la probabilité de trouver un chemin dans un délai plus petit. Aussi, dans les VANETs, les scénarios avec de faible densité peuvent avoir un effet négatif sur les performances. Par exemple, pour MSCA, le CH peut ne pas trouver un nœud voisin disponible pour envoyer l'information. Il doit donc attendre pour trouver d'autres nœuds disponibles. Pendant ce temps, l'information est bloquée, ce qui augmente le délai de bout en bout.

c. Débit

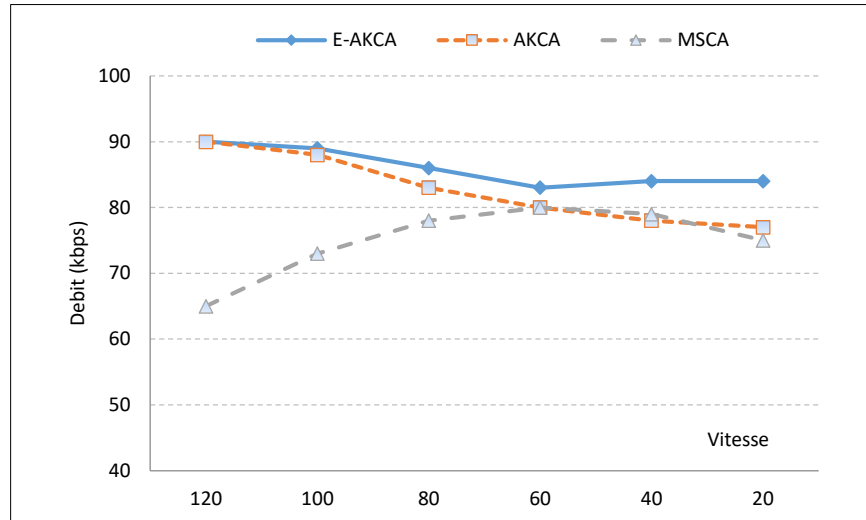


Figure 4. 19 Débit vs Vitesse.

La figure 4.19, présente le débit de routage des trois protocoles (MSCA, AKCA et E-AKCA) en fonction de la vitesse des véhicules. En hybridant la RT avec l'AG nous avons réussi à réduire les messages de contrôle. Par conséquent, la plus grande partie de la bande passante sera consacrée pour transporter les informations, et le débit est d'au moins 85 kbps dans les mauvaises conditions. En contrepartie le MSCA n'arrive pas à réaliser ce débit même dans la meilleure situation. Une des raisons est due aux messages de contrôle du MSCA pour créer de nouveau clusters dans les zones de faible densité et pour fusionner ceux dont leurs CHs sont très proches dans les zones denses.

Globalement, l'AKCA et l'E-AKCA surpassent le MSCA dans tous les cas. Cela était attendu puisque dans nos modèles, les messages de contrôles sont envoyés du CH vers les CMs uniquement lorsqu'il y a un changement de topologie. On note également que l'AKCA est moins performant qu'E-AKCA (d'environ 5%).

4.5.2.3 Métriques de stabilité

Généralement, les métriques de stabilité (durée de vie du CH et durée de vie des membres du cluster) mesurent la qualité de la méthode de clustérisation utilisée. De même, la stabilité signifie que la structure du cluster reste inchangée pour un long délai [147].

a. Durée de vie du CH

La durée de vie du CH est définie comme la période allant du moment où un véhicule devient un coordinateur au moment où il sera un nœud ordinaire. Plus la valeur de cette mesure est élevée, meilleure est la stabilité.

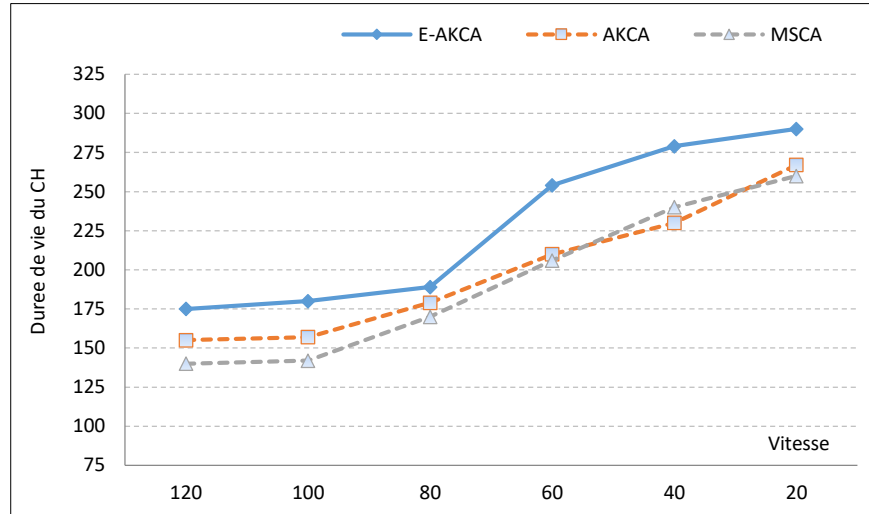


Figure 4. 20 Durée de vie du CH vs Vitesse.

La figure 4.20 compare la durée de vie moyenne des CHs des algorithmes E-AKCA, AKCA et MSCA. Cette durée augmente progressivement lorsque la vitesse diminue. L'algorithme proposé E-AKCA donne des valeurs supérieures par rapport aux autres. Par exemple, pour E-AKCA, lorsque la vitesse diminue de 80 km/h à 20 km/h, la durée de vie moyenne des CHs passe de 185 à 285 s. Pour les autres protocoles, cette amélioration est de 21 secondes pour AKCA et 10 secondes pour MSCA. On peut donc dire que l'augmentation du nombre de nœuds améliore la durée de vie moyenne des CHs. Pour tous les modèles, cette durée est plus courte avec une forte mobilité. Dans MSCA, la mobilité élevée des nœuds entraîne l'éloignement rapide des nœuds membres de leurs têtes de cluster, ce qui réduit la durée de vie de la tête de cluster qui chute à 135 s avec une vitesse de 120 km/h.

b. Durée de vie des CMs

Cette mesure indique le temps moyen pendant lequel les nœuds membres restent attachés à leurs clusters. Plus la valeur de cette mesure est grande, meilleure est la stabilité du réseau.

En effet, la durée de vie des membres du cluster est directement liée à la durée de vie de la tête de cluster.

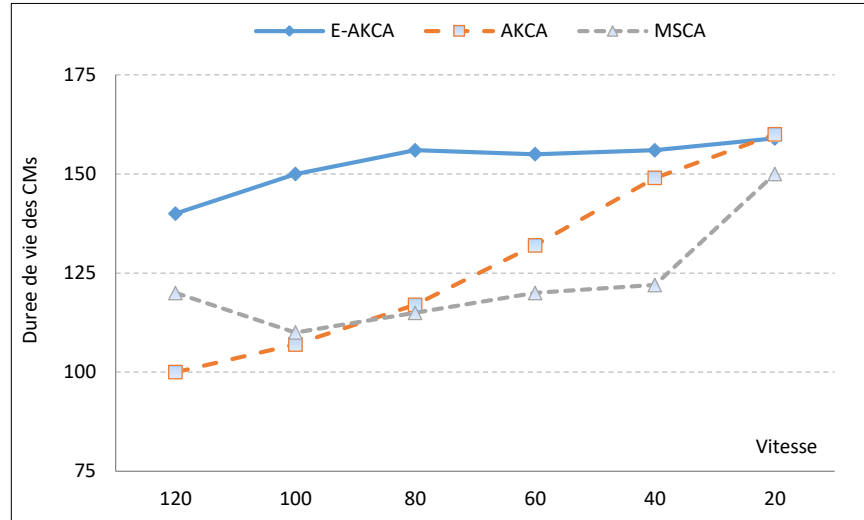


Figure 4. 21 Durée de vie des CMs Vs Vitesse

A partir des résultats présentés sur la figure 4.21, on voit que l'E-AKCA surpasse les autres approches en termes de durée de vie des CMs pour toutes les vitesses. En effet, cette durée augmente avec la diminution de la vitesse (forte densité). A grande vitesse, les chemins existants seront rompus fréquemment, et les nœuds sont susceptibles de quitter leurs clusters et en rejoindre d'autres. En contrepartie, la grande densité des clusters évite une telle situation et fournit une meilleure connectivité réseau. Pour E-AKCA la différence de durée entre la meilleure et la mauvaise situation ne dépasse pas 19 secondes. Cette différence est de l'ordre de 40 et 60 secondes respectivement pour le MSCA et AKCA.

4. 6 Conclusion

Les réseaux VANET sont des réseaux très mobiles qui souffrent d'une connectivité discontinue et d'une faible stabilité [148]. En effet, dans un scénario autoroutier, le réseau peut être étendu sur plusieurs kilomètres ce qui nuit au temps de livraison des paquets et au débit des messages transmis. Dans ce contexte, nous avons proposé un nouveau modèle hybride basé sur l'AG et la RT pour augmenter l'efficacité de notre algorithme de clustérisation pondéré AKCA. Bien que l'algorithme génétique semble être le plus efficace pour les problèmes de routage dans les réseaux de véhicules, la convergence prématurée peut bloquer la recherche dans un optimum

local. Par conséquent, nous avons intégré la RT dans l'AG pour surmonter cette convergence prématurée et pour trouver le meilleur cluster pour chaque nœud.

Cette amélioration est intégrée dans la phase de maintenance de cluster de l'AKCA. Elle concerne uniquement les nœuds de frontières appartenant à des zones de chevauchement.

Une série d'expériences ont été menées en faisant varier la densité et la vitesse des véhicules. Les résultats obtenus prouvent qu'E-AKCA surpasse l'algorithme AKCA original et l'algorithme MSCA en termes de divers métriques dans le scénario autoroutier.

Chapitre 5

Amélioration du modèle AKCA basée sur la recherche par dispersion

Sommaire

5.1.	Introduction.....	106
5.2.	Modèle hybride «recherche par dispersion-recherche tabou	106
5.2.1.	La recherche par dispersion (RD)	107
5.2.2.	Modèle proposé.....	107
5.2.3.	Application de la recherche par dispersion.....	108
5.2.4.	Résultats expérimentaux et analyse.....	113
5.3.	Système d'alerte à base d'Arduino Uno.....	114
5.4.	Conclusion.....	114

Résumé

Dans ce chapitre, nous avons hybridé la recherche par dispersion (Scatter Search) avec la recherche tabou pour affecter les CMs aux CHs. Nous avons abordé la phase de formation des clusters dans notre algorithme pondéré AKCA. L'objectif principal est de dériver de nouvelles solutions à partir de la combinaison des précédentes. Par simulation, les résultats montrent que notre contribution améliore la stabilité du réseau ainsi que la durée de vie des liens.

