

N° d'ordre 3270

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Structure de Recherche : Laboratoire de Recherche en Informatique et
Télécommunications

Discipline : Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Informatique et Télécommunications

Présentée et soutenue le 14/12/2019 par :

Nisrine IBADAH

**Approches intelligentes pour une modélisation réaliste de la mobilité
dans des réseaux mobiles sans fil**

JURY

Salma MOULINE	PES, FSR, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Président
Mohammed OUMSIS	PES, EST Salé, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Directeur de thèse
Khalid MINAOUI	PH, FSR, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Co-directeur de thèse
Dounia LOTFI	PH, FSR, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Rapporteur/ Examineur
Rahal ROMADI	PES, ENSIAS, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Rapporteur/ Examineur
Rachid BENABBOU	PH, FST, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah de Fès, Maroc	Rapporteur/ Examineur
Mohamed RZIZA	PES, FSR, Université Mohammed V de Rabat, Maroc	Examineur
César BENAVENTE-PECES	Professeur titulaire, Université Polytechnique de Madrid, Espagne	Examineur
Mohamed KAYYALI	Dr, Président de la Fédération internationale des globales et vertes TIC (IFGICT), USA	Invité

Année Universitaire : 2019-2020

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire sont effectués au Laboratoire de Recherche en Informatique et Télécommunications (LRIT), à la Faculté des Sciences de Rabat, sous la direction du Professeur **Mohammed OUMSIS** et le co-encadrement des Professeurs **Khalid MINAOUI**.

Je commence par présenter ma plus vive gratitude à mon directeur de thèse **Pr. Mohammed OUMSIS**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à l'École Supérieure de Technologie de Salé. Grâce à ses encouragements, sa pédagogie et ses précieux conseils, il a su me guider pour mener à bien mes travaux de recherche. J'exprime ici ma profonde gratitude à son égard et l'estime respectueuse que je lui porte.

Je tiens à exprimer mes remerciements à mes co-encadrants, **Pr. Khalid MINAOUI (PH)** à Rabat, pour ces années de soutien, pour ses précieux conseils scientifiques et humains, ainsi que pour ses encouragements.

Je veux exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à **Pr. Salma MOULINE**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Je tiens également à exprimer mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse. Merci à **Pr. Dounia LOTFI**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences de Rabat d'avoir accepté de rapporter mon travail. Je la remercie pour son efficacité et ses précieuses recommandations qui ont apporté une valeur ajoutée à cette mémoire.

Je remercie aussi **Pr. ROMADI Rahal**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à l'École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes (ENSIAS) de Rabat, d'avoir accepté de rapporter cette mémoire et pour le temps qu'il a consacré pour lire et évaluer mon travail.

Je souhaite remercier profondément **Pr. BENABBOU Rachid**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, d'être un rapporteur de ce manuscrit. Je le remercie pour le temps qu'il a consacré pour lire et évaluer mon travail de recherche.

Je remercie aussi **Pr. Mohamed RZIZA**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour ses précieux conseils scientifiques, et d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je voudrais également remercier **Pr. BENAVENTE PECES César**, Professeur-Chercheur à l'Université Polytechnique de Madrid - Espagne, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de se déplacer pour participer au jury.

Je remercie aussi **Dr. KAYYALI Mohamed**, Président, Fédération internationale des globales et vertes TIC (IFGICT), USA, d'avoir accepté d'assister à ma soutenance et pour le temps qu'il a consacré pour annuler et retarder ces missions internationales.

A l'issue de la rédaction de cette recherche, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne

humeur. Je souligne le soutien amical et chaleureux de tous les doctorants du Laboratoire LRIT, qui ont croisé ma route durant ce parcours doctoral et, plus particulièrement, à tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé. Un merci spécial à mes chers amis **Dr. Hajar SAHBANI** et **Kanza BAYAD** pour les moments magnifiques et inoubliables que nous avons passé ensemble, pour leur sympathie, leur bonne humeur permanente, leur énergie positive.

Enfin et autant très important à mes yeux, je voudrais témoigner tout mon amour et ma reconnaissance à ma chère famille, à qui je dédie cette thèse. Je tiens à remercier chaudement ma mère **Lhaja Najat**, mon mari **SiMohamed**, ma soeur **Ilham**, mes oncles **Hbib Sidi Mohamed** et **Hbib Aziz**, mes tantes **Tata Samira**, **Tata Leila** et **Tata Meryam** mes cousins (**Roa, Youssef,...**) pour leurs encouragements et leur assistance aussi bien matérielle que morale qui m'ont permis de faire cette thèse dans de bonnes conditions, je ne saurais jamais être reconnaissante pour toute leur confiance en moi, leur affection, leurs conseils, mais aussi leur soutien indéfectible. Grâce à vous j'ai pu accomplir cette mission. Je vis en réalité dans la peau de "**Nisrine IBADAH CHARAAOUI JARHNOUN BENCHEKROUN**". Merci à vous, même si je ne pourrai jamais vous remercier assez, mes amis, mes collègues et mes étudiants. Merci à toutes personnes positives dans ma vie.

Résumé

Les communications sans fil sont devenues omniprésentes dans notre vie quotidienne. De nos jours, une grande diversité des équipements mobiles sont interconnectées grâce aux avancées technologiques fructueuses. Les chercheurs dans les universités et l'industrie se penchent constamment sur les enjeux qui exigent des protocoles et des services plus efficaces et novateurs, sans lacunes de communication et offrant une bonne qualité de service (QoS) aux utilisateurs. La mise au point de modèles de mobilité appropriés est l'une des décisions majeures pour améliorer les performances des réseaux sans fil. La pertinence des modèles de mobilité repose essentiellement sur leur capacité à simuler et évaluer les performances globales des réseaux mobiles sans fil et à concevoir les algorithmes et protocoles qui en dépendent. La mobilité fréquente représente l'un de ces défis où elle est examinée en profondeur en considérant les réseaux mobiles hautement dynamiques, ce qui pousse les modèles de mobilité à se concentrer sur la caractérisation du mouvement des nœuds. Ce qui mène à démontrer que le modèle de mouvement adopté a un impact majeur sur l'ensemble des performances du réseau.

Notre travail de thèse offre des approches intelligentes pour une modélisation réaliste de la mobilité dans des réseaux mobiles sans fil à travers : une validation approfondie des caractéristiques spatio-temporelles des modèles de mobilité synthétique. Ensuite, une modélisation flexible de la mobilité synthétique pour la découverte des trajectoires dans les environnements complexes. Et finalement par une collecte intelligente des traces de la mobilité des véhicules en temps réel. Nos résultats confirment l'efficacité et la robustesse de nos solutions proposées.

Mots clefs : MANET, Protocole de routage, modèle de mobilité, Métrique de mobilité synthétique, NS2, Boonmotion, Analyse des performances.

Abstract

Wireless communications have become omnipresent in our daily life. Nowadays, a wide diversity of mobile devices can be interconnected, due mainly to successful technological advances. In consequence, challenging issues requiring more efficient and novel protocols and services without communication gaps and offering a high quality of service (QoS) are constantly being addressed by both academia and industry. The achievement of appropriate mobility models is one of the most impacting developments to improve the performance of wireless networks. The relevance of mobility models relies on the fact that they are used for simulating and evaluating mobile wireless networks overall performance and to design and assess algorithms and protocols which are based on. Frequent mobility represents one of those challenging issues where it is deeply examined by considering highly dynamic mobile networks, leading the network mobility models to aim at characterizing the nodes movement. Several researchers have demonstrated that the adopted motion model significantly impacts the whole network performance.

Our thesis work offers intelligent approaches for realistic modeling of mobility in mobile wireless networks through : a deep validation of spatial temporal features of synthetic mobility models. Then, flexible synthetic mobility modeling to discover trajectories for complex areas of mobile wireless networks. And finally by a smart collection of real-time vehicular mobility traces. Our results confirm the efficiency and robustness of our proposed solutions.

Keywords : MANET, Routing protocols, mobility models, synthetic mobility metric, NS2, Boonmotion, Performance analysis.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des abréviations	ix
Introduction générale	1
1 État de l'art : Modélisation de la mobilité des réseaux mobiles sans fil	6
1.1 Introduction	6
1.2 Mobilités dans les réseaux mobiles sans fil	6
1.3 Modèles de traces vs. Les modèles synthétiques	7
1.4 Modèles de traces	8
1.4.1 Description des modèles antérieurs	8
1.4.2 Récapitulatif général des traces	9
1.4.3 Exemples des modèles de traces	9
1.5 Modèles synthétiques	10
1.5.1 Classification des modèles de mobilité synthétique	11
1.5.2 Étude comparative des modèles de mobilité	18
1.5.3 Comparaison des aspects qualitatifs des modèles de mobilité	19
1.6 Métriques de la mobilité synthétique	21
1.7 Conclusion	22
2 Analyse des performances des modèles de mobilité synthétiques	23
2.1 Introduction	23
2.2 Description des modèles de simulation	24
2.3 Présentation des modèles de mobilité simulés	24
2.4 Paramètres de configuration	25
2.5 Résultats de simulation	25
2.6 Discussion des résultats obtenus	31
2.7 Conclusion	32
3 Contribution 1 : Validation approfondie des caractéristiques spatio-temporelles des modèles de mobilité synthétique	33
3.1 Introduction	33
3.2 Description des modèles validés	34
3.3 Validation des modèles de mobilité synthétiques	35
3.3.1 Problème de dégradation de la vitesse	37

3.3.2	Phénomène de densité d'onde	38
3.3.3	Pourcentage moyen des voisins	40
3.3.4	Distribution spatiale des nœuds	42
3.4	Contribution 1 : Gamme des voisins mobiles	43
3.5	Intention globale des mesures de mobilité	46
3.6	Conclusion	48
4	Contribution 2 : Modélisation flexible de la mobilité synthétique pour la découverte des trajectoires dans les environnements complexes	49
4.1	Introduction	49
4.2	Caractéristiques de mise en œuvre	50
4.2.1	Motivation du modèle de mobilité de labyrinthe	50
4.2.2	Algorithmes de création et de résolution de labyrinthes	51
4.3	Processus de mise en œuvre du modèle de mobilité du labyrinthe	54
4.4	Caractéristiques du mouvement MzMM	57
4.4.1	Découverte de la trajectoire	57
4.4.2	Caractéristiques de MzMM	58
4.5	Validation des modèles de mobilité	59
4.5.1	Problème de dégradation de vitesse	60
4.5.2	Phénomène de densité des ondes	61
4.5.3	Pourcentage moyen de voisinage	61
4.5.4	Distribution spatiale des nœuds	63
4.5.5	Gamme des voisins mobiles	64
4.6	Analyse des performances	67
4.6.1	Paramètres de la configuration	67
4.6.2	Résultats de l'analyse des performances	68
4.6.3	Discussion des résultats	71
4.7	Conclusion	72
5	Contribution 3 : Collecte intelligente des traces de la mobilité des véhicules en temps réel	74
5.1	Introduction	74
5.2	Détails d'implémentation technique	75
5.2.1	Processus de réalisation de la plate-forme	75
5.2.2	Infrastructure adoptée	78
5.3	Objectifs réalisés	79
5.3.1	Surveillance	80
5.3.2	Enregistrement	81
5.3.3	Administration	82
5.3.4	Alertes	83
5.3.5	Statistiques	85
5.4	Traces du Maroc	89
5.5	Conclusion	91
	Conclusion et perspectives	93
	Liste des publications	97
	Bibliographie	98

Table des figures

1.1	Classification des modèles de mobilité synthétiques.	11
1.2	Classification des modèles de mobilité des entités.	12
1.3	Aperçu du modèle MGMM.	14
1.4	Taxonomie des modèles de mobilité véhiculaires.	18
2.1	Taux de délivrance des paquets des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Petite zone. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.	26
2.2	Taux de délivrance des paquets des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Grande surface. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.	27
2.3	Délai moyen de bout-en-bout des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Petite zone. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.	28
2.4	Délai moyen de bout-en-bout des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Grande surface. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.	29
2.5	Débit des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Petite zone. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.	30
2.6	Débit des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Grande surface. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.	31
3.1	Classification des modèles de mobilité synthétique validés.	34
3.2	Problème de dégradation de la vitesse. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.	38
3.3	Phénomène de densité d'onde. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.	39
3.4	Pourcentage moyen des voisins. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.	41
3.5	Distribution spatiale des nœuds à $t = 1000s$. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.	42
3.6	Gamme des voisins mobiles. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.	45
4.1	Le graphe de grille $G_4(5)$	52
4.2	La génération du labyrinthe parfait.	53
4.3	Exemple d'un labyrinthe parfait représenté par un graphique non orienté. a) Résolution du labyrinthe parfait, (b) Graphique non orienté de la résolution du labyrinthe.	53
4.4	Restitution correcte de la trajectoire basée sur : (a) Trajectoire correcte entre deux emplacements différents, (b) Restitution de la trajectoire basée sur le graphe non orienté.	54
4.5	Diagramme de flux du processus de réalisation du MzMM.	55

4.6	Mise en œuvre du modèle de mobilité labyrinthe. (a) Création d'un labyrinthe (Étape 1), (b) Distribution spatiale initiale des nœuds (Étape 2), et (c) Résolution du labyrinthe et restitution du trajectoire (Étapes 3 et 4).	56
4.7	Problème de dégradation de vitesse	60
4.8	Phénomène de densité des ondes	61
4.9	Pourcentage moyen de voisinage. (a) Maze MM (b) the RW MM; (c) the MG MM	62
4.10	Distribution des nœuds spatiaux à $t = 0s$. (a) Maze MM (b) RW MM; et (c) MG MM	63
4.11	Distribution des nœuds spatiaux à $t = 1000s$. (a) Maze MM (b) RW MM; et (c) MG MM	64
4.12	Gamme de voisins mobiles. (a) Maze MM (b) RW MM; et (c) MG MM	65
4.13	Taux de délivrance des paquets en (%) du MzMM par rapport à d'autres modèles de mobilité synthétiques. (a) Petite zone, (b) Grande surface.	69
4.14	Délai moyen de bout en bout en (ms) du MzMM par rapport à d'autres modèles de mobilité synthétiques. (a) Petite zone, (b) Grande surface.	70
4.15	Débit en (Kb/s) du MzMM par rapport à d'autres modèles de mobilité synthétiques. (a) Petite zone, (b) Grande surface.	71
5.1	Raccordement d'un traceur GPS dans un véhicule.	75
5.2	Techniques de base de la plateforme du tracés	75
5.3	Architecture client/serveur de la plateforme de traçabilité.	76
5.4	États du serveur de la plateforme.	76
5.5	Diagramme de flux décrivant les procédés et les modalités requises pour la mise en place de la plateforme avant le déploiement.	77
5.6	Processus détaillé de la réalisation	78
5.7	Aperçu général des interactions entre les éléments du système pour la collecte de traces en temps réel.	79
5.8	Fonctionnalités de la plateforme.	80
5.9	Onglet de la surveillance en temps réel.	81
5.10	Trajectoire consignée d'un véhicule.	82
5.11	Restriction de la zone géographique.	83
5.12	Contrôle des alertes PM2.	83
5.13	Aperçu de la console du serveur illustrant les détails du rapport d'alerte des excès de vitesse.	84
5.14	Diagramme représentant les pourcentages relatifs à aux types des notifications.	84
5.15	Console des statistiques du serveur.	85
5.16	Répartition du nombre total d'heures de stationnement enregistrées par mois.	86
5.17	Statistiques en temps réel du PM2 : (a) surveillance en temps réel; (b) détails sur le serveur de la plate-forme.	87
5.18	Progression du délai moyen de bout en bout pendant le temps du déploiement.	88
5.19	Application mobile de la plate-forme. Exemple d'informations simultanées fournies par le système : traçabilité et statistiques des utilisateurs de la carte.	88
5.20	Rapports en temps réel des informations signalées par le système.	89
5.21	L'historique des rapports de performance.	90
5.22	Site de la géolocalisation au Maroc.	91

Liste des tableaux

1.1	Comparaison des traces de mobilité (déploiement réel) et des modèles synthétiques (programme informatisé).	8
1.2	Synthèse comparative des modèles de traces antérieurs.	9
1.3	Comparaison des caractéristiques du mouvement des modèles de mobilité synthétique. C : Constante, HB : Basée sur l'historique, UD : Uniformément distribuée, PD : Probablement distribuée, P : Périodique, PL : loi de puissance Tronquée, NA : Non Applicable, Acc. Accélération, Déc. Décélération.	19
1.4	Caractéristiques qualitatives des modèles de mobilité synthétiques; O : Oui, N : Non, A : Ambiguë.	20
2.1	Paramètres de la simulation.	25
2.2	Résultats des synthèses expérimentaux.	32
3.1	Caractéristiques qualitatives des modèles de mobilité validés; O : Oui, N : Non, A : Ambiguë.	35
3.2	Paramètres de validation.	36
3.3	Comparaison des modèles de mobilité validés. C : Constante, HB : Basée sur l'historique, UD : Uniformément distribuée, PD : Probablement distribuée, P : Périodique, TPL : loi de puissance Tronquée, NA : Non Applicable, Acc. Accélération, Déc. Décélération.	36
3.4	Détails de la validation; * Métrique proposée.	46
3.5	Les atouts et les insuffisances des mesures de la mobilité synthétique; * la métrique proposée.	47
3.6	Comparatif des métriques de mobilité validées, + avantage, - imperfection, * métrique proposée	48
4.1	Comparaison des caractéristiques du mouvement : MzMM vs. Autres modèles de mobilité synthétiques.	59
4.2	Paramètres de validation.	60
4.3	Classification des modèles de mobilité validés	67
4.4	Paramètres de simulation.	68
4.5	Résumé des résultats expérimentaux.	72
4.6	Caractéristiques qualitatives des modèles de mobilité; O : Oui, N : Non, A : Ambiguë.	72
5.1	Récapitulatif comparatif des traces du Maroc et les modèles de traces antérieurs.	91

Liste des abréviations

AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
AP	Access Point
C10K	Concurrently Handling 10,000 Connections
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector Routing
DSR	Dynamic Source Routing
IARP	Intra-zone Routing Protocol
IERP	Inter-zone Routing Protocol
DTN	Delay-Tolerant Networking
GPS	Global Positioning System
GPRS	General Packet Radio Service
IoT	Internet of Things
M2M	Machine-to-Machine
MANET	Mobile Ad Hoc Network
MGMM	Manhattan Grid Mobility Model
MM	Mobility Model
MN	Mobile Node
MVC	Model-View-Controller
MzMM	Maze Mobility Model
NMM	Nomadic Community Mobility Model
OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
PDA	Personal Digital Assistant
PDR	Packet Delivery Ratio
PM2	Process Manager 2
PSN	Pocket Switched Networks
QoS	Quality Of Service
RPGMM	Reference Point Group MM
RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
RWMM	Random Waypoint Mobility Model
SLAW	Self-Similar Least Action Walk
SVN	Apache Subversion
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network
VLSI	Very-Large-Scale Integration
WSN	Wireless Sensor Network
ZRP	Zone Routing Protocol

Introduction générale

Contexte général

Les progrès technologiques actuels mènent à la disponibilité d'un grand nombre des appareils mobiles dotés des interfaces réseaux, un vif intérêt pour la communication sans infrastructure a conduit au développement des réseaux mobiles ; comme les réseaux ad hoc. Ces types de réseaux sont formés par des dispositifs autonomes où chaque appareil peut servir simultanément comme source, comme destination, ainsi que comme routeur intermédiaire. Par conséquent, dans de tels réseaux, les paquets sont transmis sur une base de sauts par sauts avec la coopération des autres nœuds du réseau (également connus sous le nom des "nœuds relais"). Il convient toutefois de mentionner que, un chemin contemporain doit être établi avant que les paquets puissent être acheminés le long d'un itinéraire défini. Les paquets dont la destination n'est pas accessible sont toujours supprimés. Il a toutefois été relevé qu'un tel itinéraire privilégié de la source à la destination peut ne pas toujours être disponible. Ainsi, le transfert de messages et les performances d'un réseau mobile dépendent principalement de la mobilité des nœuds i.e, des événements de rencontre entre les dispositifs (utilisateurs) lorsqu'ils se rassemblent et se dispersent. Une réflexion méthodique des modèles de mobilité est donc nécessaire pour aider à concevoir des protocoles de routage pour ces réseaux.

Les réseaux mobiles se distinguent par une connectivité occasionnelle, dont la plupart des communications dépendent de la mobilité des nœuds en question. Les nœuds doivent assurer durablement l'acheminement des paquets jusqu'à la destination. Par conséquent, le routage dans ces types des réseaux devra largement affronter les ruptures successives des liaisons de communication, qui se déclenchent par la mobilité fréquentes des nœuds qui s'éloignent les uns des autres et se déplacent en respectant le modèle de mobilité adopté. Ces réseaux peuvent simplement être formés par des humains transportant des appareils portatifs (comme des assistants numériques personnels (PDA) ou des téléphones cellulaires) ou des appareils installés à bord des véhicules. Par conséquent, les chercheurs se sont constamment penchés sur la nature de la mobilité en ce qui concerne les humains, les véhicules et les animaux sauvages. Pour étudier la nature du mouvement, ils ont parfois recueilli des traces réels, ou proposer des modèles de mobilité synthétique afin d'analyser par la suite leurs performances par rapport à divers scénarios.

Ces modèles de mobilité (MM) décrivent les schémas de déplacement des acteurs mobiles (nœuds) et leurs changements des paramétrages de mobilité (position, vitesse, accélération) pendant la période examinée. Par conséquent, les modèles de mobilité tentent d'imiter les modèles de déplacement dans des environnements réels qui sont dotés une grande fiabilité pour mesurer les performances des protocoles de communication. Ainsi, la modélisation de la mobilité représente un domaine de recherche florissant pour les réseaux mobiles. Jusqu'à présent, plusieurs modèles de mobilité synthétiques basés principalement sur des équations mathématiques ont été proposés, qui sont décrites par les lois du mouvement physique. Cette catégorie suscite toujours l'intérêt de la communauté des chercheurs du fait que ces modèles de mobilité synthétiques peuvent déployer un nombre variable de nœuds sur un

large domaine de simulation afin d'imiter un mouvement spécifique en présence de nombreuses contraintes du réseau. Récemment, cette catégorie a connu des progrès remarquables, en particulier en ce qui concerne les modèles de mobilité basés sur la sociabilité et la mobilité humaine. En effet, de nombreux motifs synthétiques sont suggérés pour représenter ces mouvements dans diverses situations de réseaux mobiles, par exemple les interventions militaires, les opérations de secours en cas des désastres et les interventions de sauvetage.

La modélisation de la mobilité est devenue un domaine de recherche très ciblé en ce qui concerne les contacts d'appareils dans le domaine des réseaux mobiles. En conséquence, une grande partie de la recherche a été orientée vers

- a) l'étude et la proposition de nouveaux modèles de mobilité,
- b) l'analyse de la mobilité (en particulier des humains) en utilisant des traces de mobilité réelles,
- et c) l'étude des performances réseaux sous différents modèles de mobilité.

Périmètre de thèse

Au fil des ans, les réseaux mobiles ad hoc ont connu un changement de paradigme, les chercheurs visant des réseaux plus efficaces mais très dynamiques. Les réseaux mobiles adhoc sont devenus véritablement "mobiles" avec une topologie en constante évolution et un écart de communication plus long. Ces réseaux s'intègrent de plus en plus au domaine des communications réseau, à mesure que de nouvelles applications sont développées sur cette nouvelle idée ; peu importe leur appellation, réseau à tolérance de retard (DTN), réseau mobile d'opportunité (MON) ou réseau à connexion intermittente (ICN). Des communications dans l'espace lointain de la NASA à la gestion des catastrophes, en passant par les applications véhiculaires, ce nouveau domaine de recherche n'a cessé d'évoluer depuis la dernière décennie. Grâce à des innovations technologiques telles que VLSI et la nanotechnologie, les appareils se sont rétrécis, sont devenus "plus rapides" et détiennent davantage de fonctionnalités qu'auparavant. Les appareils tels que les téléphones mobiles/cellulaires, les ordinateurs portables, les tablettes ou les PDA font désormais partie intégrante de la vie quotidienne des êtres humains. Les individus portent de tels dispositifs dans les lieux de travail, des regroupements sociaux et des réseaux mobiles peuvent être formés spontanément à l'aide de ces dispositifs. De plus, la science qui détermine la performance de ces réseaux est le mouvement physique des dispositifs qui y participent.

Depuis le début des années 1990, des physiciens, des biologistes et d'autres groupes de chercheurs examinent les tendances des mouvements humains et animaux. Leur étude a révélé que ces mouvements sont largement influencés par plusieurs facteurs tels que l'habitat, l'alimentation, l'emplacement des aliments et la tendance à former des groupes, des communautés ou des troupes. Les êtres humains sont des personnes sociaux, leur mobilité est de ce fait largement influencée par les aspects sociaux et la communauté à laquelle ils appartiennent. Même les animaux ont tendance à rester ou à se déplacer en groupe ou en troupeau. Cependant, la mobilité humaine est plus complexe que celle des animaux et fait encore l'objet de recherches. Et pour étudier les schémas de déplacement des humains et des animaux, les chercheurs ont recueilli des données statistiques par simple observation ou à l'aide d'appareils de communication pour recueillir des traces de mobilité. En étudiant ces traces de la mobilité, ils ont pu comprendre la nature même de cette mobilité. Il a révélé que le mouvement des humains et des animaux ne sont pas du tout aléatoire, mais qu'il a un schéma défini et répétitif.

Motivations du travail

Inspirés par le long héritage de la recherche dans ce domaine avantageux, qui forme le noyau principal même des réseaux dynamiques. L'idée du "Petit Monde" a été établie grâce à l'expérience novatrice menée par Stanley Milgram [1] sur les réseaux sociaux, où il est supposé que chaque personne dans le monde était reliée à toute autre personne par au plus six degrés de séparation. La même idée a été rétablie (par l'étude de graphiques évolutifs dans le temps) pour les réseaux mobiles où il a été démontré qu'un nœud de destination pouvait être atteint par un petit nombre de relais [2] (petit diamètre du réseau mobile). De telles expériences ont révélé que les modèles de mobilité humaine ne sont pas aléatoires, mais qu'ils sont déterminés par le comportement socialisant des humains. Ainsi, une telle étude méthodique de la mobilité humaine peut nous fournir des indications qui peuvent être utilisées pour diffuser des messages "opportunistes". Ces idées ont suscité un intérêt croissant parmi les chercheurs pour la collecte et l'étude des traces de mobilité et la recherche de modèles et de traits communs dans le mouvement de tous les individus. Même des physiciens renommés comme A. Einstein [3] ont montré un intérêt profond pour l'étude de la mobilité (étude du mouvement brownien), bien que son intérêt reposait entièrement sur l'étude de la mobilité des particules microscopiques. L'étude de la mobilité et la proposition de nouveaux modèles de mobilité sont devenues un sujet à part entière puisqu'elles sont devenues un facteur primordial dans la détermination des performances des réseaux ad hoc de la prochaine génération. Étant donné que la transmission des données dans un réseau opportuniste dépend fortement de la disponibilité des voies et de la mobilité des nœuds, les chercheurs du monde entier ont commencé à recueillir des traces de mobilité des véhicules et des personnes afin de comprendre les facteurs qui affectent la nature de cette mobilité. Il y a eu quelques travaux préliminaires [4, 5, 6] qui ont fait un bref survol des modèles de mobilité et de leur impact sur le routage ad hoc. Cependant, le domaine de recherche sur les modèles de mobilité ne cesse de s'élargir et plusieurs progrès ont été réalisés au cours des dernières années, notamment en ce qui concerne les modèles de mobilité humaine. En outre, les chercheurs ont acquis des connaissances sur l'effet de la mobilité sur le routage mais il manque une étude approfondie et comparative dans ce domaine.

Ces facteurs nous ont incités à élaborer une thèse de recherche exhaustive et centrée sur l'étude des modèles de mobilité, les traces de mobilité et l'impact de la mobilité sur la performance des réseaux mobiles. Nous avons premièrement évalué l'impact des modèles de mobilité sur des protocoles de routage de base. Ensuite, nous avons effectué une validation approfondie des modèles de mobilité synthétiques pour la première fois afin de détecter les défaillances en profondeur de chaque modèle. Par la suite, nous avons proposé un nouveau modèle synthétique hybride qui prend en considération des restrictions réalistes de mouvements des entités dans les aires complexes. Puis, nous avons collecté en temps-réel un nouveau modèle de traces qui prend en considération les problèmes de déploiement des tracés précédemment proposés. Tous nos travaux de recherche ont été validés par des professionnels spécialisés du domaine.

Structure de la thèse

Cette mémoire fournit un aperçu détaillé des différents types des modèles de mobilité qui ont été proposés jusqu'à ce jour en montrant comment la mobilité détermine largement la performance du routage mobile. Nous répartissons ce travail en quatre grands chapitres :

Tout d'abord dans le premier chapitre, nous présentons un aperçu détaillé de

toutes les familles des modèles de mobilité synthétiques qui ont été développés jusqu'à présent pour imiter les mouvements réels des humains, des animaux et des véhicules. Ainsi, nous abordons les différentes traces de mobilité à l'aide de différents dispositifs sans fil, qui ont été collectées et analysées. Nous étudions également les paramètres de mobilité qui influent le rendement des modèles sur les performances du réseau entier.

Cependant dans le deuxième chapitre, la modélisation de la performance est une partie importante et intégrale de toute recherche qui aide à mieux comprendre le réseau en cause. Étant donné que la mobilité joue un rôle important dans les réseaux mobiles et détermine grandement leurs performances. Nous validons en profondeur les paramètres de mobilité suggérés précédemment pour certains modèles de mobilité synthétique répandus qui n'ont pas été vérifiés jusqu'à présent. Ensuite, nous proposons une nouvelle métrique de mobilité appelée "gamme des nœuds voisins", qui révèle le déséquilibre des modèles de mobilité pendant toute la période de simulation.

Dans le troisième chapitre, nous avons validé les propriétés stochastiques spatio-temporelles les plus pertinentes des modèles de mobilité synthétique de référence. Chaque modèle souffre de plusieurs défauts de mobilité. Un ensemble de mesures est considéré pour décrire les caractéristiques de la mobilité, notamment : le problème de dégradation de la vitesse, le phénomène de densité d'onde, la distribution spatiale des nœuds et le pourcentage moyen des voisins. Ces métriques ont déjà été vérifiées pour le modèle de mobilité Random Waypoint, mais elles ne sont pas encore validées pour les autres modèles de mobilité synthétique, qui sont les plus fréquemment adoptés dans les simulations des réseaux mobiles sans fil. De ce fait, cette investigation vise à valider en profondeur ces métriques pour les autres modèles de mobilité, à savoir les modèles de mobilité Manhattan Grid, Reference Point Group, Nomadic Community, Self-Similar Least Action Walk, et SMOOTH. Par ailleurs, nous proposons une nouvelle métrique de mobilité appelée "gamme de nœuds voisins". La pertinence de cette nouvelle mesure est qu'elle prouve à la fois l'ensemble des résultats des mesures précédentes. Il offre une vue globale sur tous les voisins mobiles pendant la période expérimentation. D'où dans le quatrième chapitre, nous proposons dans cette étude un nouveau modèle de mobilité hybride d'entité, appelé le Maze Mobility Model (MzMM). Jusqu'à présent, divers modèles de mobilité d'entités ont été proposés qui ne prennent pas en compte toutes les caractéristiques des mouvements réels (temps, espace, environnement). Afin d'obtenir un modèle amélioré qui surmonte de telles limitations, notre nouveau modèle prend en compte la chronologie d'histoire, les dépendances spatiales et les restrictions géographiques. En même temps, il respecte les lois du mouvement pour refléter les scénarios réels à l'aide d'un mécanisme de découverte flexible, où il permet aux nœuds d'arriver à des destinations prédéfinies suivant les trajectoires les plus appropriées, en présence de plusieurs obstacles. Cette approche permet aux nœuds mobiles de se déplacer correctement même en présence de multiples contraintes de mobilité. L'importance de cette recherche est que la nouvelle approche consiste à adopter une combinaison réaliste de paramètres afin d'obtenir un modèle de mobilité flexible et robuste qui peut être appliqué à la mobilité autonome ou humaine, même dans des environnements complexes afin d'optimiser les performances des réseaux.

Pourtant dans le dernier chapitre, nous proposons une nouvelle procédure visant à collecter les traces tout en évitant les défaillances de la phase de déploiement, ce qui accroît la fiabilité des données. Le principal enjeu de cette méthode classique est qu'elle produit des dossiers incomplets en raison de certains incidents imprévisibles qui surviennent pendant le déploiement. La nouvelle démarche permet la

génération complète de traces avec un minimum de dommages sans qu'il soit nécessaire de récupérer les appareils mobiles ou de les perdre, comme était le cas pour les modèles de traçage de mobilité antérieurs. Basé sur la détection et la correction de tous les problèmes survenant par erreur en temps réel, le balayage de traces proposé offre un ensemble d'informations pertinentes sur l'état du véhicule qui ont été recueillies pendant sept mois. En outre, la procédure proposée permet un recouvrement efficace qui surmonte les problèmes évoqués et qui permet de contrôler tous les incidents de déploiement. Il pourrait être appliqué pour générer des traces de véhicules. De même, il est approprié pour recueillir et générer des traces humaines et animales. De plus, nous développons une plateforme de localisation complète qui permet la collecte d'un modèle de mobilité de traces de véhicules en temps réel pendant sept mois (environ 214 jours), où nos véhicules ont été localisés par GPS.

Notre travail de thèse offre des approches intelligentes pour une modélisation réaliste de la mobilité dans des réseaux mobiles sans fil à travers : une validation approfondie des caractéristiques spatio-temporelles des modèles de mobilité synthétique. Ensuite, une modélisation flexible de la mobilité synthétique pour la découverte des trajectoires dans les environnements complexes. Et finalement par une collecte intelligente des traces de la mobilité des véhicules en temps réel. Nos résultats confirment l'efficacité et la robustesse de nos solutions proposées. Tous nos travaux de recherche ont été validés par des professionnels spécialisés du domaine.

Chapitre 1

État de l'art : Modélisation de la mobilité des réseaux mobiles sans fil

1.1 Introduction

Depuis près de deux décennies, les communications mobiles sont devenues, un domaine majeur de recherche et de découvertes scientifiques. Le réseau mobile ad hoc s'est considérablement amélioré grâce à sa flexibilité, à sa maintenance allégée, à l'absence du contrôle centralisé, à l'infrastructure fixe et stationnaire, à ses capacités d'auto-gestion et à son auto-configuration. Par conséquent, les MANET [7] est devenu une partie intégrante du réseau mobile sans-fil. Ce type de réseau peut être établi n'importe quand et n'importe où, avec deux ou plusieurs nœuds mobiles. S'ils se trouvent dans la même portée radio, ils sont directement connectés entre eux. Ils doivent donc jouer les rôles des routeurs et d'hôte simultanément.

De nombreuses recherches ont été menées dans ce domaine où la modélisation de la mobilité fait l'objet d'une attention particulière. Un sujet émergent concerne les modèles de mobilité pour les réseaux opportunistes [8], les réseaux mobiles ad hoc (MANET) [9] et les réseaux ad hoc de véhiculaires (VANET) [10], qui recourent à la mobilité des nœuds pour acheminer les paquets. La détermination d'un modèle de mobilité approprié permet d'augmenter les performances globales du réseau, dans la mesure où il contribue au succès des protocoles de routage. Dont ces derniers sont fortement influencés par la mobilité des nœuds, où le même protocole fonctionne d'une manière complètement différente pour différents mouvements des nœuds.

1.2 Mobilités dans les réseaux mobiles sans fil

Plusieurs modèles de mobilité ont été proposés pour surmonter ces contraintes dans le but d'imiter la vie réelle des êtres humains, par exemple. Les communications sans fil présentent de nombreux problèmes liés à la densité des nœuds, à la charge du trafic applicatif, à l'autonomie énergétique et à la mobilité des nœuds déployés. Le routage au sein de ce réseau souffre de fréquentes mises à jour topologiques et de routes actives entre les nœuds mobiles non-connectées. Le principal défi du routage des MANETs est de développer un protocole de routage dynamique capable de trouver rapidement une route entre les nœuds mobiles. Le choix d'un modèle de mobilité (MM) peut préférer certains modèles à d'autres. Il doit être efficacement réadapté à tout changement survenant dans la topologie du réseau [11].

Les performances des réseaux mobiles ad hoc peuvent varier considérablement selon les différents modèles de mobilité. Parfois, ils évaluent les protocoles de routage sans tenir compte des différents modèles de mobilité. Ils les analysent souvent à l'aide d'un seul protocole de routage. Alors que parfois le temps de simulation employé est trop court. Cela influe fortement sur le rendement de plusieurs modèles de mobilité. Ou généralement, la surface de simulation utilisée est trop petite. Il influence le nombre de paquets reçus. Une mise en œuvre optimale nécessite une étude approfondie des protocoles de routage. Les chercheurs trouvent utile d'explorer les décisions et les paramètres des modèles de mobilité dans la modélisation de leurs communications sans fil lorsque les nœuds mobiles se déplacent d'un endroit à un autre sans infrastructure fixe.

Diverses recherches des réseaux de capteurs sans fil ont examiné l'impact des modèles de mobilité, et différents modèles de mobilité synthétiques ont été proposés dans ce cadre : [12], [10], [13]. En guise de vue d'ensemble, nous abordons dans cette partie une vue d'ensemble des différentes classes de mobilité afin de déterminer le contexte et le domaine dans lequel le modèle proposé est conçu, et en particulier les applications ciblant les humains, les animaux et les mouvements des véhicules. Les modèles de mobilité visent à prédire le mouvement des nœuds sous différentes contraintes. Ces modèles synthétiques tentent de déterminer la trajectoire d'un nœud depuis sa position actuelle jusqu'au point de destination prévu, en fonction de sa direction actuelle, de sa vitesse et de son historique temporel. Dans ce but, ces modèles sont caractérisés par des équations qui prennent en compte les lois physiques du mouvement. D'autre part, certains modèles s'inspirent des traces de mobilité réelle afin de modéliser des mouvements de la vie quotidienne [14]. Néanmoins, dans tous les cas, le principal défi est de savoir comment obtenir les meilleures performances possibles pour les communications sans fil en présence d'une mobilité fréquente [15].

1.3 Modèles de traces vs. Les modèles synthétiques

La modélisation de la mobilité est un domaine de recherche en plein essor depuis la fin des années 1990, en raison de sa pertinence dans le développement des réseaux sans fil modernes. Grâce à de nombreuses avancées technologiques de pointe, divers modèles de mobilité des traces ont été proposés sur la base de systèmes de contrôle variés tels qu'ils sont appliqués sur des réseaux Internet des objets (IoT) par exemple grâce aux micro-ordinateurs moins coûteux et aux capteurs sans fil. De nos jours, les systèmes de suivi peuvent générer un nombre de tracés de la mobilité sans tenir compte de l'identité des entités surveillées et du moment de la collecte des données [16]. Autrement dit, nous ne connaissons pas les moments dans lesquels notre localisation est surveillée et traquée par de nombreuses applications qui enregistrent les activités personnelles dans notre vie quotidienne [17], comme les opérateurs de télécommunication par téléphone, les radars policiers via les plaques des voitures, les espaces publics par les caméras. Ces manœuvres se produisent sans révéler d'indices de surveillance publique, ce qui rend notre mobilité un fléau et une bénédiction en même temps. Ces traces de mobilité sont particulièrement pertinentes lorsqu'elles reflètent fidèlement les mouvements de la vie réelle. Ils réussissent à modéliser la nature complexe du mouvement humain, des animaux sauvages et des véhicules hétérogènes. Cette catégorie nécessite plus de temps pour recueillir des traces témoignant de la nature du mouvement. De plus, leur déploiement est une tâche fastidieuse pour de nombreuses raisons telles que : les dépenses élevées du déploiement, les mémoires

de stockage requises et les batteries énergiquement puissantes. Malgré cela, la communauté scientifique est toujours prête à assimiler des comportements de mobilité réalistes en utilisant les réseaux mobiles où ils dévoilent un large éventail de données afin de valider de nouveaux protocoles et applications en utilisant des enregistrements concrets (véritables tracés). Le tableau 1.1 fournit une comparaison entre les modèles de mobilité des traces (pratiques) et les modèles de mobilité synthétiques (basés sur un programme de modélisation).

Caractéristiques	Modèles de mobilité synthétique	Traces de mobilité
évolutif	Oui	Non
Similitude à la vie réelle	Faible	élevée
Temps de surcharge	Petit	Large
Complexité	élevée	Faible
Coût de déploiement	Faible	élevé
Frais généraux de calcul	Large	Petit

TABLE 1.1 – Comparaison des traces de mobilité (déploiement réel) et des modèles synthétiques (programme informatisé).