5.1 Introduction

Généralement, les systèmes de transport intelligents (STI) permettent de recueillir et de partager les informations pour améliorer la sécurité routière et pour offrir plus de confort aux voyageurs. En raison de la grande mobilité des nœuds, de la couverture limitée des technologies de communications et de la multitude des obstacles dans les réseaux VANETs, les liens peuvent être rompus fréquemment. Pour surmonter ce défi, on doit:

1. Faire des maintenances régulières des liens pour assurer plus de stabilité et pour transférer les messages dans les délais.
2. Optimiser le rôle des nœuds isolés dans l'échange d'informations au sein du réseau.

Dans ce contexte, nous proposons dans ce chapitre un modèle hybride combinant la recherche par dispersion et la recherche tabou (Hybrid Scatter Tabu Search (HSTS)) pour améliorer l'affectation des nœuds ordinaires aux CHs élus. La puissance de cette contribution est d'unifier les avantages des méthodes basées sur la population (SS) avec la puissance des méthodes de trajectoire (RT). De même, nous proposons dans l'Annexe A, une solution à faible coût pour minimiser l'effet négatif des nœuds isolés sur le processus de clustérisation.

5.2 Modèle hybride «recherche par dispersion-recherche tabou»

Les chevauchements lors de la clustérisation sont utiles dans plusieurs applications des réseaux de capteurs, telles que la localisation de nœud [149] et le routage inter cluster [150]. En effet, même si un nœud est couvert par plus d'un cluster, il doit obligatoirement communiquer avec un seul CH. Par conséquent, le choix du CH le plus approprié est un problème difficile à résoudre dans un temps polynomial. Pour surmonter ce défi, et pour maintenir un ensemble diversifié de solutions de haute qualité, nous avons utilisé la recherche par dispersion. Cette méthode fait partie de la famille des heuristiques à population. Elle a montré une supériorité lors de la résolution de plusieurs problèmes tels que le problème du voyageur de commerce et le problème de commande linéaire [151].

5.2.1 La recherche par dispersion (RD)

La recherche par dispersion (Scatter Search) est une métaheuristique basée sur la population. Elle est adaptée pour résoudre un large éventail de problèmes d'optimisation, y compris le routage dans les réseaux mobiles, le problème du voyageur de commerce (TSP) et la clustérisation [152], [153].

Le principe de cette méthode est que les optima globaux sont stockés dans un ensemble diversifié et élitare de solutions appelé "ensemble de référence" (RefSet). Ensuite une méthode de recombinaison est appliquée sur cet ensemble pour générer de nouvelles solutions candidates de haute qualité. Les résultats de la recombinaison sont améliorés à l'aide d'une heuristique intégrée et évalués dans le contexte de l'ensemble de référence pour savoir s'ils seront conservés ou non. Fondamentalement la RD contient cinq méthodes [154]:

1. *Une méthode de génération de diversification* : permet de produire des solutions diverses en entrée.
2. *Une méthode de mise à jour de l'ensemble de référence* : permet de mettre à jour l'ensemble des meilleures solutions dans RefSet en fonction de leur qualité ou de leur diversité. RefSet désigne les bonnes solutions obtenues par les efforts de résolution antérieurs.
3. *Une méthode de génération d'un sous-ensemble* : opère sur l'ensemble de référence pour déterminer un sous-ensemble de solutions comme base pour créer des solutions combinées.
4. *Une méthode de combinaison de solutions* : génère de nouvelles solutions d'essai à partir des paires de solutions de l'ensemble de référence.
5. *Une méthode d'amélioration* : utilise une recherche locale pour améliorer les solutions générées par l'étape précédente.

5.2.2 Modèle proposé

Le défi principal consiste à trouver le cluster le plus approprié pour tous les nœuds de la zone de chevauchement. À un instant "t" donné, un véhicule V ne doit être affecté qu'à un seul CH. Dans notre cas, chaque cluster est représenté par un graphe G (V, E).

- V : représente l'ensemble des véhicules définis par un indice i, $i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$.
- E : représente l'ensemble des arêtes. Chaque arête E_{ij} désigne la valeur de similarité (SV) du nœud i au CH j .

L'objectif est de maximiser la similarité au sein des clusters. Elle est égale à la somme des similarités de tous les nœuds membres par rapport au CH.

5.2.3 Application de la recherche par dispersion

A. Initialisation

Au début, l'utilisateur doit définir les valeurs des paramètres de départ.

- ni: nombre d'itérations.
- nia: nombre d'itérations sans amélioration.
- nsi: nombre de solutions initiales.

B. Génération de l'ensemble de référence

Cette méthode est la première étape dans la recherche par dispersion. Dans notre cas, l'ensemble des solutions de départ n'est pas généré aléatoirement, mais obtenu à partir du modèle AKCA. A titre illustratif dans la figure 5.1, le cluster 1 contient les nœuds (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) et le cluster 2 contient les nœuds (A, B, C, D, E, F, G, H).

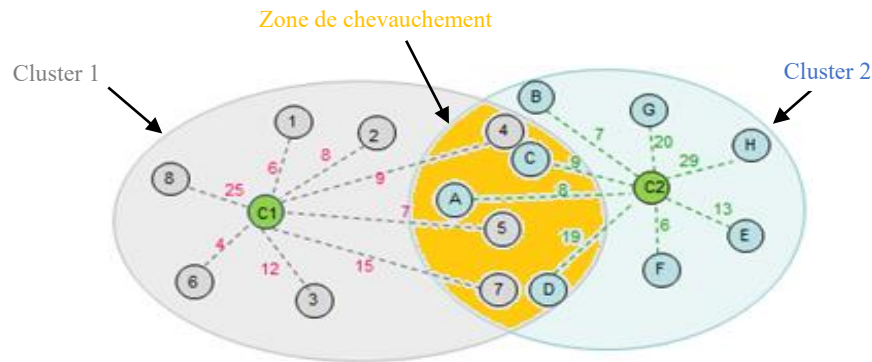


Figure 5.1 Résultat de la clustérisation suivant le modèle AKCA

C. Evaluation

Pour connaître la qualité des solutions potentielles, nous avons utilisé la fonction de fitness (F). Elle indique à quel point les nœuds d'un cluster sont similaires à leur CHs.

$$F = \sum_{i=1}^N SV_{ij} \quad (5.1)$$

D. Génération de sous-ensemble

Plusieurs méthodes sont utilisées dans la littérature pour générer les sous-ensembles. Dans notre solution, nous avons traité les nœuds pouvant être assignés à plus qu'un CH, c.à.d. les nœuds appartenant aux zones de chevauchements.

- Soit B1 la meilleure solution obtenue par l'algorithme AKCA.

C1	1	2	3	4	5	6	7	8
C2	A	B	C	D	E	F	G	H

- Soit B2 la solution réalisable, très différente de la solution B1. Elle est obtenue en commutant les nœuds du cluster 1 de la zone commune (4, 5 et 7) vers le cluster 2. De même, commuter les nœuds du cluster 2 de la zone commune (A, C et D) vers le cluster 2. Voir figure 5.2.

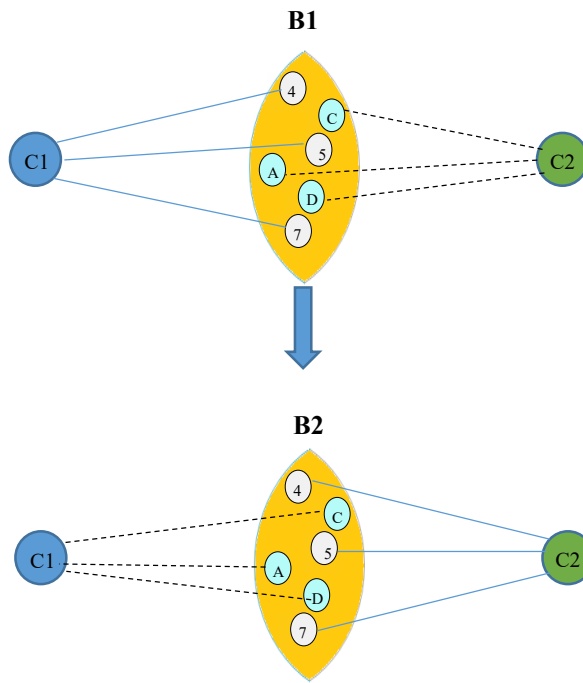


Figure 5.2 Génération de sous-ensemble.

- Soit diff : la différence entre les deux solutions. Elle représente la moyenne des nœuds commutés de C1 à C2, et de C2 à C1.

$$\text{Diff} = \text{nombre de nœuds commutés} / \text{nombre total de nœuds} = 6/16 = 37.5\%.$$

E. Méthode de combinaison

Utilisée pour combiner les éléments des sous-ensembles afin de former de nouvelles solutions. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de combinaison Path-Relinking (PR) [155] pour générer de nouvelles solutions d'essai.

PR est considérée comme une extension du mécanisme de combinaison de la recherche par dispersion [156]. Au lieu de produire directement une nouvelle solution par combinaison de solutions originales, PR génère un chemin dans l'espace de voisinage. A chaque itération, tous les mouvements possibles sont évalués et le meilleur est sélectionné.

En appliquant cette méthode, pour chaque nœud de la zone commune, on calcule ses valeurs de similarité par rapport à tous les CHs atteignables. Ensuite, le nœud est affecté au CH le plus similaire. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

Par exemple, sur la base des valeurs de similarité des nœuds frontaliers, comme indiqué dans la figure 5.3, il est plus approprié d'affecter le nœud 4 au cluster C2 au lieu du cluster C1. De même, il est préférable de déplacer le nœud D du cluster C2 vers le cluster C1.

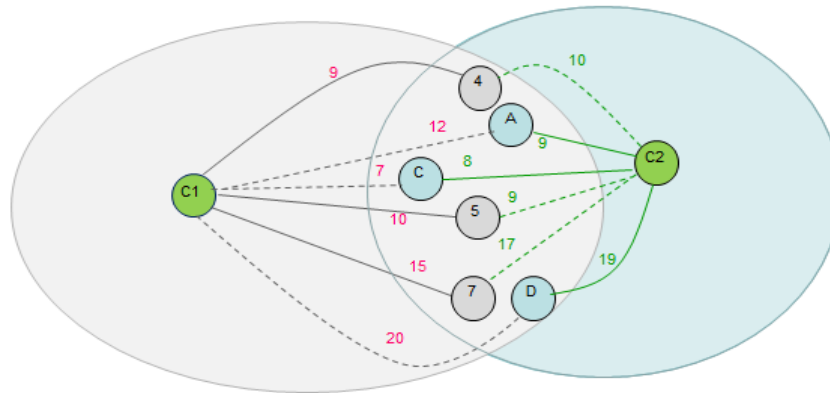


Figure 5.3 Valeurs de similarités des nœuds frontaliers.

En effet, l'application de la méthode de combinaison PR à tous les nœuds du cluster C1 de la figure 5.3 passe par trois étapes.

Etape 1 : Trier tous les nœuds du cluster 1 appartenant à la zone de chevauchement suivant leurs valeurs de similarités (SVs).



Etape 2 : On commence par le nœud qui possède la plus petite valeur de similarité. Puis on cherche à le remplacer par le nœud qui a la plus grande similarité.