1.4 Modèles de traces

1.4.1 Description des modèles antérieurs

Les tracés recueillis sont souvent de diverses sources de mobilité, telles que les humains, les animaux et les véhicules. Ils enregistrent le mouvement à travers un certain nombre de dispositifs déployés pendant des périodes de temps spécifiques. Les nœuds mobiles intègrent différents types d'appareils pour collecter les données, notamment par les iMotes, les PDA et les traceurs GPS. Les mises à jour de l'information sont transmises au coordinateur (ou au puits) à l'aide de diverses interfaces réseaux, via Bluetooth, GPRS et 802.11, comme le montre le tableau 1.2. Ces traces de mobilité ont été recueillies dans différents scénarios (conférences, campus universitaire, lieux publics) afin d'étudier le tracé des déplacements des humains, des animaux et des véhicules. Une grande partie de la collecte de traces a été consacrée à la mobilité humaine, dans la mesure où les personnes portant des appareils portatifs peuvent échanger des informations de manière sporadique quand elles se rencontrent ou passent d'une communauté à une autre. Cette approche est rarement mise en œuvre en raison de plusieurs contraintes techniques, telles que le coût de déploiement élevé et le grand nombre de dispositifs requis. Comme dans le cas des traces recueillies précédemment :

- les réinitialisations matérielles, qui surviennent très souvent et qui restent imprévisibles ;
- la consommation des batteries des appareils pendant le déploiement ;
- le vol ou le non-retour des dispositifs physiques par les utilisateurs. Où, le facteur humain constitue un des principaux problèmes de récupération des équipements à la fin de la période d'expérimentation.

Ces problèmes empêchent l'extraction complète de la totalité des données collectées, ce qui entraîne de sérieuses détériorations de la fiabilité des traces de mobilité. De nombreuses parties de ces enregistrements sont perdues du modèle collecté, ce

qui a un impact majeur sur les expériences simulées de la transmission et du routage entre les équipements.

1.4.2 Récapitulatif général des traces

Ces traces sont recueillies pour divers types de mobilité, comme pour les humains, les animaux et les véhicules. Diverses interfaces réseaux sont utilisées pour transmettre les mises à jour d'informations, comme Bluetooth, GPRS et 802.1. Ceux-ci enregistrent un certain nombre d'appareils pendant une durée spécifique où différents types d'appareils sont transportés par des nœuds mobiles, tels que les iMotes, les PDA et les traceurs GPS, pour collecter l'ensemble des données. Cette piste est rarement appliquée en raison de plusieurs contraintes, comme le coût de déploiement élevé où un grand nombre de dispositifs sont généralement coûteux. Cependant, ce modèle demeure le processus le plus efficace pour bien comprendre et valider les nouveaux protocoles, les applications de trafic et les modèles de propagation. Il en résulte de grandes similitudes avec les résultats de la vie réelle. Ces traces sont résumées dans le tableau 1.2.

Nom de Trace	Type de mobilité	Nombre de nœuds	Durée (jours)	Type des dispositifs	Réseau appliqué
Cambridge1	Humain	12	5	iMote	Bluetooth
Cambridge2 [18]	Humain	54	55	iMote	Bluetooth
ZebraNet	Animal	100	365	GPS	GPRS
Intel	Humain	9	3	iMote	Bluetooth
Hong Kong [19]	Humain	37	5	iMote	Bluetooth
Infocom, 2005 [18]	Humain	41	4	iMote	Bluetooth
Infocom, 2006 [18]	Humain	78	4	iMote	Bluetooth
Darthmouth [20]	Humain	6648	114	Ordi. portable/PDA	Wi-fi
UCSD [21]	Humain	273	77	PDA	Bluetooth
Toronto	Humain	23	16	PDA	Bluetooth
MIT BT [22]	Humain	100	246	Téléphone portable	Bluetooth
MIT GSM [22]	Humain	100	246	Téléphone portable	GSM
Shanghai [23]	Véhicule (Taxi)	2100	30	GPS	GPRS
SanFrancisco	Véhicule (Taxi)	500	30	GPS	GPRS
UMassDieselNet	Véhicule (Taxi)	40	60	Point d'accès	802.11b
USC [24]	Humain	4528	30	WLAN	802.11a

TABLE 1.2 – Synthèse comparative des modèles de traces antérieurs.

1.4.3 Exemples des modèles de traces

Les recherches ont été menées en permanence pour comprendre les comportements de mobilité réalistes des réseaux mobiles. Les modèles de mobilité synthétique sont conçus et appliqués souvent en simulation. Mais, ils ne tiennent pas compte dans la plupart du temps ; tous les aspects de la mobilité dans la conception et la mise en œuvre des réseaux mobiles, ni la nature de l'activité de mobilité observée dans la vie réelle. Divers modèles de mobilité à l'état de traces ont été recueillis au cours de diverses périodes. Dans cette partie, nous avons l'intention de présenter quelques traces qui ont déjà été mises en œuvre dans une brève enquête.

- **Cambridge [18]** : Dans cette expérience, des groupes d'utilisateurs ont transporté des iMotes de petits dispositifs avec eux pendant cinq jours ; la plupart

d'entre eux sont des étudiants au Computer Lab of Cambridge University, Royaume-Uni. De plus, un certain nombre de nœuds fixes sont déployés aux endroits les plus visités dans la ville de Cambridge. Les auteurs prévoient que les gens visiteront divers endroits comme des cafés, des centres commerciaux et des supermarchés. Seulement 12 périphériques sont suivis avec succès à la première trace de Cambridge en raison de la perte de certains des iMotes expérimentés, ainsi que de nombreux problèmes matériels se sont produits. Où, ces problèmes n'ont pas été détectés lors du déploiement qu'après l'analyse des enregistrements des dispositifs récupérés.

- **Intel [18]** : Cet ensemble de données contient les observations Bluetooth des utilisateurs dans Intel Research Cambridge Corporate Laboratory pendant environ 6 jours. Ils ont été répartis entre les chercheurs et le personnel qui étaient considérés comme des "internes". Toutefois, les dispositifs restants sont reconnus comme "externes". 9 iMotes sont correctement collectés où le nœud 1 était stable et les iMotes de 2 à 9 étaient mobiles. Mais, largement des traces ont été établies seulement pendant 3 jours.
- **Toronto [25]** : Des chercheurs ont recueilli des traces Bluetooth dans divers environnements urbains dans le but d'étudier la viabilité d'une vaste épidémie par la pratique. Des étudiants de l'université de Toronto ont porté des appareils pendant 16 jours. Cet ensemble de données a été recueilli en activant Bluetooth sur 23 assistants personnels Tungsten-T avec 16 Mo de RAM et un PalmOS pour scanner les appareils Bluetooth.
- **ZebraNET [26]** : Dans cette expérience, les données enregistrées représentent les traces de mouvement concernant deux scénarios réels de déploiement de ZebraNet à Sweetwaters Game Reserve de Nanyuki, Kenya. La première expérience a eu lieu en janvier 2004 et la seconde à l'été 2005. Le matériel des nœuds de capteurs était principalement composé d'un processeur MSP430, d'une mémoire flash, d'un module d'interface radio et d'un module GPS. L'ensemble des données recueillies utilisait le format d'horodatage Unix et fournissait des renseignements détaillés sur l'emplacement des animaux.
- **San Francisco Taxi Trace [27]** : Les enregistrements obtenus lors de ce test comprenaient des traces de 500 taxis dans la région de la baie de San Francisco prises pendant 30 jours. Chaque taxi est équipé d'un récepteur GPS qui indique l'identifiant, l'horodatage et les coordonnées géographiques. Les traces de mobilité de la cabine ont été fournies par l'exploratorium lors du développement du projet de repérage des cabines.
- **UMassDieselNet [28]** : Il s'agissait également d'une expérience de traçage des véhicules DTN qui a été réalisée par la branche UMass Amherst de la Pioneer Valley Transport Authority (PVTa). Les données recueillies représentent la circulation quotidienne de 40 autobus sur la route. Un bus scanne les autres qui utilisent un point d'accès radio (AP) 802.11b disponible (découvert) pour accéder aux médias et recevoir les connexions entrantes pendant qu'ils sont dans la zone de couverture d'AP. Les bus de DieselNet étaient équipés d'un ordinateur de bureau comprenant un disque dur de 40 Go de stockage et un récepteur GPS.

1.5 Modèles synthétiques

Les modèles de mobilité synthétique [29] imitent le mouvement des nœuds mobiles réels qui changent de vitesse, de position et de direction avec le temps. Ils

peuvent être réalisés en faisant en sorte que les mobiles se déplacent d'un endroit à un autre à un moment donné sous diverses restrictions de réseau. Ils représentent précisément les caractéristiques de mouvement des nœuds mobiles. Ils font partie des principaux paramètres qui influencent les performances du réseau mobile afin de juger quel protocole est utile dans un scénario particulier. La mobilité des nœuds doit être analysée pour explorer les besoins de dépendance et de topologie.

1.5.1 Classification des modèles de mobilité synthétique

La classification des modèles synthétiques de mobilité peut être menée de diverses manières [30]. Les modèles de mobilité synthétique sont divisés en quatre grandes catégories : MM d'entité [13], MM corrélés ou basés sur des groupes [31], MM humains ou sociaux [32], et MM véhiculaires [33], comme le montre la figure 1.1.

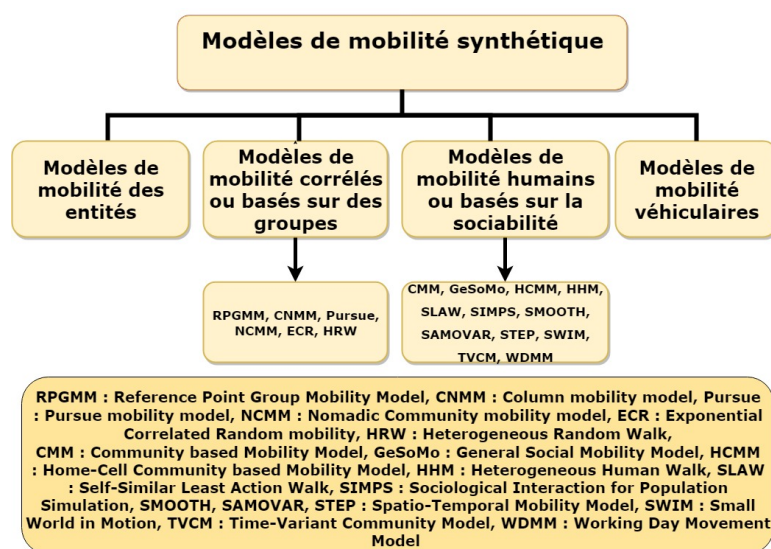


FIGURE 1.1 – Classification des modèles de mobilité synthétiques.

Chaque classe a une gestion de la mobilité spécifique qui fait face à de nombreux défis, y compris le choix de la topologie appropriée.

1. Modèles de mobilité des entités
2. Modèles de mobilité corrélés ou basés sur des groupes
3. Modèles de mobilité humains ou basés sur la sociabilité.
4. Et, Modèles de mobilité véhiculaires

1. Modèles de mobilité des entités

Les "modèles de mobilité des entités" assurent l'indépendance des nœuds les uns des autres, c'est-à-dire que chaque nœud sélectionne indépendamment sa vitesse spécifique, son temps de pause et sa destination. De nombreux modèles de mobilité synthétique par entité ont été proposés pour faire face à des circonstances spécifiques. Chaque modèle a une stratégie spécifique en fonction d'un ensemble de paramètres environnementaux (aléatoires, spatiaux, historiques et géographiques). Cette classe a été répartie selon les catégories ci-après, comme présente la figure 1.2 :

— Modèles de mobilité aléatoire,

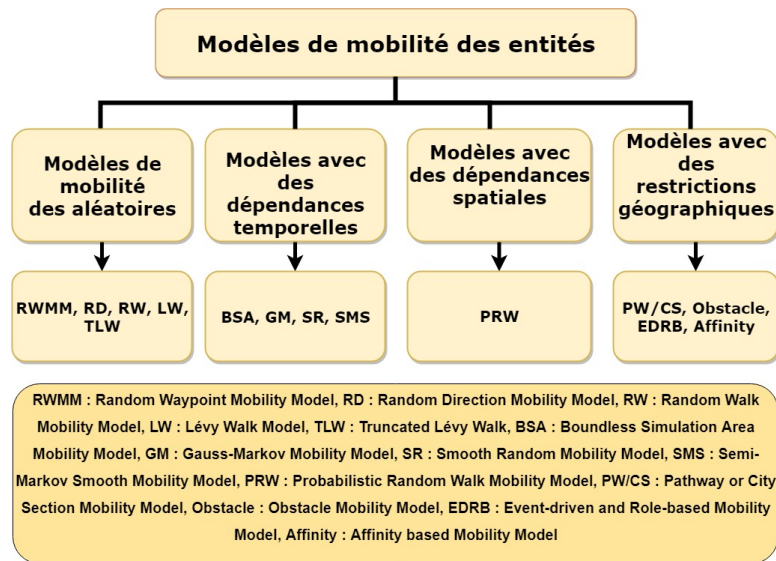


FIGURE 1.2 – Classification des modèles de mobilité des entités.

- **Modèles avec des dépendances temporelles,**
- **Modèles avec des dépendances spatiales**
- **Et; Modèles avec des restrictions géographiques.**

(a) **Modèles de mobilité aléatoire :** Dans le modèle de mobilité aléatoire, les nœuds se déplacent librement et sans aucune restriction. Tous les attributs de mobilité comme la vitesse, la direction et les points de repère (destination) sont sélectionnés de manière aléatoire et indépendante de la sélection précédente. Ces sélections produisent de nombreux problèmes de mobilité pour ces modèles, comme indiqué dans [34]. Par conséquent, ces modèles de mobilité sont généralement appelés sans mémoire, puisque la vitesse (ou la direction) à l'instant "t" est indépendante de la vitesse (ou de la direction) à l'instant précédent (t - dt). Par exemple :

- **Modèle de mobilité Random Waypoint (RWMM) [35].**
- **Random Direction Mobility Model (RD) [36]**
- **Lévy Walk Model (LW) [37]**
- **Random Walk Mobility Model (RW) [38]**

— **Modèle de mobilité Random Waypoint (RWMM) [35] :**

Le modèle de mobilité des points de cheminement aléatoires a été d'abord proposé par Johnson et Maltz [39] et qui est rapidement devenu une référence pour évaluer les protocoles de routage et les applications MANET en raison de sa simplicité. Dans un point de cheminement aléatoire, un nœud choisit au hasard une nouvelle destination (x, y) (à l'intérieur d'une zone définie) et une vitesse qui est distribuée uniformément entre [minspeed, maxspeed]. Le nœud se déplace ensuite vers la destination choisie à la vitesse sélectionnée. Une fois arrivé à sa destination, le nœud mobile s'arrête pendant une période de temps spécifiée, après laquelle il sélectionne à nouveau une destination et une vitesse aléatoire et continue de la même manière. Un tel mouvement de nœud comme ci-dessus est connu sous le nom de mobilité basée sur les époques; ce qui signifie que pendant une période

donnée appelée époque, un nœud se déplace vers une destination donnée avec une même vitesse.

Au début de la simulation, les nœuds sont répartis aléatoirement sur une zone donnée. En [40], il a été remarqué qu'il y a une grande fluctuation dans le "pourcentage moyen des voisins" qui influe sur les résultats des performances d'une simulation. Par conséquent, les chercheurs ont proposé d'éliminer les 1000 premières secondes de la simulation (également connue sous le nom de période d'échauffement) afin d'annuler le problème d'initialisation.

Cependant, les chercheurs ont trouvé plusieurs failles dans la mobilité aléatoire des stations de cheminement. Bettstetter [41] et Blough et al [42] ont respectivement observé que la distribution spatiale des nœuds du modèle Random Waypoint est transformée d'une distribution uniforme à une distribution non uniforme après le début de la simulation. Au fur et à mesure que le temps de simulation s'écoule, la distribution spatiale déséquilibrée des nœuds s'aggrave encore. Enfin, il atteint un état d'équilibre. Dans cet état, la densité de nœuds est maximale dans la région centrale, alors que la densité de nœuds est presque nulle autour de la limite de la zone de simulation. Ce phénomène est appelé distribution spatiale non uniforme. Royer, Melliar-Smith et Moser [36] ont observé une autre pathologie du modèle Random Waypoint, appelée phénomène de la densité (le nombre moyen de voisins pour un nœud varie périodiquement au fil du temps). Le repère aléatoire souffre également d'un problème de dégradation de la vitesse. Yoon et al [43] ont montré que la vitesse moyenne des nœuds diminue constamment avec le temps et elle ne devrait donc pas être utilisée dans la simulation.

- (b) **Modèles avec des dépendances temporelles** : Lorsque le mouvement d'un nœud a une dépendance temporelle, cela signifie que la mobilité est régie par des lois physiques du mouvement et que son mouvement actuel dépend de son historique de mouvement. Par exemple, la vitesse actuelle d'un nœud peut dépendre de la vitesse précédente. Encore une fois, dans la plupart des cas, les nœuds se déplacent le long d'un chemin donné ; par exemple, les véhicules circulent le long des routes et les déplacements des piétons peuvent être bloqués par des bâtiments [44]. Il existe :
- **Gauss-Markov Mobility Model (GM)** [45].
 - **Smooth Random Mobility Model (SR)** [46]
 - **Semi-Markov Smooth Mobility Model (SMS)** [47]
 - **Boundless Simulation Area Mobility Model (BSA)** [48]
- (c) **Modèles avec des dépendances spatiales** : Les mouvements des nœuds ne sont pas toujours aléatoires ou ont une dépendance temporelle. Il a été observé à de nombreuses reprises que la destination d'un nœud peut dépendre de son emplacement actuel. On dit que de tels mouvements de nœud ont une dépendance spatiale car l'emplacement d'un nœud à l'instant suivant est probablement lié à son emplacement à l'instant présent [49]. On trouve :
- **Probabilistic Random Walk Mobility Model (PRW)** [50].

(d) **Modèles avec restriction géographique** : Parfois, le mouvement des nœuds peut être limité à une zone délimitée, par exemple dans une zone de conférence ou dans une institution académique et un campus. On considère que ces modèles de mobilité ont des restrictions géographiques. Par exemple, les déplacements d'une personne peuvent être guidés par des couloirs et obstrués par des bâtiments. Cela peut aussi dépendre du rôle spécifique d'une personne[51]. Il y a :

- **Pathway or City Section Mobility Model (PW/CS)** [52]
- **Obstacle Mobility Model** [53]
- **Event-driven and Role-based Mobility Model (EDRB)** [54]
- **Affinity based Mobility Model** [55]

— **Manhattan Grid Mobility Model (MGMM)** est un parmi les "modèles avec des restrictions géographiques" et qui représente une variante du Pathway or City Section Mobility Model. Les mouvements des nœuds ne sont pas toujours aléatoires ou ont une dépendance temporelle/spatiale. Mais, il peut être obstrué dans une zone limitée, guidé par des chemins, obstrué dans une zone ou une ville limitée ou restreint dans un bâtiment. Même dans la vie réelle, les nœuds ne se déplacent pas de façon aléatoire, mais selon des trajectoires prédéfinies sur une carte, c'est-à-dire que la mobilité des nœuds a une dimension géographique contrainte. La carte est prédéfinie dans le champ de simulation. Tian et al [56] ont modélisé la carte d'une ville à l'aide d'un graphique aléatoire. Cet graphique peut être généré de façon aléatoire ou défini avec soin en se basant sur la carte d'une ville réelle. Les sommets du graphique peut représenter les bâtiments de la ville, les carrefours ou les virages et les bords modélisent les rues entre deux n'importe où jonctions. La destination de chaque phase de mouvement est choisie au hasard, un certain degré de randomité existe encore pour ce modèle. Ainsi, dans ce modèle de mobilité basé sur des graphiques, les nœuds se déplacent de façon pseudo-aléatoire sur les trajets [57]. La figure 1.3 illustre une représentation de mobilité suivant ce modèle.

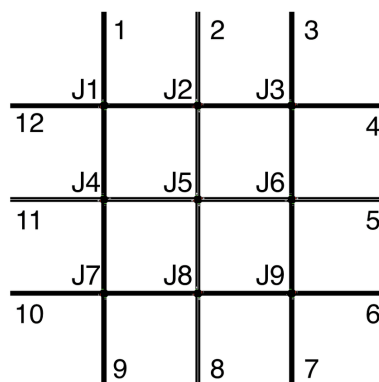


FIGURE 1.3 – Aperçu du modèle MGMM.

Tous les modèles antérieurs sont qualifiés comme des modèles de mobilité synthétiques des entités.

2. Modèles de mobilité corrélés/ basés sur le groupe

Les modèles de mobilité par groupe sont ceux dans lesquels les nœuds ont

tendance à se déplacer en groupe et à se comporter de manière coopérative. Le point de cheminement d'un nœud est largement affecté par les autres membres qui appartiennent au groupe. Ils ont tendance à former des grappes et s'écartent rarement d'un point de référence au sein du groupe. Le modèle de mobilité de groupe comprend six modèles ; à savoir :

- **Reference Point Group mobility model** [58],
- **Column mobility model** [59],
- **Pursue mobility model** [60],
- **Nomadic Community mobility model (NMM)** [61],
- **Exponential Correlated Random mobility model** [62],
- **et; Heterogeneous Random Walk** [63].

— **Modèle de mobilité par groupe de points de référence (RPGM)** [58] :

Dans ce modèle de mobilité par groupe, l'ensemble de la population du nœud est divisé en un certain nombre de groupes, chaque groupe ayant un responsable. Le leader peut être un centre logique ou un nœud prédéfini. Le mouvement du responsable de groupe caractérise complètement le mouvement de son groupe correspondant des nœuds mobiles, y compris leur direction et leur vitesse. Chaque MN se déplace au hasard autour de ses propres points de référence prédéfinis, dont leurs mouvements dépendent du mouvement du groupe. Le mouvement du centre logique de chaque groupe et le mouvement aléatoire de chaque MN au sein du groupe sont implémentés via le modèle de mobilité Random Waypoint. Pour chaque nœud, la mobilité est affectée d'un point de référence qui lui est affecté le mouvement de groupe. Sur ce point de référence prédéfini, chaque nœud mobile pourrait être placé au hasard dans le voisinage. Formellement, le vecteur de mouvement des membres du groupe i au temps t , \vec{V}_i^t , peut être décrit comme :

$$\vec{V}_i^t = \vec{V}_{group}^t + RM_i^t \quad (1.1)$$

Où V_{group} est le vecteur de mouvement du groupe et RM_i est un vecteur aléatoire dévié par un membre du groupe i par rapport à son propre point de référence. Le vecteur RM_i est un processus aléatoire indépendant distribué de manière identique (i.i.d) dont la longueur est uniformément distribuée dans l'intervalle $[0, r_{max}]$ (où r_{max} est l'écart de distance maximal autorisé) et dont la direction est uniformément distribuée dans l'intervalle $[0, 2\pi]$.

Le modèle RPGM a d'abord été proposé dans [64], puis repris dans [65]; avec une sélection appropriée de chemins prédéfinis pour le chef de groupe et d'autres paramètres, le modèle RPGM est capable d'émuler une variété de comportements de mobilité. Différentes applications du RPGM ont également été proposées :

- **Modèle de mobilité sur place** : l'ensemble du champ est divisé en plusieurs régions adjacentes. Chaque région est occupée exclusivement par un seul groupe. La communication sur les champs des batailles est un exemple.

- **Modèle de mobilité par chevauchement** : différents groupes ayant des tâches différentes se déplacent dans le même domaine d'une manière qui se recoupe. Les secours en cas des catastrophes sont un bon exemple de

ce modèle.

- **Modèle de mobilité de la Convention** : ce scénario doit imiter le modèle de mobilité de la convention, comme le comportement de mobilité lors de la conférence. Une zone est également divisée en plusieurs régions tandis que certains groupes sont autorisés à se déplacer d'une région à l'autre. Plusieurs variantes du RPGM telles que le modèle de mobilité Reference Velocity Group (RVG) [66] et le modèle de mobilité de groupe structuré (SG) [66] ont été développées pour répondre aux exigences des caractéristiques de mobilité de la vie réelle.

— **Modèle de mobilité Nomadic Community (NMM) [67]** :

Le modèle de mobilité Nomadic Community représente les scénarios de mobilité où un groupe de nœuds se déplacent ensemble. Ce modèle pourrait être appliqué aux communications mobiles dans le cadre d'une conférence ou d'une application militaire. Au sein de chaque communauté ou groupe de MNs, les individus maintiennent leurs propres "espaces personnels" où ils se déplacent de manière aléatoire. Une classe d'étudiants visitant un musée d'art est un bon exemple d'un tel modèle de mobilité où les étudiants individuels peuvent se promener autour d'un point de référence donné. L'ensemble du groupe de nœuds mobiles se déplacent de façon aléatoire d'un endroit à un autre en fonction des changements de point de référence. Contrairement à la mobilité en colonne où chaque nœud a son propre point de référence, ce modèle n'a qu'un seul point de référence pour l'ensemble du groupe.

3. **Modèles de mobilité basés sur l'humain ou la sociabilité**

Les modèles de mobilité basés sur l'humain ou la sociabilité sont déployés pour les utilisateurs des réseaux à commutation de poche (PSN)[68]. Les chercheurs s'intéressent beaucoup encore à l'étude de la mobilité, en particulier en ce qui concerne l'homme. Les scientifiques tentent encore de comprendre la nature complexe de la mobilité humaine. Les individus n'appartiennent jamais chaque jour à la même communauté ou au même réseau social et qu'ils peuvent changer ou être attirés par des communautés différentes au fil du temps contrairement aux animaux qui ont tendance à rester confinés dans leur propre troupeau et rarement changent de groupe. Cependant, les humains ont tendance à rester confinés à leur propre emplacement géographique (connu sous le nom d'emplacement de résidence) et leur emplacement présente rarement une grande variation. Les humains sont des êtres sociaux; par conséquent, leur mouvement est largement régi selon le type de communauté à laquelle ils appartiennent. Les nœuds sont animés par la socialisation des comportements humains. De plus, les gens ont tendance à rester confinés dans leur propre groupe social et en sort rarement. Ainsi, de nombreux modèles de mobilité ont été développée, en particulier en ce qui concerne les mouvements humains, inspiré par l'idée des réseaux sociaux. Par exemple, les gens passent la journée au bureau, la soirée au café et retournent à la maison la nuit. On peut citer :

— **Community based Mobility Model [69]**

— **Time-Variant Community Model (TVCM) [70]**

— **Working Day Movement Model (WDMM)[71]**

— **Sociological Orbit aware Location Approximation and Routing (SO-LAR) [72]**

- **Sociological Interaction for Population Simulation (SIMPS) [73]**
- **Small World in Motion (SWIM) [74]**
- **Self-Similar Least Action Walk (SLAW) [75]**
- **Statistical Area-based MOBility model for VirtuAl and Real-world environments (SAMOVAR)**
- **Home-Cell Community based Mobility Model (HCMM) [76]**
- **Heterogeneous Human Walk (HHW) [77]**
- **General Social Mobility Model (GeSoMo) [78]**
- **SMOOTH [79]**
- **Spatio-Temporal Mobility Model (STEP) [80]**

- **Self-Similar Least Action Walk(SLAW) [75] :**

Le SLAW a été conçu pour intégrer cinq caractéristiques importantes de la mobilité humaine

 - Répartition des trajets et des temps de pause
 - Zones de mobilité hétérogènes délimitées des individus
 - Temps de contact entre les lois de puissance tronquées
 - Dispersion auto-similaire des destinations
 - Planification des déplacements les moins urgents (LATP)

La dispersion auto-similaire des destinations implique que les gens sont toujours attirés par les endroits populaires et que leurs destinations de visite sont fortement concentrées. C'est que les endroits les plus populaires sont fortement regroupés alors que les moins populaires sont loin les uns des autres. C'est ce qu'on appelle aussi la distribution fractale des points de cheminement. De plus, les endroits à forte popularité sont rares et les endroits à faible popularité sont nombreux. SLAW prend en considération le facteur LATP qui détermine la probabilité de visiter une destination voisine à partir de n'importe laquelle de ces destinations multiples.

- **SMOOTH [79] :**

Le modèle de mobilité SMOOTH a été proposé par Munjal et al [79] pour incorporer deux caractéristiques importantes de la mobilité humaine, à savoir une distribution tronquée de la loi de puissance de la durée du vol et des temps de pause. L'ensemble de la zone de simulation est divisé en nombre de repères qui représentent chaque grappe ou communauté. Chaque nœud mobile est initialement placé à l'intérieur d'un cluster sélectionné au hasard. Pour modéliser le mouvement, chaque nœud mobile choisit d'explorer un nouvel emplacement avec une probabilité proportionnelle au nombre d'emplacements distincts visités jusqu'ici. Pour le nouvel emplacement d'abord la longueur du vol est générée à l'aide d'une distribution de loi de puissance. Si un nœud choisit de visiter l'un des lieux qu'il a visité auparavant, le lieu est sélectionné avec une probabilité proportionnelle au nombre total de fois que le nœud a visité le lieu précédemment. La vitesse du nœud est proportionnelle à la durée du vol et le temps de pause suit à une distribution tronquée de la loi de puissance.

4. Modèles de mobilité véhiculaires

La communication des véhicules devient partie intégrante des systèmes de transport intelligents "intelligent transport system" (ITS)[81] et constitue le facteur clé du maintien de la sécurité routière. La communication entre les

véhicules se compose de deux éléments de base, à savoir véhicule à véhicule (V2V) et véhicule à l'infrastructure (V2I). La communication V2V et V2I a été appliquée à la diffusion de l'information, à la prévision des temps de parcours et à la gestion de la congestion. Catégorisé sous VANET, un certain nombre de protocoles d'application et de routage ont été développés pour la communication V2V et V2I, dont l'évaluation dépend strictement de la modélisation de la mobilité des véhicules.

Le modèle de mobilité des véhicules simule le mouvement des véhicules le long des routes et des autoroutes, les changements de vitesse, les déplacements dans les files d'attente et les arrêts aux feux de circulation. De plus, le mouvement du véhicule suit l'algorithme du chemin le plus court d'une source donnée à une destination. Pour modéliser le mouvement des véhicules, un modèle de mobilité des véhicules a été développé. Les premiers travaux tels que [82], classaient la mobilité des véhicules en microscopiques ou macroscopiques. Cependant, selon [83], les auteurs ont classé le modèle de mobilité des véhicules en :

- **Modèles synthétiques,**
- **Modèles basés sur des enquêtes,**
- **Modèles à base de traces,**
- **Et, Modèles basés sur des simulateurs de circulation.**

La figure 1.4 montre la taxonomie des modèles de mobilité des véhicules proposé dans [83].

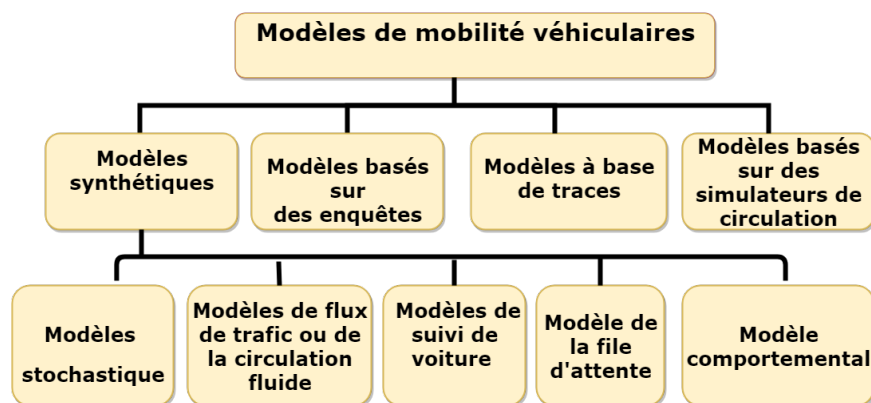


FIGURE 1.4 – Taxonomie des modèles de mobilité véhiculaires.

1.5.2 Étude comparative des modèles de mobilité

Le tableau 1.3 présente l'étude comparative des modèles de mobilité par entité, par groupe et par société.

	Modèles de mobilité	Vitesse	Direction	Acc./Déc	Temps de pause	Long. du vol	Temps de retour et la fréquence des visites
Modèles de mobilité des entités	RWMM	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	RD [36]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	TLW [38]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	RW [38]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	GM [84]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	SR [46]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	SMS	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	BSA	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	PRW	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	PW/CS [52]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	Obstacle [53]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	EDRB [54]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	Affinity [55]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
Modèles de mobilité Corrélés	RPGMM	Basé sur le point de référence	Basé sur le point de référence	NA	C/UD	NA	NA
	Column [67]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	Persue [67]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	NMM	NA	Autour du point de référence	NA	NA	NA	NA
	ECR [85]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	HRW [86]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
Modèles de mobilité humains	CMM [69]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	TVCM [70]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	WDMM [71]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	SIMPS [73]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	SWIM [74]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	SLAW	NA	PD selon les destinations définies	NA	TPL	TPL	P
	SMOOTH	NA	PD selon les destinations définies	NA	TPL	TPL	P
	SAMOVAR [87]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	HCMM [76]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
	HHW [77]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
GeSoMo [78]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA	
STEP [80]	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA	

TABLE 1.3 – Comparaison des caractéristiques du mouvement des modèles de mobilité synthétique.

C : Constante, HB : Basée sur l'historique, UD : Uniformément distribuée, PD : Probablement distribuée, P : Périodique, PL : loi de puissance Tronquée, NA : Non Applicable, Acc. Accélération, Déc. Décélération.

1.5.3 Comparaison des aspects qualitatifs des modèles de mobilité

Le tableau 1.4 offre une comparaison fondée sur certains aspects qualitatifs des modèles de mobilité. Les caractéristiques qualitatives qui ont été incluses sont :

	Modèles de mobilité	Réaliste	Modulable	Représentation et analyse mathématiques	Utilisation de la carte géographique	Peut être simulé
Modèles de mobilité des entités	RWMM	N	O	O	N	O
	RD [36]	N	O	O	N	O
	TLW [38]	A	A	O	N	N
	RW [38]	N	O	O	N	O
	GM [84]	N	O	O	N	O
	SR [46]	N	O	O	N	O
	SMS	N	O	O	N	O
	BSA	N	O	O	N	O
	PRW	N	O	A	N	O
	PW/CS [52]	N	O	N	N	O
	Obstacle [53]	A	O	N	A	O
	EDRB [54]	N	O	N	A	O
	Affinity [55]	N	O	O	N	O
Modèles de mobilité Corrélés	RPGMM	N	O	A	N	O
	Column [67]	N	O	O	N	O
	Persue [67]	N	O	O	N	O
	NMM	N	O	N	N	O
	ECR [85]	N	O	O	O	O
Modèles de mobilité humains	HRW [86]	N	O	A	N	O
	CMM [69]	O	O	N	N	O
	TVCM [70]	O	O	O	O	O
	WDMM [71]	O	O	N	O	O
	SIMPS [73]	O	O	A	N	A
	SWIM [74]	O	O	O	O	O
	SLAW	O	N	A	O	O
	SMOOTH	N	O	N	O	O
	SAMOVAR [87]	N	N	N	O	O
	HCMM [76]	O	O	A	O	O
	HHW [77]	A	O	A	N	O
	GeSoMo [78]	A	O	A	O	O
	STEP [80]	A	O	N	O	O

TABLE 1.4 – Caractéristiques qualitatives des modèles de mobilité synthétiques;

O : Oui, N : Non, A : Ambiguë.

1. **Réaliste** : si un modèle de mobilité donné est réaliste et capable d'imiter assez fidèlement la mobilité observée à appliquer pour l'évaluation des performances du réseau. De plus, certains modèles sont limités à des champs d'application spécifiques et ne peuvent pas être pris comme modèle générique de mobilité,
2. **Modulable** : Le modèle de mobilité doit être capable d'intégrer un nombre croissant des nœuds facilement sans affecter les propriétés observées du modèle,
3. **Représentation et analyse mathématiques** : certains ou tous ses paramètres peuvent être représentés par une équation exacte ; par exemple le cas du modèle Lévy walk,
4. **Utilisation du graphique social** : certains modèles comme le CMM et le HCMM utilisent des graphiques sociaux pour contrôler les mouvements des

nœuds,

5. **Utilisation de la carte géographique** : quelques modèles se servent de la carte géographique sur laquelle les nœuds peuvent se déplacer,
6. **Peut-être simulé** : certains modèles ne peuvent pas être facilement simulés en raison de la complexité du modèle ou des surcharges de calculs qui y sont liées.

Quelques modèles sont trop lourds pour qu'ils n'observent pas la propriété d'évolutivité. Si un modèle satisfait une propriété donnée, nous le désignons par O (oui) sinon par N (non). Certaines propriétés d'un modèle de mobilité donné sont contestées et discutables, nous désignons ces propriétés telles que A (ambiguë).

1.6 Métriques de la mobilité synthétique

Les chercheurs sont constamment impatients de comprendre les mouvements réalistes de mobilité des réseaux mobiles sans fil. Plusieurs traces sont préalablement implémentées pour modéliser des mouvements réels. Jusqu'à présent, plusieurs modèles de mobilité synthétiques ont été proposés, qui s'inspirent parfois de ces traces de mobilité dans le but d'étudier la gestion de la mobilité.

La gestion de la mobilité dans les réseaux ad hoc sans fil est confrontée à de nombreux défis. Ce qui représente l'ensemble des mécanismes fournissant une correspondance variante dans le temps entre l'identifiant d'un nœud mobile et son emplacement dans la structure du réseau.

— Le problème de la dégradation de vitesse

Cette propriété représente le niveau de conformité à la vitesse attribuée qui est autorisée avant de générer le modèle de mobilité. C'est l'une des questions la plus largement critiquée. Un modèle de mobilité souffre d'une diminution de la vitesse lorsque la vitesse moyenne du nœud diminue à un niveau d'équilibre qui tombe en dessous de la vitesse moyenne initiale du nœud. Une telle diminution de la vitesse peut avoir une influence considérable sur les performances mesurées et les taux de surcharge. Par conséquent, il n'est pas possible de présenter des valeurs moyennes dans le temps pendant cette période de régression, du fait que le processus de la détérioration n'est pas stationnaire. Cette mesure a été introduite par Yoon et al. [88] pour RWPM.

— La distribution spatiale des nœuds

Cette propriété décrit comment les nœuds mobiles sont localisés spatialement dans le champ de simulation. Cela est principalement lié au fait que le positionnement initial des nœuds est généralement basé sur une distribution uniforme; le modèle de mobilité peut modifier cette distribution pendant la simulation. Ce comportement se produit généralement si la surface de simulation a des frontières. Si nous ne savons pas comment le modèle de mobilité utilisé modifie la distribution des nœuds, les résultats de simulation peuvent être mal interprétés. Bettstetter et al [89] ont validé cette métrique pour RWPM.

— Le phénomène de densité des ondes

Cette mesure de mobilité représente le nombre moyen de voisins d'un nœud mobile défini à un instant donné de l'expérience. Cela représente le nombre moyen de voisins de chaque nœud et qui fluctue pendant la simulation, où les nœuds situés dans des zones spécifiques de la surface de simulation pourraient avoir beaucoup plus de voisins que les autres, c'est-à-dire que leur densité change. Cette mesure a été rapportée la première fois par Royer et al [90].

— **Le pourcentage moyen de voisins**

Cette mesure décrit le pourcentage cumulé du nombre total de nœuds voisins qui représente le pourcentage total des voisins des nœuds pendant toute la période de validation. Les faibles valeurs de cette métrique reflètent le degré d'instabilité du modèle en terme de voisinage, ce qui conduit à des mauvaises performances du réseau [91].

Sur la base de ces propriétés stochastiques, il est possible d'effectuer une analyse et une simulation précise d'un modèle de mobilité et des problèmes qui peuvent affecter les performances d'un réseau mobile sans fil. L'analyse du réseau est principalement effectuée pour vérifier l'ensemble du processus de simulation en utilisant des mesures de performance appropriées qui n'affichent qu'une perspective générale. De plus, une validation adéquate de la mobilité permet de détecter avec précision les causes de la détérioration du réseau sans avoir besoin de mettre en place un modèle de mobilité pour analyser les performances du réseau mobile.

1.7 Conclusion

Inspirée par les nombreuses recherches menées dans le cadre de ces travaux novateurs et intéressants, notre objectif est de regrouper des solutions de mobilité dans une enquête bien structurée. Le but principal de ce présent chapitre est de réaliser une étude générale sur les modèles de mobilité et les traces recueillies de la mobilité observée dans la nature. L'un des principaux objectifs des modèles de mobilité est d'aider à l'étude des performances du réseau (par rapport au protocole de routage, par exemple) pour tout type de réseau mobile. Par conséquent, la performance d'un protocole de routage particulier dans un réseau mobile dépend largement des caractéristiques de la mobilité physique de ses utilisateurs. L'étude de l'effet de la mobilité dans les réseaux mobiles est incomplète, à moins que nous n'ayons pas une connaissance approfondie des modèles de mobilité. C'est pourquoi nous effectuons d'abord une étude approfondie sur les modèles de mobilité et les traces des expériences précédentes observées dans la vie réelle. Ensuite, nous étudions son effet sur le réseau mobile qui servira de guide de base à tous ceux qui aspirent dans ce domaine de recherche. Il convient de noter que l'étude des modèles de mobilité et des traces de mobilité est hautement multidisciplinaire. Au fil du temps, des modèles de mobilité ont été proposés pour simuler la mobilité humaine, animale et véhiculaire; ils ont donc été étudiés par des chercheurs de tous les domaines, y compris des chercheurs des réseaux de capteurs sans fil.

Chapitre 2

Analyse des performances des modèles de mobilité synthétiques

Ce travail a été présenté dans un papier de conférence, dont la référence : "Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M. [Experimental Synthesis of Routing Protocols and Synthetic Mobility Modeling for MANET](#). 6th International Conference on Sensor Networks SENSORNETS'2017 Feb 19 (Vol. 2, pp. 168-173), Porto, Portugal.

2.1 Introduction

Les protocoles de routage sont fortement influencés par le mouvement empreinté des nœuds. Une grande quantité des analyses de performance sont déjà faites mais avec de nombreux défauts. Elles ne tiennent pas en compte toutes les contraintes qui influencent la simulation d'un réseau mobile. Dans certains cas, elles évaluent les protocoles de routage sans tenir en considération plusieurs modèles de mobilité. Ou, elles les analysent souvent qu'avec un seul protocole de routage. Alors que parfois, le temps de simulation utilisé est trop court. Ou généralement, la surface de simulation utilisée est trop restreinte ce qui largement influence le nombre de paquets reçus. Dans cette étude, nous visons à résumer toutes ces différentes contraintes en 90 scénarios différents avec une moyenne de 1350 fichiers simulés. Nous combinerons certains modèles de mobilité de référence avec des protocoles de routage de base du réseau mobile Ad hoc afin d'analyser leurs comportements exacts dans une synthèse expérimentale. Cela fait ressortir les résultats de trois mesures de performance combinées à cinq protocoles de routage mobile ad hoc selon trois modèles de mobilité synthétiques. Tous ces paramètres sont appliqués à deux zones de simulation différentes, une petite surface de (220m*220m) et une grande zone de (1020m*1020m). En se basant sur une analyse approfondie avec tous ces détails comme cet essai; nous permettons de bien comprendre les comportements précis de chaque protocole de routage et de chaque modèle de mobilité évalués. En affichant la capacité de chaque protocole de routage à gérer les changements topologiques, ainsi qu'assurer les performances du réseau entier.

Le présent chapitre analyse en profondeur les performances d'un modèle de mobilité synthétique dans le cadre d'un réseau mobile ad hoc. Afin de décrire les problèmes de mobilité dans divers scénarios de communication sans fil qui ont un impact important sur les protocoles de routage MANET. La présentation des modèles de simulation. Ensuite, l'ensemble du descriptif est divisé en plusieurs parties détaillées. Commençant par la présentation des paramètres de simulation. Puis, nous interprétons les résultats de la simulation. Enfin, nous discutons la conclusion.

2.2 Description des modèles de simulation

Différents scénarios ont été examinés afin d'évaluer la mobilité des nœuds et la charge du trafic[92] [39] [40]. Aussi bien, les protocoles de routage et les modèles de mobilité sont influencés par de nombreux facteurs de simulation. On cite :

- Le "**modèle de génération du trafic**"[93] qui étudie systématiquement l'effet de la charge du trafic. De nombreux flux d'applications peuvent être générés par les communications sans fil. Dans notre cas, nous considérons une charge de trafic aléatoire entre les nœuds mobiles en utilisant le trafic CBR pour Continuous Bit Rate.
- Le "**modèle de propagation radio**"[94] qui prévoit les propriétés de propagation telles que la puissance du signal reçu, les caractéristiques de l'antenne et la distance entre les zone de couverture appliquées. Au niveau de la couche physique, il existe un seuil de réception pour chaque nœud mobile. Si, la puissance du signal est inférieure de la seuil de réception, la couche MAC élimine les trames de ce trafic.

Il existe notamment trois modèles de propagation : Free Space model, Two-Ray Ground reflection model, and Shadowing model.

- Le "**modèle de génération de mobilité**" qui indique l'effet de la mobilité des nœuds sur les performances globales du réseau mobile. Les fichiers de mouvements sont caractérisé par le temps de pause. Si ce dernier est égal à 100 secondes, il n'y aura presque pas de mouvement. Par contre, s'il est égal à zéro seconde, cela correspond à un mouvement permanent des nœuds sans interruption. Pour appréhender l'effet de la mobilité, un ensemble de scénarios de mouvements correspondant à différentes stratégies de mobilité sont élaborés dans notre simulation. De ce fait, de nombreux outils ont été conçus pour générer les tracés de mobilité[30]. Dans notre cas, nous avons recours à Boonmotion Tool[95].

2.3 Présentation des modèles de mobilité simulés

Trois modèles de mobilité synthétiques sont évaluées : RWMM est un modèle d'entité aléatoire, MGMM est un modèle entité avec des restrictions géographiques, et RPGMM un modèle corrélé.

- RWMM appartient aux modèles aléatoires. Où, les nœuds se déplacent librement sans aucune contrainte de mouvement. Ces modèles sélectionnent au hasard un nouveau repère sans tenir compte les décisions de mobilité antérieures, comme les coordonnées spatiales, la vitesse, la direction et la destination précédente. En plus, ces modèles sont généralement dépourvus de mémoire.
- MGMM [57] est un parmi les "modèles avec des restrictions géographiques". Les mouvements des nœuds ne sont pas toujours aléatoires ou ont une dépendance temporelle/spatiale. Mais, il peut être obstrué dans une zone limitée, guidé par des chemins, ou restreint dans un bâtiment.
- RPGMM fait partie à la famille des "modèles de mobilité corrélés ou basé sur le groupe". Dans laquelle, le mouvement d'un nœud est dépendant des autres. Dans cette sous-classe, Chaque groupe est gouverné par un leader qui peut être un nœud prédéfini ou logique. Les nœuds se déplacent suivant le leader du groupe.

2.4 Paramètres de configuration

Le présent chapitre présente les résultats de trois mesures du rendement, soit le taux de délivrance de paquets (Packet Delivery Ratio) (PDR), le délai moyen de bout en bout (average end-to-end delay) et le débit des divers scénarios. Les paramètres de simulation employés sont illustrés dans le tableau 2.1.

Paramètres	Valeurs
Modèle de propagation	TwoRayGround model
Bande passante	10 Mb/s
Nombre de nœuds	50
Type des paquets	CBR
Taux des paquets	512 bytes/s
Sources de trafic	4 Paquets/s
Vitesse	10 m/s
Temps de pause (s)	0, 20, 40, 60, 80
Protocoles de routage	DSDV, OLSR, AODV, DSR, et ZRP
Modèles de mobilité	RWMM, MGMM, et RPGMM
Mesure des performances	PDR, Délai moyen de bout-en-bout, et Débit
Zones	220 * 220, et 1020 * 1020
Temps de simulation	1000 s
Récursion	15 fois

TABLE 2.1 – Paramètres de la simulation.

Nous combinons :

- Cinq protocoles de routage du réseau mobile ad hoc ; dont deux sont proactifs, deux réactifs et un protocole hybride.
- Avec trois modèles de mobilité synthétiques qui sont : RWMM est un modèle d'entité aléatoire, MGMM est un modèle entité avec des restrictions géographiques, et RPGMM est un modèle de groupe.
- Tous ces paramètres sont appliqués sous deux zones de simulation : une petite surface de (220m*220m) et une grande de (1020m*1020m).

Par conséquent, nos résultats couvriront 90 scénarios distincts avec une moyenne de 1350 fichiers simulés. Nous cumulons tous ces éléments pour bien percevoir les comportements corrects des protocoles de routage et des modèles de mobilité évalués.

2.5 Résultats de simulation

Pour évaluer les protocoles de routage, un ensemble des indicateurs de performance a été pris en compte pour déterminer les particularités des différents modèles de mobilité. Nos résultats visent à analyser leurs influences sur les performances des protocoles de routage du réseau MANET. Par conséquent, diverses mesures ont été employées pour les comparer et les évaluer par rapport à la mobilité des nœuds, dont les suivantes :

1. Taux de délivrance des paquets (PDR)

Tout d'abord, nous commençons par le taux de délivrance des paquets (PDR).

Cela correspond au quotient des paquets délivrés aux destinations, par rapport à ceux générés par les sources d'application. Sur cette base, les résultats de simulation de cette métrique sont illustrés aux figures 2.1 et 2.2.

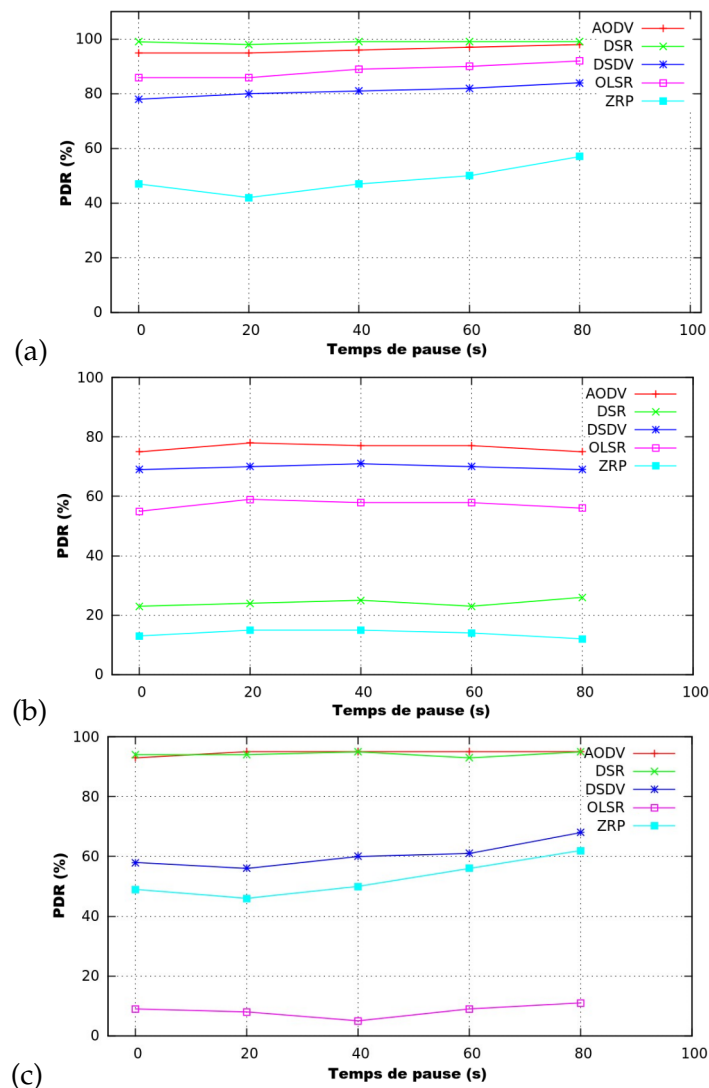


FIGURE 2.1 – Taux de délivrance des paquets des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Petite zone. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.

La figure 2.1 est appliquée dans une petite zone. Selon les sous-figures 2.1(a) et (c), le PDR de l'AODV et du DSR produit les meilleurs résultats pour les deux modèles RWMM et RPGMM dans lesquels il atteint environ 100%. En raison de leur politique réactive, les routes sont assurées par une recherche à la demande. Cependant, AODV représente le meilleur protocole de routage pour MGMM selon la figure 2.1(b). Toutefois, pour les modèles RWMM et MGMM, le ZRP génère les pires rendements pour cette métrique à cause de la densité du maillage de zones utilisé par ce protocole. DSDV et OLSR pour RWMM et MGMM apportent des résultats acceptables, grâce à la mise à jour continue de leur table de routage. OLSR a connu le plus mauvais taux avec RPGMM. Conséquemment, il est basé sur le routage par groupement.

De plus, RPGMM a son maître de groupe. Donc, la même stratégie est appliquée respectivement pour le routage et la mobilité. La coordination entre les nœuds leaders sera plus difficile dans ce cas. En général, nous remarquons que l'AODV offre le meilleur PDR pour toutes les mobilités exploitées sur le domaine étroit.

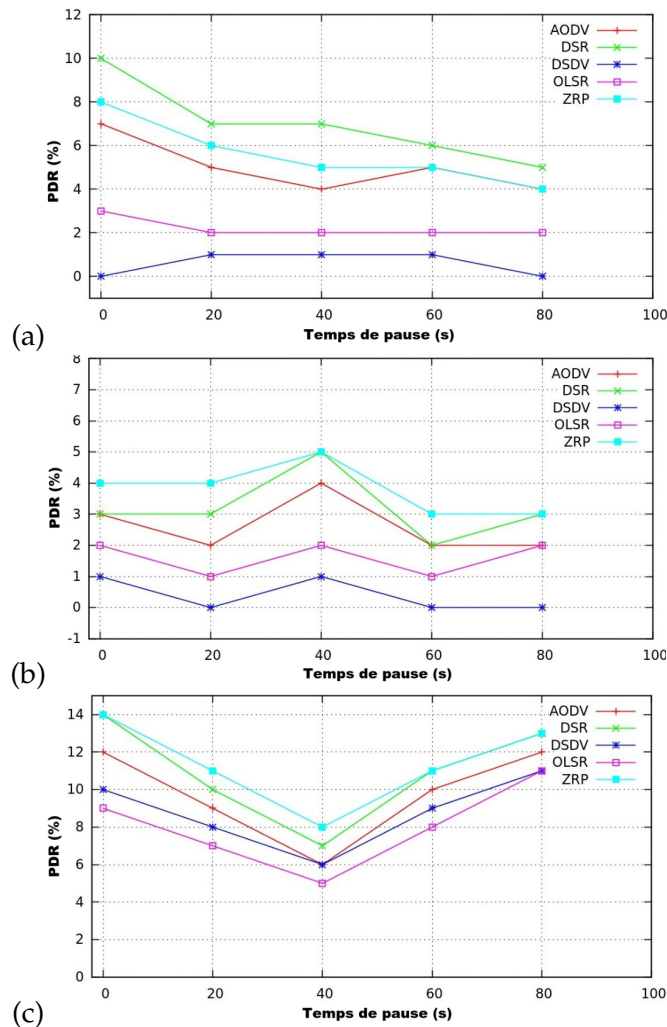


FIGURE 2.2 – Taux de délivrance des paquets des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Grande surface. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.

La figure 2.2 est appliquée sur une grande surface. Selon les sous-figures 2.2(a), (b) et (c), DSR et ZRP offrent le plus haut pourcentage du PDR. En raison de la table de routage cachée du DSR qui possède souvent un itinéraire disponible vers la destination, même dans un champ large. De plus, le protocole basé sur les zones tel que ZRP permet d’être convenable pour les vastes zones. Bien que les protocoles proactifs OLSR et DSDV sont les plus défavorables pour tous les modèles de mobilité. Les protocoles proactifs fournissent généralement de mauvais dénouements dans les grands champs de simulation. Nous relevons que ZRP est le meilleur en PDR dans ce domaine. Grâce à la division d’une zone de simulation spacieuse en une petite zone qui sera plus facile pour vérifier les paquets transmis.

2. Délai moyen de bout-en-bout

En second lieu, nous analysons le "délai moyen de bout-en-bout" qui représente le temps total écoulé entre la source du trafic et sa destination. Les résultats de la simulation sont affichés aux figures 2.3 et 2.4.

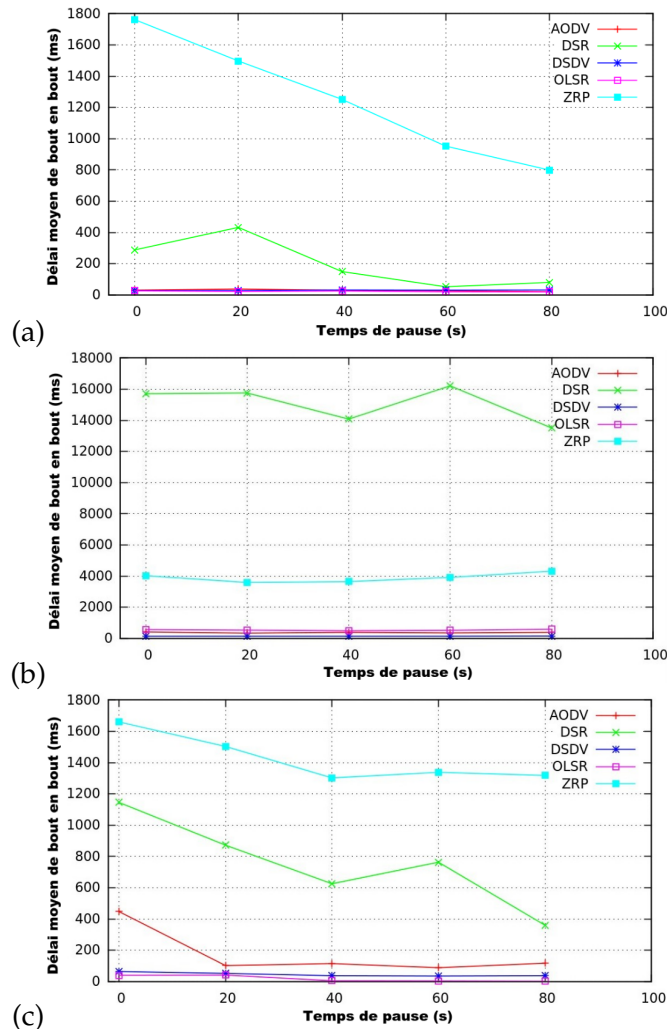


FIGURE 2.3 – Délai moyen de bout-en-bout des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Petite zone. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.

La figure 2.3 est appliquée à une petite zone. D'après les sous-figures 2.3 (a), (b) et (c), le délai moyen de bout-en-bout du DSR et du ZRP sont les pires de ces trois modèles de mobilité simulés en raison de l'approche de zone de ZRP et des routes inutiles sauvegardées par DSR. Toutefois, nous constatons que dans le petit secteur, cette mesure est la meilleure pour l'AODV, OLSR et DSDV grâce aux stratégies de ces protocoles de routage soit à la demande pour les réactifs ou la proactivité permanente adoptée par OLSR.

La figure 2.4 concerne la large surface. Selon les sous-figures 2.4 (a), (b) et (c), le délai moyen de bout-en-bout du DSR et du ZRP sont aussi les pires dans ces trois modèles de mobilité simulés, comme exactement détourné pour la petite zone en raison de l'approche de zone du ZRP et des itinéraires inutiles sauvegardés du DSR. De sorte que, parfois, ils empruntent des itinéraires plus longs

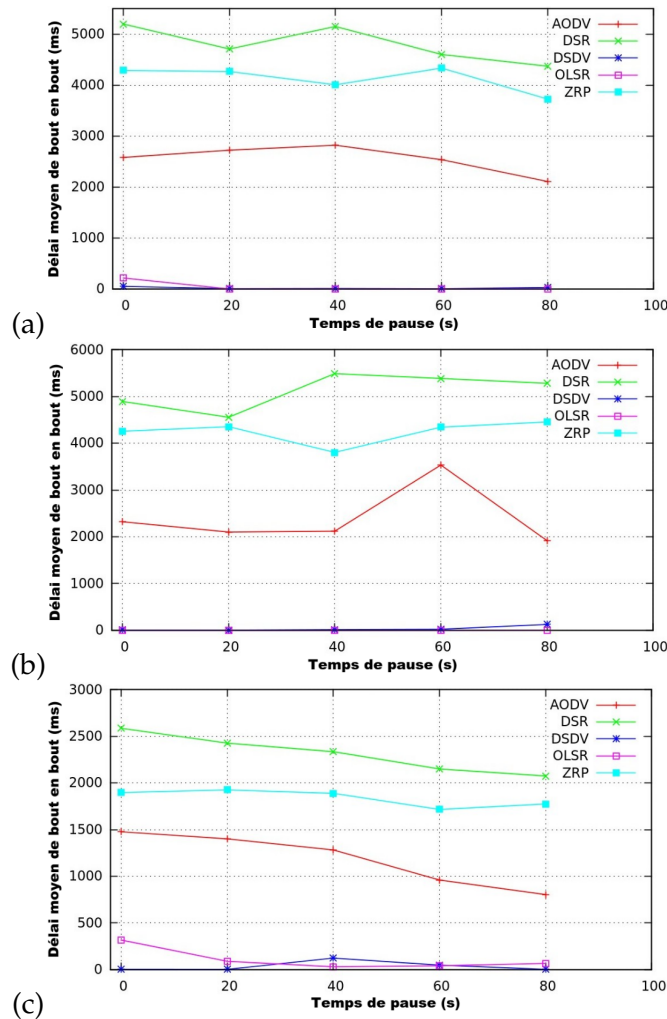


FIGURE 2.4 – Délai moyen de bout-en-bout des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Grande surface. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.

pour atteindre leurs destinations. Cependant, l'AODV présente des résultats satisfaisants grâce à sa méthodologie réactive qui transmet au voisin direct les paquets sans connaissance absolue du chemin correct vers la destination. Nous relevons que le délai moyen de bout-en-bout des protocoles proactifs OLSR et DSDV n'est pas influencé par le champ de simulation adopté. Il offre toujours les meilleurs résultats à cet métrique grâce à leur approche proactive continue.

3. Débit

Troisièmement, nous mesurons le "débit" qui correspond à la somme des flux de données délivrés à tous les nœuds mobiles, ce qui indique les bits ou paquets reçus par seconde. Les résultats de la simulation sont illustrés aux figures 2.5 et 2.6.

La figure 2.5 concerne la petite étendue. À partir des sous-figures 2.5 (a) et (c), les protocoles réactifs AODV et DSR révèlent les meilleurs résultats pour RWMM et RPGMM. Ces protocoles sont convenables pour les petites zones.

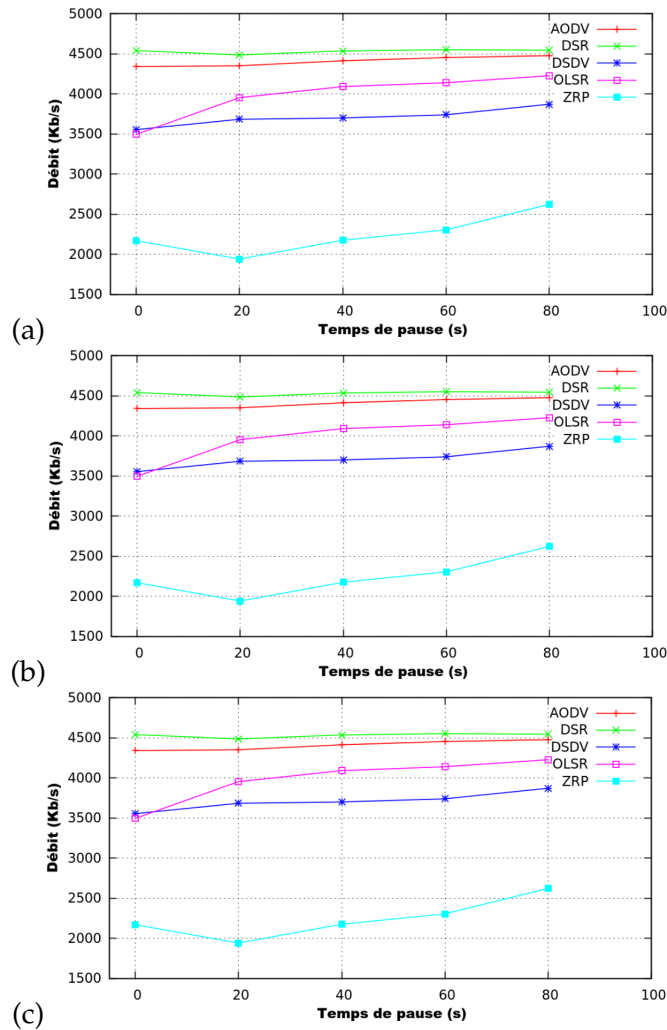


FIGURE 2.5 – Débit des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Petite zone. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.

Par contre, selon la figure 2.5 (b), l'AODV est plus efficace que les autres protocoles de routage pour MGMM en raison des fiables trajectoires suivies. Cependant, ZRP est le pire en RWMM mais il est plus admissible en RPGMM. Bien que, DSDV et OLSR offrent des résultats acceptables pour RWMM et MGMM. Par contre, OLSR constitue le pire protocole en RPGMM en raison de son processus de routage en grappe. Nous en déduisons que, AODV est le plus adapté à tous ces modèles de mobilité simulés dans un champ restreint.

La figure 2.6 est reportée sur une grande surface. Les sous-figures (a), (b) et (c) montrent que ZRP, AODV et DSR offrent les meilleurs résultats en terme de débit. D'outre, ZRP est le plus performant au regard de cette métrique. Cependant, les protocoles OLSR et DSDV demeurent les pires protocoles pour tous les modèles testés. Nous parvenons à la conclusion suivante pour les vastes secteurs; que les protocoles proactifs sont néfastes. Quant à ZRP offre la meilleure solution.

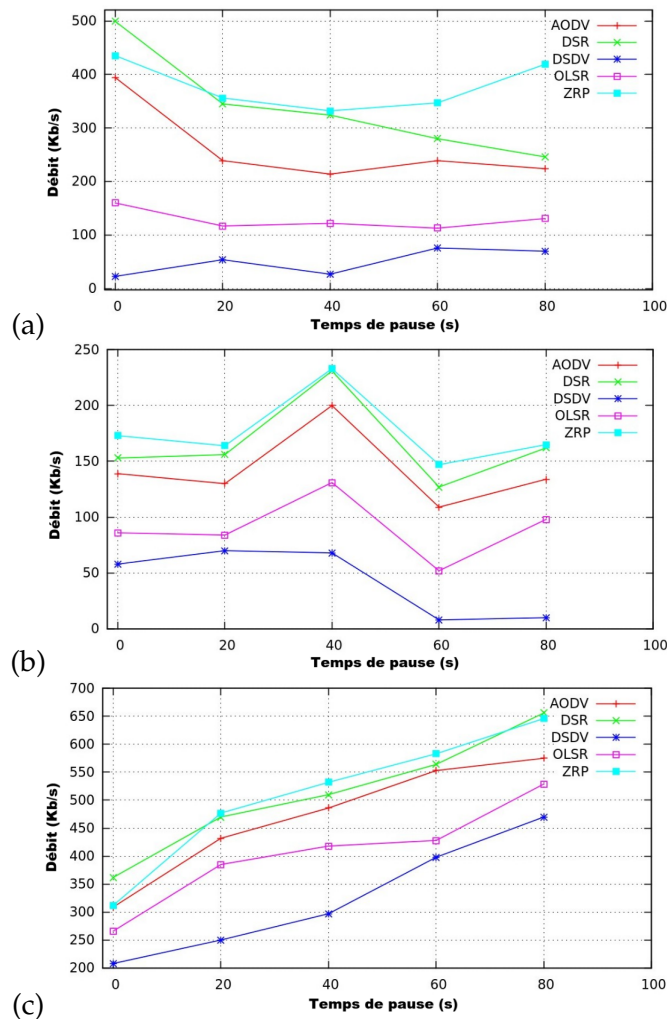


FIGURE 2.6 – Débit des protocoles de routage sous divers modèles de mobilité - Grande surface. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM.

2.6 Discussion des résultats obtenus

Après avoir simulé 1350 fichiers de 90 scénarios différents. Nos résultats seront synthétisés dans le tableau 2.2. Lorsque nous avons combiné ces protocoles de routage avec des modèles de mobilité synthétiques. Nous réussissons à obtenir les meilleurs résultats qui sont affichés avec les cellules vertes 1-2 tandis que les pires performances avec la couleur rouge 4-5.

Nous en déduisons que pour :

- Le taux de livraison des paquets et le débit dans une zone restreinte, AODV atteint les meilleurs résultats grâce au système à la demande qui est basé sur la requête de route RREQ et la réponse de route RREP qui aboutissent à posséder exactement le bon chemin. Cependant, le pire protocole est celui du ZRP du fait qu'il exploite les informations intra-zone (IARP) du protocole de routage et les informations inter-zone (IERP) qui seront fastidieux à coordonner entre eux dans une petite zone. Pour les plus vastes étendues, nous acquérons les meilleurs résultats avec DSR en raison du chemin disponible vers un nœud de destination, y compris dans une zone étendue. En outre, ZRP est la conséquence de la division d'une zone de simulation spacieuse en une petite zone qui sera plus facile à vérifier les paquets transmis.

Mesures des performances	Protocoles de routage	Modèles de mobilité					
		Petite zone			Grande surface		
		RWMM	MGMM	RPGMM	RWMM	MGMM	RPGMM
PDR	AODV	2	1	1	3	3	3
	DSR	1	4	2	1	2	2
	DSDV	4	2	3	5	5	4
	OLSR	3	3	5	4	4	5
	ZRP	5	5	4	2	1	1
Délai de bout-en-bout	AODV	3	3	3	3	3	3
	DSR	4	5	4	5	5	5
	DSDV	2	1	2	1	2	1
	OLSR	1	2	1	2	1	2
	ZRP	5	4	5	4	4	4
Débit	AODV	2	1	1	3	3	3
	DSR	1	4	2	2	2	2
	DSDV	4	2	3	5	5	5
	OLSR	3	3	5	4	4	4
	ZRP	5	5	4	1	1	1

TABLE 2.2 – Résultats des synthèses expérimentaux.

- Toutefois, pour le délai moyen de bout-en-bout dans les deux domaines, nous avons les meilleurs résultats avec les protocoles proactifs DSDV et OLSR, en raison de leurs recherches à l’avance et des mises à jour continues des tables de routage. Ils disposent donc tout le temps de chemins justes vers les cibles. En revanche, les pires résultats ont été obtenus par DSR à cause de la présence d’une table cachée sans aucune stratégie pour l’effacer, ainsi que par ZRP en raison de la capacité de localiser la destination dans une zone spécifique dans le champ de simulation.

2.7 Conclusion

En guise à l’énorme poussée de recherche orientée vers les modèles de mobilité, le but principal de ce chapitre était d’analyser les performances d’un réseau mobile conçu pour mieux comprendre le fonctionnement exact des paramètres simulés qui seront par la suite utilisé par des applications de notre vie quotidienne. De nombreux modèles de mobilité ont été élaborés pour étudier les performances du réseau mobile Ad hoc et évaluer divers paramètres pouvant convenir. Ce chapitre avait pour objectif de résumer plusieurs scénarios d’évaluation des performances des protocoles de routage MANET opérant sous divers modèles de mobilité. Trois modèles de mobilité ont été appliqués afin d’étudier leurs impacts sur les métriques d’évaluation des performances, soit le délai moyen de bout en bout, le débit et le taux de délivrance des paquets. Nous concluons que l’AODV offre les meilleurs résultats dans les petites zones. Il est le plus souvent modéré ou meilleur pour tous les quatre-vingt-dix scénarios. Il constitue un protocole de routage souple sous différents modèles de mobilité pour la petite et la grande zone grâce à son approche réactif de routage qui restitue le bon chemin pour la transmission des paquets. Toutefois, le ZRP demeure le pire protocole de routage pour les petites zones. Cependant, il représente le meilleur protocole dans les larges surfaces. Par ailleurs, les protocoles proactifs produisent les pires performances par rapport aux autres protocoles. En se reposant sur cette analyse détaillée avec tous ces détails de simulation, on peut bien comprendre les comportements exacts des protocoles de routage et des modèles de mobilité en vigueur.

Chapitre 3

Contribution 1 : Validation approfondie des caractéristiques spatio-temporelles des modèles de mobilité synthétique

Ce travail a été validé dans un papier d'un journal, dont la référence : "Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M, Benavente-Peces C. **Deep Validation of Spatial Temporal Features of Synthetic Mobility Models**. Computers. 2018 Dec;7(4) : p 71.

3.1 Introduction

Ce chapitre se penche sur les propriétés stochastiques spatio-temporelles les plus pertinentes des modèles de mobilité synthétique de référence. Chaque modèle souffre de plusieurs défauts de mobilité, comme révélera notre validation des modèles. Un ensemble de mesures est considéré pour décrire les caractéristiques de la mobilité, notamment : le problème de dégradation de la vitesse, le phénomène de densité d'onde, la distribution spatiale des nœuds et le pourcentage moyen des voisins. Ces métriques ont déjà été vérifiées pour le modèle de mobilité Random Waypoint, mais elles ne sont pas encore validées pour les autres modèles de mobilité synthétique, qui sont les plus fréquemment adoptés dans les simulations des réseaux mobiles sans fil. De ce fait, cette investigation vise à valider en profondeur ces métriques pour les autres modèles de mobilité, à savoir les modèles de mobilité Manhattan Grid, Reference Point Group, Nomadic Community, Self-Similar Least Action Walk, et SMOOTH. Par ailleurs, nous proposons une nouvelle métrique de mobilité appelée "gamme de nœuds voisins". La pertinence de cette nouvelle mesure est qu'elle prouve à la fois l'ensemble des résultats des mesures précédentes. Elle offre une vue globale sur tous les voisins mobiles pendant la période d'expérimentation. La recherche actuelle se concentre sur une compréhension plus rigoureuse des caractéristiques de la mobilité afin de procéder à une évaluation précise de chaque défaut de mobilité, étant donné que cela influe davantage sur la performance de tout le réseau. Ces validations visent à résumer plusieurs paramètres en 18126 scénarios différents avec une moyenne de 486 fichiers validés. En se basant sur une analyse exhaustive avec tous ces détails comme dans ce document, on arrive à bien comprendre les comportements précis des différents scénarios de mouvement. En affichant la capacité de chaque modèle à faire face à certains changements topologiques, ainsi qu'à assurer les performances du réseau. Les résultats de la validation confirment l'efficacité et la robustesse de notre nouvelle métrique.

Le reste du présent chapitre est organisé comme suit. Tout d'abord, nous présentons quelques caractéristiques liées aux modèles de mobilité nouvellement validés. Deuxièmement, nous validons les mesures de mobilité de certains modèles de mobilité synthétiques. Troisièmement, nous proposons une nouvelle mesure de la mobilité. Quatrièmement, nous résumons les caractéristiques détaillées des mesures validés. Ensuite, nous discutons la relation entre les indicateurs de mobilité et la gestion des ressources. Enfin, les résultats sont discutés avec une présentation des principales conclusions.

3.2 Description des modèles validés

La figure 3.1 présente une classification des modèles de mobilité qui peuvent être regroupés en quatre grandes catégories.

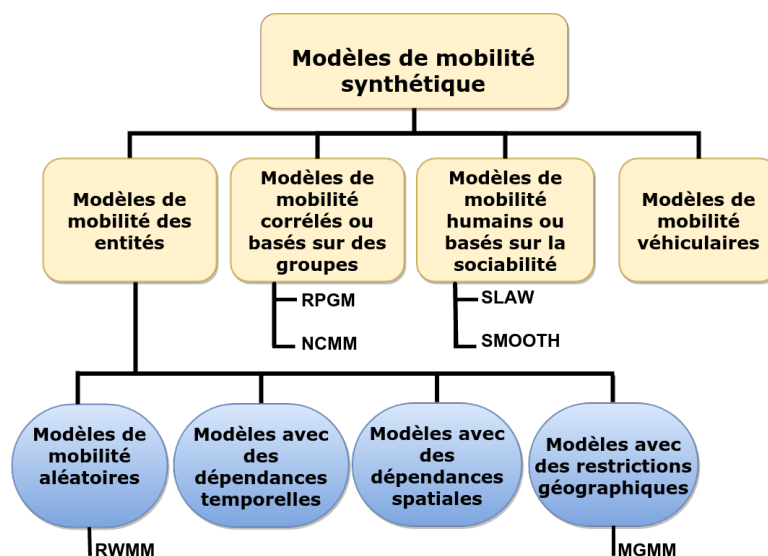


FIGURE 3.1 – Classification des modèles de mobilité synthétique validés.

Nous avons déjà présenté et discuté les principales caractéristiques de quelques modèles de mobilité synthétique avant de procéder à la validation de certains modèles appartenant à ces classes. Afin de nous amener ensuite à préciser le contexte de mouvement principal de chaque motif. Ce qui nous aidera à bien analyser les résultats des métriques qui peuvent montrer les défauts de mobilité de chaque modèle.

Concernant les trois premières classes, six modèles de mobilité différents ont été évalués et validés afin d'inspecter les défauts de mouvement dans chaque catégorie, à savoir deux MM entités, deux MM corrélés et deux MM humains ont été envisagés. Les propriétés les plus pertinentes de ces modèles sont les suivantes :

- Le premier modèle expérimental est celui du RWMM, qui appartient à la sous-classe des entités aléatoire, qui a été d'abord défini par Johnson et Maltz
- Le deuxième modèle validé est le Manhattan Grid Mobility Model (MGMM).
- Le troisième modèle de mobilité validé est le modèle RPGM.
- Le quatrième modèle de mobilité vérifié est le Nomadic Community Mobility Model (NMM).
- Le cinquième modèle est le Self-Similar Least Action Walk (SLAW)

— Le dernier motif est SMOOTH

Les modèles présentés précédemment représentent des repères de modélisation de la mobilité qui sont couramment utilisés pour effectuer l’analyse du rendement des réseaux sans fil. Le tableau 3.1 résume et met en évidence les raisons de la robustesse de ces modèles, où O signifie Oui, N est Non, et A représente Ambigu. Ces modèles peuvent être une bénédiction ou une malédiction pour les communications réseaux s’ils souffrent des problèmes de mobilité qui affectent les performances générales de tout le réseau mobile.

Modèles de mobilité	Réaliste	Modulable	Représentation et analyse mathématiques	Utilisation de la carte géographique	Peut être simulé
RWMM	N	O	O	N	O
MGMM	N	O	N	N	O
RPGMM	N	O	A	N	O
NMM	N	O	N	N	O
SLAW	O	N	A	O	O
SMOOTH	N	O	N	O	O

TABLE 3.1 – Caractéristiques qualitatives des modèles de mobilité validés; O : Oui, N : Non, A : Ambiguë.

3.3 Validation des modèles de mobilité synthétiques

Dans cette section, nous décrivons la première étape pour la validation de la stabilité de mouvement de certains modèles de mobilité de référence. Auparavant, cette validation n’était effectuée que pour RWMM. Elle repose sur un certain nombre de mesures de mobilité afin de construire et de déduire une évaluation précise de chaque déséquilibre de mobilité. Le test de mouvement décrit des caractéristiques rigoureuses qui ont de sérieuses retombées sur les performances du réseau entier. Les paramètres expérimentaux sont indiqués dans le tableau 4.2. La validation analysée est effectuée sur la base des paramètres suivants :

- Les quatre paramètres de mobilité validés sont : le problème de dégradation de vitesse, la distribution spatiale des nœuds, le phénomène de densité des ondes et le pourcentage moyen de voisinage.
- Les six modèles de mobilité vérifiés se présentent comme suit : il existe deux modèles d’entité, RWMM et MGMM; deux modèles corrélés, RPGMM et NMM, et deux modèles humains : SLAW et SMOOTH.
- Un champ étalé sur une surface de $1030m \times 1030m$ est considéré comme un paramètre très important.
- 120 scénarios différents sont examinés avec des essais de 20 itérations par modèle pendant 1000s et une vitesse moyenne de $5m/s$.

Les paramètres expérimentaux précités sont combinés pour évaluer tous les scénarios possibles dans le but d’obtenir la connaissance la plus précise et la plus exhaustive possible des problèmes de mouvement. En utilisant l’outil d’implémentation MATLAB, les résultats de simulation sont décrits et discutés dans les figures 4.7,

Paramètres	Valeurs
Nombre de nœuds	50
Vitesse	5 m/s
Temps de pause (s)	0
Modèles de mobilité	RWMM, MGMM (Modèles des entités) RPGMM, NMM (Groupes corrélés MMs) SLAW, and SMOOTH (MMs humains)
Les métriques de la mobilité	Problème de dégradation de la vitesse Distribution spatiale des nœuds Phénomène de densité d'onde Pourcentage moyen des voisins
Zone	1030m × 1030m
Temps de simulation	1000 s
Récursion	20 fois
Outil de mise en œuvre	MATLAB

TABLE 3.2 – Paramètres de validation.

Modèles de mobilité	Classes des modèles	Vitesse	Direction	Acc. /Déc.	Temps de pause	Long. du vol	Temps de retour et fréquence des visites
RWMM	Aléatoire (Entité)	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
MGMM	Restrictions géo. (Entité)	C/UD	UD sur un ensemble de points	NA	C/UD	NA	NA
RPGMM	Groupe / Corrélé	Basé sur le point de référence	Basé sur le point de référence	NA	C/UD	NA	NA
NMM	Groupe / Corrélé	NA	Autour du point de référence	NA	NA	NA	NA
SLAW	Humain	NA	PD selon les destinations définies	NA	TPL	TPL	P
SMOOTH	Humain	NA	PD selon les destinations définies	NA	TPL	TPL	P

TABLE 3.3 – Comparaison des modèles de mobilité validés. C : Constante, HB : Basée sur l'historique, UD : Uniformément distribuée, PD : Probablement distribuée, P : Périodique, TPL : loi de puissance Tronquée, NA : Non Applicable, Acc. Accélération, Déc. Décélération.

4.8, 4.9, et 3.5 au cours des paragraphes qui suivent. Ces métriques doivent approuver la stratégie de mouvement adoptée par les modèles analysés, qui sont déjà présentés dans la section précédente. Certaines caractéristiques importantes du modèle

sont décrites basées sur les conceptions du modèle dans le tableau 3.3. Cependant, nous nous assurerons qu'elles sont vraiment correctes par ces validations approfondies.