Dans notre cas, on doit commencer par le nœud ④₉

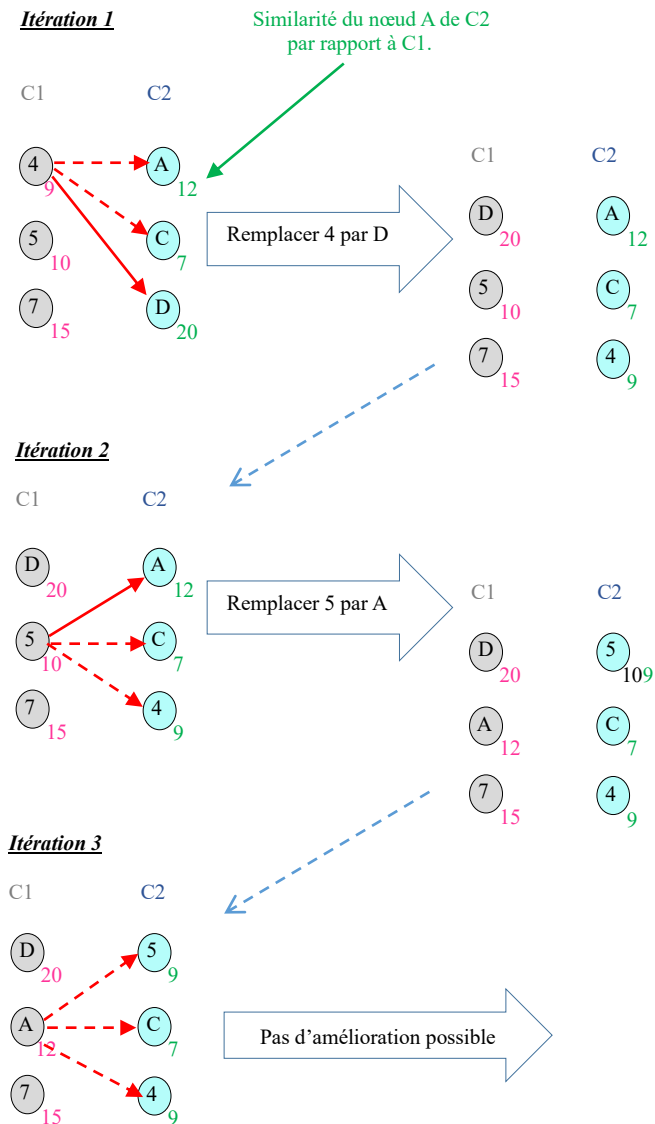


Figure 5.4 Application de la méthode PR.

Etape 3 :

- Condition d'arrêt est satisfaite.
- La similarité globale des nœuds frontaliers du cluster 1 passe de 34 ($9+10+15$) à 47 ($20+12+15$).

F. Méthode d'amélioration

Dans cette étape, nous avons utilisé la recherche tabou pour transformer les solutions obtenues par la méthode de combinaison a d'autres plus efficaces. Si la solution améliorée augmente la similarité globale au sein du cluster, elle sera incluse dans l'ensemble de référence, sinon, elle sera ignorée. Pour éviter la perte de temps en cas de grand nombre de voisinage, le nombre sélectionné d'itérations ne dépasse pas 10. En effet, la figure 5.5 reprend les étapes du modèle proposé ainsi que les méthodes qui lui sont associées (Path Relinking et RT)

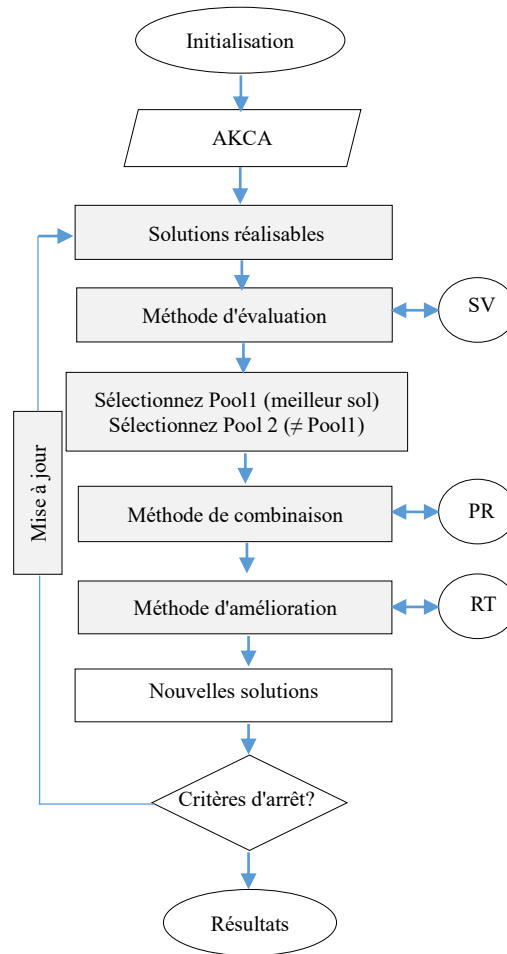


Figure 5.5 Flow chart du modèle proposé.

5.2.4 Résultats expérimentaux et analyse

Pour évaluer l'amélioration apportée par notre modèle (HSTS), nous avons utilisé trois métriques de base [157]. Cette contribution est comparée avec l'algorithme de clustérisation pondéré AKCA. La comparaison prouve que le travail supplémentaire que nous avons ajouté a amélioré les résultats obtenus, notamment en termes de délais.

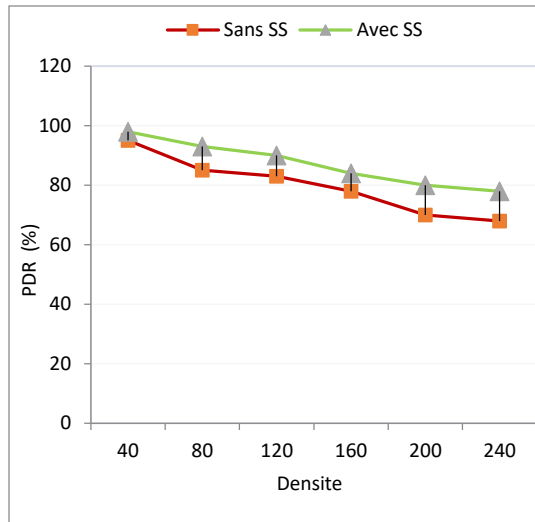


Figure 5.6 PDR avec SS et sans SS.

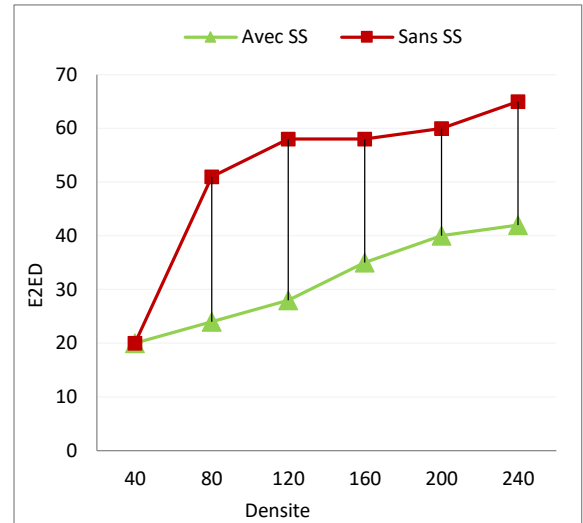


Figure 5.7 E2ED avec SS et sans SS.

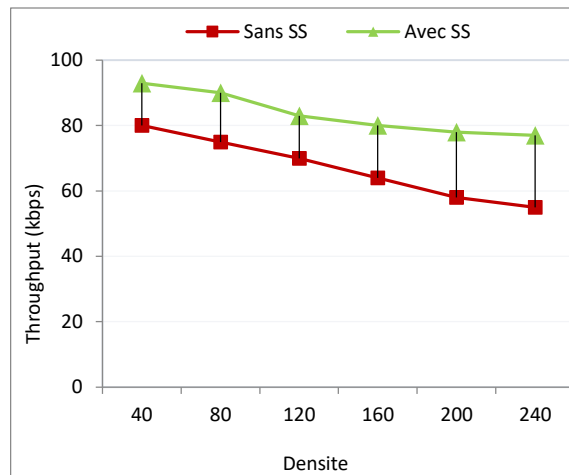


Figure 5.8 Throughput avec SS et sans SS.

Dans les figures 5.6, 5.7 et 5.8, nous avons comparé le PDR, l'E2ED et le débit du modèle AKCA avec et sans recherche par dispersion. Les résultats prouvent que les mises à jour régulières apportées par la RD ont permis de faire face aux ruptures de liaison causées par la forte mobilité des nœuds. La raison de ce succès est que la RD fournit des solutions

supplémentaires lors de la découverte et de la maintenance de la route. De même, la génération de nouvelles solutions à partir de la combinaison des autres dans les zones de chevauchements fournit des itinéraires plus appropriés et permet une réparation rapide en cas de rupture de liens. On remarque pour toutes les métriques que plus la densité augmente plus l'effet de la RD est renforcé. Par exemple dès que la densité dépasse 80, le délai diminue de 50 ms à 24 ms, c'est à dire une réduction de plus de 50%. Cette supériorité est constatée aussi avec les autres métriques.

5.3 Système d'alerte à base d'Arduino Uno

Voir Annexe A.

5.4 Conclusion

En raison de la diversité des environnements de routage et de la grande mobilité des véhicules, la construction d'un réseau stable semble être le défi de base. Pour résoudre ce problème, nous avons amélioré l'algorithme de clustérisation pondéré AKCA. Nous avons hybridé la recherche par dispersion et la recherche tabou pour maximiser les similarités intra-cluster. Nous avons traité les zones de chevauchement où un nœud peut simultanément appartenir à plus d'un cluster. Les résultats montrent que le modèle hybride proposé (HSTS) surpasse l'AKCA en termes de PDR, E2ED et de débit dans toutes les situations. En effet, plus la similarité au sein d'un cluster est grande, meilleure est la stabilité du réseau. Prochainement, nous prévoyons améliorer le comportement de notre modèle en utilisant l'heuristique Cuckoo Search, en particulier dans le scénario urbain avec l'existence d'intersections et d'obstacles.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons présenté plusieurs contributions permettant un routage d'informations fiable et rapide dans les réseaux véhiculaires. Cela a été réalisé en utilisant la technique de clustérisation et les métaheuristiques. Notre but était de concevoir un modèle permettant de réduire les conséquences des accidents de la route et offrir plus de confort aux conducteurs et aux voyageurs.