3.3.1 Problème de dégradation de la vitesse

Cette propriété représente le niveau de conformité à la vitesse attribuée qui est autorisée avant de générer le modèle de mobilité. C'est là l'une des questions les plus largement critiquées. Un modèle de mobilité souffre d'une diminution de vitesse lorsque la vitesse moyenne du nœud diminue à un niveau d'équilibre qui tombe en dessous de la vitesse moyenne initiale du nœud. Une telle diminution de la vitesse peut avoir une influence considérable sur les performances mesurées et les taux de surcharge. Par conséquent, il n'est pas possible de présenter des valeurs moyennes dans le temps pendant cette période de régression, du fait que le processus de la détérioration n'est pas stationnaire. Cette mesure a été introduite par Yoon et al. [88] pour RWMM. Le hasard contredit la fameuse hypothèse RWMM selon laquelle la même vitesse moyenne est maintenue pendant toute la durée de la simulation, qui est testée de manière appropriée à la figure 4.7(a). Nous observons que la vitesse subit de fortes fluctuations lorsque l'expérience commence. Ensuite, il s'ajuste pour s'approcher de la vitesse attribuée, montrant des fluctuations éparses avant même que l'expiration du temps de simulation.

La figure 4.7 illustre la fluctuation de la vitesse moyenne des autres modèles de mobilité synthétiques pendant la durée de la simulation. Nous observons ce qui suit :

- D'après les figures 4.7(e) et (f), nous en déduisons que les modèles humains souffrent fortement du problème de la dégradation de vitesse et présentent la vitesse moyenne la plus défavorable. Même dans le cas où une vitesse spécifique est fixée, elle ne sera pas déployée par ces modèles puisqu'elle est inférieure à 5m/s pendant toute la durée de la simulation. Ce problème concerne principalement la vitesse, l'accélération et la décélération non attribuées dans ces modèles, comme l'indiquent strictement les paramètres de ces modèles dans le table 3.3.
- La figure 4.7(c) démontre que le RPGMM présente une vitesse qui fluctue dans le temps, à partir de la vitesse spécifiée et oscillant ensuite entre 0 et 5m/s. Ceci est dû à la stratégie corrélée des nœuds mobiles. Les nœuds forment plusieurs groupes et chaque groupe a un responsable qui prend toutes les décisions en matière de mobilité. Parfois, un nœud change de groupe et suit un autre dirigeant de groupe à une vitesse différente. Le tableau 3.3 souligne également que la vitesse est basée sur des points de référence alors que cette métrique de validation identifie précisément que la vitesse est distribuée uniformément en fonction des points de référence.
- Dans la figure 4.7(b), MGMM représente une vitesse pratiquement stable pendant toute la durée de la simulation. Elle oscille dans une marge acceptable entre 5 et 5,25 m/s. Ceci lui permet d'être plus stable grâce à la stratégie de mouvement adoptée, qui est basée sur une division uniforme du champ de simulation avec une vitesse constante ou uniforme, comme décrit dans le tableau 3.3.
- Selon la figure 4.7(d), nous soulignons que NMM présente la meilleure vitesse moyenne parmi tous les modèles validés qui conserve la même vitesse pendant le temps de simulation. Ce résultat ne concorde pas avec la principale méthodologie d'utilisation de la vitesse, de l'accélération et de la décélération non attribuées, comme le montre le tableau 3.3. Ainsi, un dénouement

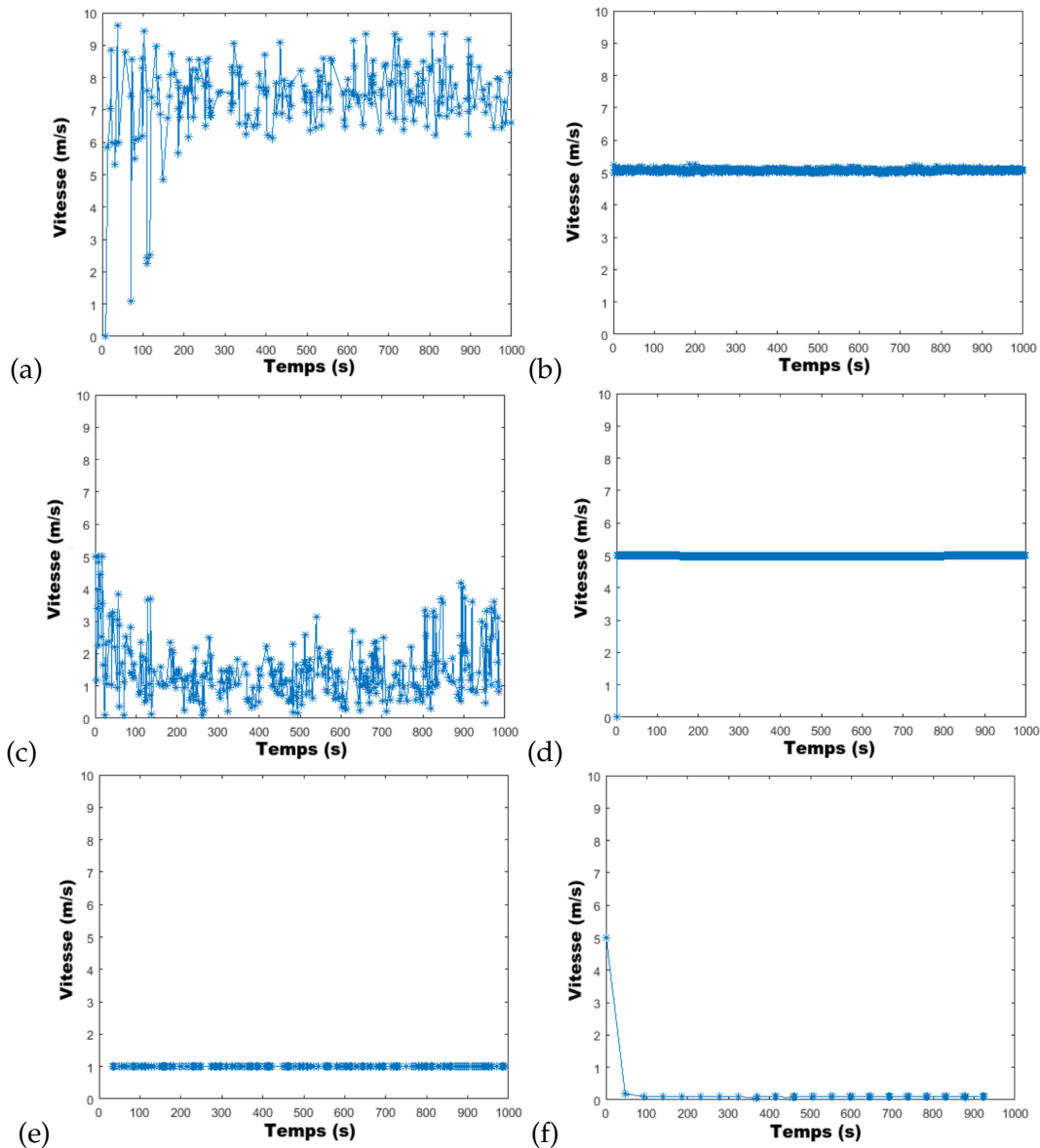


FIGURE 3.2 – Problème de dégradation de la vitesse. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.

pertinent de cette recherche et de cette validation est que NMM a montré une vitesse constante au cours de l'expérience grâce à l'appartenance de tous les nœux à un seul dirigeant.

En conclusion, nous pouvons affirmer qu'*afin d'éviter le problème de la dégradation de vitesse, un modèle de mobilité stable doit se maintenir dans une plage de vitesse tolérable, comme pour MGMM et NMM. Par conséquent, il doit respecter les lois de mouvement dans chaque décision de mobilité en prenant en considération la relation entre le temps, la vitesse et la distance pendant le déplacement.*

3.3.2 Phénomène de densité d'onde

Cette mesure de mobilité représente le nombre moyen de voisins d'un nœud mobile défini à un instant donné de l'expérience. Cela représente le nombre moyen

de voisins qui appartient à chaque nœud et qui fluctue pendant la simulation, où les nœuds situés dans des zones spécifiques de la surface de simulation pourraient avoir beaucoup plus de voisins que les autres, c'est-à-dire que leur densité change. Royer, Melliar-Smith et Moser [90] ont remarqué que pour le modèle de mobilité RandomWaypoint, la densité fluctue régulièrement avec le temps, comme le montre la figure 4.8(a), avec une fluctuation modérée entre 0 et 11 nœuds. Cependant, ce problème affecte plus les performances de ce motif [96]. Cette fonction montre la mobilité indépendante des nœuds mobiles. Selon la figure 4.8, il est intéressant de noter que :

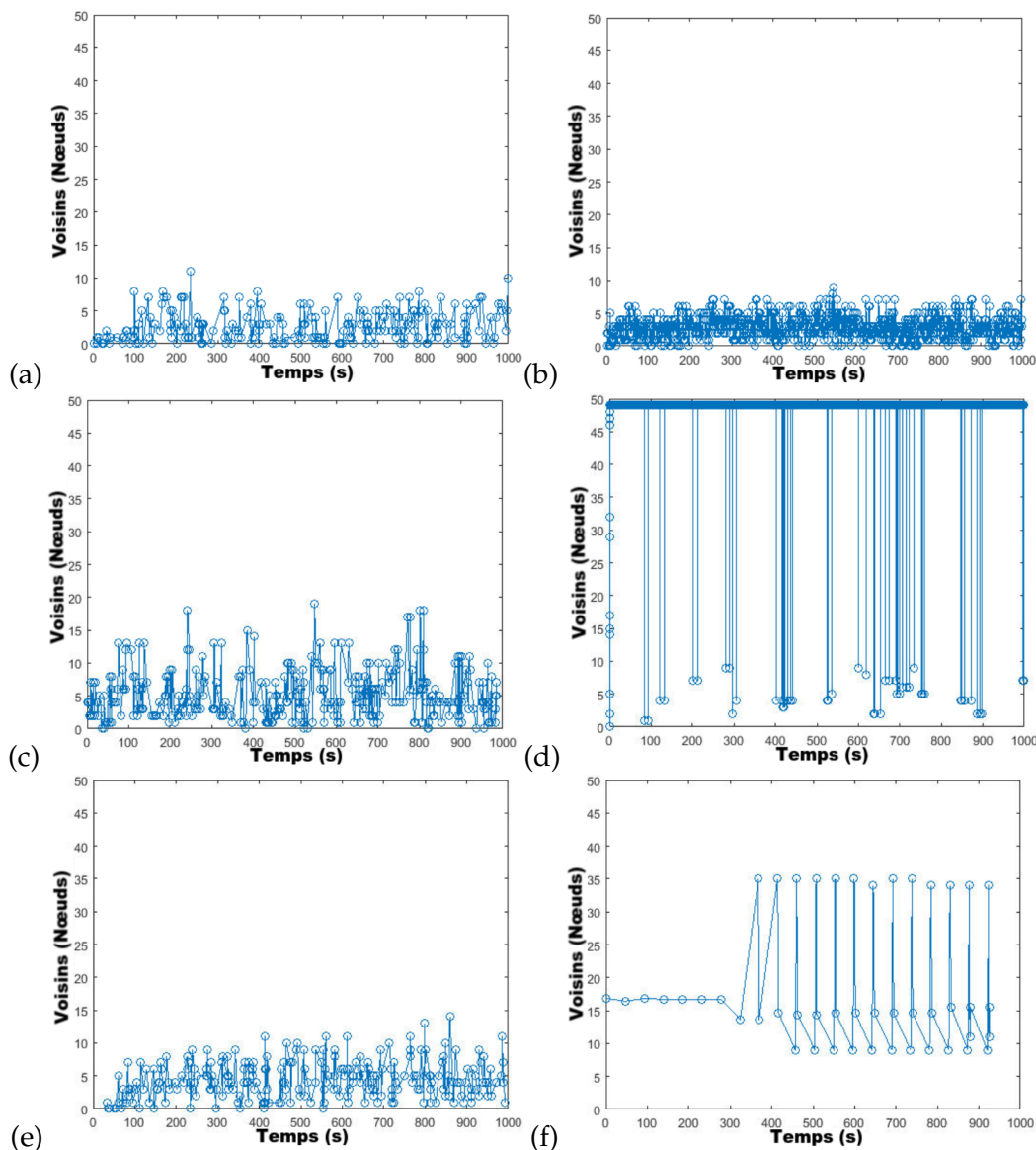


FIGURE 3.3 – Phénomène de densité d’onde. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.

- Les modèles d’entités montrent dans les figures 4.8(a) and (b), le comportement le plus faible de la densité d’onde où elles sont limitées entre 0 et 11 et 0 et 9 pour RWMM et MGMM respectivement, En raison de leur sélection autonome des positions de destination, les nœuds se déplacent indépendamment sans tenir compte les décisions de mobilité des autres nœuds, en ce qui

concerne les directions et les destinations.

- Dans la figure 4.8(e), le SLAW oscille modérément entre 0 et 14 avec des instants où le nœud n'a aucun voisin en raison de la distribution probabiliste des voisins.
- Cependant, les modèles corrélés RPGMM et NMM montrent les meilleurs résultats quand on considère uniquement l'effet de cette problématique. Le voisinage de ces modèles fluctue dans une plage satisfaisante avec moins d'instant sans aucun voisin dans les figures 4.8(c) et (d). Il se réfère à un mouvement de groupe où un nœud mobile appartient toujours à un groupe spécifique avec les nœuds attachés.
- SMOOTH surpasse les autres modèles en considérant cette propriété dans la plage [8,35], comme le montre la figure 4.8(f). On remarque clairement que le nœud mobile avait au moins huit voisins pendant le temps de validation, ce qui permet de présenter le meilleur rapport de délivrance de paquets.

Nous concluons que la plupart des modèles de mobilité validés souffrent de ce phénomène de densité d'onde, à l'exception des modèles corrélés et SMOOTH. Le NMM montre la meilleure robustesse contre ce problème étant donné qu'il offre une large gamme voisine de [0 à 49]. C'est grâce à son principe de gestion qui consiste à attribuer un chef à tous les nœuds mobiles. Le taux de délivrance de paquets d'une simulation expérimentale donnée est sensiblement affecté en présence de ce problème [36]. Pour éviter cette défaillance de mouvement, les nœuds mobiles doivent adopter une stratégie de mobilité qui leur permet de se déplacer dans un groupe de plusieurs nœuds ou ils doivent être uniformément répartis dans la région de simulation. De plus, pour s'assurer d'avoir au moins un voisin, ils doivent se déplacer à la même vitesse lorsqu'ils suivent des mouvements de rotation. Cette condition n'est pas satisfaite par les nœuds qui adoptent des déplacements fréquents.

3.3.3 Pourcentage moyen des voisins

Cette mesure décrit le pourcentage cumulé du nombre total de nœuds voisins qui représente une valeur totale des voisins des nœuds pendant toute la période de validation. Les faibles valeurs de cette métrique reflètent le degré d'instabilité du modèle en terme de voisinage, ce qui conduit à des mauvaises performances du réseau [91]. Pour vérifier fortement les résultats présentés dans la figure 4.8, nous validons le pourcentage moyen du voisin pendant la durée de la simulation. La figure 4.9 montre les résultats de cette mesure. Nous pouvons ressortir :

- Selon la figure 4.9(a), RWMM présente les pires résultats, où il fluctue dans une plage de 0 à 16% avec de nombreux instants détectés sans aucun voisin. A ces moments, si un nœud mobile envoie un paquet, il ne trouve aucun récepteur vers lequel ces données peuvent être transmises. Ce comportement augmente encore le nombre de paquets perdus et affaiblit le PDR de RWMM.
- À partir de la figure 4.9(b), le MGMM révèle de petites fluctuations de l'ordre de 4 à 9%, et plus de deux voisins sur un total de 49 nœuds sont toujours présents. Cela permet à ce modèle d'être plus performant que le RWMM, néanmoins il reste insuffisant pour offrir les meilleures performances.
- D'après les figures 4.9(e) et (c), SLAW et RPGMM montrent de meilleurs résultats que RWMM et MGMM. Ces modèles fluctuent entre 0 et 18% et 0 à 25%, respectivement, avec moins d'instant sans voisins.

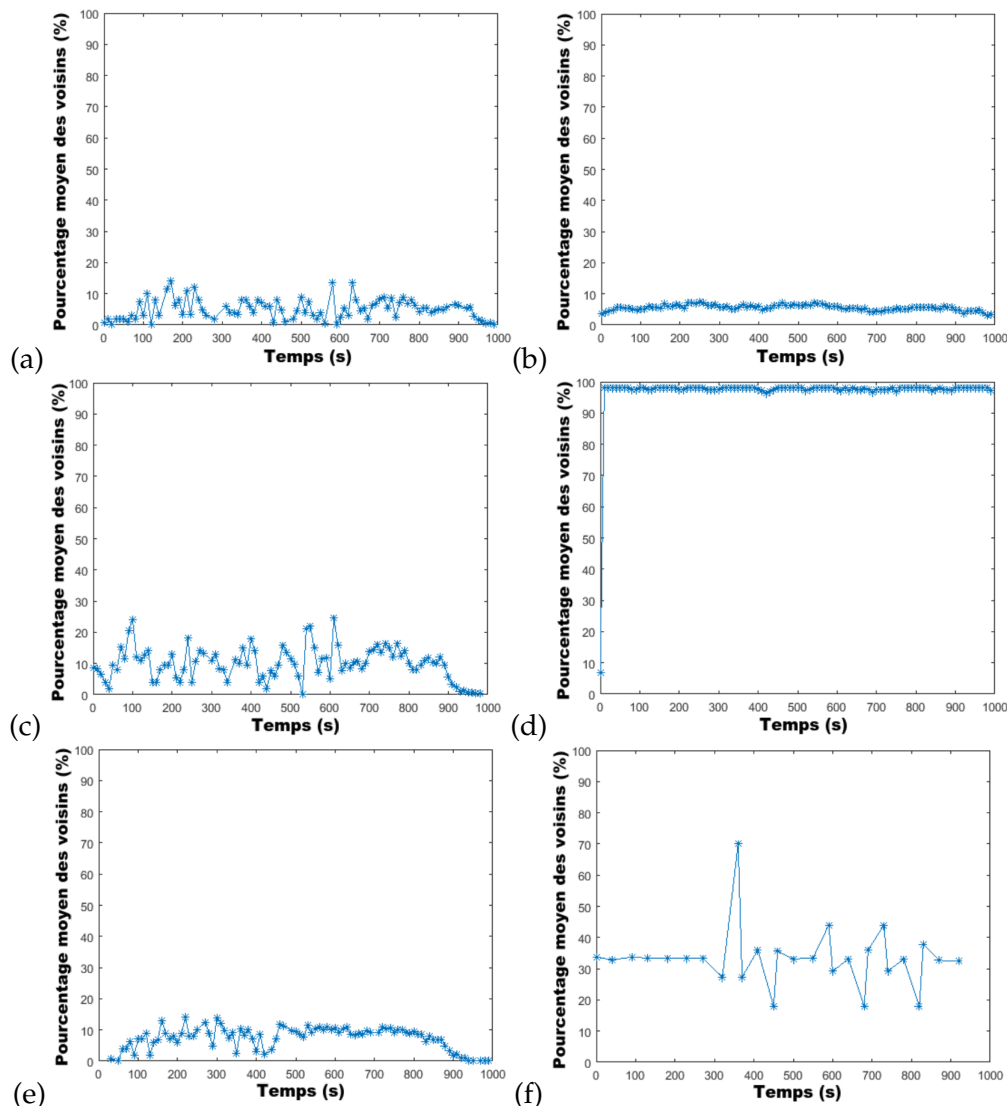


FIGURE 3.4 – Pourcentage moyen des voisins. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.

— Cependant, d’après les figures 4.9(f) and (d), SMOOTH et NMM ont des plages de 18 à 70% et 8 à 98%, respectivement. Ils fournissent tous les deux les meilleurs résultats, ayant plus de quatre voisins pendant toute la durée de la simulation. Cette fonctionnalité leur permet de surpasser les autres modèles des réseaux mobiles dans la mesure où *ils peuvent fournir tous les paquets sans aucune perte* [97]. Ces modèles sont *plus stables* que les autres.

Cette mesure apporte une vision globale du phénomène de densité d’onde par le biais du pourcentage moyen pendant la période de validation. Ces résultats appuient fortement les résultats présentés à la figure 4.8, tels qu’ils sont récapitulés dans table 3.5.

3.3.4 Distribution spatiale des nœuds

Cette propriété décrit comment les nœuds mobiles sont localisés spatialement dans le champ de simulation. Cela est principalement lié au fait que le positionnement initial des nœuds est généralement basé sur une distribution uniforme ; le modèle de mobilité peut modifier cette distribution pendant la simulation. Ce comportement se produit généralement si la surface de simulation a des frontières. Si nous ne savons pas comment le modèle de mobilité modifie sa distribution des nœuds, les résultats de simulation peuvent être mal interprétés. Bettstetter et al [89] ont validé cette métrique pour RWMM. Ils ont reconnu une distribution spatiale non uniforme de ce modèle de mobilité. Lorsqu'il atteint l'état stationnaire, les nœuds mobiles se rassemblent au centre et s'éloignent des limites, comme le montre la figure 3.5(a). Dans notre validation, nous choisissons de vérifier l'état finale (à $t = 1000s$) de cette propriété. À partir de figure 3.5, nous pouvons interpréter les résultats obtenus pour les deux dernières métriques, et il est important de souligner que :

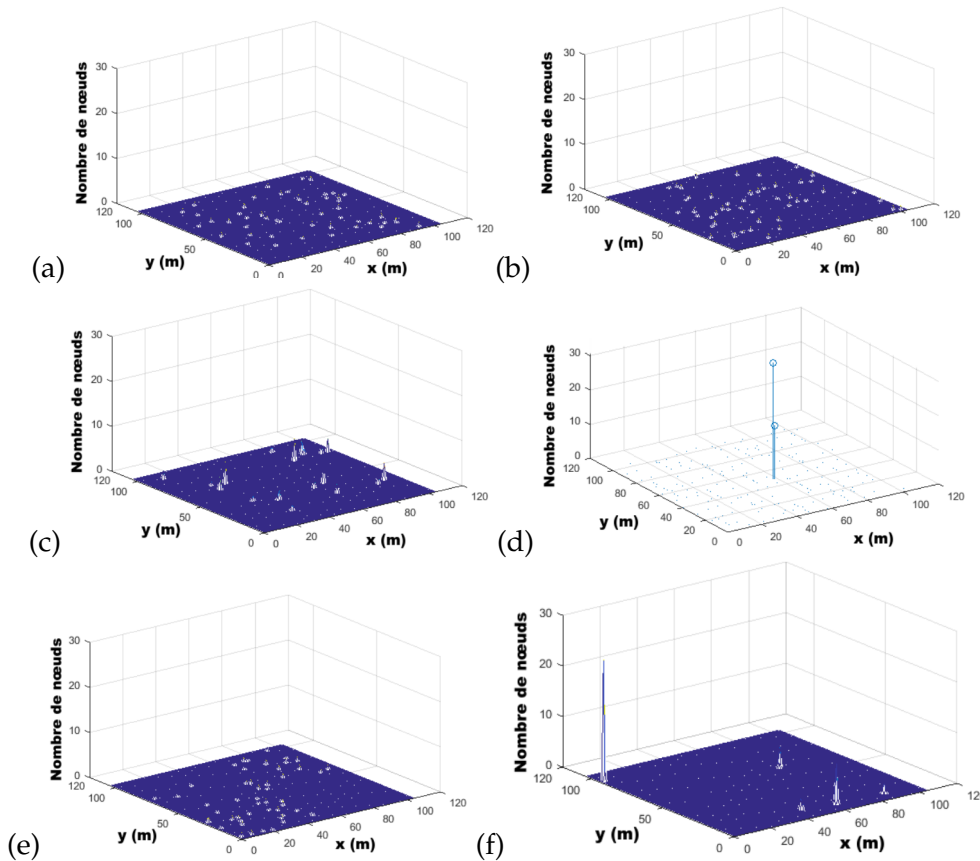


FIGURE 3.5 – Distribution spatiale des nœuds à $t = 1000s$. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.

- Les figures 3.5(c) et (f) apportent des résultats insuffisants du fait que les nœuds se rassemblent à proximité des dirigeants du RPGMM ou dans des lieux peuplés du SMOOTH. Si les groupes sont clairsemés, le modèle de mobilité affichera la plus mauvaise performance, puisque aucun voisin intermédiaire est accessible pendant la transmission. Il en résulte un réseau plus

fragile qui est fortement morcelé et comporte beaucoup des espaces vides de simulation.

- D'après les figures 3.5(e) et (b), nous remarquons que SLAW et MGMM sont légèrement et mieux distribués dans le champ de simulation que RWMM, SMOOTH, et RPGMM. En raison de la division de la superficie par MGMM, les nœuds mobiles sont situés aux limites avec peu d'espaces vides par rapport à RWMM dans la figure 3.5(a). Ce dernier représente la pire distribution spatiale, étant principalement basé sur des décisions de mouvements totalement aléatoires avec aucun respect des lois de mouvement.
- La figure 3.5(d) affiche les meilleurs résultats, tous les nœuds mobiles étant situés dans une zone gouvernée par un chef nomade en déplacement. Ceci prouve que tous les nœuds appartiennent à un seul point de référence. Le résultat de la figure 4.9(d) est exemplaire avec près de 98% des nœuds regroupés en raison de la distribution spatiale concentrée de tous les nœuds nomades dans une zone spécifique.

Nous concluons que si un modèle de mobilité montre une distribution spatiale non uniforme des nœuds pendant la durée de la simulation, les nœuds souffriront également d'un phénomène d'onde de densité instable et d'un pourcentage moyen de voisinage perturbé, comme le montrent les figures 4.8 et 4.9, respectivement. Ces trois défauts de mobilité sont principalement reliés les uns aux autres.

Étant donné les limites de ces mesures, une nouvelle mesure synthétique de la mobilité innovante sera proposée pour surmonter ces problèmes. Cette métrique, qui comprend un ensemble de paramètres validés avec peu de limitations, s'appelle la "*Gamme des voisins mobiles*", et sera décrite dans la section suivante.

3.4 Contribution 1 : Gamme des voisins mobiles

Dans cette section, afin de surmonter les limites que présentent d'autres métriques, nous suggérons une nouvelle métrique qui offre une série d'avantages dans le but de restituer un comportement précis de la mobilité pour tous les nœuds simulés pendant la durée du test. Quel que soit le nœud prévu et l'instant ciblé, nous pouvons facilement représenter l'éventail des voisins pour chaque modèle de mobilité. La validation de cette propriété est effective à tous les instants de simulation. En même temps, cette mesure met en évidence les atouts et les insuffisances de chaque problème de mobilité qui a été vérifié précédemment.

1. **Principe :** Nous évaluons un ensemble de modélisation de mobilité synthétique pour chaque modèle afin de définir la plage du nombre de voisins pour tous les nœuds mobiles pendant le temps de la simulation. Nous générons tous les modèles de mobilité avec une portée de propagation de 150m. Pour cette raison, un seuil (150m) est présent dans notre nouvelle métrique pour refléter exactement les bons résultats. Ensuite, nous supprimons les valeurs les plus basses et les plus hautes du nombre total de voisins enregistrés. Ainsi, cette métrique permet d'inspecter une plage de propagation totale prédéfinie basée sur l'ensemble des paramètres de mobilité quel que soit le nœud inspecté, le modèle ciblé et le moment de l'inspection instantanée le sont-elles. Cette propriété est calculée à l'aide de l'algorithme suivant :

Algorithme 1 : Processus de calcul de "la gamme des voisins mobiles"

Result : Portée des voisins mobiles durant la validation

Input : Modèles de mobilité

Output : Gamme de voisins mobiles de chaque instant

```

1  $t \leftarrow 0s$ 
2  $pas \leftarrow 10s$ 
3  $T \leftarrow Temps\_de\_validation$ 
4 while  $t \leq T$  do
5   foreach Intervalle de temps [ $t, t+pas$ ] do
6     foreach  $MM$  [ $0, Max$ ] do
7       /* Calculer la distance entre le nœud actuel et les
8         autres nœuds */
9       foreach  $nœud$  [ $id\_0, id\_Max$ ] do
10        foreach  $voisin$  [ $id\_0, id\_Max$ ] do
11          if ( $id\_nœud == id\_voisin$ ) then
12            | Skip
13          else if (distance entre le nœud et le voisin > distance de
14            propagation du nœud) then
15              | Skip
16          else if (distance[nœud, voisin] ou[voisin, nœud] déjà vérifié)
17            then
18              | Skip
19          else
20            | Sauvegarder en tant que voisin
21          end
22        end
23      Sauvegarder les voisins de chaque nœud
24    end
25  Sauvegarder les voisins de chaque modèle de mobilité
26 end
27 Sauvegarder les voisins de chaque intervalle de temps
28 end
29 Définir les voisins[ $min, max$ ] pour chaque intervalle de temps de tous les
30 modèles de mobilité;
31 end

```

2. **Validation et résultats :** Les résultats de validation sont présentés à la figure 4.12. Nous observons celui-là :

- D'après les figures 4.12(a) et (b), RWMM et MGMM représentent les pires modèles de mobilité selon cette propriété, car ils souffrent considérablement de la variation du nombre de voisins dans le temps. Cependant, MGMM montre des fluctuations oscillatoires pratiques de 0 à 9 avec un écart évident et régulier mais avec de nombreux instants dans lesquels il n'y a aucun voisin présent. Ceci est en accord avec les résultats des métriques précédentes, comme montre le phénomène de densité d'onde.
- SLAW and RPGMM montrent des performances moyennes avec des plages de [0,14] et [0,19], respectivement selon les figures 4.12(e) et (c). RWMM montre un écart irrégulier pendant le temps de simulation dans une plage modérée. Des instants acceptables sans voisins sont enregistrés.

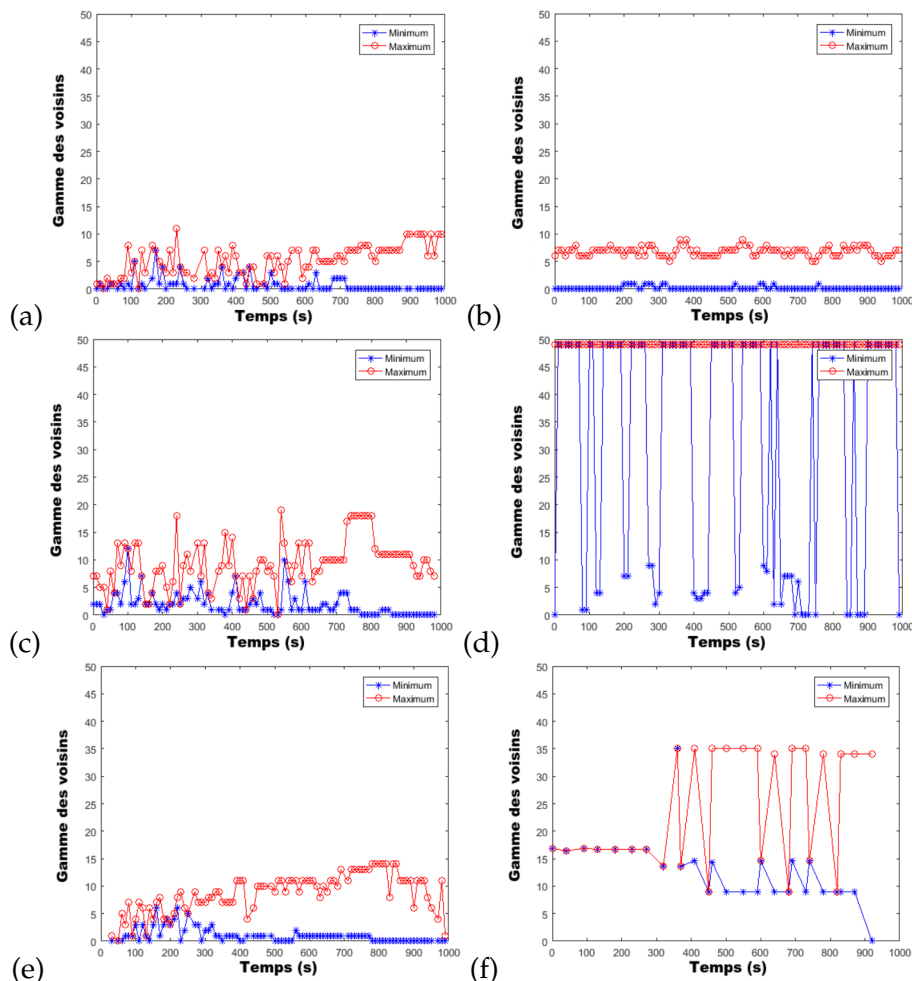


FIGURE 3.6 – Gamme des voisins mobiles. (a) RWMM, (b) MGMM, (c) RPGMM, (d) NMM, (e) SLAW, and (f) SMOOTH.

- Les figures 4.12(d) et (f) montrent que NMM et SMOOTH ont peu d’instants sans voisinage avec une portée converge rapidement pour bénéficier au maximum de tous les nœuds déployés. Le NMM atteint son maximum à 49 voisins, soit le meilleur modèle grâce à sa stratégie corrélée d’appartenance à un groupe avec un unique leader pour tous les nœuds mobiles (49 + le chef = 50 nœuds évalués) (tableau 4.2).

3. **Interprétations** : Après avoir réalisé 600 tests pour la portée mobile des voisins :

- Lorsque vous percevez de nombreux instants avec 0 à la ligne minimale (la ligne bleue), cela signifie qu’à cet instant, un ou plusieurs nœuds déployés n’ont aucun voisin détecté.
- Par ailleurs, le maximum de la ligne est trop éloigné du nombre total de nœuds mobiles déployés. Cela conduit à un modèle de mobilité plus défavorable avec un écart irrégulier dans la gamme des voisins mobiles ainsi qu’une instabilité dans le temps.
- En revanche, lorsque les lignes obtenues présentent des fluctuations marginales acceptables ou importantes, le minimum n’est pas égal à 0 et le maximum se rapproche du nombre total de nœuds déployés. Cela reflète

le fait que le modèle de mobilité validé est plus stable et plus régulier dans le temps, ce qui mènera à des résultats satisfaisants dans l'analyse du rendement [96].

Selon les caractéristiques de la métrique proposée, nous en déduisons qu'elle présente un exact et précis évidente voisinage. Elle appuie fortement les résultats obtenus par les autres mesures en vigueur, telles que comme la distribution spatiale des nœuds, le phénomène de densité d'onde et le pourcentage moyen du voisinage. D'après le tableau 3.6, la nouvelle mesure suggérée fournit une précision élevée par rapport aux autres. Ce résultat inspecte tous les nœuds déployés qui changent avec le temps pour nous montrer plus apparents les comportements de mouvement de tous les modèles de mobilité. Nous en déduisons que les voisins mobiles proposent des remèdes des défauts de toutes les métriques proposées précédemment en palliant leurs faiblesses par la vérification de tous les nœuds de tous les modèles de mobilité pendant toute la durée de la simulation.

3.5 Intention globale des mesures de mobilité

Sur la base de ces mesures de mobilité, nous pouvons prédire la performance des modèles de mobilité sans avoir besoin de simuler un véritable réseau mobile sans fil, comme le font la plupart des chercheurs par effectuer des analyses de performance. Ces validations visent à résumer plusieurs paramètres en 18126 scénarios différents avec une moyenne de 486 fichiers validés correspondant aux six modèles de mobilité. Les détails de notre validation sont présentés dans le tableau 3.4.

Métriques de mobilité	Modèles de mobilité						Total des validations
	RWMM	MGMM	RPGMM	NMM	SLAW	SMOOTH	
	RWMM	MGMM	RPGMM	NMM	SLAW	SMOOTH	
Phénomène de densité d'onde	20 fois	20 fois	20 fois	20 fois	20 fois	20 fois	120
Pourcentage moyen des voisins	50 nœuds * 20 fois	50 nœuds * 20 fois	50 nœuds * 20 fois	50 nœuds * 20 fois	50 nœuds * 20 fois	50 nœuds * 20 fois	6000
Distribution spatiale des nœuds	1	1	1	1	1	1	6
* Gamme des voisins mobiles	50 nœuds	50 nœuds	50 nœuds	50 nœuds	50 nœuds	50 nœuds	6000
							18120 fichiers

TABLE 3.4 – Détails de la validation; * Métrique proposée.

En se basant sur une analyse exhaustive avec tous ces détails comme ce présent travail, on parvient à bien comprendre les comportements précis des modèles de mobilité. En démontrant la capacité de chacun pour faire face à certains changements de topologie, ainsi que pour assurer les performances du réseau. Nous concluons qu'ils peuvent être classés en fonction de leurs résultats, tels qu'ils sont résumés dans le tableau 3.5. Les meilleurs résultats sont indiqués par (1 et 2) cellules, les quarts de travail acceptables sont représentés par (3 et 4) cellules, et les pires résultats sont souscrits par (5 et 6) cellules.

Mesure de la mobilité	Modèles de mobilité					
	Entité		Corrélé		Humain	
	RWMM	MGMM	RPGMM	NMM	SLAW	SMOOTH
Problème de dégradation de vitesse	3	2	4	1	5	6
Phénomène de densité d'onde	5	6	3	2	4	1
Pourcentage moyen des voisins	6	5	4	1	3	2
Distribution spatiale des nœuds	6	5	3	1	4	2
* Gamme des voisins mobiles	6	5	3	1	4	2

TABLE 3.5 – Les atouts et les insuffisances des mesures de la mobilité synthétique ; * la métrique proposée.

D'après les métriques validées et discutées précédemment, nous en déduisons que :

- Le phénomène de densité d'onde n'est obtenu que pour un nœud unique pendant le temps de simulation. Il inspecte un seul nœud pour seulement refléter la fluctuation du voisinage du nœud validé. Ce qui rendra la vérification de cette propriété pour tous les nœuds mobiles utilisés par la simulation sera une tâche futile.
- Le nombre moyen de nœuds mobiles indique le nombre moyen de voisins d'un nœud spécifique pendant la durée de simulation. Cette mesure est inexacte dans les cas où elle est inférieure ou supérieure au nombre de voisins de tous les nœuds mobiles à un instant donné. Cette caractéristique rend cette métrique imprécise pour refléter les changements exacts de la variabilité des voisins.
- La distribution spatiale des nœuds doit être validée à un instant donné, dans la mesure où elle ne peut pas révéler tous les changements du déplacement d'une période continue.
- Le problème de la dégradation de vitesse produit seulement une variation de vitesse par instant de temps sans tenir compte l'emplacement spatial exact des nœuds.

Le tableau 3.6 illustre l'étude comparative de toutes les propriétés susmentionnées qui ont été validées dans le présent document. Nous concluons que tous les indicateurs de mobilité présentent des caractéristiques complémentaires visant à évaluer avec précision les défauts de mobilité, ce qui permet enfin de mettre en évidence les défauts de modèle qui ont le plus d'impact sur les performances de l'ensemble du réseau mobile. Choisir le mauvais modèle de mobilité peut avoir des conséquences indésirables, en raison de l'apparition de nombreuses imperfections dans le réseau.

Métriques de la mobilité	Caractéristiques de la validation		
	Paramètres inspectés	Niveau de précision	Limitations
Problème de dégradation de vitesse	+ Tous les nœuds + Temps complet + Moyenne des modèles	Les nœuds Low (seulement la vitesse)	voisins
Phénomène de densité d'onde	- Un seul nœud + Temps complet + Moyenne des modèles	Moyen	Autres nœuds + Vitesse
Pourcentage moyen des voisins	- Un seul nœud + Temps complet + Moyenne des modèles	Moyen	Autres nœuds + Vitesse
Distribution spatiale des nœuds	+ Tous les nœuds - Temps spécifique - Modèle spécifique	Faible	Autres modèles + Temps + Vitesse
* Gamme des voisins mobiles	+ Tous les nœuds + Temps complet + Moyenne des modèles	élevée	Vitesse

TABLE 3.6 – Comparatif des métriques de mobilité validées, + avantage, - imperfection, * métrique proposée

3.6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons mis en évidence pour la première fois une tentative de validation de certains modèles de mobilité dans les réseaux en tenant compte des paramètres de mobilité les plus pertinents, à savoir le problème de dégradation de vitesse, le phénomène de densité des ondes, la distribution spatiale des nœuds et le pourcentage moyen des voisins. Ces validations visent à résumer plusieurs paramètres en 18126 scénarios différents avec une moyenne de 486 fichiers validés. Sur la base des différentes expériences menées, nous concluons que les modèles d'entités présentent les pires performances en raison de leur modèle de mouvement indépendant et du caractère randomisé total de la RWMM. Dans un deuxième temps, le RPGMM et le SLAW montrent de meilleures performances, comme le révèlent les résultats présentés précédemment. Néanmoins, il convient de noter que NMM et SMOOTH constituent les modèles de mobilité qui offrent les meilleures performances. Conformément à ce résultat, nous avons proposé une nouvelle mesure de mobilité appelée "gamme des voisins mobiles" qui prouve l'ensemble des résultats des mesures précédentes qui peuvent être remplacée par cette mesure. Cette nouvelle métrique montre un comportement efficace des changements de comportement des voisins dans les modèles de mobilité, montrant des résultats précis pour tous les nœuds mobiles pendant la mise en œuvre de l'expérience. La mesure proposée fusionne les forces de toutes les propriétés stochastiques qui ont été discutées précédemment. En se basant sur une analyse exhaustive avec tous ces détails comme le présent document, on comprend bien les comportements précis des modèles de mobilité en affichant la capacité de chaque modèle à faire face à certains changements de topologie, ainsi qu'à assurer les performances du réseau. La gestion de la mobilité dans les réseaux sans fil ad hoc est confrontée à de nombreux défis. La mobilité engendre constamment la topologie du réseau se modifier. Afin de conserver des itinéraires précis, les protocoles de routage doivent s'adapter dynamiquement à ces changements. Ainsi, les surcharges du trafic de mise à jour du routage sont très élevées. Les modèles de mobilité ont en général un impact différent sur les protocoles réseau ou les applications de service offert à l'utilisateur final.

Chapitre 4

Contribution 2 : Modélisation flexible de la mobilité synthétique pour la découverte des trajectoires dans les environnements complexes

Ce travail a été validé dans un papier d'un journal Springer, dont la référence : "Ibadah N, Rziza M, Minaoui K, Oumsis M, Benavente-Peces C. **Flexible synthetic mobility modeling to discover trajectories for complex areas of mobile wireless networks**. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing JAIHC Springer. 2019 : p 1-4."

Tandis que, la partie de la validation a été présenté dans un papier de conférence, dont la référence : "Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M, Benavente-Peces C. **Flaws Validation of Maze Mobility Model using Spatial-temporal Synthetic Mobility Metrics**, 9th International Joint Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems PECCS'2019, 19-20 Septembre, Vienne, Autriche."

4.1 Introduction

La modélisation de la mobilité est l'un des piliers les plus décisifs pour améliorer les performances des réseaux sans fil. La compréhension des caractéristiques de mobilité est primordiale pour la conception et l'analyse des schémas de mouvement propres à tout réseau. Jusqu'à présent, divers modèles de mobilité d'entités ont été proposés qui ne prennent pas en compte toutes les caractéristiques des mouvements réels (temps, espace, environnement). Afin d'obtenir un modèle amélioré qui surmonte de telles limitations, nous proposons dans cette étude un nouveau modèle de mobilité synthétique hybride des entités, appelé Maze Mobility Model (MzMM). Notre modèle prend en compte l'historique de la chronologie du mouvement, les dépendances spatiales et les restrictions géographiques. En même temps, il respecte les lois du mouvement afin de refléter des scénarios réels à l'aide du mécanisme de la découverte flexible, où les nœuds arrivent à des destinations prédéfinies suivant les trajectoires les plus appropriées, en présence de plusieurs obstacles. Cette approche permet aux nœuds mobiles de se déplacer correctement même en présence de multiples contraintes de mobilité. L'importance de cette recherche est que la nouvelle approche consiste à adopter une combinaison réaliste de paramètres pour obtenir

un modèle de mobilité flexible et robuste qui peut être appliqué à la mobilité autonome ou humaine, même dans des environnements complexes afin d'optimiser les performances des réseaux mobiles sans fil, comme en témoignent nos résultats de haute performance.

Néanmoins, ce domaine de recherche manifeste une volonté persistante d'expérimenter et de mettre en œuvre de nouveaux modèles. Notre modèle proposé combine un ensemble des sous-classes de la mobilité des entités. Sur la base d'une analyse de l'état de l'art des modèles qui ont déjà été suggérés[55], nous proposons un nouveau modèle de mobilité synthétique hybride appelé Maze Mobility Model (MzMM) permettant de remédier les problèmes des mouvements actuels et futurs dans les communications sans fil dans les aires complexes. Comme nous le démontrerons dans le présent document, ces caractéristiques surpassent les autres modèles avec une adaptation aux environnements complexes comportant plusieurs obstacles. En même temps, il respecte les lois du mouvement en permettant à un nœud d'arriver à une destination prédéfinie avec la meilleure trajectoire possible. Cela permet en outre aux nœuds mobiles d'adresser correctement les paquets de données vers leur destination via la trajectoire de nœud la plus appropriée, même en présence d'un certain nombre de contraintes de mobilité qui doivent être satisfaites. Les résultats montrent que le modèle de mobilité proposé est plus performant que les modèles existants.

Le reste de ce chapitre est structuré comme suit. La section 4.2 décrit les caractéristiques de mise en œuvre du modèle de mobilité suggéré du labyrinthe. La section 4.3 présente le processus de réalisation de MzMM. La section 4.4 présente en détail les propriétés du mouvement MzMM. La section 4.5 valide les métriques de la mobilité synthétique. La section 4.6 analyse les performances du réseau MzMM. Enfin, nous abordons les principales conclusions.

4.2 Caractéristiques de mise en œuvre

4.2.1 Motivation du modèle de mobilité de labyrinthe

Comme nous l'avons vu précédemment, de nombreux modèles de mobilité synthétiques ont été proposés. Cependant, le défi à relever est de savoir comment, dans des environnements complexes, utiliser ces modèles pour découvrir la trajectoire la plus appropriée vers une destination spécifique. Certains modèles imitent divers scénarios de la vie réelle, mais ils ne s'adaptent pas à leur environnement. Par conséquent, ils ne peuvent pas assurer une mobilité flexible à l'intérieur d'une zone complexe, ni une amélioration des performances.

Dans notre vie quotidienne, deux grands principes de mobilité sont utilisés : un "processus de découverte" ou un "mouvement avec mémoire". Le "processus de découverte" permet une recherche physique au hasard pour une destination donnée. Cette méthode triviale est à la demande. Il est adopté par les humains et les animaux pour la première fois dans le but de découvrir le bon chemin vers un nouvel emplacement. Néanmoins, il présente de nombreuses faiblesses, étant donné qu'il nécessite plus de temps plus une consommation d'énergie conséquente lors de la recherche du bon trajectoire. En revanche, le processus de "mouvement avec mémoire" évite de tels défauts en adoptant une stratégie proactive. Il suit une trajectoire probable qui a déjà été mémorisée. C'est-à-dire, si nous sommes à la maison pour la première fois, nous adoptons un "processus de découverte" mais ensuite, nous passons d'une pièce à l'autre selon le "processus de mémorisation", en utilisant le bon chemin sans visiter toutes les pièces. De même, lorsque nous conduisons une voiture

dans une ville avec plusieurs rues et intersections, le parcours est choisi en fonction des expériences passées, en se basant sur la mémoire. Les techniques de localisation comme le GPS ont été déployées qui aident à conduire, en évitant une recherche aléatoire, pour choisir le chemin le plus approprié pour atteindre efficacement la destination souhaitée. Ainsi, l'architecture interne d'une maison et sa distribution des équipements, ou la vue aérienne d'une zone spécifique, peut être considérée au départ comme une région complexe qui peut être représentée par un labyrinthe.

Inspiré par ces perceptions de la vie réelle, le présent document propose un modèle de mobilité réaliste qui s'appuie sur un mécanisme flexible de découverte du parcours. L'objectif principal de cette étude est de déterminer comment permettre aux nœuds mobiles la capacité de se déplacer correctement en présence de diverses contraintes et obstacles de mobilité (murs, intersections et chemins). Comme il est basé sur le principe du processus de découverte pour calculer la trajectoire convenable vers une destination. Ensuite, il l'enregistre dans le but de permettre aux nœuds mobiles de se déplacer en se basant sur la mémoire. Le modèle de mobilité proposé s'appelle le modèle de mobilité de labyrinthe (MzMM).

4.2.2 Algorithmes de création et de résolution de labyrinthes

Un labyrinthe est une sorte d'énigme qui se constitue d'un ensemble de chemins et de bords avec des passages valides connus entre deux endroits éloignés. Chaque région complexe peut être modélisée géométriquement comme un labyrinthe spécifique. Selon[98], les caractéristiques du labyrinthe peuvent être classées en sept classes : un labyrinthe est formé par la combinaison d'une caractéristique de chaque classe. Ces caractéristiques influencent généralement l'approche de création du labyrinthe, ce qui a un impact sur la stratégie de résolution, y compris le temps requis, le taux d'exécution et la difficulté. Tous les algorithmes de création et de résolution de labyrinthes sont analysés dans Daedalus[99].

Plusieurs algorithmes de création de labyrinthes ont été proposés pour générer différentes morphologies. Une géométrie de labyrinthe arbitraire peut être générée pour représenter ce modèle. Dans notre implémentation, nous avons choisi de produire un labyrinthe parfait[100] en raison de ses avantages qui se caractérise par un ensemble arbitraire de circuits fermés sans grille inaccessible. Une grille infinie d'un labyrinthe parfait peut être représentée par une zone rectangulaire avec m colonnes et n rangées constituant un ensemble de $m \times n$ cellules reliées entre elles par un chemin unique, où le nombre total de parois internes possibles W_i est défini par :

$$W_i = 2 \times m \times n - m - n. \quad (4.1)$$

Selon la théorie des graphes, un graphe de grille[101] est un sous-graphe de la grille infinie induite par un ensemble de sommets. Une grille rectangulaire $n \times m$ est le quadrillage ayant l'ensemble des sommets $((X, Y) \in \mathbb{Z}^2 | 1 \leq x \leq n, 1 \leq y \leq m)$. Elle sera notée par $G_n(m)$, comme le représente exactement la figure 4.1.

Par conséquent, le théorème de Kirchoff[102] fournit un moyen systématique de déterminer le nombre d'arbres possibles couvrant $t_n(m)$ d'un quadrillage donné $G_n(m)$ en utilisant la matrice adjacente $A(G)$.

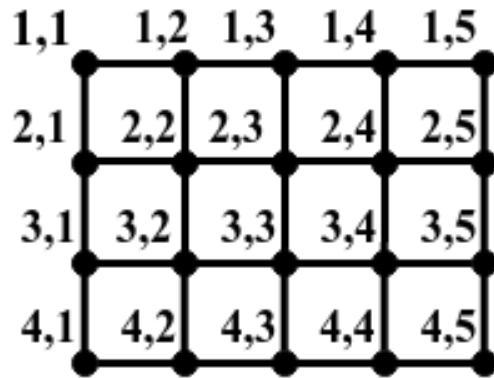


FIGURE 4.1 – Le graphe de grille $G_4(5)$.

$$A(G) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Cette méthode donne le nombre d'arbres polynomiaux d'un graphe de grille spécifique sans qu'il n'y ait au moins un des informations préalables sur la construction des arbres. La matrice d'adjacence n'est pas une bonne solution dans la mesure où il ne peut pas mettre en évidence les caractéristiques d'une structure de grille. De plus, il ne fournit aucune idée des relations entre les arbres couvrants. Donc, en se basant sur cette matrice et en utilisant la matrice de Laplacien $L = D - A$ où D est le degré de la matrice[102], le nombre des arbres couvrant $t_n(m)$ peut être fixée sur la base de la structure de la grille. Le nombre des arbres couvrants est calculé à l'aide de l'équation 2.

$$t_n(m) = \frac{(2 + \sqrt{3})^m - (2 - \sqrt{3})^m}{2\sqrt{3}} \quad (4.2)$$

L'algorithme de division récursive[103] représente l'algorithme le plus pratique pour créer ce type de graphique. C'est l'algorithme le plus rapide avec tout algorithme directionnel des préjugés. En même temps, il peut faire en sorte que plusieurs cellules rivalisent pour des labyrinthes d'arbres binaires. Ces caractéristiques permettent éventuellement qu'un graphe non orienté puisse représenter la structure finale parfaite du labyrinthe. Sur la base de ce processus, la zone de simulation peut être divisée en lignes noires (murs) et en grilles blanches (passages), comme le montre la figure 4.2, où les lignes noires en gras représentent les murs.

Selon l'équation 4.1, le nombre de murs intérieurs d'un labyrinthe parfait est le suivant :

$$W_p = 2 \times m \times n - m - n - (m \times n - 1) = (m - 1) \times (n - 1) \quad (4.3)$$

Une fois que l'algorithme de création du labyrinthe a été généré avec succès, l'algorithme de résolution du labyrinthe est ensuite exécuté afin de représenter les

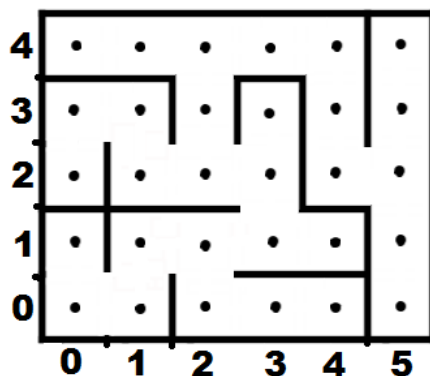


FIGURE 4.2 – La génération du labyrinthe parfait.

raccordements aux grilles solutionnées, comme le montre la figure 4.3(a). De ce fait, pour passer d'une grille source $xS(i), yS(j)$ à une grille de destination $xD(i), yD(j)$ sans avoir aucune isolation (trou), un graphe non orienté sous forme d'arbre binaire se forme à partir de $t_n(m)$, comme illustré à la figure 4.3(b). Dans notre implémentation, l'algorithme "recursive backtracker" a été adopté pour permettre aux nœuds une résolution plus rapidement possible[104].

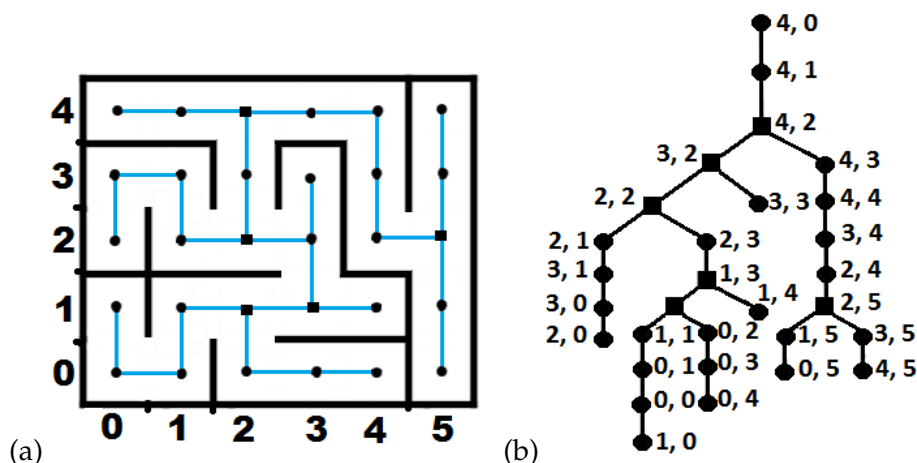


FIGURE 4.3 – Exemple d'un labyrinthe parfait représenté par un graphique non orienté. a) Résolution du labyrinthe parfait, (b) Graphique non orienté de la résolution du labyrinthe.

Dans la figure 4.3, les lignes bleues sont les "flight lights" et les points noirs (ronds et carrés) correspondent aux centres des grilles, où les carrés représentent les points de décision. Si un nœud mobile souhaite se déplacer d'un endroit à un autre, l'algorithme de résolution détermine le chemin correct entre ces deux points sélectionnés en fonction des maillages intermédiaires. Par exemple, en passant de (0,5) à (2,0), la trajectoire résultante sera évidente comme un déplacement fluide et réaliste dû au mécanisme de découverte, comme le montre la figure 4.4(a), qui est fortement lié à la trajectoire appropriée fournie par le graphe non-orienté du schéma de la figure 4.4(b). À partir de chaque point de décision, toutes les possibilités sont analysées (explorées) pour obtenir finalement le chemin correct qui permet d'atteindre le point de destination. Selon l'algorithme de résolution, le chemin correct résultant

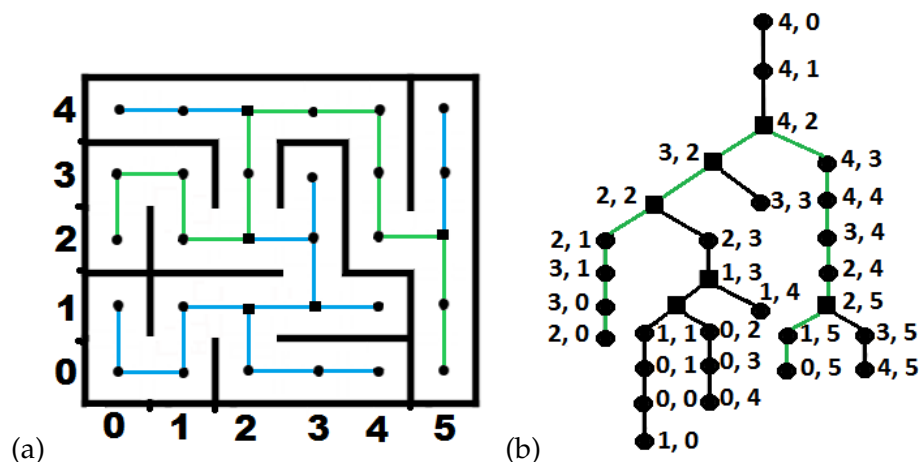


FIGURE 4.4 – Restitution correcte de la trajectoire basée sur : (a) Trajectoire correcte entre deux emplacements différents, (b) Restitution de la trajectoire basée sur le graphe non orienté.

peut être décrit comme suit : $(0,5) - (1,5) - (2,5) - (2,4) - (3,4) - (4,4) - (4,3) - (4,2) - (3,2) - (2,2) - (2,1) - (3,1) - (3,0)$, où les points en gras correspondent aux points de décision. Le principe de fonctionnement détaillé du MzMM est décrit dans la section suivante.

4.3 Processus de mise en œuvre du modèle de mobilité du labyrinthe

Dans notre environnement, nous nous déplaçons habituellement en fonction d'obstacles géographiques existants où notre comportement de mobilité dépend fortement de leur emplacement particulier. Cependant, dans un domaine complexe où de nombreux obstacles peuvent être rencontrés en cours de route, nous ne pouvons pas atteindre avec succès la position réelle de notre destination en utilisant les modèles de mobilité synthétiques suggérés précédemment. Ce qui requiert un modèle beaucoup plus adapté. Cette limitation empêche l'utilisation des modèles précités pour prendre les bonnes décisions de mouvement comme une caractéristique clé même avec des contraintes de mobilité réalistes, comme dans le cas d'un labyrinthe. Dans un tel cas, un modèle de mobilité flexible est nécessaire, qui permet à un nœud mobile de se déplacer d'une position à une autre en suivant la trajectoire la plus appropriée dans un labyrinthe spécifique. Par conséquent, dans le cadre de la recherche, nous visons à détailler les étapes appropriées d'un nouveau modèle de mobilité synthétique, qui est nommé le modèle de mobilité du labyrinthe. La figure 4.5 présente le diagramme de flux qui définit la démarche à adopter pour générer MzMM. Les étapes susmentionnées sont décrites en détail ci-dessous.

Étape 1 : Génération du labyrinthe

- La génération du labyrinthe est la première étape de la mise en œuvre du MzMM. Différentes formes sont disponibles pour la génération d'un maze[99]. Dans notre cas, nous choisissons une région carrée de $n \times n$ ou rectangulaire de $n \times m$ pour évaluer plus en détail la performance du réseau du modèle suggéré en utilisant un

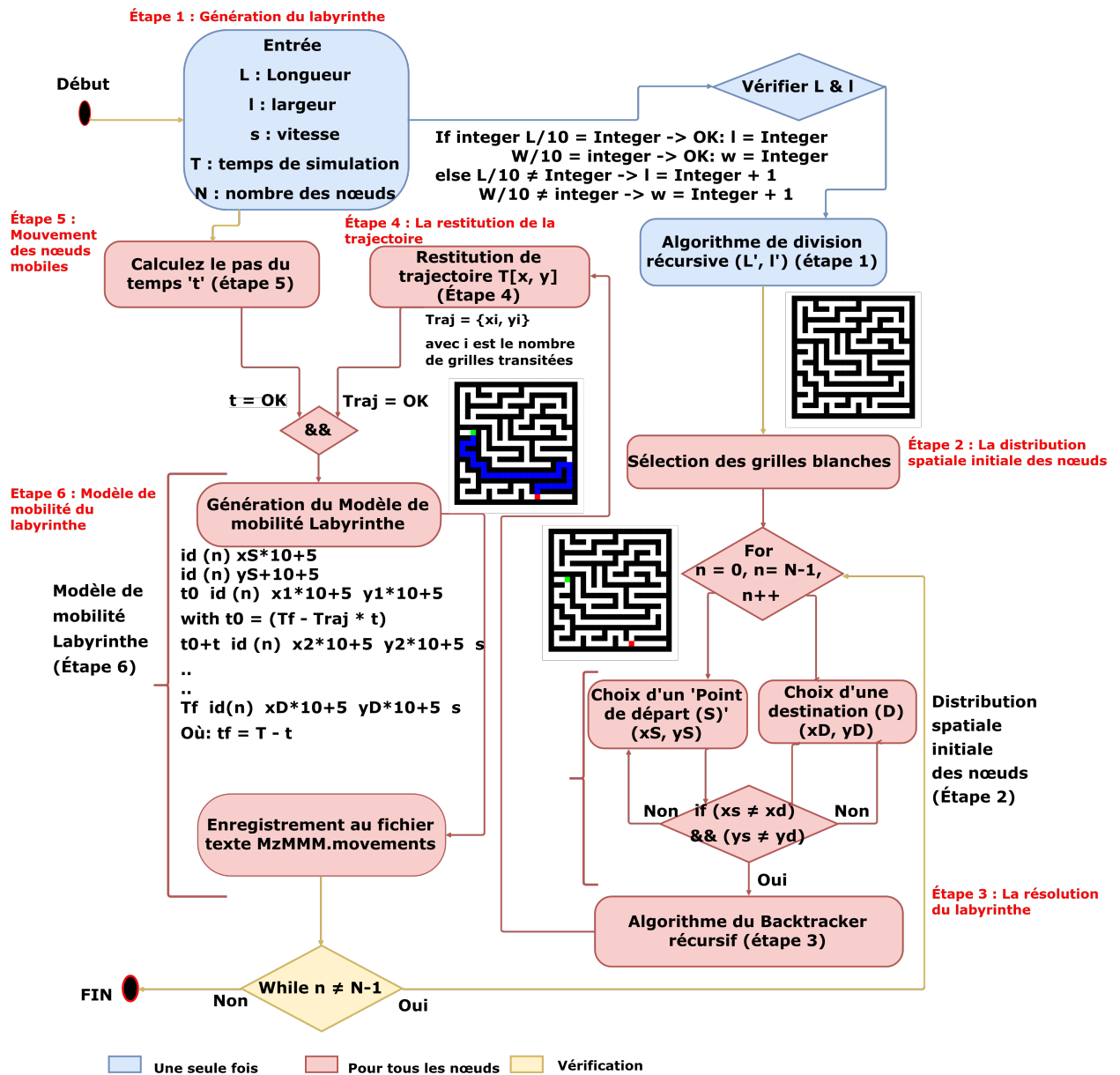


FIGURE 4.5 – Diagramme de flux du processus de réalisation du MzMM.

simulateur de réseau. Par la suite, un algorithme de division récursive[100] est appliqué pour former un labyrinthe qui est divisé en grilles uniformes comme le montre la figure 4.2 et mis en œuvre comme décrit dans la figure 4.6(a).

Par exemple, si nous adoptons des grilles de 10 m dans une zone de 100 m × 100 m, nous obtenons un labyrinthe uniforme; avec 10 grilles horizontales et 10 grilles verticales.

- Cette procédure est générée une seule fois pendant toute la durée de l'expérience. Le design obtenu grâce à l'algorithme de création du labyrinthe sera connu par tous les nœuds mobiles afin de pouvoir le résoudre en utilisant un algorithme de résolution de labyrinthe (étape 3) avant d'essayer d'atteindre la destination par des mouvements physiques (étape 6).

Étape 2 : La distribution spatiale initiale des nœuds

- Avant de sélectionner les emplacements de départ et d'arrivée par les nœuds

mobiles, les positionnements pris par les murs (cellules noires) sont éliminés selon la procédure de génération du labyrinthe (étape 1), en raison du scénario réaliste où il est impossible, en principe, de se déplacer depuis ou vers un mur. Ensuite, un point de départ est désigné aléatoirement parmi les grilles blanches disponibles, qui est désigné par la couleur verte, et aussi un point final comme une destination, désigné par la grille rouge. Ces deux positions doivent correspondre à deux emplacements différents des grilles blanches, comme le montre la figure 4.6(b).

Étape 3 : La résolution du labyrinthe

- Les grilles du labyrinthe sont réparties en quatre catégories : les grilles blanches, qui représentent les passages ; les grilles noires, qui représentent les murs ; les grilles vertes, qui indiquent la position de la source ; et une grille rouge, qui indique le point final. L'algorithme du backtracker récursif [104] assure le "processus de découverte" avant le déplacement qui prend en compte toutes les grilles pour déduire le graphe non-orienté du labyrinthe créé, comme représenté à la figure 3(b). Cette méthode consiste à déterminer correctement la trajectoire entre le point de départ et la destination visée, comme le démontre la figure 4.6(c).

Étape 4 : La restitution de la trajectoire

- Selon l'algorithme de résolution (étape 3), les coordonnées des grilles parcourues sont définies dans le labyrinthe. Ce processus permettra aux nœuds de "se déplacer avec la mémoire" qui correspond exactement au chemin adéquat entre la position de départ et de destination, comme illustré par la trajectoire verte à la figure 4.6(b). Cette fonction révoque le nœud mobile pour se déplacer en parcourant la bonne direction dans un domaine aussi complexe. Cela mène fortement à économiser le temps de mouvement ainsi que la consommation d'énergie des nœuds.

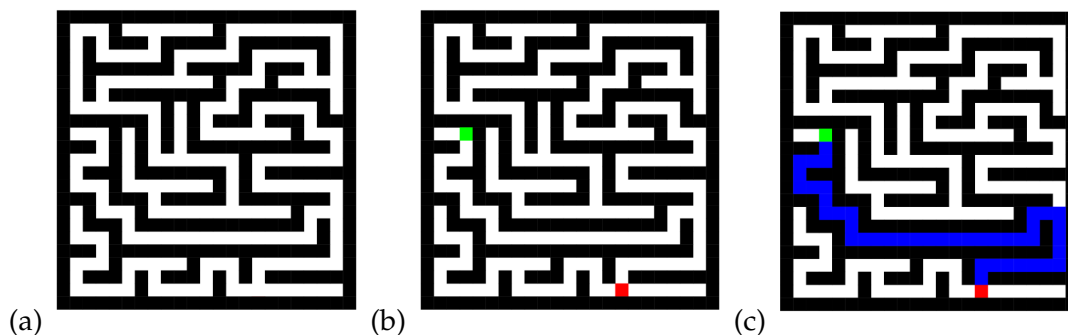


FIGURE 4.6 – Mise en œuvre du modèle de mobilité labyrinthe. (a) Création d'un labyrinthe (Étape 1), (b) Distribution spatiale initiale des nœuds (Étape 2), et (c) Résolution du labyrinthe et restitution du trajectoire (Étapes 3 et 4).

Étape 5 : Mouvement des nœuds mobiles

- Compte tenu de la rétroaction apportée par l'algorithme de résolution de labyrinthe (étape 3), les trajectoires appropriées sont alors recensées par les positions des grilles exactes (étape 4). Cependant, pour rendre ce modèle plus réaliste, il devra nécessairement respecter les lois du mouvement, à savoir, $t = d/s$, avec :

* d représente la distance entre deux grilles adjacentes où chaque grille est identifiée par son centre. D'où $d = 10$ m en raison de la répartition uniforme du labyrinthe.

* s est la vitesse adoptée lors de la validation de l'algorithme. Dans nos travaux de développement et de simulation, nous admettons une vitesse constante du marche rapide.

* Ensuite, t est calculé en fonction de la distance parcourue et de la vitesse sélectionnée.

Étape 6 : Modèle de mobilité du labyrinthe

De toutes les étapes décrites précédemment, on a pu produire un modèle de mobilité synthétique cohérent et réaliste. La sortie du MzMM contient toutes les informations et caractéristiques qui décrivent notre modèle.

4.4 Caractéristiques du mouvement MzMM

Le modèle de mobilité proposé dans cette étude possède un grand nombre de caractéristiques de base, telles que décrites dans la sous-section suivante, qui régissent l'ensemble de la stratégie de gestion adoptée.

4.4.1 Découverte de la trajectoire

La découverte de la trajectoire est basé sur un algorithme qui, à chaque point de décision du tracé, analyse les différentes possibilités en écartant celles qui arrivent aux points de non-sortie et en considérant celles qui permettent de franchir de nouvelles étapes. Par exemple, le modèle résultant de la figure 4.6(c) peut être décrit dans les étapes suivantes relatives aux paramètres du code :

1. \$node_(0) set X_ 105

2. \$node_(0) set Y_ 45 :

- La première et la deuxième lignes représentent le réglage, les positions du point de départ, qui sont sélectionnées à partir de la distribution spatiale initiale (étape 2). Dans ce cas, le nœud mobile sera positionné à une grille donnée (10,4) sur la base du référentiel précédent (selon l'étape 4).

- Ces valeurs sont multipliées par la distance d de la grille, qui est égale à 10 m, et additionnées à 5 m, ce qui correspond au centre de la grille atteint (étape 5). Ainsi, les coordonnées x et y résultantes seront $x = (10 * 10 + 5) = 105$ et $y = (4 * 10 + 5) = 45$, comme résultat final pour définir les coordonnées réelles du point de départ des lignes 1 et 2 précitées.

3. \$ns_ at 0.0 \$node_(0) setdest 115 45 5.0 :

- La troisième ligne indique la première grille après le point de départ qui appartient à la trajectoire correcte (indiquée en vert) où : $t = 0$, $id_node = 0$, $x = 115$ (c'est-à-dire, $105 + d$), $y = 45$ et $s = 5.0$ m/s.

Dans cet exemple, après avoir exploré les différentes possibilités et écarté celles qui se classent aux points de non sortie, le nœud mobile se déplace vers le bas en fonction de la décision de mobilité donnée, en prenant en considération qu'il ne peut tourner que dans une seule direction : gauche ($y - d$), haut ($x - d$), droite ($y + d$) ou bas ($x + d$) selon le résultat de l'étape 4.

4. \$ns_ at 2.0 \$node_(0) setdest 125 45 5.0

- La quatrième ligne indique la deuxième grille après le point de départ où $t = 2.0$ s (c.-à-d, d/s) et $x = 125 = (115 + d)$ (c.-à-d que le nœud descend) avec la même position y . Dans le mouvement suivant, un intervalle de temps de d/s est ajouté au dernier temps t (selon l'approche de dépendance temporelle décrite à l'étape 5).

L'algorithme continue son exécution pour d'autres lignes jusqu'à la dernière (nième ligne), soit le dernier point de décision.

n. \$ns_ at 88.0 \$node_(0) setdest 225 165 5.0

Plusieurs transitions de mobilité sont effectuées pour finalement atteindre la destination prévue. La dernière ligne n affiche les positions (x, y) du dernier emplacement, qui est situé sur la grille (22,16). Dans ce cas, le nœud arrive à cette position au moment $t = d/s * 44$ où 44 représente le nombre de décisions de mouvement entre la

source et le point de destination. À la fin, un arbre de décision avec tous les chemins potentiels à partir du point de départ est représenté, et celui qui obtient le point de destination avec moins d'étapes (chemin le plus court), choisi comme trajectoire de la découverte.

4.4.2 Caractéristiques de MzMM

Sur la base de toutes les étapes mentionnées ci-dessus, nous concluons que MzMM se distingue par plusieurs caractéristiques frappantes :

- MzMM respecte la loi physique du mouvement : il prend en considération les relations de base entre la distance, le temps et la vitesse (étape 5), contrairement, par exemple, au modèle aléatoire, qui sélectionne au hasard la destination et la vitesse indépendamment les unes des autres. Cela rend ces modèles irréalistes.
- Il se fonde sur un modèle basé sur un historique de la direction. Il se déplace dans l'une des quatre directions possibles (haut, gauche, bas ou droite) principalement selon la dernière grille $(-d, +d)$. Il s'agit donc d'un modèle de mobilité spatialement dépendant. La position suivante ne peut être que dans une seule direction : gauche, haut, droite ou bas (étape 4).
- Il s'agit d'un modèle de mobilité dépendant du temps : l'heure actuelle repose sur des instants temporels antérieurs, c'est-à-dire essentiellement $(t = d/s)$ (étape 5).
- La longueur de la volée est constante entre deux grilles consécutives grâce à la grille uniforme (étape 1).
- Le temps de retour et la fréquence des visites sont distribués de manière probabiliste, principalement en relation avec à la trajectoire résultante (étapes 2 et 4).
- Au lancement, il a une distribution spatiale (grilles blanches). Dans les étapes suivantes, la trajectoire résultante ne doit être constituée que par des passages sans murs, comme le montre la figure 4.6(c). Ce fait impose un comportement de mouvement réaliste qui semble être celui de notre vie quotidienne.

Les caractéristiques de mouvement les plus notables (par rapport aux autres modèles de mobilité) du MzMM sont mises en évidence dans le tableau 4.1.

La signification des lettres du tableau 4.1 est la suivante. *C* : Constant, *HB* : Basé sur l'historique, *UD* : Répartition uniforme, *PD* : Probabilistiquement répartie, *P* : périodique, *PL* : loi de puissance tronquée, *UD* : Répartition uniforme, *N.A* : Non applicable. Nous concluons que le MzMM prend en compte tous les paramètres de mouvement pertinents afin d'obtenir un modèle hybride de mobilité des entités. Il reflète un contexte réel avec plusieurs contraintes géographiques, comme les murs (étape 1). MzMM permet un mouvement flexible, même dans des zones complexes, qui peut prendre la forme d'un labyrinthe avec diverses contraintes. Sur la base du modèle obtenu, les nœuds mobiles peuvent obtenir la trajectoire convenable avant de se déplacer (étape 5). La résolution du labyrinthe remplace le simple processus de découverte. Ensuite, il permet de générer un modèle de mobilité cohérent qui sera suivi par des nœuds lors des déplacements. Il reflète exactement ce que l'on appelle le mouvement avec mémoire. Il s'inspire principalement du mouvement humain dans la vie réelle. Il en résulte un modèle de mobilité flexible, précis et robuste qui fonctionne dans des domaines complexes, même si l'on tient compte de divers besoins de mobilité.

D'après les caractéristiques de cette approche présentées ci-dessus, nous pouvons conclure qu'elle est plus appropriée pour la prise en charge des protocoles de

Modèles de mobilité	Classe du modèle	Vitesse	Direction	Acc. /Déc	Temps de pause	Long. du vol	Temps de retour et la fréquence des visites
MzMM	Entité (Hybride)	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
RWMM	Entité (aléatoire)	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
MGMM	Entité (aléatoire)	UD	NA	NA	C/UD	NA	NA
RPGMM	Corrélée	Basé sur le point de référence	Basé sur le point de référence	NA	C/UD	NA	NA
NMM	Corrélée	NA	Autour du point de référence	NA	NA	NA	NA
SLAW	Humaine	NA	PD selon les destinations définies	NA	TPL	TPL	P
SMOOTH	Humaine	NA	PD selon les destinations définies	NA	TPL	TPL	P

TABLE 4.1 – Comparaison des caractéristiques du mouvement : MzMM vs. Autres modèles de mobilité synthétiques.

routage dans les réseaux sans fil. En outre, il peut fonctionner dans des domaines complexes présentant des performances plus élevées que les autres approches développées jusqu'à présent, même si l'on tient compte des diverses exigences de mobilité, comme nous le démontrerons dans la section suivante.

4.5 Validation des modèles de mobilité

Cette partie se concentrera principalement sur les mesures de mobilité, telles que la distribution spatiale des nœuds, problème de dégradation de vitesse, phénomène de densité d'ondes, pourcentage moyen de voisinage des nœuds et la portée des voisins mobiles afin de décrire plus précisément les caractéristiques de notre nouveau modèle en vigueur. Nous comparons le Maze MM avec le RW MM et le MG MM. Les métriques mentionnées précédemment ont déjà été évaluées uniquement pour le RW MM. Et récemment, elles ont été analysées pour d'autres modèles de mobilité dans [105]. Dans cette partie, nous nous proposons de valider la régularité du mouvement pour le modèle Maze MM par rapport à d'autres modèles de mobilité synthétiques. Sur la base de ces mesures de mobilité, nous pouvons établir et comprendre un jugement précis sur chaque imperfection de la mobilité. La stratégie adoptée des nœuds mobiles affecte principalement les performances de la totalité du réseau. Ces mesures permettront d'expliquer précisément les divergences entre les modèles. Les paramètres de validation sont indiqués dans le tableau 4.2.

Les conditions préalables précitées sont corrélées pour rectifier tous les scénarios possibles afin d'en déduire une connaissance profonde et précise de chaque déséquilibre de mobilité. Les résultats de la validation sont présentés et examinés par les figures 4.7 à 4.12 dans les sous-sections suivantes. Ces résultats doivent admettre les caractéristiques de mobilité pertinentes qui décrivent la politique de mouvement

TABLE 4.2 – Paramètres de validation.

Paramètres	Valeurs
Nombre de nœuds	50
Vitesse	5 m/s
Temps de pause (s)	0
Modèles de mobilité	Maze MM RW MM et; MG MM
Mesure de la mobilité	Problème de dégradation de vitesse Distribution spatiale des nœuds Phénomène de densité des ondes Pourcentage moyen de voisins et, Gamme des voisins mobiles
Aire de validation	1030m1030m
Temps de simulation	1000 sec
Itérations	20 fois

soutenue par les modèles validés, comme précise le tableau 4.1.

Les modèles eux-mêmes n’offrent pas des explications précises sur les différences entre les MM. Cette partie constituera par conséquent une tâche ardue qui se concentrera principalement sur les mesures de la mobilité afin de décrire plus précisément les caractéristiques de notre nouveau modèle actuel. En utilisant Matlab, nous faisons la moyenne de 20 MM pour chaque modèle afin d’obtenir des résultats plus rigoureux. Le Random Waypoint MM, en tant que référence pour la modélisation de la mobilité, souffre de nombreux problèmes. Dans cette partie, nous devons nous pencher sur Maze MM et le comparer avec RW MM et MG MM.

4.5.1 Problème de dégradation de vitesse

Nous commençons par le "problème de dégradation de vitesse". Yoon et al.[43] ont montré que la vitesse moyenne des nœuds diminue constamment avec le temps. Et donc, il ne devrait pas être utilisé pour les simulations. Elle décroît avec le temps avant d’atteindre un état stable, ce qui contredit l’hypothèse d’avoir la même vitesse moyenne pendant un temps de simulation, comme le prouve le tracé de la ligne rouge de la figure 4.7. Nous remarquons que le RW MM souffre évidemment d’un problème de décroissance de la vitesse. La vitesse n’est pas stable pendant la simulation, en raison de la sélection aléatoire et indépendante de la vitesse et du point de destination.

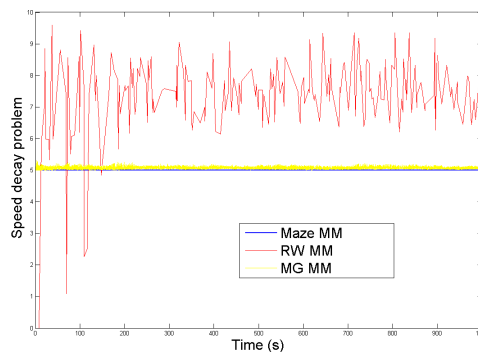


FIGURE 4.7 – Problème de dégradation de vitesse

A partir de la même figure 4.7, on observe que le MG MM est moins stable par rapport au Maze MM dont la vitesse est stationnaire pendant toute la durée de la simulation. Nous concluons que Maze MM ne souffre pas de ce problème. Étant donné que chaque décision de mobilité est prise en fonction de la distance parcourue, de la vitesse adoptée et du temps de déplacement. Si ces trois paramètres sont dépendants les uns des autres et se respectent, nous évitons presque tout problème de diminution de la vitesse dans un modèle de mobilité, comme le montre la figure 4.7 pour Maze MM.

4.5.2 Phénomène de densité des ondes

Deuxièmement, une autre métrique de mobilité est validée, intitulée "phénomène de densité des ondes", qui représente le nombre moyen de voisins pour un nœud particulier. Royer, Melliar-Smith et Moser[106] ont observé cette pathologie de densité des ondes qui oscille régulièrement avec le temps, comme le prouve exactement la figure 4.8.

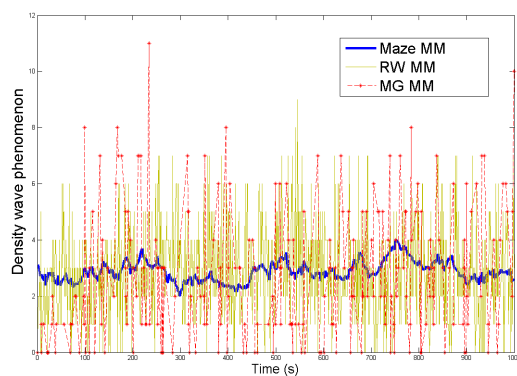


FIGURE 4.8 – Phénomène de densité des ondes

A partir de la figure 4.8, MG MM connaît également ce problème, comme le montre la représentation graphique de la ligne verte. Nous observons que RW MM et MG MM fluctuent dans une large gamme de 0 à 11 et de 0 à 9 respectivement, et souvent sans aucun voisin. Mais cette fourchette est plus précise (2-4) avec le Maze MM qui a toujours au moins deux voisins. Cette mesure est bien trop importante, surtout si l'on applique pour les MANET. Si un nœud mobile envoie un trafic sans aucun nœud intermédiaire, cela influencera principalement le taux de délivrance des paquets (PDR) dans ce type de réseau. Cependant, Maze MM est plus stable, avec de légères fluctuations dans une marge raisonnable avec un voisinage permanent.