Pour évaluer nos propositions, nous avons utilisé le simulateur OMNeT++5.0. C'est l'un des simulateurs les plus puissants dans le domaine des réseaux mobiles et en particulier les VANETs. Les résultats de simulation montrent de manière significative que les différents objectifs ont été atteints. Les contributions majeures de ce travail peuvent être résumées en trois points:

1- Nous avons utilisé l'algorithme de clustérisation k-medoids pour concevoir un protocole de routage pour les VANETs. Notre but était de maximiser la stabilité du réseau en diminuant les ruptures des liens dues à la forte mobilité des nœuds. Dans ce modèle la taille du cluster dépend de la densité et de la vitesse des véhicules. En effet, plus la densité augmente (faible vitesse), plus la taille du cluster diminue pour éviter les collisions et permettre un transfert rapide des données. Au contraire, en cas de faible densité, la taille du cluster augmente pour servir le maximum de véhicules et pour profiter de la forte mobilité des nœuds pour un routage rapide. A travers trois propositions, le modèle proposé AKCA a pu s'adapter avec les conditions de route et garantir une haute stabilité avec un transfert fiable et rapide des informations entre les différents composants du réseau (véhicules, unités de routes,...).

- Contrairement aux méthodes aveugles qui commencent par un choix aléatoire des paramètres initiaux, notre modèle détermine ces paramètres sur les bases de données spécifiques telles que la longueur des routes et les plages de transmission disponibles. Cette procédure aide à atteindre rapidement la stabilité globale du réseau.

- Pour changer de CH, nous avons intégré une nouvelle métrique appelée «fréquence de déconnexion du nœud». Cette métrique exprime le comportement passé d'un nœud avant d'être élu en tant que nouveau CH. En cas de fluctuation ou de non stabilité, ce nœud sera automatiquement exclu.

- En changeant de CH, le processus de maintenance du réseau est lancé automatiquement en se basant sur des métriques bien choisies telles que la direction, la vitesse et la proximité.

2- Parce que le problème de routage est NP- difficile, il n'est pas possible de trouver une solution exacte valide pour tous les scénarios. Pour cela, nous avons eu recours aux métaheuristiques. Nous avons hybridé l'algorithme génétique avec la recherche Tabou pour améliorer les performances de l'AKCA. Le but est de profiter de la puissance de l'AG sans tomber dans le problème la convergence prématurée due au blocage de la recherche dans un optimum local. Cette amélioration fait partie de la phase de maintenance des clusters du modèle AKCA. Elle concerne uniquement les nœuds de frontières appartenant à des zones de chevauchement. Ces nœuds peuvent être affecté a plus d'un cluster, d'où la détermination du meilleur emplacement qui est en soi un défi.

3- À un autre stade, nous avons hybridé la recherche par dispersion et la recherche tabou pour maximiser les similarités des nœuds appartenant à un même cluster. En utilisant cette méthode nous avons déterminé les nœuds aberrants du cluster, puis les avons assignés à un autre cluster plus similaire. En considérant le réseau comme un graphe connexe, cette contribution passe par les cinq méthodes suivantes: méthode de génération de diversification, méthode de mise à jour de l'ensemble de référence, méthode de génération d'un sous-ensemble, méthode de combinaison de solutions et méthode d'amélioration. La RT est intégrée dans la dernière étape pour améliorer les solutions trouvées dans les étapes précédentes.

Les résultats présentés dans cette thèse prouvent les performances des modèles proposés, ainsi que leurs versions améliorées. Nous avons pu également adapter notre modèle aux conditions de la route. Cette adaptation a émergé clairement dans l'exactitude et la rapidité de transmission de l'information entre les nœuds.

Perspectives

Plusieurs directions de recherche futures s'ouvrent.

- Utiliser le nuage véhiculaire pour créer une structure de contrôle du trafic plus fiable. Ce nuage sera utile pour fournir des ressources à la demande. De même, le véhicule peut accéder à Internet et partager des informations d'une façon plus rapide et moins coûteuse.
- Dans un environnement véhiculaire, un défaut dans un nœud peut causer un mauvais fonctionnement dans tout le système. Par conséquent, un mécanisme de tolérance aux pannes doit être conçu pour limiter le défaut dans le système et supprimer le comportement défectueux.
- Utilisation de l'apprentissage automatique, en tant qu'approche de l'intelligence artificielle, pour améliorer l'efficacité et la précision des informations de routage. Cette technique permet d'améliorer considérablement les performances du réseau et relever les défis qui en découlent.

Liste des publications personnelles

Journaux

- [1] Rejab Hajlaoui, Hervé Guyennet, Tarek Moulahi, “A survey on Heuristic-based Routing Methods in Vehicular Ad-Hoc Network: Technical challenges and future trends”, IEEE Sensors Journal, Volume 16, Issue 17, June **2016**.
- [2] Rejab Hajlaoui, Hervé Guyennet, Tarek Moulahi, “Construction of a stable vehicular ad hoc network based on hybrid genetic algorithm”, Telecommunication systems Journal. Springer, **2018**.
- [3] Rejab Hajlaoui, Tarek Moulahi, Hervé Guyennet, “An Adjusted K-medoids Clustering Algorithm for Effective Stability in Vehicular Ad Hoc Networks”, IEEE-Journal of Communications and Networks, **2018**.

Conférences

- [4] Rejab Hajlaoui, Tarek Moulahi, Hervé Guyennet, “Vehicular ad hoc networks: From simulations to real-life scenarios”, IEEE, International Conference on Communication, Management and Information Technology ICCMIT, Poland, **2017**.
- [5] Rejab Hajlaoui, Tarek Moulahi, Hervé Guyennet, “A Scatter Search based Heuristic for Reliable Clustering in Vehicular Ad Hoc Networks”, AIAI 2018 : 14th Artificial Intelligence Applications and Innovations conference, Rhodes, Greece, **2018**.

Références

- [1] A. Singh, M. Kumar, R. Rishi, and D.K. Madan, “A Relative Study of MANET and VANET: Its Applications, Broadcasting Approaches and Challenging Issues”, 1st International Conference on Computer Science and Information Technology, CCSIT, Vol 132, pp. 627-632, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [2] N.V. Pardakhe and R.R. Keole, “Analysis of Various Topology Based Routing Protocols in VANET”, International Journal of Advanced Research in Computer Science, Vol. 4, Issue 6, pp. 35 – 38, 2013.
- [3] Y. Yang, J. Xu, D. Cheng, L.H. Wu, P.J. Tan and L.T. Yang, “VANET link characteristics and analysis in urban and suburban scenarios”, IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems, pp. 84 – 88, Fujian, China, 2008.
- [4] K. Tanuja, T.M. Sushma, M. Bharathi and K.H. Arun, “A survey on VANET technologies”, International Journal of Computer Applications, Vol. 121, Issue 18, pp. 1 – 9, 2015.
- [5] D. Dinesh, M. Deshmukh, “Challenges in Vehicle Ad Hoc Network (VANET)”, International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, Vol. 2, Issue 7, 2014.
- [6] K. Mehta, L. G. Malik and P. Bajaj, “Security Challenges, Issues And Their Solutions For VANET”, International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA), Vol.5, No.5, 2013.
- [7] A. Y. Dak, S. Yahya, and M. Kassim, “A Literature Survey on Security Challenges in VANETs”, International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol. 4, No. 6, 2012.
- [8] R. K. Thandil, “Security and Privacy in Vehicular Ad Hoc Network (VANET): A Survey”, International Journal of Computer Applications, 2015.
- [9] S. Busanelli, G. Ferrari, and L. Veltri, "Short-lived Key Management for Secure Communications in VANETs", 11th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), pp. 613-618, 2011.
- [10] Jason J. Haas, Y-C Hu, “Security certificate revocation list distribution for vanet”, VANET Workshop, San Francisco, California, 2008.
- [11] P. Sung-Yeop, L. Woongsup and C. Dong-Ho, “Resource Allocation for Vehicle-to-Infrastructure Communication Using Directional Transmission”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1-12, 2015.
- [12] K. Liu, J. K. Y. Ng, J. Wang, V. C. S. Lee, W. Wu and S. H. Son, “Network-Coding-Assisted Data Dissemination via Cooperative Vehicle-to-Vehicle/-Infrastructure Communications”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1-6, 2015.
- [13] J.M. Kahn, J.R. Barry, “Wireless Infrared Communications”, Proceedings of the IEEE, Vol.85, Issue.2, pp. 265 Intelligent Transportation Systems, pp. 1-6, 2015
- [14] C.M. Ramya, M. Shanmugaraj and R. Prabakaran, "Study on ZigBee technology", 3rd International Conference on Electronics Computer Technology (ICECT), Vol.6, pp.297, 301, 2011.

- [15] M. S. Anwer and C. Guy, "A Survey of VANET Technologies", *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 2014.
- [16] R. Frank, W. Bronzi, G. Castignani and T. Engel, "Bluetooth Low Energy: An Alternative Technology for VANET Application", *11th IEEE/IFIP Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services*, 2014.
- [17] D. Wang, K. O'Keefe and M.G. Petovello, "Decentralized Cooperative Positioning for Vehicle-to-Vehicle (V2V) Application Using GPS Integrated with UWB Range", *Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting*, pp.793 – 803, 2013.
- [18] J. B. Kenney, "Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States", *Proceedings of the IEEE*, Vol 99, Issue 7. 2011.
- [19] G. S. Khakare and A. V. Sakhare, "Intelligent Traffic System for VANET: A Survey", *International Journal of Advanced Computer Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 99-102, 2012.
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Communications,_Air-interface,_Long_and_Medium_range
- [21] <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005725/network-and-i-o/wireless-networking.html>
- [22] J.S. Huang, O. Yang, and F. Lawal, "Sending Safety Video over WiMAX in Vehicle Communications", *Proc. of Future Internet*, pp. 535-567, 2013.
- [23] A. Greenspan, M. Klerer, M. Tomcik and R. Canchi", *IEEE 802.20: Mobile Broadband Wireless Access for the Twenty-First Century*", *IEEE Communications Magazine*, pp. 56–63, 2008.
- [24] S. Reshma and C. Prakash, "Analysis of Vanet Technologies", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 8, Issue 6, 2017.
- [25] F. Aadil, S. Rizwan and A. Akram, "Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs), Past Present and Future: A survey", *7th International Open Conference HET-NETs*, 2013.
- [26] Y. Li, K. Ying, P. Cheng, H. Yu and H. Luo, "Cooperative dissemination in cellular-VANET heterogeneous wireless networks", *4th International Data High Speed Intelligent Communication Forum (HSIC)*, 2012.
- [27] K. A. Hafeez, L. Zhao, B. Ma and J.W. Mark, "Performance Analysis and Enhancement of the DSRC for VANET's Safety Applications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, Issue 7, pp. 3069 -3083, 2013.
- [28] B. Marzak, H. Toumi, E. Benlahmar and M. Talea, "Performance Analysis of Routing Protocols in Vehicular Ad Hoc Network", *Advances in Ubiquitous Networking*, pp. 31-42, 2017.
- [29] V. Jindal and P. Bedi, "Vehicular Ad-Hoc Networks: Introduction, Standards, Routing Protocols and Challenges", *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 13, Issue 2, 2016.
- [30] A. Singh, M. Kumar, R. Rishi, and D.K. Madan, "A Relative Study of MANET and VANET: Its Applications, Broadcasting Approaches and Challenging Issues", *1st International Conference on Computer Science and Information Technology, CCSIT, Springer*, 2011.