4.5.3 Pourcentage moyen de voisinage

Troisièmement, nous validons une autre mesure de la mobilité appelée "pourcentage moyen de voisins". En général, une forte variation du pourcentage moyen de voisinage des nœuds mobiles produit une forte variabilité des résultats de performance [91]. Afin d'être absolument certain des résultats affichés dans la figure 4.8, cette mesure devrait offrir une représentation plus rigoureuse des changements des nœuds voisins de la figure 4.9.

- Selon la figure 4.9b, RW MM connaît les pires résultats. Il oscille dans une fourchette de 0 à 16% avec plusieurs moments existants de aucun voisin. Cela

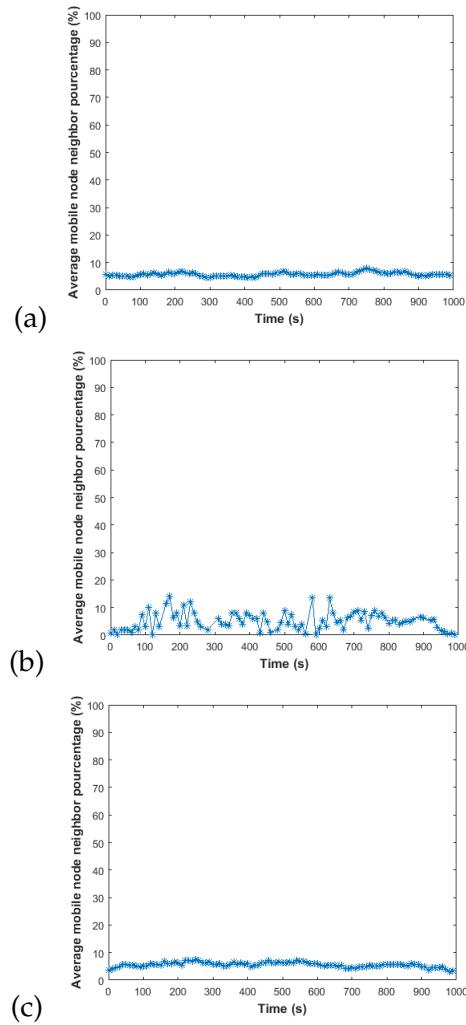


FIGURE 4.9 – Pourcentage moyen de voisinage. (a) Maze MM (b) the RW MM; (c) the MG MM

signifie que aucun nœud intermédiaire ne sera détecté pour acheminer les paquets qui sont envoyés par un nœud mobile déterminé. Cette faille augmente encore les paquets perdus, ce qui réduit le taux de délivrance des paquets de ce modèle validé.

- D’après la figure 4.9c, MG MM présente de petites fluctuations de l’ordre de 4 à 9%, en outre plus de deux voisins sont toujours présents parmi le total des nœuds expérimentés. Ce fait permet à ce modèle d’être plus performant que le RW MM.
- Néanmoins, d’après la figure 4.9a, Maze MM présente une fourchette de 3-6%. Il produit les meilleurs résultats obtenus, avec une présence continue des voisins pendant toute la durée de la validation. Cette particularité lui permet d’obtenir des performances nettement supérieures à celles des autres modèles [107]. Ce modèle de mobilité est plus stable que les autres modèles.

Cette propriété confère une visibilité globale du phénomène de densité des ondes durant la période de la validation. Cela confirme puissamment les résultats présentés dans la figure 4.8, tels que présentés dans le tableau 3.5.

4.5.4 Distribution spatiale des nœuds

Quatrièmement, nous vérifions une autre mesure de la mobilité, à savoir la "distribution spatiale des nœuds". Bettstetter [108], Blough et al.[42] ont respectivement observé la distribution spatiale non uniforme de RW MM comme le prouve la figure 4.10(b). À l'état d'équilibre, la densité de nœuds est extrême dans la région centrale, alors qu'elle est presque nulle autour des limites, comme le montre la figure 4.10(b). Nous analysons cette métrique de mobilité à $t = 0$ et à quand le temps de simulation s'écoule.

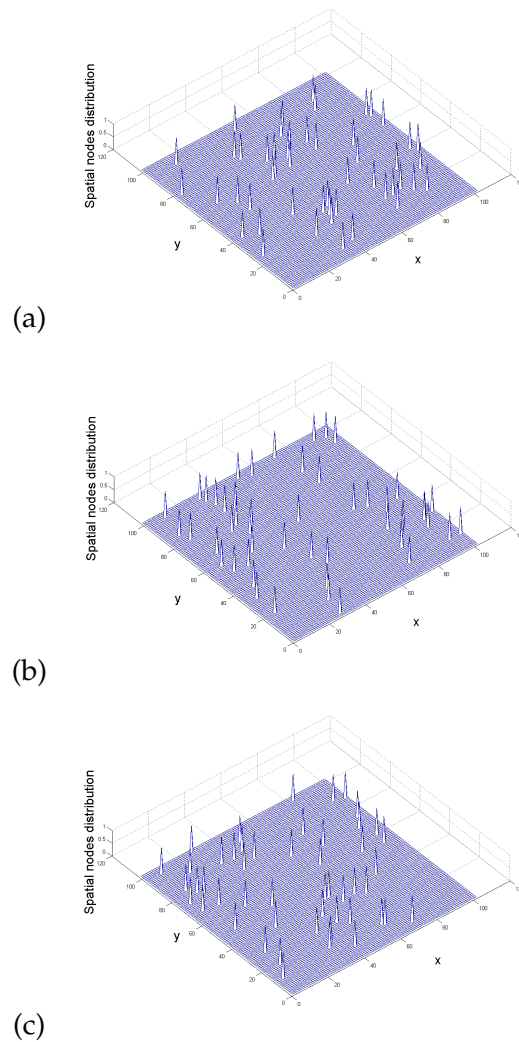


FIGURE 4.10 – Distribution des nœuds spatiaux à $t = 0s$. (a) Maze MM (b) RW MM; et (c) MG MM

Dans la Fig. 4.10(a) à $t = 0$, nous observons que Maze MM est bien distribué dans le domaine de simulation; quand les nœuds mobiles sont situés aux limites avec quelques espaces vides par rapport aux Fig. 4.10(b) et Fig. 4.10(c). Cela semble plus évident si l'on utilise un nombre élevé de nœuds mobiles et si l'on analyse cette métrique de mobilité lorsque le temps de simulation s'écoule. Sur la figure 4.11(a), nous observons que Maze MM a toujours la meilleure distribution spatiale. Il est bien réparti dans le champ de simulation, avec quelques nœuds mobiles aux frontières. Il comporte quelques espaces vides par rapport à la figure 4.11(b) et à la

figure 4.11(c). Si un MM présente ce phénomène pendant la simulation, les nœuds souffriront en permanence du "phénomène de densité des ondes", comme le prouve la figure 4.8.

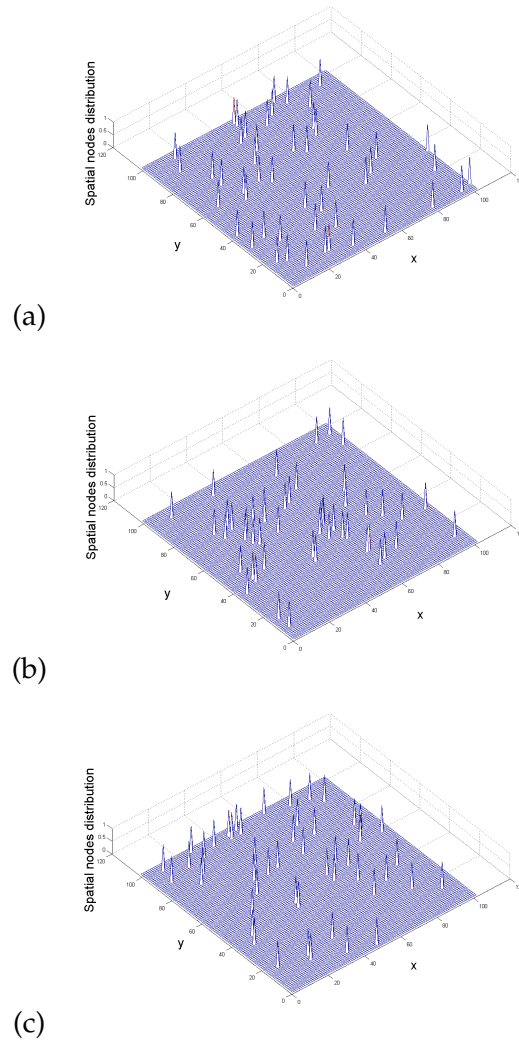


FIGURE 4.11 – Distribution des nœuds spatiaux à $t = 1000s$. (a) Maze MM (b) RW MM; et (c) MG MM

4.5.5 Gamme des voisins mobiles

Une nouvelle mesure a récemment été suggérée pour surmonter les limites des autres mesures qui ont été proposées précédemment, telles que la distribution spatiale des nœuds, le phénomène de densité des ondes et le pourcentage moyen de voisinage. Cette nouvelle mesure est appelée "gamme de voisins mobiles". Elle apporte une conduite exacte de la stabilité des modèles de mobilité pour tous les nœuds mobiles au cours de toute la période de validation. Elle inspecte les changements de voisinage en se basant sur une portée de propagation précise, quel que soit l'instant, le modèle ciblé et le nœud inspecté. Cette fonctionnalité est prospère pour chaque instant en indiquant la plage de voisins enregistrés pour le modèle de mobilité. Parallèlement, cette mesure met en évidence les avantages et les inconvénients de chaque problème de mobilité qui a été mis en évidence précédemment.

Les résultats de la validation de cette mesure de la mobilité sont illustrés dans la figure 4.12.

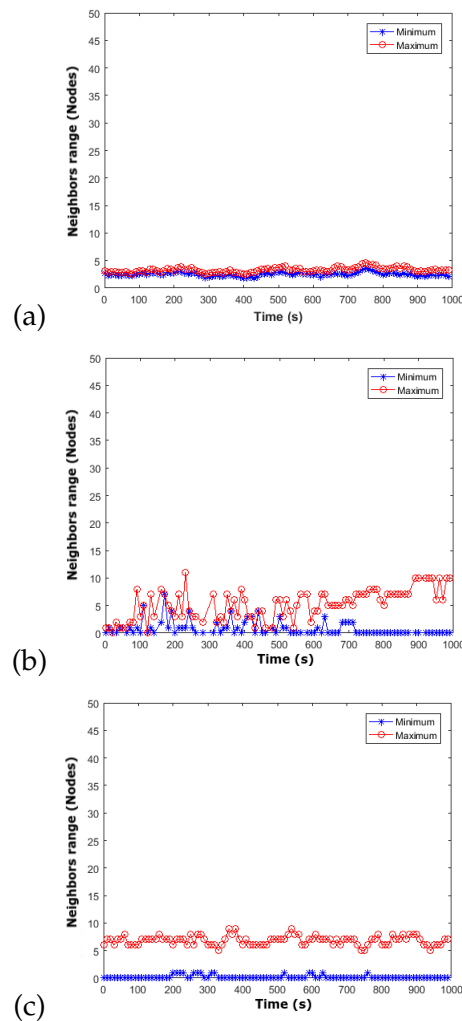


FIGURE 4.12 – Gamme de voisins mobiles. (a) Maze MM (b) RW MM; et (c) MG MM

Nous constatons que :

- Selon la figure 4.12b, RW MM présente le pire modèle en fonction de cette caractéristique. Il est perçu par le nombre de voisins qui varie dans le temps. Cela se traduit par un comportement de mobilité plus défavorable, avec un écart irrégulier de la portée des voisins mobiles qui reflète le mouvement instable au cours du temps.
- MG MM définit des fluctuations plus appropriées avec un écart régulier de 0 à 9, à plusieurs périodes sans aucun voisin détecté. Cela confirme fermement les résultats précédents des mesures validées, comme le phénomène de densité des ondes et le pourcentage moyen de voisinage.
- La figure 4.12 révèle que le RW MM et le MG MM ont clairement ce problème. Cependant, Maze MM surpasse ce problème puisque la marge calculée converge trop rapidement en une bande régulière. En outre, pendant tout le temps de validation, les nœuds mobiles détectent certains voisins pour acheminer les paquets vers leur destination sans perte. Cette spécificité n'est

pas mise en avant pour l'autre modèle validé. Cela montre bien que notre modèle de mobilité validé est plus stable et plus performant, ce qui conduit à des résultats surprenants lors de l'analyse des performances [96].

Cette métrique fournit une précision accrue par rapport aux autres mesures. La gamme des voisins mobiles démontre clairement les lacunes de toutes les mesures de mobilité antérieures en validant tous les nœuds déployés au cours de toute la période de validation pour tous les modèles de mobilité. Nous concluons que Maze MM offre les meilleurs résultats que RW MM et MG MM dans les cinq métriques de mobilité analysées. Il maintient :

- La même vitesse pendant le temps de simulation, grâce au respect de la loi de mouvement, comme le prouve le "problème de dégradation de vitesse" de la figure 4.7.
- Maze MM a la meilleure " distribution spatiale des nœuds " avant le mouvement, comme le confirme la figure 4.10. Et aussi, lorsque le temps de simulation s'écoule, comme le montre la figure 4.11.
- Tout le temps, Maze MM a quelques fluctuations de densité des voisins par rapport à RW MM et MG MM, comme le témoigne la figure 4.8, pour le "phénomène de densité des ondes".
- Le modèle du labyrinthe maintient le même rythme pour le pourcentage moyen des voisins, comme le révèle la figure 4.9.
- De plus, Maze MM offre la meilleure gamme de voisins mobiles enregistrés avec des résultats très satisfaisants, comme indique exactement la figure 4.12.

Grâce à ces métriques, nous pouvons estimer les performances des modèles de mobilité sans avoir besoin de les simuler dans un réseau sans fil, comme cela se fait habituellement pour évaluer le modèle de mobilité. Cette démarche est plus précise afin de ne produire que le comportement juste de la stratégie de mouvement adoptée. Ces mesures accentuent les aspects intégraux dans le but d'extraire correctement les perspectives des enjeux de la mobilité. En raison de ces défauts, le choix d'un mauvais modèle de mobilité affecte profondément les performances de l'ensemble du réseau, avec des conséquences indésirables. Après avoir simulé 60 fichiers correspondant aux trois modèles de mobilité, nous en déduisons que nous pouvons les classer en fonction de leurs résultats, comme indiqué dans le tableau 4.3. Les meilleurs résultats sont indiqués dans les cellules vertes(1), les écarts acceptables sont présentés par des cellules jaunes(2), et les pires résultats sont présentés par des cellules rouges(3).

Cette validation du Maze MM est largement suffisante pour juger la robustesse et l'efficacité du Maze MM par rapport aux autres modèles. L'objectif de cette enquête est de prouver que la combinaison réaliste de l'approche Maze MM qui prend en compte tous les paramètres pour assurer un modèle de mobilité efficace et flexible qui peut être déployé dans des situations complexes pour offrir les meilleures performances, comme le prouvent ses résultats de haute performance [107].

TABLE 4.3 – Classification des modèles de mobilité validés

Mobility Metrics	Mobility models		
	Maze MM	RW MM	MG MM
Speed decay problem	1	3	2
Density wave phenomenon	1	3	2
Average neighbor percentage	1	3	2
Spatial node distribution	1	3	2
Mobile neighbors range	1	3	2

4.6 Analyse des performances

4.6.1 Paramètres de la configuration

Dans cette section, les performances d'un réseau particulier lors de l'utilisation du modèle de mobilité proposé (MzMM) sont analysées. L'évaluation du rendement a été évaluée ainsi :

- Le MzMM proposé a été comparé à six modèles de mobilité de référence, à savoir deux modèles d'entités : RandomWaypoint MM (RWMM) et ManhattanGrid MM (MGMM); deux modèles corrélés : Groupe de points de référence MM (RPGMM) et MM nomades (NMM); et deux modèles humains : Self-Similar Least Action Walk (SLAW) et SMOOTH.
- Trois protocoles de routage mobile Ad hoc sont combinés : un protocole réactif, Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV); un protocole proactif, le protocole OLSR (Optimized Link State Routing protocol); et un protocole hybride, ZRP (Zone Routing Protocol).
- Afin d'analyser l'impact de la région de simulation, deux zones différentes ont été considérées : une zone petite, 220 m × 220 m, et une autre de grande superficie, 1030 m × 1030 m.
- Trois paramètres de rendement sont analysés : Taux de délivrance des paquets (PDR), délai moyen de bout en bout et débit du réseau.
- Les résultats de simulation ont été obtenus en considérant 42 scénarios différents pour les tests, 630 fichiers simulés avec une moyenne de 15 itérations par scénario pendant 1000 secondes.

Les paramètres de simulation sont combinés pour analyser tous les cas possibles afin d'obtenir une conclusion fiable et significative sur la performance des autres modèles de mobilité par rapport au MzMM proposé. Les paramètres expérimentaux sont présentés dans le tableau 4.4. Les résultats de la simulation sont décrits dans les figures 4.13, 4.14 et 4.15, et sont présentés dans les tableaux 4.5 et 4.6.

Paramètres	Valeurs
Modèle de propagation	TwoRayGround model
Bande passante	10 Mb/s
Nombre de nœuds	50
Type des paquets	CBR
Taux des paquets	512 bytes/s
Vitesse	5 m/s
Temps de pause (s)	20
Protocoles de routage	AODV OLSR ZRP
Modèles de mobilité	MzMM (Modèle proposé) RWMM, MGMM (Modèles des entités) RPGMM, NMM (Groupes corrélés MMs) SLAW, and SMOOTH (MMs humains)
Mesure des performances	PDR Délai moyen de bout en bout Débit
Zones	220m × 220m 1030m × 1030m
Temps de simulation	1000 s
Récursion	15 fois

TABLE 4.4 – Paramètres de simulation.

4.6.2 Résultats de l'analyse des performances

Plusieurs mesures de performance ont été prises en compte pour déterminer correctement le rendement des modèles de mobilité synthétiques afin de connaître leurs comportements lorsqu'ils sont combinés à d'autres caractéristiques de simulation. D'autre part, les résultats obtenus visent à évaluer comment les protocoles de routage MANET influencent leurs performances, comme suit :

- Taux de délivrance des paquets (PDR)

Cette métrique indique le nombre de paquets délivrés et reçus avec succès à une destination donnée par rapport au nombre total de paquets qui ont été envoyés par l'expéditeur à cette destination. Lorsque cette mesure atteint 100% signifie que tous les paquets envoyés ont été reçus avec succès et que la meilleure prestation est achevée.

En se basant sur l'analyse de la figure 4.13(a), on constate que pour les petites zones de simulation, le résultat du PDR de MzMM est évidemment supérieur à celui des six autres modèles pour les trois autres modèles analysés les protocoles de routage AODV, OLSR, et ZRP, et ceci est rendu du fait que le MzMM tient en considération toutes les caractéristiques logiques de la mobilité synthétique. Par ailleurs, pour les protocoles de routage, AODV affiche les meilleurs résultats grâce à son fonctionnement à *la demande*. Cela conduit le modèle de mobilité à montrer une performance correcte où il obtient exactement le chemin correct pour atteindre une destination via la demande d'itinéraire RREQ et la réponse d'itinéraire RREP. Le pire résultat est montré par la ZRP, qui doit fonctionner en coordination avec l'Intra-zone

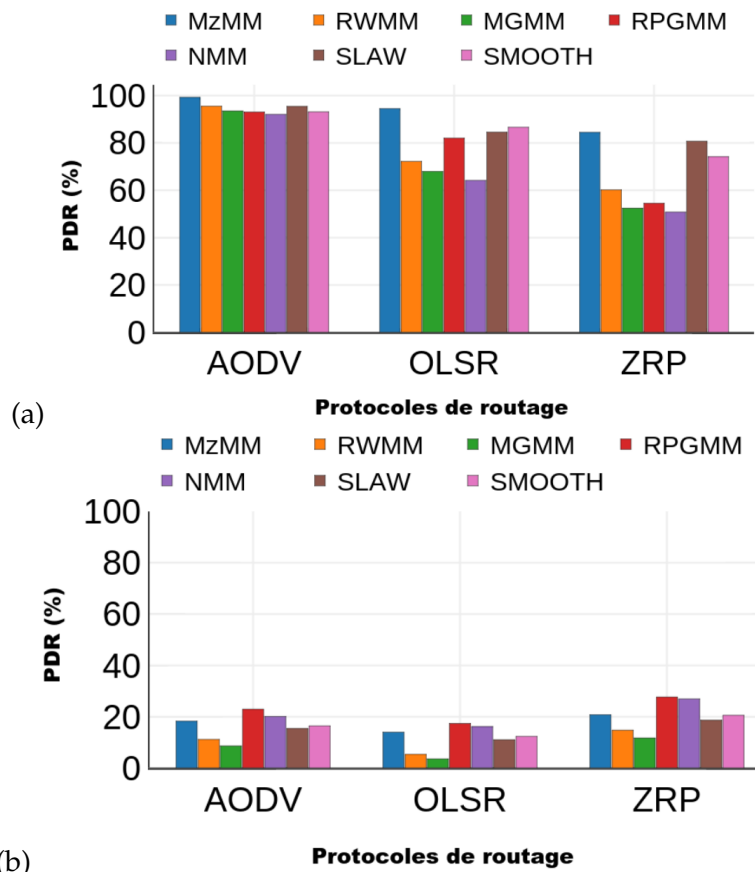


FIGURE 4.13 – Taux de délivrance des paquets en (%) du MzMM par rapport à d’autres modèles de mobilité synthétiques. (a) Petite zone, (b) Grande surface.

Routing Protocol (IARP) et l’Inter-zone Routing Protocol (IERP) afin d’explorer les informations de routage. Cependant, comme révèle la figure 4.13(b), dans le cas des grandes régions, le modèle proposé dans cette étude permet de parvenir des résultats moyens pour les trois protocoles de routage, tels que ceux présentés par les modèles humains (SLAW et SMOOTH). Mais les modèles d’entités obtiennent les pires résultats, en raison de leur principe de mouvement individuel, du processus de mobilité aléatoire du RWMM et des mouvements avec contraintes géographiques dans MGMM. Il est à noter que les modèles corrélés obtiennent les meilleurs résultats en utilisant le protocole PDR, grâce à la stratégie de groupe qu’ils utilisent. Cependant, le protocole ZRP excelle en divisant une zone de simulation spacieuse en petites zones où il devient plus facile de contrôler les paquets transmis.

- Délai moyen de bout en bout

Cette mesure détermine le temps nécessaire pour qu’un paquet transmis sur le réseau se route depuis son nœud source jusqu’à sa destination. Si la valeur est faible, on considère qu’il s’agit d’un bon délai de bout-en-bout (idéalement, zéro seconde).

Dans le cas des petites zones, les résultats présentés dans la figure 4.14(a) révèlent que l’approche MzMM est plus performante que les autres modèles de mobilité, aboutissant ainsi aux mêmes résultats que ceux des modèles humains. Il fonctionne mieux que l’entité et les modèles corrélés lorsqu’il utilise l’un des trois protocoles de routage pris en compte dans cette étude. De plus, les résultats présentés

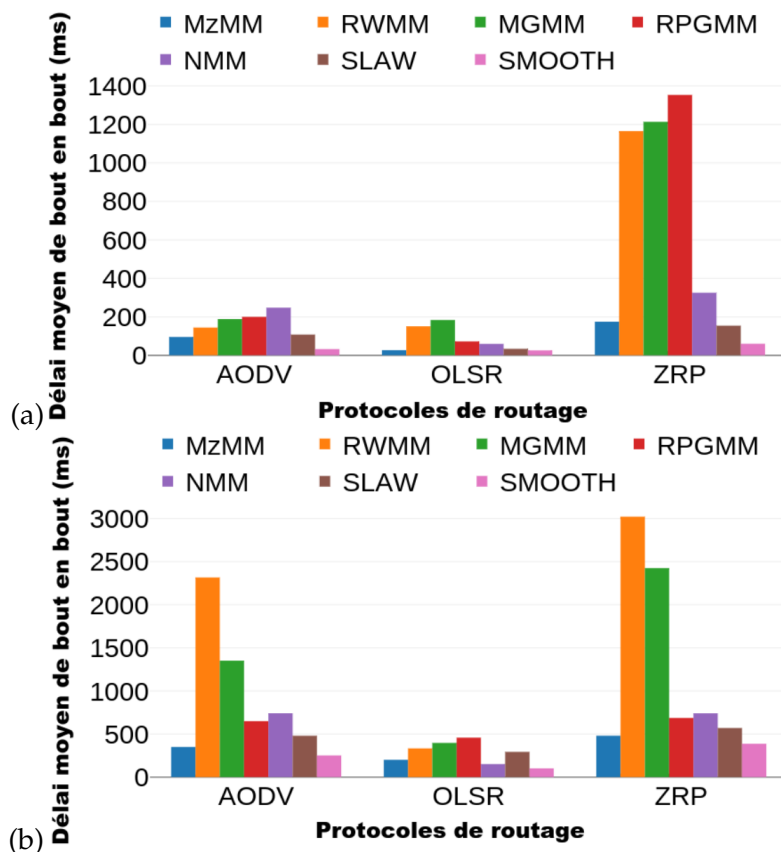


FIGURE 4.14 – Délai moyen de bout en bout en (ms) du MzMM par rapport à d’autres modèles de mobilité synthétiques. (a) Petite zone, (b) Grande surface.

à la figure 4.14(b) montrent que le modèle proposé surpasse les autres lorsqu’on examine les grands secteurs, ce qui produit des résultats remarquables comparativement à SMOOTH, RWMM, MGMM, RPGMM, et NMM. Par ailleurs, le délai moyen de bout-en-bout dans les deux domaines considérés obtient les meilleurs scores en adoptant le protocole proactif OLSR. Ce résultat est obtenu grâce au fait que ce protocole de routage identifie toujours un chemin disponible vers toutes les destinations, en cherchant à l’avance les routes et en mettant à jour en permanence les tables de routage requises. D’autre part, ZRP est le protocole avec les pires résultats en termes de cette métrique, en raison du temps nécessaire pour localiser une destination dans une zone bien délimitée de la région de simulation.

- Débit

Le débit du réseau mesure le nombre de messages transmis avec succès sur une liaison donnée ; habituellement mesuré en bps (bits par seconde). Plus cette valeur est élevée, plus les performances du réseau sont satisfaisantes. La figure 4.15(a) montre que dans le cas d’une petite zone, le débit du modèle MzMM est supérieur à celui des autres modèles vérifiés. De même, la figure 4.15(b) montre la robustesse du modèle MzMM qui est meilleure que celle de tous les autres modèles de mobilité de référence analysés, même en considérant une vaste zone de simulation.

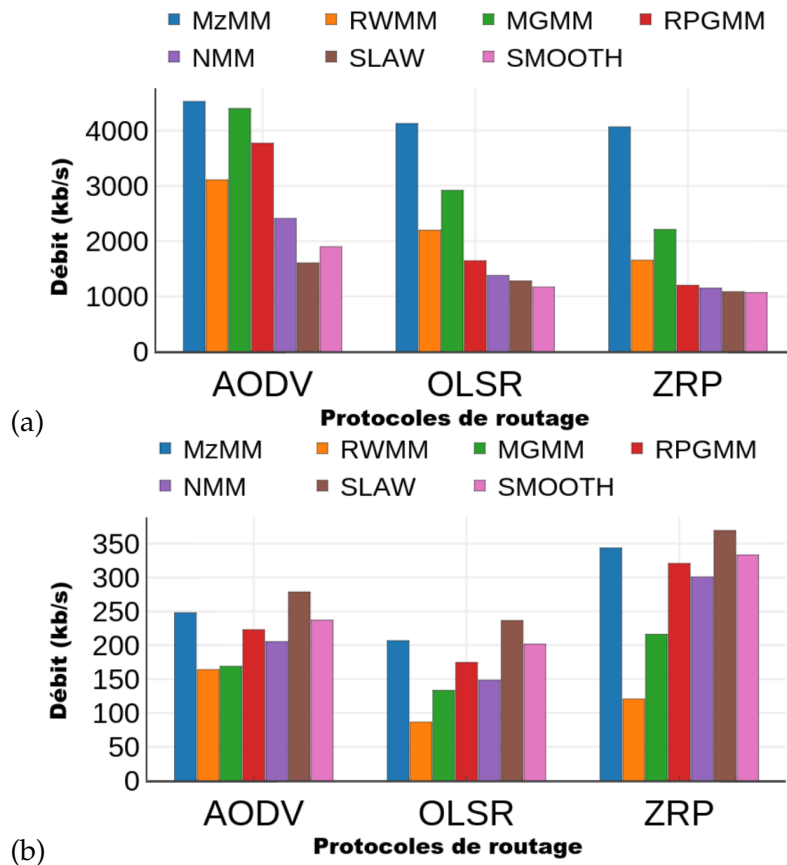


FIGURE 4.15 – Débit en (Kb/s) du MzMM par rapport à d'autres modèles de mobilité synthétiques. (a) Petite zone, (b) Grande surface.

4.6.3 Discussion des résultats

Après avoir simulé 630 fichiers de scénarios représentant 42 cas de figure différents, les combinaisons prises en compte du protocole de routage/modèle de mobilité ont été notées et classées en fonction de leurs résultats, qui sont résumés dans le tableau 4.5.

Les meilleurs résultats sont indiqués en vert (notes de 1 à 3), les résultats acceptables en jaune (note 4) et les pires résultats en rouge (notes de 5 à 7).

Après avoir analysé tous les résultats présentés ci-dessus concernant les simulations effectuées dans des conditions distinctes, nous en concluons que :

- MzMM surpasse les autres modèles de mobilité considérés dans cette étude en adoptant divers protocoles de routage mobiles Ad hoc, tels qu'AODV, OLSR et ZRP.
- MzMM montre la meilleure performance en termes de trois paramètres considérés : PDR, délai moyen de bout en bout et débit.
- MzMM est plus stable même si l'on tient compte de différentes zones de simulation : petit ou grand champ.
- MzMM est plus efficace que les autres modèles de mobilité dans tous les scénarios combinés, comme le révèle le tableau 4.5.

Mesures des performances	Modèles de mobilité	Protocoles de routage					
		Petite zone			Grande zone		
		AODV	OLSR	ZRP	AODV	OLSR	ZRP
PDR	MzMM	1	1	1	3	3	3
	RWMM	3	5	4	6	6	6
	MGMM	5	6	6	7	7	7
	RPGMM	6	4	5	1	1	1
	NMM	7	7	7	2	2	2
	SLAW	2	3	2	5	5	5
	SMOOTH	4	2	3	4	4	4
Délai de bout-en-bout	MzMM	3	2	3	2	3	2
	RWMM	4	6	5	7	5	7
	MGMM	5	7	6	6	6	6
	RPGMM	6	5	7	4	7	4
	NMM	7	4	4	5	2	5
	SLAW	2	3	2	3	4	3
	SMOOTH	1	1	1	1	1	1
Délai	MzMM	1	1	1	2	2	2
	RWMM	4	3	3	7	7	7
	MGMM	2	2	2	6	6	6
	RPGMM	3	4	4	4	4	4
	NMM	5	5	5	5	5	5
	SLAW	7	7	7	1	1	1
	SMOOTH	6	6	6	3	3	3

TABLE 4.5 – Résumé des résultats expérimentaux.

Les résultats remarquables du modèle de mobilité suggéré (MzMM) ont été obtenus grâce à sa conception, à son processus logique, à la prise en compte des mouvements réels et à toutes les caractéristiques du MzMM qui ont été détaillées dans la section 4 de ce chapitre. Ces remarques rendent le modèle proposé plus stable, adapté et efficace, même en présence de diverses contraintes de mobilité. Le tableau 4.6 résume et met en évidence les caractéristiques qualitatives des modèles de mobilité validés, où O signifie Oui, N signifie Non et A équivaut Ambigu.

Modèles de mobilité	Réaliste	Modulable	Représentation et analyse mathématiques	Utilisation de la carte géographique	Peut être simulé
MzMM	O	O	O	O	O
RWMM	N	O	O	N	O
MGMM	N	O	N	N	O
RPGMM	N	O	A	N	O
NMM	N	O	N	N	O
SLAW	O	N	A	O	O
SMOOTH	N	O	N	O	O

TABLE 4.6 – Caractéristiques qualitatives des modèles de mobilité ; O : Oui, N : Non, A : Ambiguë.

4.7 Conclusion

De toute évidence, l'élaboration de modèles de mobilité appropriés a une incidence directe sur les performances du réseau sans fil. Par conséquent, une bonne compréhension des caractéristiques de mobilité est importante pour concevoir et déployer des réseaux mobiles performants. De ce fait, les modèles de mobilité visent à caractériser les mouvements des nœuds à l'intérieur d'un réseau sans fil. Dans cet

essai, un nouveau modèle de mobilité hybride des *entités* synthétiques a été proposé, intitulé le Maze Mobility Model (MzMM). Le nouveau modèle de mobilité a été décrit et analysé en tenant compte des différentes tailles de la région évaluée et en tenant compte aussi des protocoles de routage distincts. Les performances de MzMM ont été comparées à celles d'autres modèles de mobilité bien répandus, tels que RWMM, MGMM, RPGMM, NMM, SLAW et SMOOTH, en mesurant les métriques réseaux : taux de délivrance des paquets, délai moyen de bout-en-bout et débit réseau. Basé sur les résultats issus des simulations mises en œuvre, nous déduisons que le MzMM proposé offre un modèle de mobilité plus flexible que les approches antérieures qui offre un mouvement adaptatif même dans des zones complexes. Cet avantage a été atteint grâce au fait que le modèle est défini en tenant compte de plusieurs comportements réels, tels que les dépendances temporelles où les décisions actuelles sont basées sur la chronologie des mouvements précédents, ainsi que les dépendances spatiales où la position actuelle dépend essentiellement du dernier emplacement connu. De plus, il prend en compte les contraintes géographiques définies à l'intérieur de la zone de simulation. La combinaison de ces caractéristiques réalistes permet au MzMM d'être plus précis et plus robuste, ce qui représente un modèle de mobilité hybride *par excellence*, comme en témoignent les résultats de haute performance décrites dans le présent document. Les résultats de la simulation prouvent la robustesse et l'efficacité de notre modèle proposé.

Chapitre 5

Contribution 3 : Collecte intelligente des traces de la mobilité des véhicules en temps réel

Ce travail a été validé dans un papier d'un journal, dont la référence : Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M, Benavente-Peces C. **Smart Collection of Real-Time Vehicular Mobility Traces**. *Future Internet*. 2018 Aug 9;10(8) : p 78.

5.1 Introduction

Les techniques de traçage de la mobilité nous permettent de dégager les comportements du mouvement réel qui conditionnent la mobilité sur les réseaux sans fil. Dans notre recherche, plusieurs modèles de mobilité du traçage ont été recueillis après le déploiement des équipements physiques. Le principal enjeu de cette méthode classique est qu'elle produit des dossiers incomplets en raison de certains incidents imprévisibles qui surviennent pendant la phase de déploiement. Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle procédure visant à collecter les traces tout en évitant les défaillances en phase de déploiement, ce qui accroît la fiabilité des données. Cette nouvelle démarche permet une génération complète de traces avec un minimum de dommages sans qu'il soit nécessaire de récupérer les appareils mobiles ou de les perdre, comme était le cas pour les modèles de traçage de mobilité antérieurs. Basé sur la détection et la correction de tous les problèmes survenant par erreur en temps réel, le balayage de traces proposé offre un ensemble d'information pertinente sur l'état du véhicule qui ont été recueillies pendant sept mois. En outre, la procédure proposée pourrait être appliquée pour générer des traces de véhicules. De même, il est approprié pour recueillir et générer des traces humaines et animales. Les résultats de notre procédure démontrent l'efficacité et la robustesse de cette méthode de collecte intelligente du modèle de mobilité des traces proposé.

Ce présent chapitre est organisé comme suit. La section 5.2 explique en détail la procédure de déploiement de notre plate-forme de localisation proposée. La section 5.3 indique et discute les différentes fonctionnalités issues des traces du Maroc. Enfin à la section 5.4, nous présentons une synthèse de conclusion.

5.2 Détails d'implémentation technique

5.2.1 Processus de réalisation de la plate-forme

Notre plateforme s'articule autour de plusieurs étapes de réalisation technique. Chaque étape intervient pour atteindre l'objectif principal, qui est la collecte des traces de mobilité en temps réel en contrôlant tous les problèmes de déploiement. Cette section décrit certains des innombrables fondements techniques sur lesquels repose l'architecture interne. En outre, les traqueurs sont installés et intégrés dans les véhicules, comme le montre la figure 5.1.



FIGURE 5.1 – Raccordement d'un traceur GPS dans un véhicule.

Dans la mise en œuvre, nous considérons une architecture client-serveur qui repose sur des techniques de développement à jour, comme le montre les figures 5.2 et 5.3. Cette combinaison fournit une implémentation avec des fonctionnalités étendues grâce aux facteurs ci-dessous :

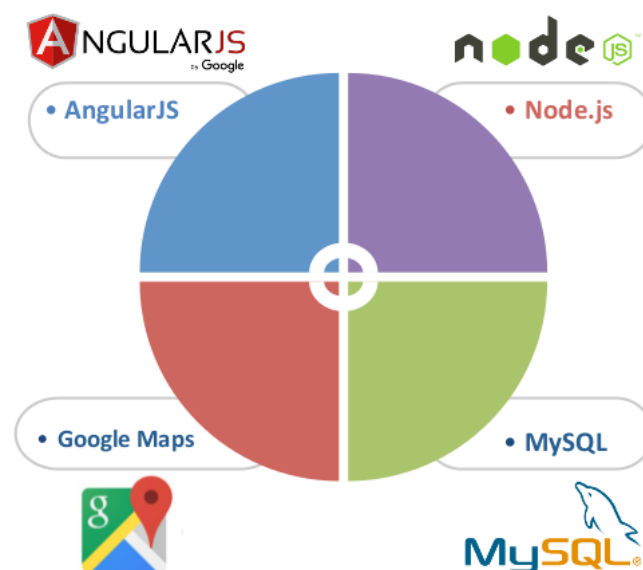


FIGURE 5.2 – Techniques de base de la plateforme du tracés

- **AngularJS** est basé sur le principe du "data binding" pour éviter les boucles du "dirty-checking" afin de faciliter la visualisation des interfaces [109].

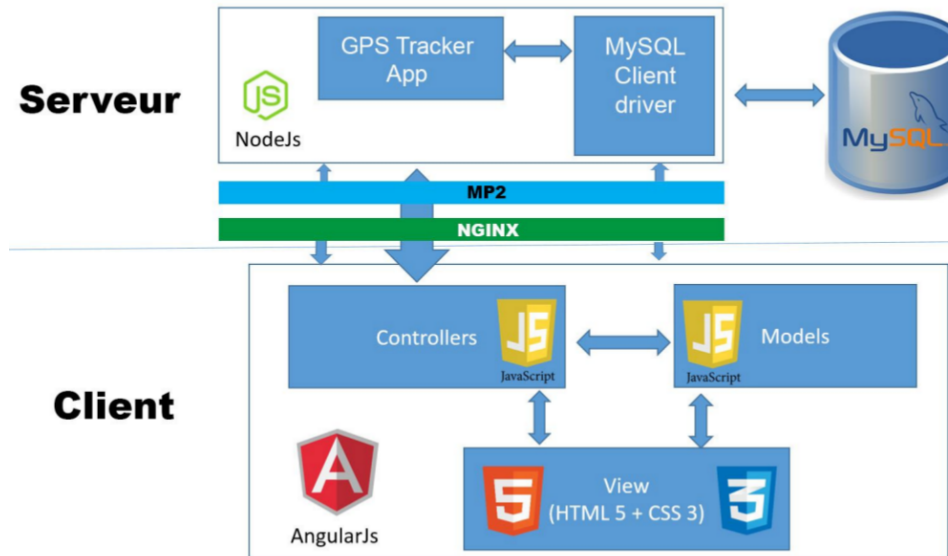


FIGURE 5.3 – Architecture client/serveur de la plateforme de traçabilité.