- [31] N.V. Pardakhe and R.R. Keole, “Analysis of Various Topology Based Routing Protocols in VANET”, *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, Vol. 4, Issue 6, pp. 35–38, 2013.
- [32] M. Abolhasan, T. Wysocki, and E. Dutkiewicz, “A Review of Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks”, *Ad Hoc Networks Journal*, Elsevier, 2004.
- [33] C. Mbarushimana, and A. Shahrabi, “Comparative Study of Reactive and Proactive Routing Protocols Performance in Mobile Ad Hoc Networks”, *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 2007.
- [34] H. Ghafoor and K. Aziz, “Position-based and geocast routing protocols in VANETs”, *7th International Conference on Emerging Technologies*, IEEE, 2011.
- [35] <http://www.cmu.edu/homepage/environment/2014/fall/from-0-70-in-30.shtml>
- [36] https://en.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_W140
- [37] <http://www.autonews.com/article/20161031/OEM06/310319825/honda-picks-tokyo-over-silicon-valley-for-ai-research-center>.
- [38] <http://www.reuters.com/article/us-toyota-connectivity-microsoftidUSKCN0X11LL>.
- [39] <http://dataconomy.com/2015/12/how-data-science-is-driving-the-driverless-car/>
- [40] <http://tpe-voiture-autonome.kazeo.com/les-principaux-capteurs-dune-voiture-autonome-a123093210>
- [41] C-I. Kuo, PC. Wang, CH. Lin, CK. Shieh and MF. Tsai, “Implementation of Radar Map Using GPS in Vehicular Networks”, *Proceedings of the International Computer Symposium ICS*, Springer, 2012.
- [42] <http://www.businessinsider.com/report-10-million-self-driving-cars-will-be-on-the-road-by-2020-2015-5-6>
- [43] M. H. Eiza, T. Owens, Q. Ni, and Q. Shi, “Situation-Aware QoS Routing Algorithm for Vehicular Ad Hoc Networks”, *IEEE Transactions on vehicular technology*, Vol. 64, No. 12, 2015.
- [44] R. Hajlaoui, H. Guyennet and T. Moulahi, “A Survey on Heuristic-Based Routing Methods in Vehicular Ad-Hoc Network: Technical Challenges and Future Trends”, *IEEE Sensors Journal*, Vol 16 Issue 17, 2016.
- [45] X-S. Yang, “Metaheuristic Optimization”, *Scholarpedia*, Vol 6, Issue 8, 2011.
- [46] C. Blum and A. Roli, “Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison”, *ACM Computing Surveys*, pp. 268–308, 2003.
- [47] I. Boussaïd, J. Lepagnot and P. Siarry, “A survey on optimization metaheuristics”, *Information Sciences Journal*, pp. 82-117, 2013.
- [48] T. A. El-Mihoub, A. A. Hopgood, L. Nolle, and A. Battersby, “Hybrid Genetic Algorithms: A Review”, *Engineering Letters*, August 2006.
- [49] P. Hansen and N. Mladenović, “An Introduction to Variable Neighborhood Search”, In: Voß S, Martello S, Osman I.H, Roucairol C. (eds) *Meta-Heuristics*. Springer, Boston, MA, 1999.

- [50] A. Kout S. Chikhi and S. Labed, “Comprehensive state of the art of bio-inspired routing in Mobile Ad hoc Networks”, Third International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology – IPCT, 2015.
- [51] M. Widmer, “Les métaheuristiques : des outils performants pour les problèmes industriels”, 3eme Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation, MOSIM’01, Troyes (France), 2001.
- [52] E-G. Talbi, “A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics. Journal of Combinatorial Optimization”, pp. 1-45, 1999.
- [53] V. Bachelet, P. Preux, and E-G. Talbi, “Parallel Hybrid Meta-heuristics : Application to the Quadratic Assignment Problem”, 1996.
- [54] J. P. Gibson, “Complexity and Algorithm Analysis”, cours de fondements mathématiques, Telecom SudParis, France. 2012.
- [55] J. van Leeuwen, editor. Handbook of Theoretical Computer Science: Algorithms and Complexity, volume A. MIT Press, 1990.
- [56] <https://discrete.gr/complexity/>
- [57] D. Wout, S. Marc, S. Kenneth and S. Johan, “Applications of metaheuristics”, European Journal of Operational Research, Vol. 179, Issue 3, pp. 601 – 604, Elsevier, 2007.
- [58] R. Hajlaoui, H. Guyennet and T. Moulahi, “A Survey on Heuristic-Based Routing Methods in Vehicular Ad-Hoc Network: Technical Challenges and Future Trends,” IEEE Sensors Journal , Vol 16 Issue 17, 2016.
- [59] K. P. Wang, L. Huang, C.-G. Zhou and W. Pang, “Particle swarm optimization for traveling salesman problem,” in Proc. Int. Conf. Mach. Learn. Cybern, Vol. 3, pp. 1583–1585, 2003.
- [60] Y. Del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R. G. Harley, “Particle swarm optimization: Basic concepts, variants”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 12, Issue. 2, pp. 171 – 195, 2008.
- [61] J. Kennedy and R. Mendes, “Population structure and particle swarm performance,” in Proc. IEEE Congr. Evol. Comput, vol. 2, May 2002, pp. 1671–1676.
- [62] S. Kannan, S. M. R. Slochanal, P. Subbaraj, and N. P. Padhy, “Application of particle swarm optimization technique and its variants to generation expansion planning problem,” Electr. Power Syst. Res, Vol. 70, no. 3, pp. 203–210, 2004.
- [63] S. Sharma, A. K. Giri, and N. Singhal, “Finding Optimal Configuration of DSDV using Particle Swarm Optimization,” Int. J. Comput. Appl, Vol. 104, no. 4, pp. 27–31, 2014.
- [64] D. K. Lobiyal, C. P. Katti, and A. K. Giri, “Parameter value optimization of ad-hoc on demand multipath distance vector routing using particle swarm optimization,” in Proc. Int. Conf. Inf. Commun. Technol. (ICICT), pp. 151–158, 2014.
- [65] Z. A. Zukarnain, N. M. Al-Kharasani, S. K. Subramaniam, and Z. M. Hanapi, “Optimal configuration for urban VANETs routing using particle swarm optimization,” in Proc. Int. Conf. Artif. Intell. Comput.Sci. (AICS), Bandung, Indonesia, pp. 15–16, 2014.
- [66] A. Bandi and B. N. Chandrashekar, “Parameters tuning of OLSR routing protocol with metaheuristic algorithm for VANET,” in Proc. Int. Adv. Comput. Conf. (IACC), 2015.

- [67] K. D. Kalambe, A. R. Deshmukh, and S. S. Dorle, "Particle swarm optimization based routing protocol for vehicular ad hoc network," *Int. J. Eng. Res. General Sci*, Vol. 3, no. 1, pp. 1375–1382, 2015.
- [68] O. Kaiwartya, S. Kumar, D. K. Lobiyal, P. K. Tiwari, A. H. Abdullah, and A. N. Hassan, "Multiobjective dynamic vehicle routing problem and time seed based solution using particle swarm optimization", *J. Sensors*, Vol. 2015, 2015.
- [69] <http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Eric.Goubault/poly/cours009.html>
- [70] <http://ehehe.free.fr/algogen/rapport.html>
- [71] E. S. Cavalcante, A. L. L. Aquino, and G. L. Pappa, "Roadside unit deployment for information dissemination in a VANET: An evolutionary approach", *14th Annu. Conf. Companion Genetic Evol. Comput*, pp. 27–34, 2012.
- [72] H. Cheng, X. Fei, A. Boukerche, and M. Almulla, "A genetic algorithm based sparse coverage over urban VANETs," in *Proc. 28th IEEE Int. Parallel Distrib. Process. Symp. Workshops*, pp. 464–469, 2014.
- [73] S. Raghay, S. El Hadaj and T. Noel, "A genetic algorithm for management data stream in VANET", *Int. J. Inf. Technol. Knowl. Manage*, Vol. 4, no. 1, pp. 315–318, 2011.
- [74] C. Lochert, B. Scheuermann, C. Wewetzer, A. Luebke, and M. Mauve, "Data aggregation and roadside unit placement for a vanet traffic information system," *5th ACM Int. Workshop Veh. Inter-Networking*, pp. 58–65, 2008.
- [75] S. A. Bitaghsir and F. Hendessi, "An intelligent routing protocol for delay tolerant networks using genetic algorithm," in *Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011.
- [76] D. Gupta and R. Kumar, "An improved genetic based routing protocol for VANETs," in *Proc. 5th Int. Conf. Next Generat. Inf. Technol. Summit*, pp. 347–353, 2014.
- [77] M. Hadded, R. Zagrouba, A. Laouiti, P. Muhlethaler, and L. A. Saidane, "A multi-objectif genetic algorithm-based adaptive weighted clustering protocol in VANET," *IEEE Congr. Evol. Comput*, Sendai, Japan, pp. 994–1002, 2015.
- [78] E. C. G. Wille, H. I. Del Monego, B. V. Coutinho and G. G. Basilio, "Routing Protocols for VANETs: An Approach based on Genetic Algorithms», *KSII Transactions on Internet and Information Systems Journal*, Vol. 10, no. 2, pp. 542-558, 2016.
- [79] A. Wilke, "Ant Colony Optimization", *University of Paderborn Bio-Inspired Networking Seminar* January 18, 2011.
- [80] A. M. Oranj, R. M. Alguliev, F. Yusifov, and S. Jamali, "Routing algorithm for vehicular ad hoc network based on dynamic ant colony optimization," *Int. J. Electron. Elect. Eng*, Vol. 4, no. 1, pp. 79–83, 2016.
- [81] U. Mane and S. A. Kulkarni, "QoS realization for routing protocol on VANETs using combinatorial optimization," *4th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. (ICCCNT)*, pp. 1–5, 2013.
- [82] X. Wang, C. Liu, Y. Wang, and C. Huang, "Application of ant colony optimized routing algorithm based on evolving graph model in VANETs," *17th Int. Symp. Wireless Pers. Multimedia Commun. (WPMC)*, 2014, pp. 265–270.