- **Node.js** permet des mises à jour en temps réel de la plateforme du serveur sans actualisation manuelle [110].
- **Nginx** met à jour les clients du système. En particulier, il accélère le traitement du node.js. En plus, il résout le problème du traitement simultané de dix mille connexions (C10K), ce qui optimise les sockets réseaux pour supporter un grand nombre de clients. Ceci rend les changements d'état flexibles pour gérer plusieurs connexions simultanées. De ce fait, il attribue un proxy inversé qui assure l'optimisation de l'adresse IP du serveur [111].
- **MVC (Model-View-Controller)** fournit un cadre modulaire qui sépare la vue, le traitement du contrôleur et les connexions entre la base de données et le client [112].
- **PM2 (Process Manager 2)** permet d'exécuter le serveur en continu même si la plate-forme du serveur est en mode hors ligne du nœud.js [113] tout en surveillant l'état du serveur, Comme illustré par la figure 5.4.

```

[root@vps40349 ~]# pm2 list
● Agent Online | Dashboard Access: https://app.keymetrics.io/#/r/h1it67f809s2yuc | Server name: LWS
┌──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┐
│ App name │ id │ mode │ pid │ status │ restart │ uptime │ cpu │ mem │ watching │
├──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┤
│ app.geofleet.ma │ 2 │ fork │ 21994 │ online │ 14 │ 2h │ 0% │ 72.9 MB │ disabled │
│ preprod.geofleet.ma │ 3 │ fork │ 919 │ online │ 0 │ 17D │ 0% │ 29.2 MB │ disabled │
├──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┤
│ Module activated │ │ │ │ │ │ │ │ │ │
├──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┤
│ Module │ version │ target PID │ status │ restart │ cpu │ memory │ │ │ │
├──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┤
│ pm2-logrotate │ 2.2.0 │ N/A │ online │ 0 │ 0% │ 68.688 MB │ │ │ │
│ pm2-server-monit │ 2.5.1 │ N/A │ online │ 0 │ 0% │ 14.859 MB │ │ │ │
└──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┬──────┘

```

FIGURE 5.4 – États du serveur de la plateforme.

Conformément à la figure 5.4, nous avons élaboré deux versions différentes de la plate-forme. Cette mesure permet de tester la version la plus stable de l'ensemble pour l'adopter. Cette fonction nécessite une Subversion Apache (SVN), qui permet

de maintenir les versions actuelles et l'historique des fichiers logiciels de tous les différents développeurs concurrents de la plate-forme sans perdre aucun code source, page web ou documentation. Cette technique est principalement liée à Fredistrano, qui exporte automatiquement les sources de fichiers depuis un référentiel subversion et les synchronise avec le contenu d'un répertoire cible. Le processus détaillé de mise en œuvre de l'ensemble du cadre est présenté dans les figures 5.5 et 5.6.

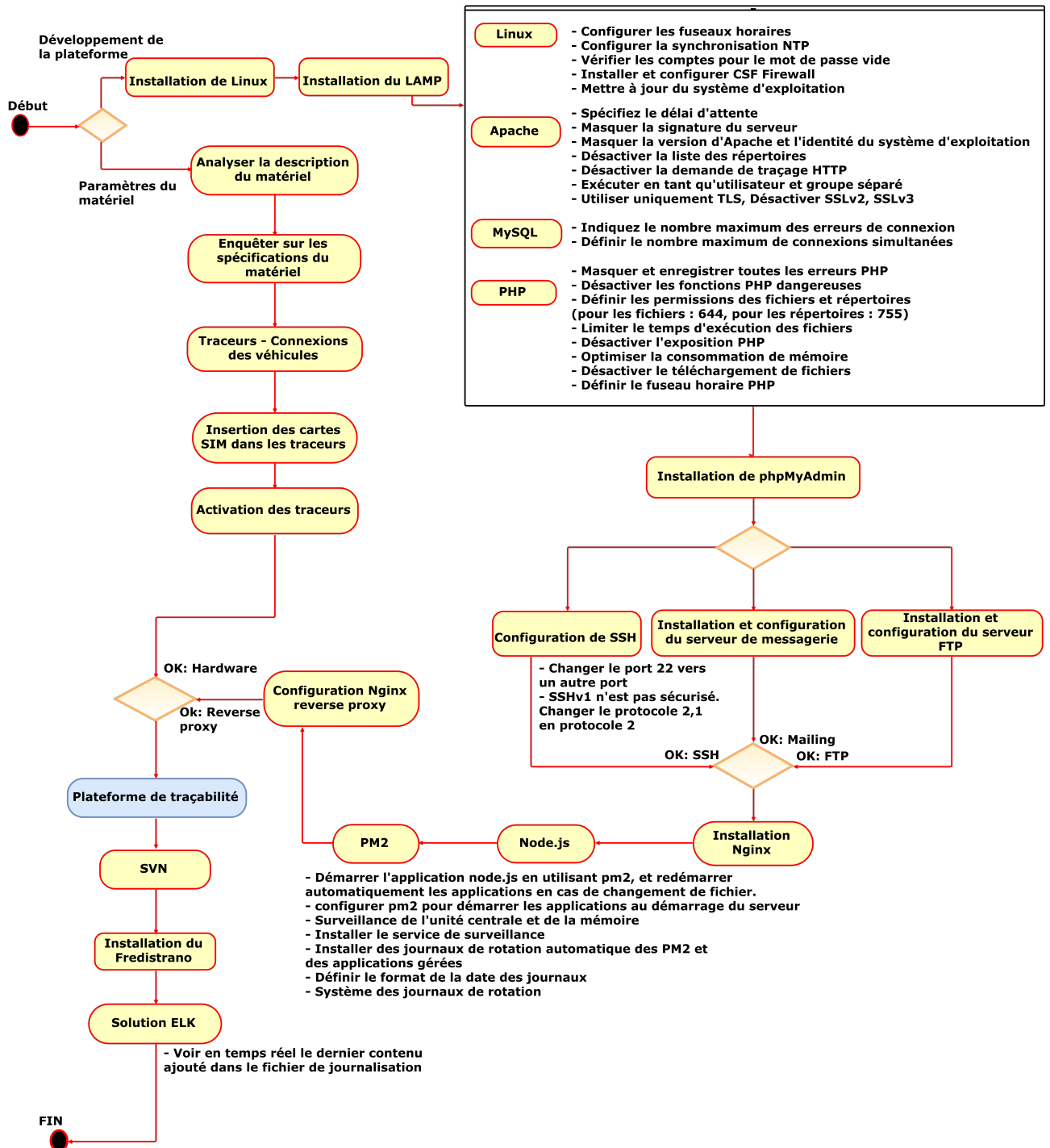


FIGURE 5.5 – Diagramme de flux décrivant les procédés et les modalités requises pour la mise en place de la plateforme avant le déploiement.

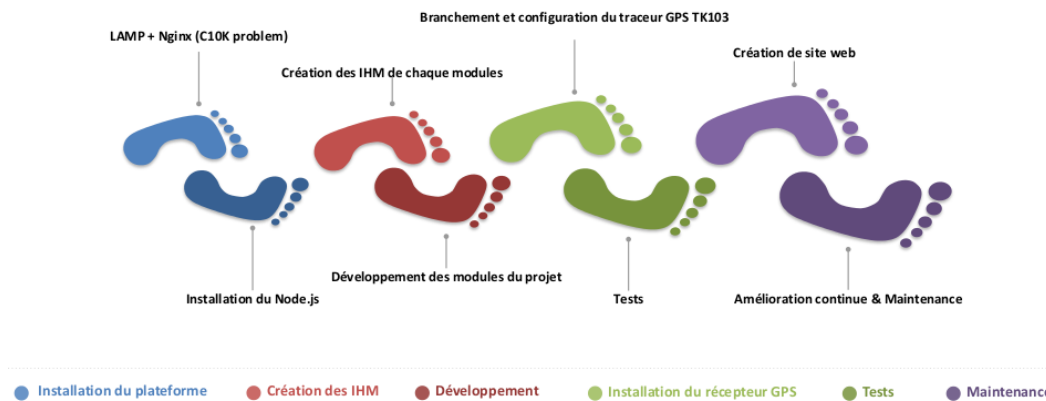


FIGURE 5.6 – Processus détaillé de la réalisation

5.2.2 Infrastructure adoptée

Sur la base du schéma développé, le système génère une information qui est utilisée soit pour :

- Transmettre les positions enregistrées aux intervalles réguliers à la plate-forme de géolocalisation,
- Ou, avertir l’administrateur d’un dysfonctionnement du système.

Le système nécessite un accès réseau pour transmettre les mises à jour produites par les traceurs au serveur de traitement via l’un des réseaux de communication disponibles (GSM et GPRS). Ces traqueurs sont configurés en mode hybride afin de détecter le réseau disponible pour envoyer immédiatement, avec plus de précision et de fiabilité, les données collectées au centre de traitement qui héberge l’infrastructure principale. Ces données sont analysées pour fournir une description des comportements réels des véhicules. Toutefois, si aucune couverture réseau n’est présente dans la zone de déploiement, le traceur stocke les données recueillies jusqu’à ce qu’un réseau soit à nouveau disponible, pour les transmettre au serveur. Cette méthode d’exploitation choisie constitue une solution appropriée dans la mesure où elle offre l’avantage majeur d’une collecte continue des données pendant la durée de l’expérience sans pertes. L’ensemble de données obtenu contient une trace complète du parcours du véhicule du début jusqu’à la fin du déploiement. Les expériences ont été réalisées sur une période continue de sept mois (environ 214 jours). L’approche adoptée permet d’éviter les problèmes d’exploitation, tels que la consommation d’énergie, la perte de dispositifs et les éventuels dépannages de matériel. La solution choisie prend en compte trois méthodes des alertes pour libérer des conditions réglementées ou les mises à jour déclenchées :

- La méthode principale permet des mises à jour continues de la plateforme via GPRS pour afficher les modifications dans le tableau de bord de l’administrateur.
- S’il détecte que le tableau de bord est inactif, un courriel d’avertissement sera transmis à l’administrateur.
- Autrement, pour effectuer une surveillance permanente du véhicule, ces avertissements seront expédiés sous forme de message texte lorsqu’ils sont spécifiés comme des notifications critiques (facultatif).

Le processus de collecte des données est représenté dans la figure 5.7. Il en ressort que chaque véhicule est équipé d’un traceur GPS, permettant de le localiser, et



FIGURE 5.7 – Aperçu général des interactions entre les éléments du système pour la collecte de traces en temps réel.

d'un modem GPRS pour transmettre les mises à jour actuelles. Le système calcule des mises à jour précises qui sont transmises au serveur de traitement via un réseau disponible afin de fournir les données de localisation et tous les incidents de déploiement. Ceci permet une collecte intelligente dans le but de détecter, corriger et prévenir la perte d'aucune partie du modèle de mobilité collecté. Un ensemble de graphiques est affiché en temps réel sur la console de l'administrateur. Toutes les trajectoires des véhicules sont enregistrées dans une base de données globales, permettant notamment d'obtenir un modèle complet de traçabilité du mouvement, intitulé "Morocco traces". Le système proposé surveille les trajectoires des véhicules et permet en outre de gérer à distance et simultanément les activités des parcs de véhicules hétérogènes dans plusieurs régions, comme les excursions, le transport maritime, de même que la localisation des camions. L'analyse de l'ensemble des trajets collectés et des données actuelles permet d'optimiser les parcours, par exemple dans un réseau ad hoc véhiculaire (VANET) [114]. De nos jours, ces types d'applications ont attiré beaucoup d'attention dans le cas des villes intelligentes, en particulier dans le déploiement de véhicules intelligents, où elles peuvent être interconnectées dans un contexte d'IoT [115].

5.3 Objectifs réalisés

Cette partie vise à présenter les caractéristiques majeures, telles qu'illustrées à la figure 5.8. La réalisation de la plate-forme permet d'obtenir des résultats complets et cohérents. Sur la base de ces fonctions, nous pouvons surveiller et administrer tous les véhicules déployés. Cela conduit à une collection intelligente de l'information finale enregistrée en se basant sur des rôles qui assurent une détection en temps réel des incidents par la détection et la correction de tous les problèmes de déploiement afin de les prévenir davantage. Cette solution suggérée permet de collecter une trace intégrale sans aucune perte grâce à la robustesse de la procédure développée et le stockage flexible des données.

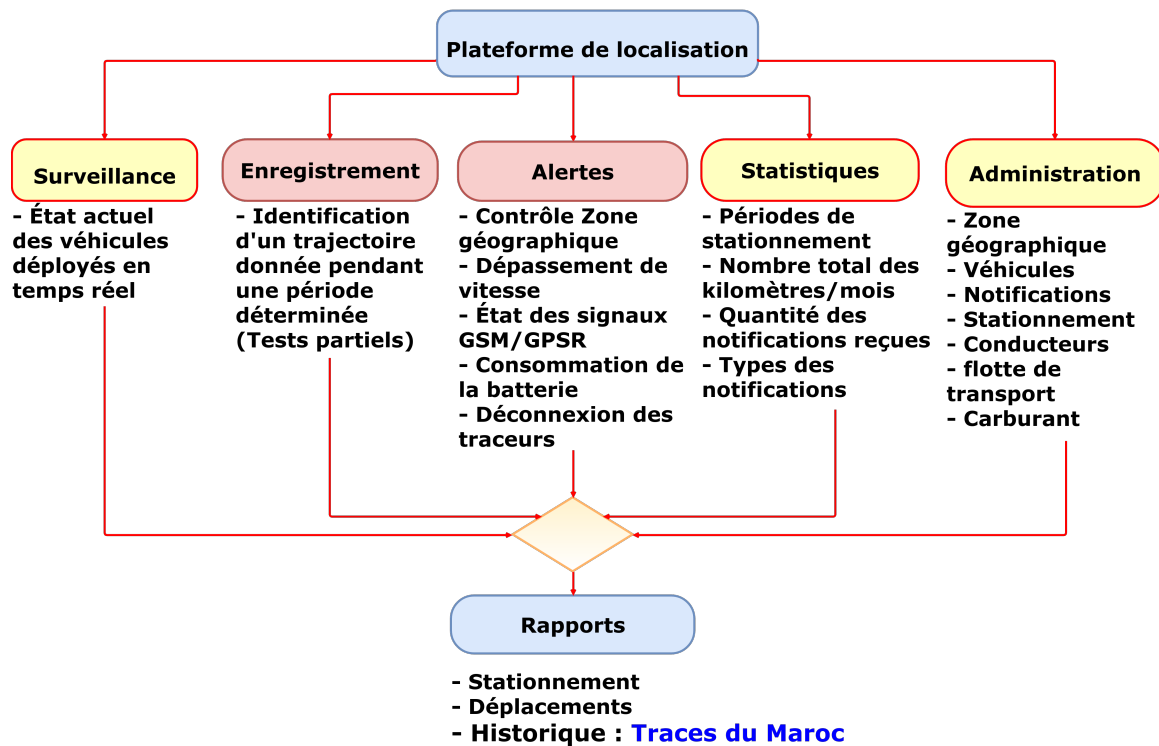


FIGURE 5.8 – Fonctionnalités de la plateforme.

5.3.1 Surveillance

Une fois que l'administrateur procède l'authentification avec succès, l'interface du panneau d'accueil affiche l'onglet "Surveillance". Celle-ci représente la première fonctionnalité du framework et inspecte les mouvements des traqueurs GPS en détectant le nombre de véhicules surveillés dans chaque zone, l'état des véhicules et les détails correspondants, comme il est illustré à la figure 5.9.

Par ailleurs, nous détectons les problèmes de déploiement en temps réel et nous corrigeons les dysfonctionnements du framework afin d'éviter la perte de n'importe quelle partie de l'ensemble des données. Pour tous ces véhicules, nous avons installé des traqueurs GPS en activant le service de localisation. Ensuite, nous devons remplir le formulaire correspondant pour ajouter les informations du véhicule à la plate-forme. Ces entrées conduisent à un stockage automatique dans la base de données de notre serveur, comme le montre la figure 5.5. Chaque véhicule possède des informations spécifiques telles que la marque, le modèle, l'année de la mise en service, le numéro d'immatriculation, les heures de stationnement, la catégorie de boîte de vitesse, les kilomètres enregistrés et le type de carburant. Sur la base de ces caractéristiques, le système génère un avertissement approprié lorsqu'un événement déclencheur est détecté.

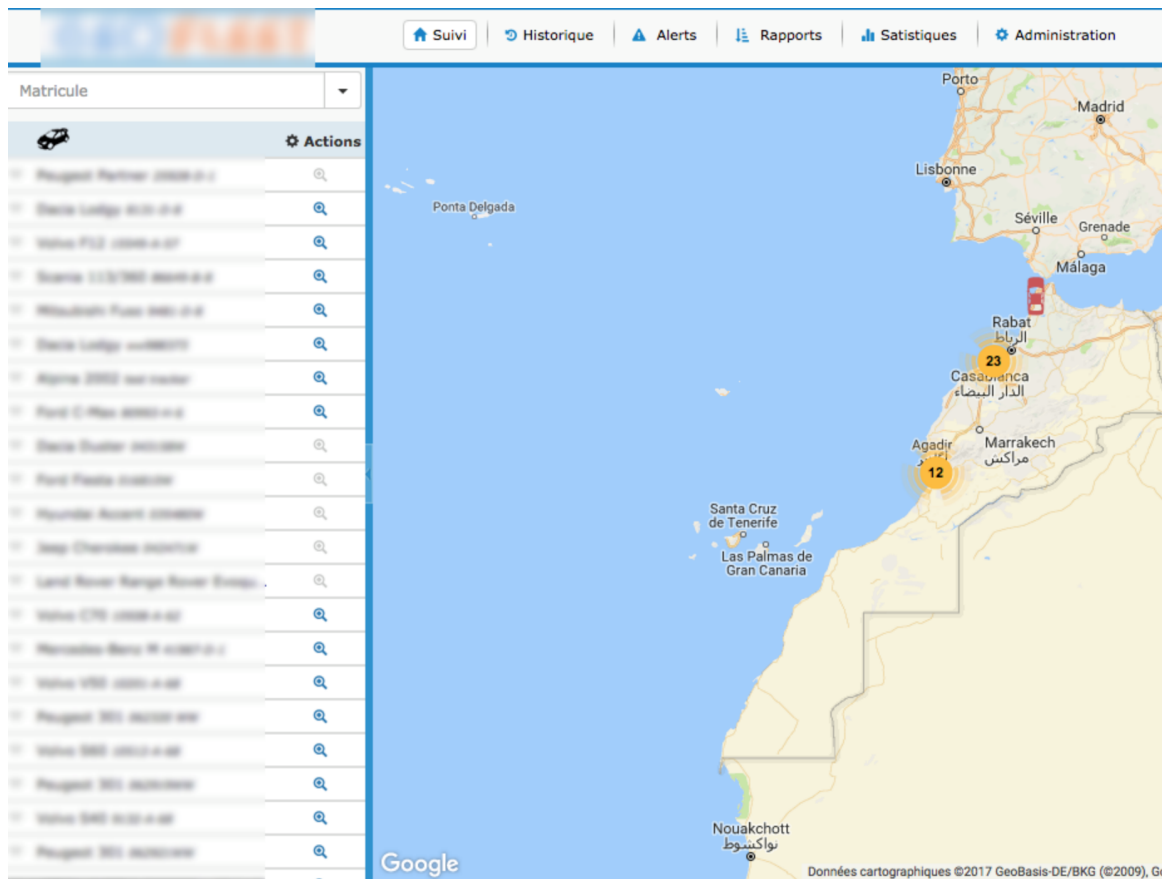


FIGURE 5.9 – Onglet de la surveillance en temps réel.

5.3.2 Enregistrement

La deuxième fonctionnalité disponible est "l'enregistrement". Cette fonction est nécessaire pour s'assurer l'efficacité du serveur, en particulier lors d'une surveillance instantanée. Nous pouvons simplement remplir un créneau horaire d'un véhicule particulier afin de surveiller la trajectoire correcte, comme le révèle la figure 5.10. Par ailleurs, la trajectoire enregistrée dans le système rapporte le mouvement réel des véhicules. Nous ne pouvons considérer que des intervalles concrets spécifiques ou toutes les périodes enregistrées pour obtenir les rapports désignés sans arrêter le banc d'essai déployé ou attendre l'atteinte du déploiement. De plus, les enregistrements globaux ou partiels peuvent être générés, ce qui constitue l'une des fonctionnalités exigées.

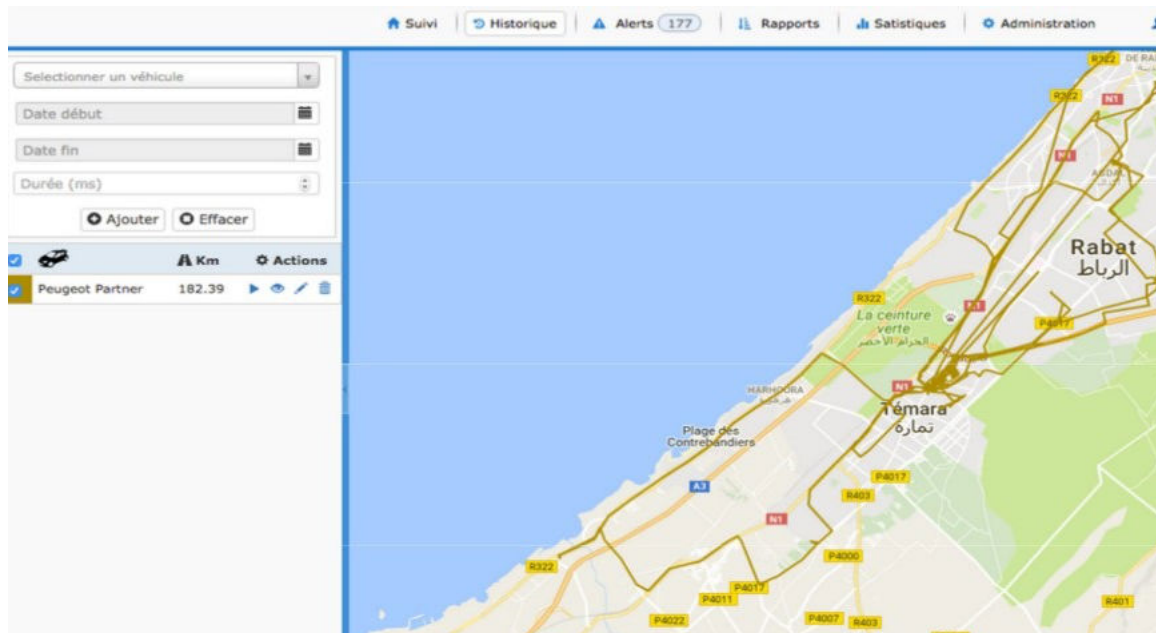


FIGURE 5.10 – Trajectoire consignée d'un véhicule.

5.3.3 Administration

L'onglet "Administration" est essentiel pour la gestion en temps réel de la plateforme. Cette fenêtre permet à l'administrateur de contrôler tous les intervenants influençables, de sorte que nous pouvons facilement maîtriser l'efficacité et la pertinence de toute la plateforme. Diverses tâches administratives sont disponibles pour gérer les opérateurs suivants :

- les conducteurs,
- les véhicules,
- les stationnements,
- les comptes clients,
- les zones de géolocalisation,
- les notifications, et
- et, l'état du carburant.

Prenons le cas des zones de géolocalisation illustrées à la figure 5.11. Nous avons limité un véhicule spécifique à une certaine zone afin d'éviter toute infraction. Lorsqu'il quitte la zone assignée, l'administrateur est immédiatement alerté afin de prendre les mesures nécessaires. Cette fonctionnalité est utile pour surveiller et suivre les flottes de transport dans le contexte des villes intelligentes en contrôlant leurs itinéraires afin d'éviter qu'un véhicule quitte la zone surveillée. Les sous-onglets d'administration harmonisent l'ensemble des tâches de localisation dans le but de détecter tous les problèmes de déploiement en temps réel. En même temps, cette collection intelligente évite les pertes de traces par une correction continue des erreurs.

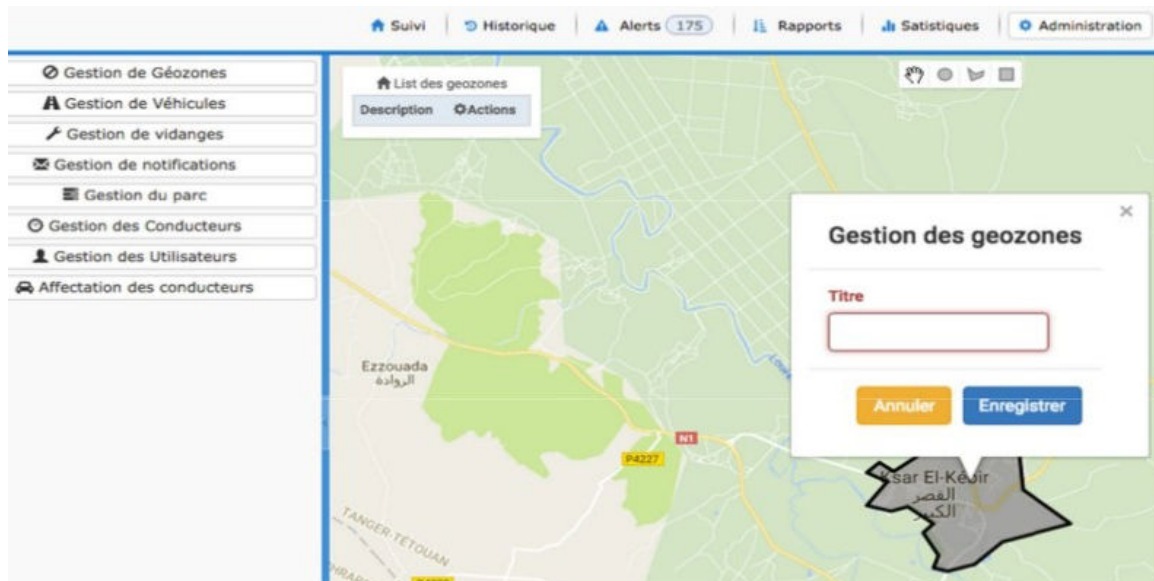


FIGURE 5.11 – Restriction de la zone géographique.

5.3.4 Alertes

L'administrateur du framework reçoit des notifications d'avertissement lorsqu'un événement prédéfini est déclenché. Ces alertes peuvent signaler par exemple que le véhicule entre ou sort d'une zone géographique, les changements de vitesse, l'utilisation du carburant, la consommation de batterie, le faible niveau de carburant, la réception du signal GPRS. Tous ces avertissements éventuels sont affichés par défaut sur le tableau de bord en temps réel. Si la plate-forme reste inactive pendant une période donnée, ces alertes seront transmises à l'administrateur par email ou par SMS si l'alerte qui s'est produite est spécifiée comme critique. En outre, les PM2 [116] permettent une surveillance souple des alertes, comme le montre la figure 5.12.

```

status      online
name        pm2-server-monit
restarts    0
uptime      2D
script path /root/.pm2/node_modules/pm2-server-monit/app.js
script args N/A
error log path /root/.pm2/logs/pm2-server-monit-error-0.log
out log path /root/.pm2/logs/pm2-server-monit-out-0.log
pid path    /root/.pm2/pids/pm2-server-monit-0.pid
interpreter node
interpreter args N/A
script id   0
exec cwd    /root/.pm2/node_modules/pm2-server-monit
exec mode   fork_mode
node.js version
watch & reload x
unstable restarts 0
created at  2017-10-09T09:35:10.551Z
    
```

FIGURE 5.12 – Contrôle des alertes PM2.

La figure 5.13 présente un exemple illustratif dans lequel on constate une "vitesse excessive du véhicule". Quand il dépasse une valeur limite de la vitesse, l'administrateur sera informé en configurant un avertissement qui indique la vitesse enregistrée et le temps complet de l'incident. Cette mesure est exécutée en temps réel afin d'avertir à temps le conducteur du véhicule de la pénalité de cette infraction. Cette alerte recueille des informations pratiques y compris le véhicule, le conducteur et les détails de l'événement, tels que les coordonnées du conducteur, l'heure et le temps exact de l'événement, la latitude, la longitude et la vitesse observée.

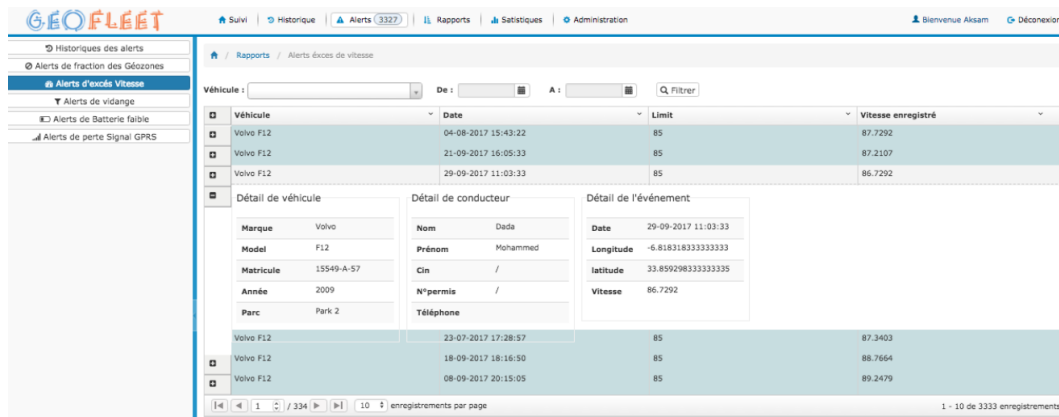


FIGURE 5.13 – Aperçu de la console du serveur illustrant les détails du rapport d'alerte des excès de vitesse.

Toutes les notifications notifiées sont classées par type, comme le montre la figure 5.14. La plus fréquente est la "sortie de zone". Il convient de noter que, pendant toute la durée de déploiement et de test est étalée sur sept mois consécutifs.

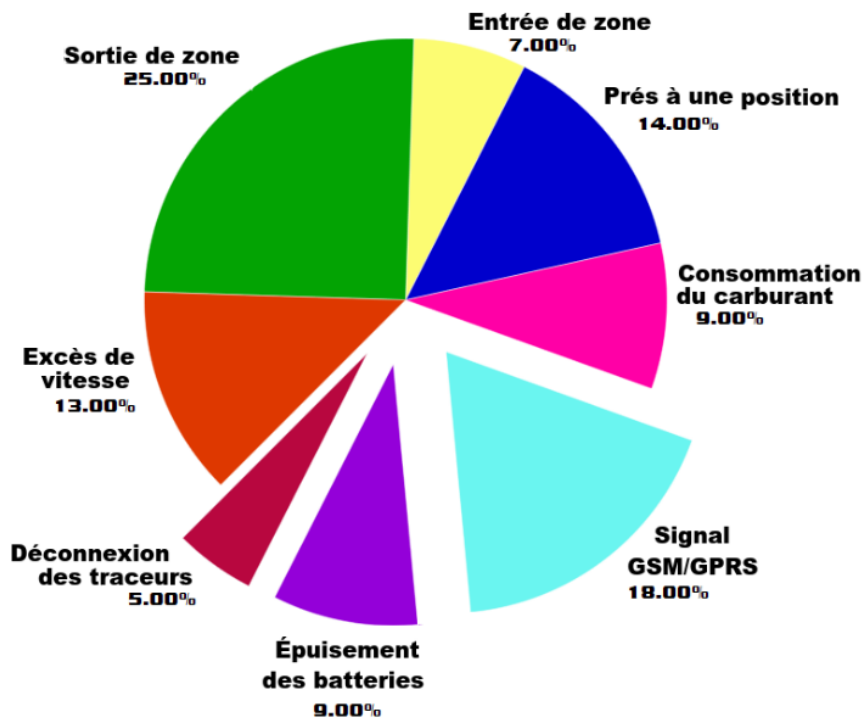


FIGURE 5.14 – Diagramme représentant les pourcentages relatifs à aux types des notifications.

- l'absence du signal GSM/GPRS représente 18% de toutes les notifications,
- les rapports sur l'épuisement des batteries correspondent à 9%,
- et, les problèmes de déconnexion des traceurs identifient 5% des rapports.

Ces notifications sont générées périodiquement par défaut ou immédiatement suite à un incident. Ces alertes sont instantanément corrigées pour générer un rapport complet grâce au suivi continu, à l'enregistrement et à l'administration du framework. Ceux-ci sont dessinés dans l'onglet "statistiques" en se basant sur les critères de filtrage.

5.3.5 Statistiques

Une fois les différents rapports recueillis dans l'onglet "Statistiques", nous dessinons des graphiques significatifs pendant et après la collecte des traces. En analysant ces graphiques, nous pouvons modéliser les comportements du mouvement des véhicules d'essai pendant toute la durée de l'expérience ou seulement pour des périodes spécifiques sans l'arrêt ou l'attente de l'écoulement du temps de déploiement, contrairement aux traces précédentes. Ces résultats résument tous les événements déclenchés qui sont prédéfinis sous la forme des alertes système. Notre période d'essai a débuté en début mai 2016 et s'est achevée fin novembre 2016. Cette plate-forme a fonctionné pendant environ sept mois (près de 214 jours continus), au cours desquels le suivi, la collecte, l'entretien et l'amélioration permanente de l'ensemble du cadre ont été assurés.

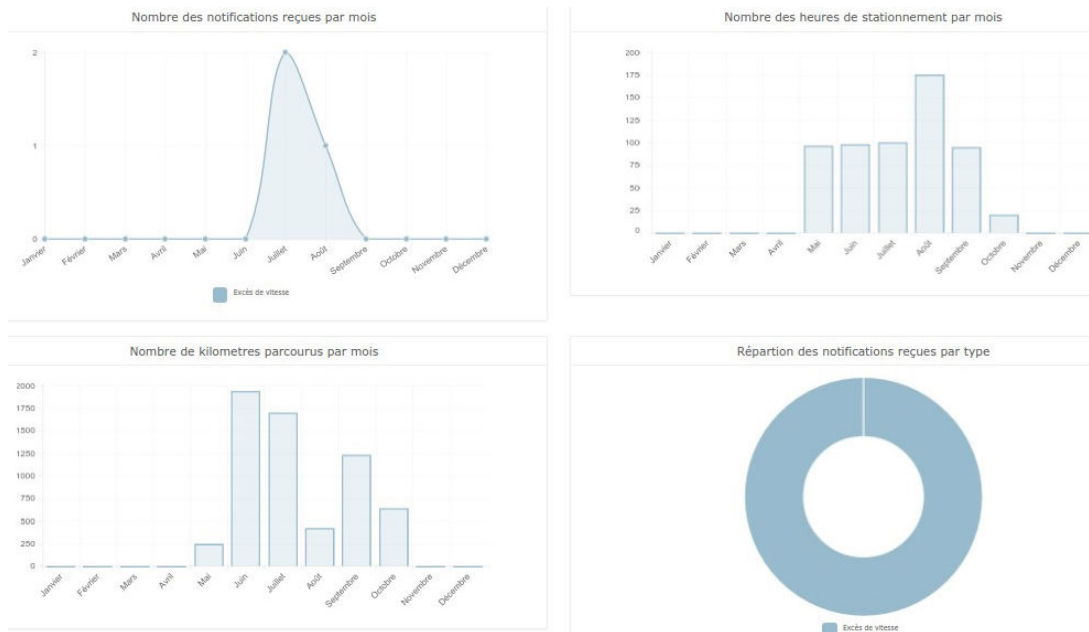


FIGURE 5.15 – Console des statistiques du serveur.

La figure 5.15 donne quelques exemples de statistiques produites dont voici quelques exemples :

- La sous-figure en haut à gauche indique le nombre de notifications d'excès de vitesse reçues par mois par un véhicule donné.
- La sous-figure en bas à gauche présente la distance exacte parcourue par un véhicule défini pendant l'expérience.

- La sous-figure supérieure droite montre le nombre total des heures de stationnement par mois, ce qui indique que le véhicule a accumulé environ 175 heures de stationnement à Août.
- La sous-figure en bas à droite montre la répartition des notifications par type qui est marquée comme des alertes de vitesse pour le véhicule suivi.

Grâce à cette fonctionnalité, nous pouvons facilement analyser les détails de toutes les activités de déplacement selon les besoins pour un véhicule spécifique ou pour l'ensemble d'entre eux. Après avoir recueilli l'ensemble des données, nous pouvons calculer toutes les mesures en plus d'autres informations de surveillance à partir de l'ensemble de la base de données globale recueillie. La figure 5.16 illustre le nombre total des heures de stationnement de tous les véhicules déployés pendant l'expérience. L'enregistrement d'une valeur maximale signifie qu'une faible mobilité est détectée pendant toute la période d'essai. Nous constatons que les valeurs enregistrées sont élevées au cours des deux premiers mois pour tous les véhicules de la flotte. Par la suite, elles ont diminué de façon spectaculaire en Août, pour s'établir à 14,040h, et a légèrement augmenté jusqu'à 20,789h en Novembre. Ce résultat est inversement proportionnel au degré de mobilité du véhicule, il est donc important d'indiquer le nombre d'heures de conduite consignées sur les rapports de mobilité.

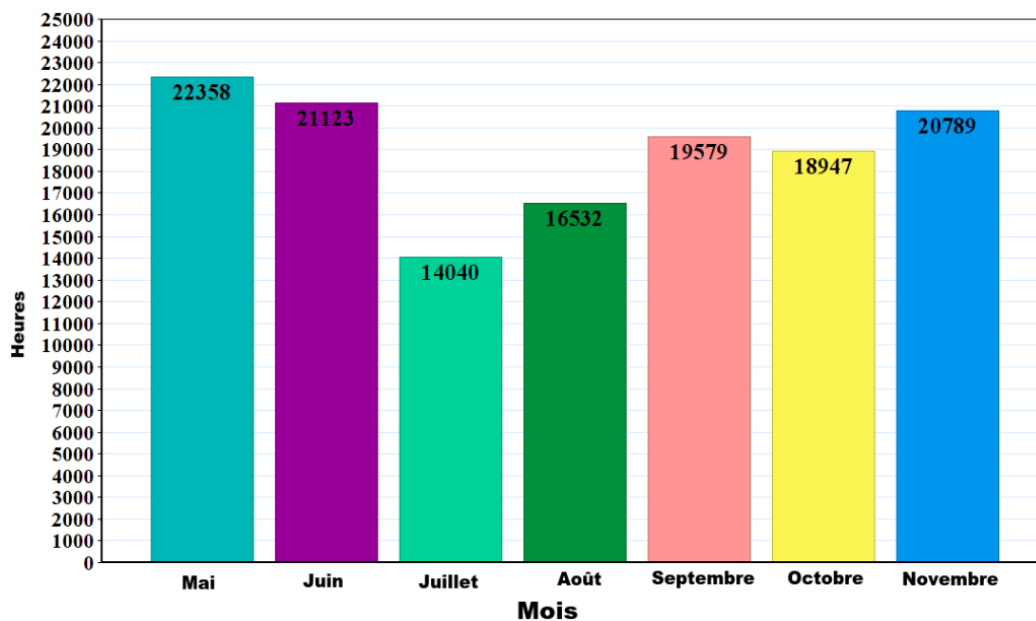


FIGURE 5.16 – Répartition du nombre total d'heures de stationnement enregistrées par mois.

Les résultats des statistiques démontrent la robustesse et l'efficacité de notre framework de localisation des véhicules en temps réel afin de générer une trace complète sans perte d'aucune partie de l'ensemble de données. Une surveillance permanente des performances est nécessaire pour contrôler le fonctionnement du matériel et des services. Ces tâches sont obligatoires pour assurer le bon déroulement des processus du framework. En adoptant le PM2, nous pouvons en outre contrôler les états du système en cours d'exécution en temps réel, comme le montre la figure 5.17.



FIGURE 5.17 – Statistiques en temps réel du PM2 : (a) surveillance en temps réel; (b) détails sur le serveur de la plate-forme.

Grâce aux informations détaillées recueillies, une mesure de précision est calculée pour déterminer la valeur moyenne du délai de bout-en-bout entre les traceurs GPS et la plate-forme d'administration. Cette durée souligne l'importance du temps total occupé de la deuxième à la cinquième étape de la figure 5.7. Grâce à la synchronisation continue, et l'analyse des performances de la plate-forme au cours de la période d'expérimentation, nous a permis de réduire les délais de 84 secondes en mai à 17 secondes en Novembre, comme le montre la figure 5.18. Cette particularité concorde avec l'objectif du modèle en temps réel, qui s'appuie également sur le succès de l'initiative de la correction de tous les anomalies et problèmes détectés lors de la réalisation de l'expérience avec la plateforme modélisée.

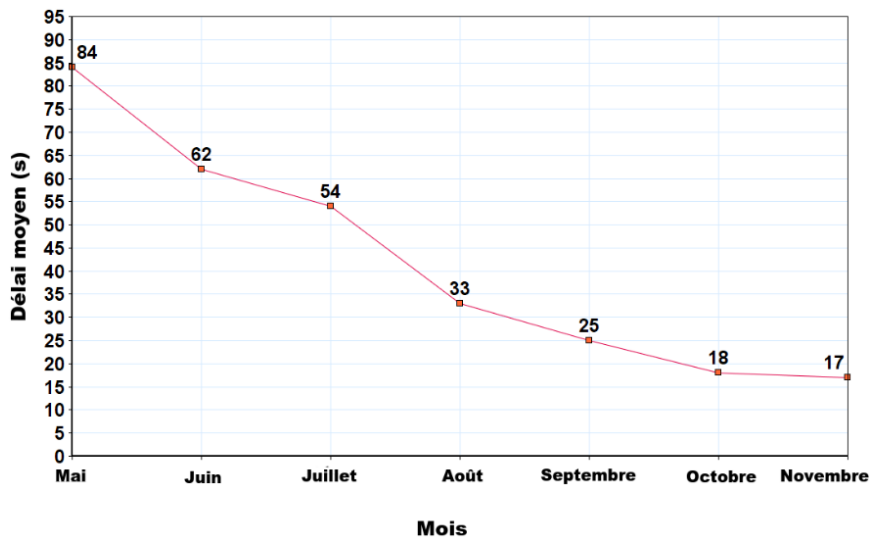


FIGURE 5.18 – Progression du délai moyen de bout en bout pendant le temps du déploiement.