- [83] R. Silva, H. S. Lopes, and W. G. Junior, "A heuristic algorithm based on ant colony optimization for multi-objective routing in vehicle ad hoc networks," 11th Brazilian Congr. Comput. Intell, pp. 435–440, 2013.
- [84] H. Rana, P. Thulasiraman, and R. K. Thulasiram, "MAZACORNET: Mobility aware zone based ant colony optimization routing for VANET," Proc. IEEE Congr. Evol. Comput, México, 2013.
- [85] R. R. Sahoo, R. Panda, D. K. Behera, and M. K. Naskar, "A trust based clustering with ant colony routing in VANET," in Proc. 3rd Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. (ICCCNT), pp. 1–8, 2012.
- [86] M. Fathian, A. R. Jafarian-Moghaddam, and M. Yaghini, "Improving vehicular ad-hoc network stability using meta-heuristic algorithms," Int. J. Autom. Eng, Vol. 4, no. 4, pp. 1–11, 2014.
- [87] N. Meghanathan and M. Sugumar, "A beaconless minimum interference based routing protocol to minimize end-to-end delay per packet for mobile ad hoc networks," Int. J. Interdiscipl. Telecommun. Netw, Vol. 2, no. 1, pp. 12–26, 2010.
- [88] M. Ahmadi, M. Shojafar, A. Khademzadeh, K. Badie, and R. Tavoli, "A hybrid algorithm for preserving energy and delay routing in mobile ad-hoc networks," Wireless Pers. Commun, Vol. 85, no. 4, pp. 2485–2505, 2015.
- [89] S. Vodopivec, J. Bešter, and A. Kos, "A Survey on Clustering Algorithms for Vehicular Ad-Hoc Networks", 35th IEEE International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2012.
- [90] R. Hajlaoui, T. Moulahi and H. Guyennet, "Vehicular ad hoc networks: from simulation to real life scenario", IEEE International Conference on Communication, Management and Information Technology (ICCMIT 2017), Poland, 2017.
- [91] <http://www.prnewswire.com/news-releases/lg-and-intel-develop-and-pilot-5g-telematics-technology-for-next-generation-cars-300223806.html>, Mobile World Congress in Barcelona, Feb. 22, 2016.
- [92] P. Dharanyadevi, and K. Venkatalakshmi, "Proficient routing by adroit algorithm in 5G-Cloud-VMesh network", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Springer, 2016.
- [93] H. Xin, "Introduction of Centralized and Distributed Routing Protocols", IEEE International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011.
- [94] X. Shen and Z. Li, "Centralized Routing Protocol and Distributed Routing Protocol", 3rd International Conference on Computer Technology and Development, (ICCTD), 2011.
- [95] A.v. Sutagundar, P. Hubballi and R. Belagali, "Stability Oriented Cluster Dynamism in VANET (SOCDV)",
IEEE 2016 International Conference on Computational Systems and Information Systems for Sustainable Solutions, 2016.
- [96] J. P. Singh and R. S. Balib, "A Hybrid Backbone Based Clustering algorithm for Vehicular Ad-Hoc networks", International Conference on Information and Communication Technologies, Elsevier, 2015.

- [97] M. Re, L. Khoukhi, H. Labiod, J. Zhang and V. Veque, “A mobility-based scheme for dynamic clustering in vehicular ad-hoc networks (VANETs)”, IEEE/IFIP NOMS Workshop: International Workshop on Urban Mobility & Intelligent Transportation Systems (UMITS), 2016.
- [98] J-H Kwon, H. S. Chang, T. Shon, J-J. Jung and E-J. Kim, “Neighbor stability-based VANET clustering for urban vehicular environments”, Journal of Supercomputing, Vol. 72 Issue 1, pp. 161-176, 2016.
- [99] A. Abuashour and M. Kadoch, “A Cluster-Based Life-Time Routing Protocol in VANET”, 4th IEEE International Conference on Future Internet of Things and Cloud, 2016.
- [100] E. Daknou, M. Thaalbi and N. Tabbane, “Clustering Enhancement for VANETs in Highway scenarios”, 5th IEEE International Conference on Communications and Networking (COMNET), 2015
- [101] Z. Khan and P. Fan, “A Novel Triple Cluster based Routing Protocol (TCRP) for VANETs”, 83rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016.
- [102] P. Huballi, A. V. Sutagundar and R. Belagali, “Agent based Dynamic Clustering for Hybrid VANET (ADCHV)”, IEEE International Conference On Recent Trends In Electronics Information Communication Technology, 2016.
- [103] R. Mehra, R. S. Bali and P. Kaur, “Efficient Clustering based OLSR Routing Protocol for VANET”, Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN), 2016.
- [104] <http://www.ims.uni-stuttgart.de/institut/mitarbeiter/schulte/theses/phd /algorithm.pdf>
- [105] X. Y. Hong, K. X. Xu, and M. Gerla, “Scalable Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks”, IEEE Network, pp. 11–21, 2002.
- [106] J Y. Yu and P- H. J. Chong, “A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2005.
- [107] X. Jin and J. Han, “K-Medoids Clustering”, Encyclopedia of Machine Learning, pp. 564-565, Springer, 2010.
- [108] T. Velmurugan, “Efficiency of k-Means and K-Medoids Algorithms for Clustering Arbitrary Data Points”, Int.J.Computer Technology & Applications, Vol. 3, pp. 1758-1764, 2012.
- [109] https://www.interstate-guide.com/i-194_mi.html
- [110] M.Chatterjee, S K. Das and D.Turgut, “WCA: A Adjusted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks”, Cluster Computing Journal, Vol. 5, Issue 2, pp. 193–204, springer, 2002.
- [111] C. YAWUT, “Thèse de doctorat : Adaptation à la mobilité dans les réseaux ad hoc”, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
- [112] F. Bai, N. Sadagopan and A. Helmy, “IMPORTANT: A framework to systematically analyze the Impact of Mobility on Performance of Routing protocols for Adhoc Networks”, IEEE INFOCOM, 2003.
- [113] <https://omnetpp.org/9-articles/software/3726-omnet-5-0b1-released>
- [114] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Autoroute_A10_\(France\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Autoroute_A10_(France))

- [115] G. F. Ahmed, R. Barskar and N. Barskar, "An Improved DSDV Routing Protocol for Wireless Ad Hoc Networks", *Procedia Technology*, Elsevier, 2012.
- [116] H. Gong, N. Liu, L. Yu, and C. Song, "An Efficient Data Dissemination Protocol with Roadside Parked Vehicles' Assistance in Vehicular Networks", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013.
- [117] P. Li, Y. Fang and J. Li, "Throughput, delay, and mobility in wireless ad hoc networks", *Proceedings of the 29th conference on Information communications*, pp.1406-1414, USA, 2010.
- [118] M. Ren, L. Khoukhi, H. Labiod, J. Zhang and V. Vèque, "A mobility-based scheme for dynamic clustering in vehicular ad-hoc networks (VANETs)", *Vehicular Communications journal*, Elsevier, 2016.
- [119] A. Karimi, A. Afsharfarnia, F. Zarafshan, 1 and S. A. R. Al-Haddad, "A Novel Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks Based on Determination of Virtual Links' Weight to Increase Network Stability", *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, Vol. 12, no. 2, pp. 411–418, 2014.
- [120] M. A. Abid and A. Belghith, "Stability routing with constrained path length for improved routability in dynamic MANETs", *Journal of Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 15, Issue 8, Springer, pp. 799-810, 2011.
- [121] F. D. da Cunha, A. Boukerche, L. Villas, A. C. Viana and A. A. F. Loureiro, "Data Communication in VANETs: A Survey, Challenges and Applications", *research report N8498*, 2014.
- [122] P. K. Singh, K. Lego and T. Tuithung, "Simulation based Analysis of Ad hoc Routing Protocol in Urban and Highway Scenario of VANET", *International Journal of Computer Applications*. Vol. 12, No.10, 2011.
- [123] J. Toutouh, J. Garcia-Nieto and E. Alba, "Intelligent OLSR Routing Protocol Optimization for VANETs", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 61, Issue 4, 2012.
- [124] H. M. Weea and P.C. Yang, "The optimal and heuristic solutions of a distribution network", *European Journal of Operational Research*, Vol. 158, Issue 3, pp. 626 -632, 2004.
- [125] S. N. Kumar and R. Panneerselvam, "A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants", *Intelligent Information Management Journal*, 2012.
- [126] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijenk, B. Jarupan, K. Lin, and T. Weil, "Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions", *IEEE communications surveys tutorials*, 2011.
- [127] M. Fathian and A. R. Jafarian-Moghaddam, "New clustering algorithms for vehicular ad-hoc network in a highway communication environment", *Wireless Networks Journal*, Vol. 21, Issue 8, pp. 2765 - 2780, Springer, 2015.
- [128] S. S. Kumar, D. Rajaguru, T. Vengattaraman, P. Dhavachelvan, A. J. Jesline and J. Amudhavel, "Intelligent Collision Avoidance Approach in VANET Using Artificial Bee Colony Algorithm", *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 398. Springer, New Delhi, 2016.

- [129] S. Harrabi, I. B. Jaafar and K. Ghedira, "A Novel Clustering Algorithm Based on Agent Technology for VANET", *Network Protocols and Algorithms Journal*, Vol. 8, No 2, 2016.
- [130] S. Harrabi, I. B. Jaafar and K. Ghedira, "Novel Optimized Routing Scheme for VANETs", *7th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks (EUSPN)*, Springer, 2016.
- [131] M. Hadded, R. Zagrouba, A. Laouiti, P. Muhlethaler and L. A. Saidane, "A Multi-Objectif Genetic Algorithm-Based Adaptive Weighted Clustering Protocol in VANET", *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Sendai, Japan, pp.994 - 1002, 2015.
- [132] M. Chatterjee, S. K. Das, and D. Turgut, "WCA: A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks", *Cluster Computing*, pp. 193 - 204, 2002.
- [133] E. Moridi and H. Barati, "RMRPTS: a reliable multilevel routing protocol with tabu search in VANET", *Telecommun Syst*, Springer, 2016.
- [134] A. Hertz and D. de Werra, "The tabu search meta-heuristic: How we used it", *Math Artif Intell*, Springer, 1990.
- [135] R. Hajlaoui, M. Gzara and A. Dammak, "Hybrid Model for Solving Multi-Objective Problems Using Evolutionary Algorithm and Tabu Search", *World of Computer Science and Information Technology Journal (WCSIT)*, 2011.
- [136] U. Bilge, M. Kurtulan and F. Krac, "A tabu search algorithm for the single machine total weighted tardiness problem", *European Journal of Operational Research*, pp. 1423 - 1435, 2007.
- [137] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [138] <http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms /selection.php>
- [139] <http://khayyam.developpez.com/articles/algo/genetic/>
- [140] R. K. Bhattacharjya, "Introduction To Genetic Algorithms", Department of Civil Engineering IIT Guwahati, 2015.
- [141] A. R. Najeeb, A. M. Aibinu, M. N. Nwohu, M. J. E. Salami, and H. B. Salau, "Performance Analysis of Clustering Based Genetic Algorithm", *IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, pp. 327 - 331, 2016.
- [142] K. F. Man, K. S. Tang and S. Kwong, "Genetic algorithms: concepts and applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 43, Issue 5, 1996.
- [143] K. Prasanth, K. Duraiswamy, K. Jayasudha and C. Chandrasekar, "Reducing Packet Transmission Delay in Vehicular Ad Hoc Networks using Edge Node Based Greedy Routing", *International Journal of Computer Networks* , Vol. 2, Issue 1, 2010.
- [144] J. Boleng, W. Navidi, and T. Camp, "Metrics to enable adaptive protocols for mobile ad hoc networks", *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN '02)*, pp. 293–298, Las Vegas, Nev, USA, 2002.
- [145] S. Kumar, S. C. Sharma and B. Suman, "Classification and Evaluation of Mobility Metrics for Mobility Model Movement Patterns in Mobile Ad-Hoc Networks", *International journal on applications of graph theory in wireless ad hoc networks and sensor networks (GRAPH-HOC)* Vol.3, No.3, 2011.

- [146] https://en.wikipedia.org/wiki/Performance_metric
- [147] F. Bai, N. Sadagopan and A. Helmy, “The important framework for analyzing the Impact of Mobility on Performance Of Routing protocols for Adhoc Networks”, *Ad Hoc Networks journal*, pp. 383–403, 2003.
- [148] R. Shahidi and M. H. Ahmed, "Probability Distribution of End-to-End Delay in a Highway VANET", *IEEE Communications Letters*, Vol. 18, Issue 3, 2014.
- [149] A. Youssef and M. Younis, “Overlapping Multihop Clustering for Wireless Sensor Networks”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 20, Issue 12, 2009.
- [150] A. Youssef, M. Youssef, M. Younis, and A. Agrawala, “The Overlapped K-hop (OK) Clustering Algorithm”, Technical Report CS-TR-4735, Department of Computer Science, University of Maryland College Park, 2005.
- [151] R. Martí, M. Laguna and V. Campos, “Scatter Search vs. Genetic Algorithms”, In: Sharda R., Voß S., Rego C., Alidaee B. (eds) *Metaheuristic Optimization via Memory and Evolution. Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, Vol. 30. Springer, 2005.
- [152] S. Scheuerer, R. Wendolsky, “A scatter search heuristic for the capacitated clustering problem”, *European Journal of Operational Research*, pp. 533–547, 2006.
- [153] D. S. Yamashita, V. A. Armentano, and M. Laguna, “Scatter search for project scheduling with resource availability cost”, *European Journal of Operational Research*, pp. 623–637, 2004.
- [154] M. Laguna, R. Martí, “Scatter Search: Methodology, Implementations”, Kluwer Academic Press, 2003.
- [155] F. Glover, M. Laguna, and R. Martí, “Fundamentals of scatter search and path relinking”, *Control and Cybernetics Journal*. Vol 39 pp. 653- 684, 2000.
- [156] R. Martí, J-J. Pantrigo, A. Duarte, V. Campos and F. Glover, “Scatter Search and Path Relinking: A Tutorial on the Linear Arrangement Problem”, *International Journal of Swarm Intelligence Research*, 2(2), pp. 1-21, 2011.
- [157] J. Agrawal, A. Singhal, R.N. Yadav, “Multipath routing in mobile Ad-hoc network using meta-heuristic approach”, *IEEE International Conference on Advances in Computing, Communications, Informatics (ICACCI)*, India, 2017.

Annexe A

Système d'alerte à base d'Arduino Uno

Sommaire

1. Introduction.....	128
2. Système proposé.....	129
3. Architecture d'un robot.....	129
4. Expérimentation.....	132
<i>Scénario 1 : détection d'obstacles</i>	132
<i>Scénario 2 : détection de dommage de route</i>	134
5. Conclusion.....	134

1. Introduction

Cette section présente un système d'alerte à petite échelle pouvant être utilisé dans les zones non couvertes. Comme indique dans la figure A.1, ce système permet de tolérer les ruptures de connectivité en offrant des informations décrivant les conditions de circulation (obstacles, animaux passant la route, ...) ainsi que l'état de la rue (travaux, ralentisseurs de vitesse, dommages environnementaux). Par l'exploitation des nouvelles technologies de communication, les informations collectées seront diffusées d'un véhicule à un autre jusqu'à arriver aux zones couvertes. Notre but est de prouver que cette idée à faible coût est applicable à différents scénarios. Pour cela, nous effectuons des expérimentations dans des conditions réelles.



Figure A.1 Conditions de la route.

2. Système proposé

Nous avons utilisé la plateforme de développement open-source Arduino pour concevoir un réseau de trois robots mobiles.

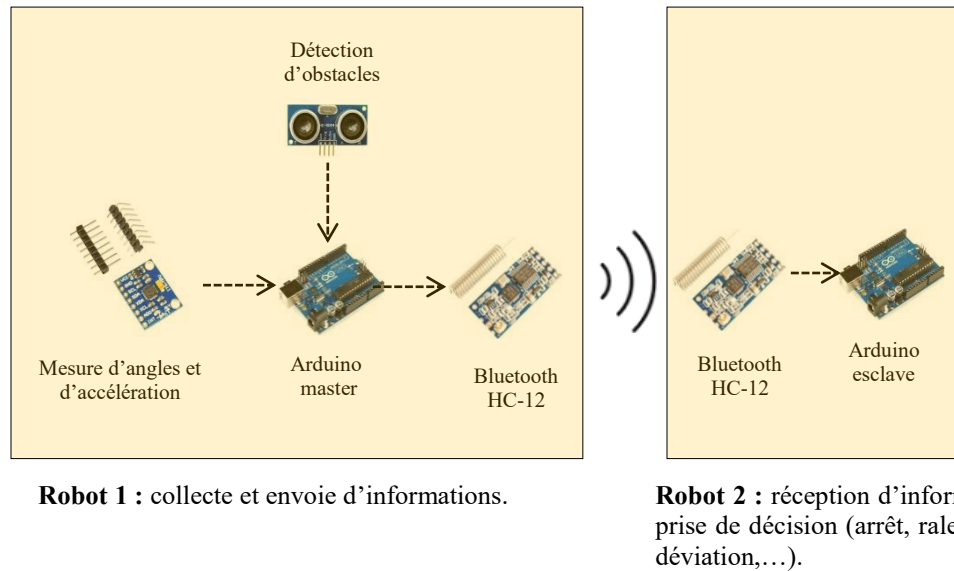


Figure A.2 Description du système.

3. Architecture d'un robot

Les sections suivantes décrivent l'architecture matérielle du robot développé.

a. Définition

Un robot est une machine électromécanique guidée par la programmation informatique [1].¹ Il est constitué par un châssis, 2 moteurs à courant continu, 2 roues motrices, une roue de guidage, un module L298D (pour commander les roues dans les deux sens), une carte ARDUINO UNO R3, une batterie 9V, un capteur d'obstacle de type Ultra-son HC-SR04, une module Bluetooth HC-12 et un module accéléromètre / gyroscope GY521.

[1] <https://www.pinterest.com/pin/593771532096074591/>

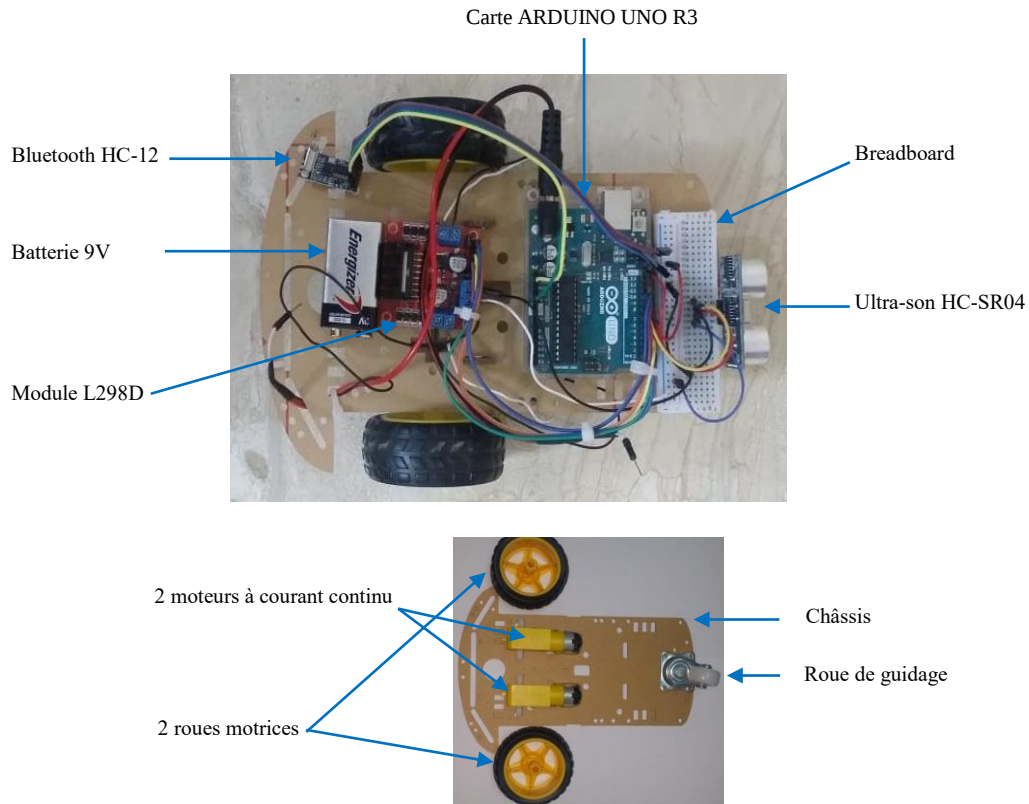


Figure A.3 Composants du robot.

b. Composants

<u>Carte ARDUINO UNO R3</u>	
Arduino Uno est une carte de microcontrôleur 8 bits basée sur l'ATmega328. Elle dispose de 6 broches analogiques, 14 broches numériques et d'autres broches d'alimentation telles que VCC et GND [2].	
<u>Capteur d'obstacles de type Ultra-son HC-SR04</u>	
Ce capteur fonctionne avec une tension d'alimentation de 5 volts. Il dispose d'un angle de mesure de 15° environ et permet de faire des mesures de distance entre 2 centimètres et 4 mètres avec une précision de 3mm [3]. Pour prendre une mesure, le système envoie une impulsion HIGH de 10µs sur la broche TRIGGER du capteur.	

Les ultrasons se propagent dans l'air jusqu'à toucher un obstacle et retourne dans l'autre sens vers le capteur. Le capteur détecte l'écho et clôture la prise de mesure. [4].	
<u>Un module Bluetooth HC-12</u>	
Le HC-12 est un module de communication série sans fil semi-duplex avec 100 canaux dans la gamme 433.4 - 473.0 MHz. Jumelé à une antenne externe, la couverture de ce module peut atteindre 1.8 km. Il est généralement utilisé pour créer une liaison sans fil entre deux ordinateurs en cas de manque de réseau. [5].	
<u>Un module accéléromètre / Gyroscope GY521</u>	
C'est une carte support basée sur un capteur MPU-6050, utilisée dans divers applications tel que les robots à auto-équilibrage. Ce capteur contient à la fois un gyroscope à 3 axes et un accéléromètre à 3 axes permettant des mesures des deux indépendamment. Il donne six valeurs en sortie : trois valeurs de l'accéléromètre et trois du gyroscope. Ces valeurs sont généralement en angles pour déterminer la position angulaire de son référentiel par rapport à un référentiel inertiel (ou galiléen) [6]. Elles sont utilisées pour détecter l'orientation permettant de suivre les mouvements. L'accéléromètre et le gyroscope sont tous deux intégrés dans une seule puce. En effet, la combinaison des valeurs de l'accéléromètre et du gyroscope permettra d'obtenir des valeurs précises des angles d'inclinaison par rapport à la surface de la terre [7].	

[2] C. Dahat, M. Thakur, R. Sahare, R. Ramtekkar, V. Barve and V. Khanwe, "VANET for Emergency Services and Accident Detection", International Journal of Engineering Science and Computing, Vol. 7 Issue 3, 2017.

[3] <https://randomnerdtutorials.com/complete-guide-for-ultrasonic-sensor-hc-sr04/>

[4] <https://www.acmesystems.it/HC-SR04>

[5] <https://www.allaboutcircuits.com/projects/understanding-and-implementing-the-hc-12-wireless-transceiver-module/>

[6] <http://www.instructables.com/id/MPU6050-Arduino-6-Axis-Accelerometer-Gyro-GY-521-B/>

[7] W M. M. Khaing and K. Thiha, "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF REMOTE OPERATED SPY ROBOT CONTROL SYSTEM", International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), Vol. 3, Issue 7, 2014.

Module L298D

Généralement, utilisé pour contrôler la vitesse et la direction des moteurs à courant continu, ou de contrôler un moteur pas à pas bipolaire avec facilité. De même, il peut être utilisé dans d'autres applications, tels que le pilotage de la luminosité des projets d'éclairage comme les réseaux de LED haute puissance. Ce module H-bridge L298N peut être utilisé avec les moteurs qui ont une tension comprise entre 5 et 35V DC [8].



4. Expérimentation

Cette section décrit les performances comportementales de l'algorithme mis en œuvre sur nos robots mobiles. C'est à dire à quel point notre système est capable d'atténuer les problèmes de la route et d'accomplir des tâches de sécurité et de couverture ?

Nous considérons deux scénarios : le premier simule l'existence d'obstacles et le deuxième simule l'existence des problèmes sur la route telle que les fissures ou les ralentisseurs.

Scénario 1 : détection d'obstacles

Dans ce scénario, lorsque le robot détecte un objet dans la route, il doit :

- Envoyer un message d'alerte vers le robot qui suit.
- Faire une déviation d'un angle alpha prédéterminé pour dépasser l'obstacle.

Si l'obstacle persiste, alors le robot s'arrête et attend jusqu'à ce qu'il y ait un passage (figure A.4).

[8] A. Abed and A. A. Jasim, "DESIGN AND IMPLEMENTATION OF WIRELESS VOICE CONTROLLED MOBILE ROBOT", Al-Qadisiyah Journal For Engineering Sciences, Vol. 9, No. 2, 2016.

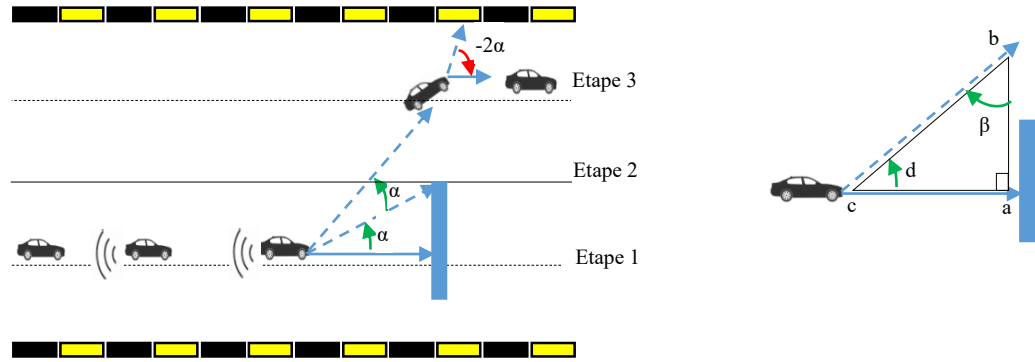


Figure A.4 Scenario 1 : détection d'obstacles.

Algorithme comportemental du scenario 1

Début

0. Initialisation

Déviaton $d=0$.

1. Robot en mouvement

2. Etape 1. Détection d'obstacle

- Envoie de message d'alerte au robot suivant.

3. Etape 2. (début de déviation)

Répéter

- Déviation de α degré
- $d=d+\alpha$.

Jusqu'à (absence d'obstacle) et ($D < 90$ degré)

4. Etape 3.

Si ($d < 90$) alors

- Avancer une distance [cb]
- Faire une déviation de $(-d)$ degré
- Avancer

Sinon

- Arrêt
- Déviation $(-d)$ degré
- Aller à Etape1

Fin si

Fin

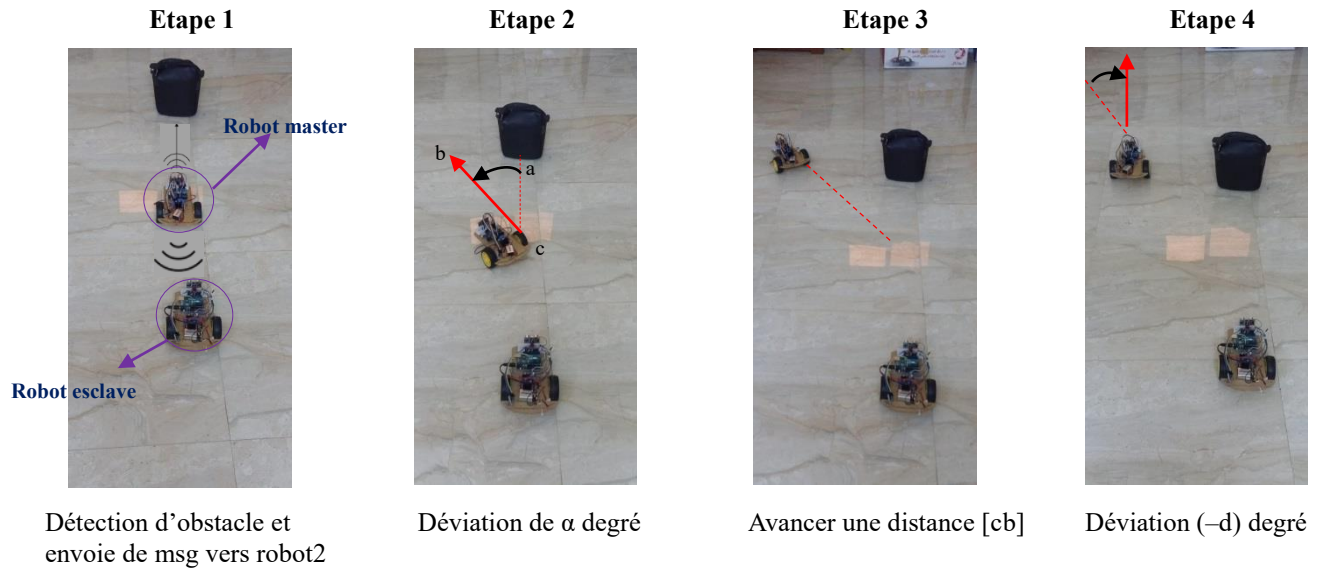


Figure A.5 Test du scénario 1.

Scénario 2 : détection de dommage de route

Le but de ce scénario est de détecter les fissures de la rue. Ce type de dommage affecte négativement l'équilibre du robot. Dans ce cas, le robot doit envoyer un message d'alerte au suivant pour qu'il prenne une décision préventive. Nous avons réalisé des tests pour vérifier la réaction du robot détecteur ainsi que le robot qui reçoit le message d'alerte. Dans le test que nous considérons, le robot 1 est le premier qui détecte le problème, puis il commence la phase de ralentissement suivant les informations offertes par le gyroscope. Lorsque le robot 1 atteint la zone du problème, il transmet un message au robot 2 et il allume sa LED rouge, afin d'être identifié visuellement. En effet, plus la déviation angulaire augmente plus la vitesse diminue.

5. Conclusion

Dans cette partie, nous avons fait une mise en œuvre réelle de trois robots mobiles basés sur des plates-formes Arduino et équipé par des capteurs et des modules de communication. Les capteurs sont conçus pour détecter les obstacles et surveiller l'équilibre des robots. Nous avons embarqué un algorithme comportemental qui indique aux robots les décisions à prendre en cas de problèmes. Compte tenu des faibles ressources disponibles, nous avons réalisé une expérimentation réelle de notre algorithme et nous avons montré son efficacité en cas de présence d'obstacles fixes ou mobiles. Par contrainte de temps nous n'avons pas pu exploiter les

données offertes par le gyroscope. En tant que travail futur, nous allons intégrer un Module GPS pour Arduino sur chaque robot pour connaître l'altitude, la position du robot. De même nous devons tester notre algorithme comportemental dans des conditions de route plus variables.

Titre : Résolution à base d'heuristiques du problème de routage dans les réseaux ad hoc de véhicules
Mots clés : Réseaux ad hoc de véhicules (VANET), protocoles, métaheuristiques, capteurs, routage Clustérisation.

Résumé :

Les réseaux ad hoc véhiculaires (VANETs) sont constitués par un ensemble de véhicules qui tentent d'échanger des données de sécurité et de confort même s'ils ne sont pas directement à portée radio. Les problèmes liés aux réseaux VANET ne sont pas encore tous résolus.

Dans ce contexte, et dans le but de maximiser la stabilité dans les réseaux VANETs, nous proposons différentes contributions combinant les métaheuristiques et la technique de clustérisation. Tout d'abord, nous proposons un modèle de routage utilisant l'algorithme de clustérisation le plus efficace K-medoids.

Ensuite, nous proposons plusieurs améliorations utilisant les métaheuristiques, plus précisément les AGs, la RT et la recherche par dispersion. Enfin, nous proposons une application réelle pour permettre la communication entre trois robots mobiles dans les zones non couvertes par le réseau VANET.

A l'aide de diverses métriques, des simulations extensives montrent que nos contributions présentent de bons résultats par rapport à d'autres modèles conçus pour le même but.

Title : Resolution of the VANET routing problem based on heuristic approaches.

Keywords : Vehicular Ad hoc networks (VANET), protocols, metaheuristics, sensors, routing, Clustering.

Abstract : Vehicular ad hoc networks (VANETs) consist of a set of vehicles trying to exchange security and comfort data even if they are not directly within radio range of each other. The problems related to VANET networks are not yet solved. In this context, and in order to maximize the stability in the VANETs networks, we propose different contributions combining the metaheuristics and the clustering technique. First, we propose a routing model using the most efficient clustering algorithm K-medoids.

Then, we propose several improvements using metaheuristics, more precisely the AGs, the RT and the Scatter Search. Finally, we propose a real application to allow communication between three mobile robots in an areas not covered by the VANET network. Using various metrics, extensive simulations prove that our contributions show good results compared to other models designed for the same purpose.