Toutes les fonctionnalités du framework décrites précédemment sont intégrées dans une autre application développée pour une utilisation mobile, comme le montre la figure 5.19. Il s’agit de la version mobile (version limitée) du cadre, qui est également interconnectée au serveur de traitement principal.

Cette application est installée en tant que compte administrateur ainsi que pour les clients de sorte que l’administrateur bénéficie d’un suivi permanent de tous les événements déclenchés. Toutes ces fonctions permettent une supervision des mouvements du véhicule en temps réel. Lorsqu’un problème survient, nous le corrigeons dans le but de maintenir des rapports cohérents et complets sans aucun problème matériel, ou de réinitialisation du système ou de consommation des batteries.

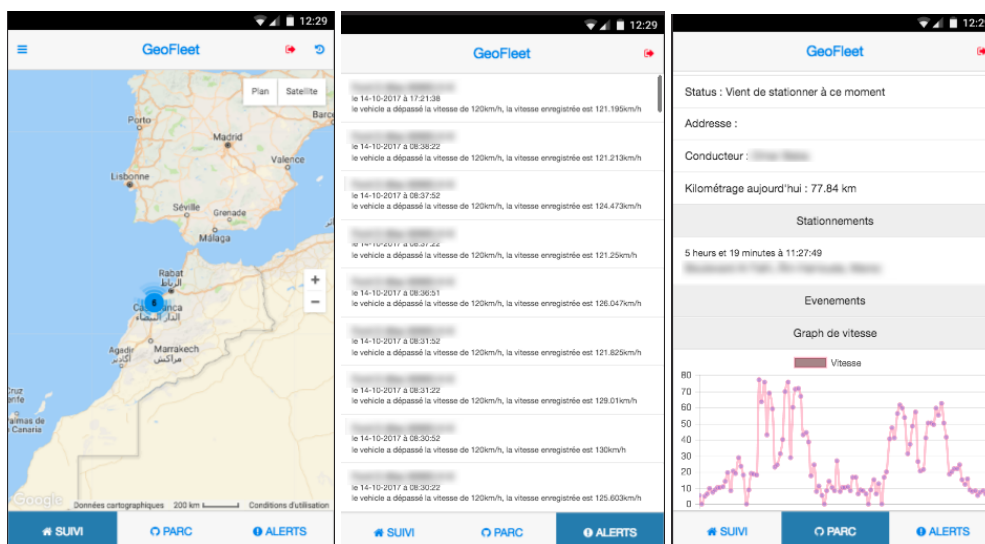


FIGURE 5.19 – Application mobile de la plate-forme. Exemple d’informations simultanées fournies par le système : traçabilité et statistiques des utilisateurs de la carte.

5.4 Traces du Maroc

Les expériences précédentes impliquant les modèles de traçabilité du mouvement, elles distribuent simplement un nombre des appareils dans un campus universitaire, une conférence ou un stade sans aucun contrôle du système. Néanmoins, ces expériences ont été appliquées dans la mesure où elles ont permis d'obtenir une restitution remarquable des résultats du sondage des performances et les améliorations possibles. Par exemple, les chercheurs ont observé le coût d'exécution élevé et le fait qu'il n'y avait aucune possibilité de restaurer les appareils après avoir subi un problème de dysfonctionnement. Par ailleurs, il n'a pas été possible d'identifier les problèmes de déploiement prévus, qui ne peuvent pas être détectés lors de la mise en œuvre de l'expérience.

Pour la solution suggérée dans le cas de cet essai, les problèmes tels que les réinitialisations matérielles, la consommation électrique et les pannes de périphériques sont supervisées et contrôlées par l'administrateur en temps réel. C'est-à-dire qu'un ensemble des informations globales est généré en permanence pour garantir l'efficacité du serveur de traçage, comme le montre évidemment la figure 5.20.

```
Global Logs
app.geofleet.ma > longitude: -7.525833333333333,
app.geofleet.ma > speed: '0.00',
app.geofleet.ma > course: '0',
app.geofleet.ma > millage: '000',
app.geofleet.ma > battery: 'F',
app.geofleet.ma > course_type: 'tracker',
app.geofleet.ma > timestamp: 2017-09-30T15:46:57.384Z } }
app.geofleet.ma > message to return
app.geofleet.ma > { trackerId: '864180032340940',
app.geofleet.ma > type: 'locationUpdate',
app.geofleet.ma > location:
app.geofleet.ma > { available: true,
app.geofleet.ma > latitude: 33.44228833333333,
app.geofleet.ma > longitude: -7.525833333333333,
app.geofleet.ma > speed: '0.00',
app.geofleet.ma > course: '0',
app.geofleet.ma > millage: '000',
app.geofleet.ma > battery: 'F',
app.geofleet.ma > course_type: 'tracker',
app.geofleet.ma > timestamp: 2017-09-30T15:46:57.384Z } }
app.geofleet.ma > currentParseFunctionIndex 1
app.geofleet.ma > publish message from
app.geofleet.ma > { trackerId: '864180032340940',
app.geofleet.ma > type: 'locationUpdate',
app.geofleet.ma > location:
app.geofleet.ma > { available: true,
app.geofleet.ma > latitude: 33.44228833333333,
app.geofleet.ma > longitude: -7.525833333333333,
app.geofleet.ma > speed: '0.00',
app.geofleet.ma > course: '0',
app.geofleet.ma > millage: '000',
app.geofleet.ma > battery: 'F',
app.geofleet.ma > course_type: 'tracker',
app.geofleet.ma > timestamp: 2017-09-30T15:46:57.384Z } }
app.geofleet.ma > - event:users:[14] tracker-online
```

FIGURE 5.20 – Rapports en temps réel des informations signalées par le système.

Comme mentionné précédemment, notre modèle de traçabilité de la mobilité des véhicules s'intitule "Morocco traces" a été testé pendant sept mois. Nous concevons le framework développé pour obtenir des enregistrements complets qui reflètent exactement les mouvements réels du véhicule (en temps réel), résolvant ainsi tout problème de déploiement (collection intelligente). De plus, ces traces peuvent être analysées plus en détail pour extraire un certain nombre de caractéristiques de mobilité qui affectent les performances entières du réseau mobile, telles que le temps de contact, la plage d'activité et le temps de visite. L'ensemble des informations recueillies contribuera à l'obtention et à l'amélioration du modèle de mobilité. Le cadre a été élaboré dans le contexte d'une mobilité des véhicules. Cependant, il convient également à d'autres cibles, telles que les mouvements humains et animaux. Nous recueillons un ensemble de rapports qui stockent les traces réelles. Trois d'entre elles sont traitées et interprétées sur le serveur de traitement principal afin de lisser les onglets de rapport vacants dans notre framework. La figure 5.21 les détaille, comme suit :

ID	Véhicule	Date	Longitude	Latitude	Vitesse
131923	Valvo F12	01-06-2017 05:35:39	-7.9828866666666665	33.27941833333333	0
131924	Valvo F12	01-06-2017 08:46:32	-7.9830683333333334	33.27971333333333	8
131925	Valvo F12	01-06-2017 08:47:30	-7.98316	33.279736666666665	0
131926	Valvo F12	01-06-2017 08:54:09	-7.98421	33.27991	16
131927	Valvo F12	01-06-2017 08:56:40	-7.9803983333333335	33.279044999999996	0
131928	Valvo F12	01-06-2017 09:06:33	-7.9818733333333334	33.27939	7
131929	Valvo F12	01-06-2017 09:07:31	-7.98166	33.27928333333333	0
131930	Valvo F12	01-06-2017 12:04:55	-7.982236666666667	33.2799	7
131931	Valvo F12	01-06-2017 12:07:13	-7.982196666666667	33.27956	0
131932	Valvo F12	01-06-2017 13:28:21	-7.981975	33.279505	7
131933	Valvo F12	01-06-2017 13:30:49	-7.98183	33.279521666666667	0
131934	Valvo F12	01-06-2017 14:08:29	-7.9819949999999995	33.279515	5
131935	Valvo F12	01-06-2017 14:10:59	-7.98305	33.27974833333333	0
131936	Valvo F12	01-06-2017 14:14:14	-7.982498333333333	33.279551666666666	5

FIGURE 5.21 – L'historique des rapports de performance.

- **Historique** : Ceci représente les tracés globalement ciblés. Ces rapports donnent un aperçu général des activités réalisées qui représente l'objectif principal et le cœur de notre travail. Cette trace génère exactement un modèle complet de mobilité de traces. Il définit un ensemble de données qui enregistre tous les événements survenus pendant toute la période du déploiement et des tests. Il décrit également l'identificateur du véhicule, la marque et le temps complet, la longitude, la latitude et la vitesse courante des véhicules. Nous recueillons un rapport cohérent sans aucune perte grâce à la détection, la correction et la prévention à l'avance des problèmes les plus fréquemment décelés. De plus, toutes les fonctionnalités développées sont combinées afin de réaliser et renforcer la stratégie de collection la plus efficace possible.
- **Déplacements** : Il s'agit d'un sous-rapport du projet "Morocco traces", qui se contente d'enregistrer les trajectoires des voyages vers et depuis des lieux prédéfinis et qui inclut les détails de tout événement.
- **Stationnement** : Il est une sous trace de "Morocco traces". Il produit un journal de toutes les informations concernant les stationnements des véhicules.

Les rapports sur les déplacements et les stationnements sont obtenus pour vérifier la cohérence et la stabilité de l'ensemble des données recueillies. Ces rapports peuvent être téléchargés sous forme de fichiers texte ou visualisés sous forme de statistiques. Un résumé comparatif des paramètres de certains modèles de la mobilité des traces proposés précédemment et notre modèle actuel est présenté dans le

tableau 5.1.

Nom de Trace	Type de mobilité	Nombre de nœuds	Durée (jours)	Type des dispositifs	Réseau appliqué
Cambridge 1 [18]	Humain	12	5	iMote	Bluetooth
Intel [18]	Humain	9	3	iMote	Bluetooth
Toronto [25]	Humain	23	16	PDA	Bluetooth
ZebraNet [26]	Animal	100	365	GPS	GPRS
SanFrancisco [27]	Véhicule (Taxi)	500	30	GPS	GPRS
UMassDieselNet [28]	Véhicule (Taxi)	40	60	Point d'accès	802.11b
Morocco Traces [117]	Véhicule (hétérogènes)	36	210	GPS	GPRS

TABLE 5.1 – Récapitulatif comparatif des traces du Maroc et les modèles de traces antérieurs.

Dans le test déployé, la trace enregistrée correspond à 36 véhicules dans la première version des "Traces du Maroc". Nous avons l'intention prochainement d'étendre nos expériences en utilisant autant de véhicules que possible, y compris les hétérogènes.

Pour cette raison, comme le montre la figure 5.22, nous avons développé un site Web dans le but d'attirer davantage des entreprises qui nous permettraient de gérer leur flotte de transport. (Le site Web est disponible à l'adresse suivante : <http://www.gps-maroc.ma/>). Un nombre important d'appareils mobiles permet de tester et d'analyser en profondeur les performances du serveur en termes de synchronisation de l'infrastructure, la vitesse de traitement et du stockage des données.

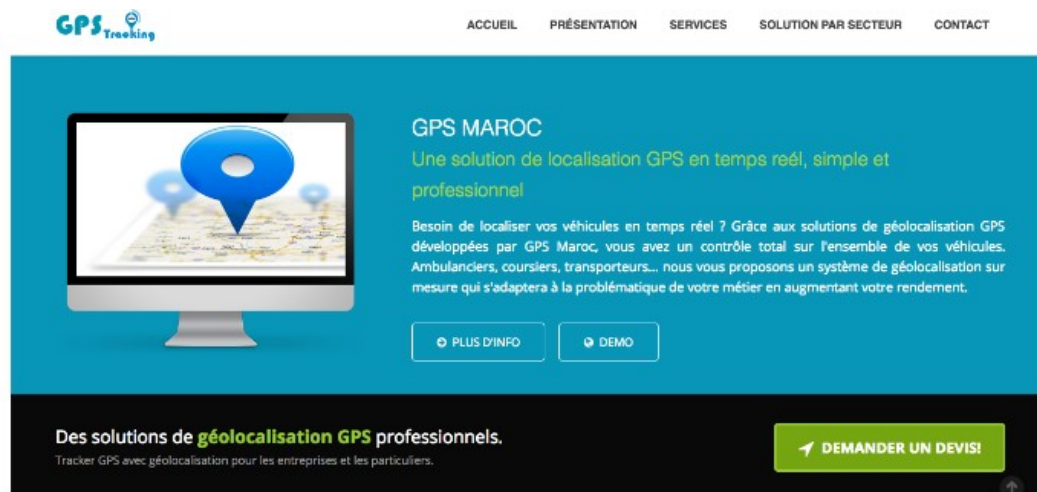


FIGURE 5.22 – Site de la géolocalisation au Maroc.

5.5 Conclusion

A ce jour, plusieurs modèles de mobilité de traces ont déjà été établis, dans lesquels les résultats obtenus des traces enregistrées pendant les phases de test sont simplement extraits des dispositifs retournés. Ce processus classique a plusieurs

inconvénients tels que la perte des équipements, les réinitialisations imprévisibles du matériel, l'absence de supervision des recharges restantes des batteries et une multitude de difficultés de déploiement. Dans cette étude, nous avons élaboré une nouvelle approche de collecte de traces qui permet d'éviter les problèmes de déploiement mentionnés ci-dessus. Ainsi, nous avons conçu et développé un environnement de localisation complet fonctionnant en temps réel, qui est connecté au GPS destiné à générer des traces. Le système déployé offre plusieurs fonctionnalités telles que la surveillance, l'enregistrement, la gestion des alertes, le rapportage et la génération de statistiques. Cette plate-forme peut être déployée à différentes fins pour diverses applications telles que la mobilité humaine, la surveillance animale et la localisation de véhicules. Le système a été déployé et testé pendant sept mois, aboutissant à l'ensemble des résultats, appelés "Morocco traces", qui ont fourni des traces en temps réel basés sur un processus de collecte intelligente des données. Les futures activités de recherche se concentreront sur l'amélioration du système par l'ajout de nouvelles langues, telles que les capacités multilingues, et l'augmentation du nombre de tracés simultanés de véhicules en étendant son utilisation à des milliers de véhicules, en particulier les entreprises de transport pour gérer efficacement leur flotte. Cette activité peut par exemple promouvoir Casablanca comme la première ville intelligente en Afrique par le recueil des traces humaines.

Conclusion et perspectives

L'étude de la mobilité et la proposition des modèles de mobilité est un domaine de recherche prospectif depuis les années 1990. Ce rapport de thèse fournit une étude détaillée et des recherches de pointe sur la mobilité et son impact sur les algorithmes de routage mobiles. Nous avons effectué une recherche approfondie sur le sujet et avons mis en évidence les principales conclusions jusqu'à ce jour. Mais nous considérons que la "Mobilité" est un sujet à part entière et qu'il existe encore des masses de documentation qu'il serait assez intéressant de parcourir. Nous divisons l'ensemble de l'enquête en cinq grands chapitres.

Le **premier chapitre** donne un aperçu détaillé de presque tous les modèles de mobilité de référence disponibles dans la littérature à ce jour. La mobilité influe fortement sur la performance des algorithmes de routage et les différents modèles ont des effets différents sur la mesure du rendement. Même un même modèle de mobilité, mais avec des paramètres différents tels que la vitesse, le temps de pause, la durée du vol, etc ; peuvent refléter des caractéristiques de performance différentes. Étant donné que la mobilité a un impact significatif, les performances d'un réseau dynamique doivent être évaluées avec une mobilité qui correspond étroitement au scénario réel dans lequel le réseau est déployé. Par exemple, si le réseau est déployé dans le cadre d'un scénario de gestion des catastrophes, la meilleure façon d'évaluer les performances consiste à choisir un modèle de mobilité basé sur les événements et les rôles. De même, s'il s'agit d'un DTN véhiculaire, les nœuds doivent suivre le modèle de mobilité véhiculaire.

Le **2ème chapitre** aborde l'impact de la mobilité sur les algorithmes de routage du réseau mobile. L'effet de la mobilité peut être mieux évalué en choisissant un modèle de mobilité approprié. Les modèles de mobilité sociale ont une structure communautaire et les nœuds ont des schémas de mouvement fortement corrélés. Les paramètres de mobilité tels que la vitesse et les temps de pause ont un effet direct sur les ruptures de liaison. Il est donc essentiel de disposer d'un environnement bien adapté pour évaluer correctement les performances des protocoles de routage. Bai et al [118] proposent un framework appelé "IMPORTANT" pour analyser l'impact de la mobilité sur les protocoles de routage adhoc.

Dans le **3ème chapitre**, nous avons mis en évidence pour la première fois une tentative de validation de certains modèles de mobilité dans les réseaux en tenant compte des paramètres de mobilité les plus pertinents, à savoir le problème de dégradation de vitesse, le phénomène de densité des ondes, la distribution spatiale des nœuds et le pourcentage moyen des voisins. Ces validations visent à résumer plusieurs paramètres en 18126 scénarios différents avec une moyenne de 486 fichiers validés. En plus, nous avons proposé une nouvelle mesure de mobilité appelée "gamme des voisins mobiles" qui prouve l'ensemble des résultats des mesures précédentes qui peuvent être remplacées par cette mesure. Cette nouvelle métrique montre un comportement efficace des changements de comportement des voisins dans les modèles de mobilité, montrant des résultats précis pour tous les nœuds mobiles pendant la mise en œuvre de l'expérience. La mesure proposée fusionne les forces de toutes les propriétés stochastiques qui ont été discutées précédemment.

Tandis que, le **4ème chapitre** propose un nouveau modèle de mobilité hybride des *entités* synthétiques a été proposé, intitulé "Maze Mobility Model"(MzMM). Le nouveau modèle de mobilité a été décrit et analysé en tenant compte des différentes tailles de la région évaluée; ainsi que, des protocoles de routage distincts. Les performances de MzMM ont été comparées à celles d'autres modèles de mobilité en mesurant des métriques réseaux tels que : le taux de délivrance des paquets, le délai moyen de bout-en-bout et le débit du réseau. Basé sur les résultats issus des simulations mises en œuvre, nous déduisons que le MzMM proposé offre un modèle de mobilité flexible plus que les approches antérieures. Il offre un mouvement adaptatif même dans des zones complexes. Cet avantage a été atteint grâce au fait que le modèle est défini en tenant compte de plusieurs comportements réels, tels que les dépendances temporelles où les décisions actuelles sont basées sur la chronologie des mouvements précédents, ainsi que les dépendances spatiales où la position actuelle dépend essentiellement du dernier emplacement connu. Ainsi que, il prend en compte les contraintes géographiques définies à l'intérieur de la zone de simulation. La combinaison de ces caractéristiques réalistes permet au MzMM d'être plus précis et plus robuste, ce qui représente un modèle de mobilité hybride *par excellence*, comme en témoignent les résultats de haute performance décrites dans le présent document. Les résultats de la simulation prouvent la robustesse et l'efficacité de notre modèle.

Cependant, le **5ème chapitre** traite une nouvelle approche de collecte de traces qui permet d'éviter les problèmes de déploiement. Ainsi, nous avons conçu et développé un environnement de localisation complet fonctionnant en temps réel, qui est connecté au GPS destiné à générer des traces. Le système déployé offre plusieurs fonctionnalités telles que la surveillance, l'enregistrement, la gestion des alertes, le rapportage et la génération de statistiques. Cette plate-forme peut être déployée à différentes fins pour diverses applications telles que la mobilité humaine, la surveillance animale et la localisation de véhicules. Le système a été déployé et testé pendant sept mois, aboutissant à l'ensemble des résultats, appelés "Morocco traces", qui ont fourni des traces en temps réel basés sur un processus de collecte intelligente des données.

Comme perspectives à nos travaux de recherche, nous discuterons en détail :

- Les conséquences de chaque modèle de mobilité sur la gestion des ressources et respectivement sur l'économie des ressources des réseaux. Dans cette direction, nous efforcerons de combiner les caractéristiques de mobilité des nœuds et leur intérêt pour l'échange d'informations afin d'améliorer l'économie des ressources au sein du réseau global. En plus des scénarios d'application de chaque modèle de mobilité (p. ex. réseaux ultra-denses, réseaux hétérogènes, réseaux de sécurité publique, etc.), l'analyse de complexité pour l'implantation de chaque modèle de mobilité et discuter de son applicabilité en temps réel et du coût de mise en œuvre de chaque mobilité par rapport aux applications du monde réel.
- Les humains ont tendance à rester confinés à leur propre emplacement géographique (connu sous le nom d'emplacement de résidence) et leur emplacement présente rarement une grande variation. De plus, la mobilité dépend des classes d'individus et très peu de travaux ont été réalisés sur le rôle d'une personne dans la société.
- Un autre paramètre important de la mobilité est le temps de pause qui a souvent été négligé ou étudié de manière moins approfondie. Le temps de pause peut avoir une influence directe sur l'inter-contact time (ICT) et le rendement

indirectement. La pause a été observée dans la mobilité humaine comme les personnes demeurent à un endroit donné pendant une courte période de temps avant de déménager dans un nouvel endroit. Parfois, les temps de pause peuvent être suffisamment grand et la répartition du temps de pause et de son effet sur les ICT est un sujet d'étude intéressant. Très peu d'œuvres comme [37, 119] ont tenu compte de la nature des longueurs de vol et des temps de pause lors de la conception d'un modèle de mobilité. Même les traces qui ont été recueillis ne révèlent pas grand-chose sur la nature des temps de pause et des durées de vol. Ces caractéristiques n'ont pas encore été prises en compte dans les modèles de mobilité.

- Un autre domaine intéressant est celui de la prédiction de la mobilité fondée sur une histoire récente. Les prévisions de mobilité et leur comparaison avec les résultats expérimentaux peut aider à mieux comprendre le mouvement humain. Si nous sommes capables de prédire l'évolution de l'activité humaine à l'intérieur d'un pourcentage d'erreur donné, on peut comprendre bien les enjeux de la mobilité humaine et peuvent être représentés mathématiquement.
- Les gens sont souvent attirés par les endroits populaires et la popularité d'un endroit donné détermine de façon significative leur fréquence de visite dans ces régions. Ces lieux peuvent servir de points d'attraction et les individus peuvent les visiter à plusieurs reprises. Bien que des traces aient été recueillies pour représenter la mobilité humaine générale dans une région confinée comme une conférence ou une université, on ne dispose toujours pas de statistiques suffisantes sur la fréquence des visites des individus dans un lieu donné. Par exemple, des dispositifs pourraient être installés à des endroits populaires bien connus et des traces peuvent être enregistrées concernant la fréquence des visites effectuées par un dispositif particulier au cours d'une période de temps donnée. Bien que la plupart des travaux de recherche concernant les réseaux mobiles aient été orientés vers la conception de nouveaux algorithmes de routage, très peu de travaux [120, 121] ont pris en compte la mobilité en proposant de tels algorithmes. La plupart des chercheurs ont utilisé les traces de mobilité disponibles pour évaluer la performance de leurs algorithmes de routage, mais ils ne prennent pas en compte la nature du mouvement avant de proposer un nouvel algorithme. Nous recommandons que la mobilité et ses caractéristiques inhérentes soient la base même d'un algorithme de routage. Avant de concevoir un nouvel algorithme de routage, les chercheurs devraient effectuer une analyse statistique des paramètres de mobilité appropriés du modèle de mobilité ou de l'ensemble à partir des traces de mobilité. Par exemple, si l'on a l'intention d'évaluer la performance d'un protocole de routage basé sur des traces de mobilité, il faut recueillir des données statistiques sur ICT, le temps de contact, la durée du vol et le temps de pause.
- D'autres domaines importants pour proposer de nouveaux modèles de mobilité peuvent être améliorés grâce à des algorithmes de sélection des zones utilisateurs en fonction de la distance par rapport à l'emplacement actuel. L'idéal serait de combiner les modèles de mobilité communautaire (CMM ou HCMM) avec des modèles de mobilité réalistes tels que Lévy Walk ou SLAW car la mobilité humaine est largement influencée par la formation communautaire ou une forte attraction entre individus appartenant à la même communauté.

Pour évoquer certains paradigmes de mobilité, nous recommandons d'éviter les modèles de mobilité tels que random waypoint, random direction ou random walk qui ne reflètent pas la vraie nature de la mobilité telle qu'elle est observée dans notre vie quotidienne.

Liste des publications

Articles de journaux :

1. Ibadah N, Rziza M, Minaoui K, Oumsis M, Benavente-Peces C. **Flexible synthetic mobility modeling to discover trajectories for complex areas of mobile wireless networks**. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing JAIHC Springer. 2019 : p 1-4.
2. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M, Benavente-Peces C. **Deep Validation of Spatial Temporal Features of Synthetic Mobility Models**. Computers. 2018 Dec;7(4) : p 71.
3. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M, Benavente-Peces C. **Smart Collection of Real-Time Vehicular Mobility Traces**. Future Internet. 2018 Aug 9;10(8) : p 78.
4. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M. **Performance Analysis of Synthetic Mobility Models and Mobile Ad Hoc Routing Protocols**. Sensors Transducers, Vol. 212, Issue 5, May 2017, pp. 23-30

Communications scientifiques :

1. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M, Benavente-Peces C. **Flaws Validation of Maze Mobility Model using Spatial-temporal Synthetic Mobility Metrics**, 9th International Joint Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems PECCS'2019, 19-20 Septembre, Vienne, Autriche.
2. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M. **Experimental Synthesis of Routing Protocols and Synthetic Mobility Modeling for MANET**. 6th International Conference on Sensor Networks SENSORNETS'2017 Feb 19 (Vol. 2, pp. 168-173), Porto, Portugal.
3. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M. **Modèles de mobilité et évaluation de performances des protocoles de routage : Application aux MANET**, Journée URAC'15, 28 novembre 2015, Rabat, Maroc.
4. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M. **Mobility models impact on the throughput in the Mobile ad hoc network**, the Third Edition of the International Conference on NETworked sYStems NETYS'15, May 13-15, Agadir, Maroc.
5. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M. **Mobile Ad Hoc Routing Protocols analysis using Different Mobility Models**, Mediterranean Conference on Information Communication Technologies MedICT'15, May 7-9, Saidia, Maroc.
6. Ibadah N, Minaoui K, Rziza M, Oumsis M. **Evaluation des performances de routage Ad hoc pour les réseaux MANET**, JDTIC'14, ENSIAS, Rabat, 19-20 Juin 2014.

Bibliographie

- [1] Jeffrey TRAVERS et Stanley MILGRAM. « An experimental study of the small world problem ». In : *Social Networks*. Elsevier, 1977, p. 179-197.
- [2] Augustin CHAINTREAU et al. « The diameter of opportunistic mobile networks ». In : *Proceedings of the 2007 ACM CoNEXT conference*. ACM. 2007, p. 12.
- [3] Albert EINSTEIN. *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. Courier Corporation, 1956.
- [4] Tracy CAMP, Jeff BOLENG et Vanessa DAVIES. « A survey of mobility models for ad hoc network research ». In : *Wireless communications and mobile computing 2.5* (2002), p. 483-502.
- [5] Emre ATSAN et Öznur ÖZKASAP. « A classification and performance comparison of mobility models for ad hoc networks ». In : *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*. Springer. 2006, p. 444-457.
- [6] Mirco MUSOLESI et Cecilia MASCOLO. « Mobility models for systems evaluation a survey ». In : *Middleware for Network Eccentric and Mobile Applications*, Springer-Verlag (2008).
- [7] Jonathan LOO, Jaime Lloret MAURI et Jesús Hamilton ORTIZ. *Mobile ad hoc networks : current status and future trends*. CRC Press, 2016.
- [8] Marco CONTI et Silvia GIORDANO. « Mobile ad hoc networking : milestones, challenges, and new research directions ». In : *IEEE Communications Magazine* 52.1 (2014), p. 85-96.
- [9] Xiuzhen CHENG, Xiao HUANG et Ding-Zhu DU. *Ad hoc wireless networking*. T. 14. Springer Science & Business Media, 2013.
- [10] Felipe Domingos DA CUNHA et al. « Data communication in VANETs : a survey, challenges and applications ». Thèse de doct. INRIA Saclay ; INRIA, 2014.
- [11] Ashish SRIVASTAVA et al. « Survey and overview of Mobile Ad-Hoc Network routing protocols ». In : *Advances in Engineering and Technology Research (ICAETR), 2014 International Conference on*. IEEE. 2014, p. 1-6.
- [12] Dmytro KARAMSHUK et al. « Human mobility models for opportunistic networks ». In : *IEEE Communications Magazine* 49.12 (2011), p. 157-165.
- [13] Qian DONG et Waltenegeus DARGIE. « A survey on mobility and mobility-aware MAC protocols in wireless sensor networks ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 15.1 (2013), p. 88-100.
- [14] Roelant A STEGMANN et al. « A survey of evaluation methods for personal route and destination prediction from mobility traces ». In : *Wiley Interdisciplinary Reviews : Data Mining and Knowledge Discovery* 8.2 (2018), e1237.

- [15] S. BATABYAL et P. BHAUMIK. « Mobility Models, Traces and Impact of Mobility on Opportunistic Routing Algorithms : A Survey ». In : *IEEE Communications Surveys Tutorials* 17.3 (2015), p. 1679-1707.
- [16] Poria PIROZMAND et al. « Human mobility in opportunistic networks : Characteristics, models and prediction methods ». In : *Journal of Network and Computer Applications* 42 (2014), p. 45-58.
- [17] Michael TOMASELLO. *A natural history of human thinking*. Harvard University Press, 2014.
- [18] Augustin CHAINTREAU et al. « Impact of human mobility on opportunistic forwarding algorithms ». In : *IEEE Transactions on Mobile Computing* 6.6 (2007).
- [19] Pan HUI et Jon CROWCROFT. « Human mobility models and opportunistic communications system design ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 366.1872 (2008), p. 2005-2016.
- [20] Jihwang YEO, David KOTZ et Tristan HENDERSON. « CRAWDAD : a community resource for archiving wireless data at Dartmouth ». In : *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 36.2 (2006), p. 21-22.
- [21] Anand BALACHANDRAN et al. « Characterizing user behavior and network performance in a public wireless LAN ». In : *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*. T. 30. 1. ACM. 2002, p. 195-205.
- [22] Nathan EAGLE et Alex Sandy PENTLAND. « Reality mining : sensing complex social systems ». In : *Personal and ubiquitous computing* 10.4 (2006), p. 255-268.
- [23] Jun QIN et al. « POST : Exploiting dynamic sociality for mobile advertising in vehicular networks ». In : *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 27.6 (2016), p. 1770-1782.
- [24] Wei-jen HSU et Ahmed HELMY. « On modeling user associations in wireless LAN traces on university campuses ». In : *2006 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*. IEEE. 2006, p. 1-9.
- [25] Jing SU et al. « A preliminary investigation of worm infections in a bluetooth environment ». In : *Proceedings of the 4th ACM workshop on Recurring malware*. ACM. 2006, p. 9-16.
- [26] Scott COUNTS et Karen E FISHER. « Energy-efficient computing for wildlife tracking : Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet ». In : *Proceedings of the 41st Hawaii International Conference on System Sciences*. 2008.
- [27] Michal PIORKOWSKI, Natasa SARAFIJANOVIC-DJUKIC et Matthias GROSSGLAUSER. « A parsimonious model of mobile partitioned networks with clustering ». In : *Communication Systems and Networks and Workshops, 2009. COMSNETS 2009. First International*. IEEE. 2009, p. 1-10.
- [28] Xiaolan ZHANG et al. « Study of a bus-based disruption-tolerant network : mobility modeling and impact on routing ». In : *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking*. ACM. 2007, p. 195-206.
- [29] S UMAMAHESWARAN, Naresh KUMAR et PK BISWAS. « A survey of routing protocol design patterns for mobile ad hoc networks ». In : *Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking (ET2ECN), 2014 2nd International Conference on*. IEEE. 2014, p. 1-6.

- [30] Suvadip BATABYAL et Parama BHAUMIK. « Mobility models, traces and impact of mobility on opportunistic routing algorithms : A survey ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 17.3 (2015), p. 1679-1707.
- [31] Sudip MISRA et Prateek AGARWAL. « Bio-inspired group mobility model for mobile ad hoc networks based on bird-flocking behavior ». In : *Soft Computing* 16.3 (2012), p. 437-450.
- [32] Poria PIROZMAND et al. « Human mobility in opportunistic networks : characteristics, models and prediction methods ». In : *Journal of Network and Computer Applications* 42 (2014), p. 45-58.
- [33] Francisco J ROS, Juan A MARTINEZ et Pedro M RUIZ. « A survey on modeling and simulation of vehicular networks : Communications, mobility, and tools ». In : *Computer Communications* 43 (2014), p. 1-15.
- [34] André PANISSON et al. « On the dynamics of human proximity for data diffusion in ad-hoc networks ». In : *Ad Hoc Networks* 10.8 (2012), p. 1532-1543.
- [35] Guangjie HAN et al. « A Survey on Mobile Anchor Node Assisted Localization in Wireless Sensor Networks ». In : (2016).
- [36] Chandanpreet KAUR. « A comprehensive view of mobility models in Wireless Ad hoc Networks ». In : *Networks* 2.3 (2012).
- [37] Injong RHEE et al. « On the levy-walk nature of human mobility ». In : *IEEE/ACM transactions on networking (TON)* 19.3 (2011), p. 630-643.
- [38] David ALDOUS et James FILL. *Reversible Markov chains and random walks on graphs*. 1995.
- [39] Ola ALSAQOUR et al. « A comparative study of simulation based performance evaluation of routing protocol for ad-hoc networks ». In : *Innovations and Advances in Computing, Informatics, Systems Sciences, Networking and Engineering*. Springer, 2015, p. 215-221.
- [40] Arvind Kumar SHUKLA, CK JHA et Rajeev ARYA. « A Simulation Study with Mobility Models Based on Routing Protocol ». In : *Proceedings of Fifth International Conference on Soft Computing for Problem Solving*. Springer. 2016, p. 867-875.
- [41] Christian BETTSTETTER. « Mobility modeling in wireless networks : categorization, smooth movement, and border effects ». In : *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 5.3 (2001), p. 55-66.
- [42] Douglas M BLOUGH, Giovanni RESTA et Paolo SANTI. « A statistical analysis of the long-run node spatial distribution in mobile ad hoc networks ». In : *Wireless Networks* 10.5 (2004), p. 543-554.
- [43] Jinsu YOON, Minggang LIU et Brian NOBLE. « Random waypoint considered harmful ». In : *INFOCOM 2003. twenty-second annual joint conference of the IEEE computer and communications. IEEE societies*. T. 2. IEEE. 2003, p. 1312-1321.
- [44] Yirui CONG, Xiangyun ZHOU et Rodney A KENNEDY. « Interference prediction in mobile ad hoc networks with a general mobility model ». In : *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14.8 (2015), p. 4277-4290.
- [45] Vinícius FS MOTA et al. « Protocols, mobility models and tools in opportunistic networks : A survey ». In : *Computer Communications* 48 (2014), p. 5-19.

- [46] Christian BETTSTETTER. « Smooth is better than sharp : a random mobility model for simulation of wireless networks ». In : *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. ACM. 2001, p. 19-27.
- [47] Ming ZHAO et Wenye WANG. « WSN03-4 : A Novel Semi-Markov Smooth Mobility Model for Mobile Ad Hoc Networks. » In : *IEEE Globecom 2006*. IEEE. 2006, p. 1-5.
- [48] Zygmunt J HAAS. « A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks ». In : *Proceedings of ICUPC 97-6th International Conference on Universal Personal Communications*. T. 2. IEEE. 1997, p. 562-566.
- [49] Sabrina MERKEL, Sanaz MOSTAGHIM et Hartmut SCHMECK. « Hop count based distance estimation in mobile ad hoc networks—Challenges and consequences ». In : *Ad Hoc Networks* 15 (2014), p. 39-52.
- [50] Youssef SAADI et al. « Simulation analysis of routing protocols using manhattan grid mobility model in MANET ». In : *arXiv preprint arXiv :1304.2035* (2013).
- [51] Preetha PRABHAKARAN et Ravi SANKAR. « Impact of realistic mobility models on wireless networks performance ». In : *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2006.(WiMob'2006). IEEE International Conference on*. IEEE. 2006, p. 329-334.
- [52] Vanessa Ann DAVIES et al. « Evaluating mobility models within an ad hoc network ». Mém. de mast. Citeseer, 2000.
- [53] Amit JARDOSH et al. « Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks ». In : *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM. 2003, p. 217-229.
- [54] Samuel C NELSON, Albert F HARRIS III et Robin KRAVETS. « Event-driven, role-based mobility in disaster recovery networks ». In : *Proceedings of the second ACM workshop on Challenged networks*. ACM. 2007, p. 27-34.
- [55] Suvadip BATBYAL et Parama BHAUMIK. « Improving network performance with affinity based mobility model in opportunistic network ». In : *Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2012*. IEEE. 2012, p. 1-7.
- [56] Jing TIAN et al. « Graph-based mobility model for mobile ad hoc network simulation ». In : *Simulation Symposium, 2002. Proceedings. 35th Annual*. IEEE. 2002, p. 337-344.
- [57] Francisco J MARTINEZ et al. « Computer simulations of VANETs using realistic city topologies ». In : *Wireless Personal Communications* 69.2 (2013), p. 639-663.
- [58] Qian DONG et Waltenegeus DARGIE. « A survey on mobility and mobility-aware MAC protocols in wireless sensor networks ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 15.1 (2013), p. 88-100.
- [59] Xianfeng LI, Tao ZHANG et Jianfeng LI. « A particle swarm mobility model for flying ad hoc networks ». In : *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE. 2017, p. 1-6.
- [60] Junfei XIE et al. « A survey and analysis of mobility models for airborne networks ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16.3 (2013), p. 1221-1238.

- [61] Radhika Ranjan ROY. « Reference point group mobility ». In : *Handbook of mobile ad hoc networks for mobility models*. Springer, 2011, p. 637-670.
- [62] Pu WANG et Ian F AKYILDIZ. « Spatial correlation and mobility-aware traffic modeling for wireless sensor networks ». In : *IEEE/ACM Transactions On Networking* 19.6 (2011), p. 1860-1873.
- [63] Claus METZNER et al. « Superstatistical analysis and modelling of heterogeneous random walks ». In : *Nature communications* 6.1 (2015), p. 1-8.
- [64] Xiaoyan HONG et al. « A group mobility model for ad hoc wireless networks ». In : *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. T. 53. Citeseer. 1999, p. 60.
- [65] Guangyu PEI et al. « A wireless hierarchical routing protocol with group mobility ». In : *WCNC. 1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (Cat. No. 99TH8466)*. T. 3. IEEE. 1999, p. 1538-1542.
- [66] Karen H WANG et Baochun LI. « Group mobility and partition prediction in wireless ad-hoc networks ». In : *2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No. 02CH37333)*. T. 2. IEEE. 2002, p. 1017-1021.
- [67] Miguel SÁNCHEZ et Pietro MANZONI. « ANEJOS : a java based simulator for ad hoc networks ». In : *Future generation computer systems* 17.5 (2001), p. 573-583.
- [68] Pan HUI et al. « Pocket switched networks and human mobility in conference environments ». In : *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*. ACM. 2005, p. 244-251.
- [69] Mirco MUSOLESI et Cecilia MASCOLO. « Designing mobility models based on social network theory ». In : *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 11.3 (2007), p. 59-70.
- [70] W-J HSU et al. « Modeling time-variant user mobility in wireless mobile networks ». In : *IEEE INFOCOM 2007-26th IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE. 2007, p. 758-766.
- [71] Frans EKMAN et al. « Working day movement model ». In : *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models*. ACM. 2008, p. 33-40.
- [72] Joy GHOSH, Sumesh J PHILIP et Chunming QIAO. « Sociological orbit aware location approximation and routing (SOLAR) in MANET ». In : *Ad Hoc Networks* 5.2 (2007), p. 189-209.
- [73] Vincent BORREL et al. « Simps : Using sociology for personal mobility ». In : *IEEE/ACM Transactions on Networking* 17.3 (2008), p. 831-842.
- [74] Alessandro MEI et Julinda STEFA. « SWIM : A simple model to generate small mobile worlds ». In : *IEEE INFOCOM 2009*. IEEE. 2009, p. 2106-2113.
- [75] Daniel HIRANANDANI, Katia OBRACZKA et JJ GARCIA-LUNA-ACEVES. « MANET protocol simulations considered harmful : the case for benchmarking ». In : *IEEE Wireless Communications* 20.4 (2013), p. 82-90.
- [76] Chiara BOLDRINI et Andrea PASSARELLA. « HCMM : Modelling spatial and temporal properties of human mobility driven by users' social relationships ». In : *Computer Communications* 33.9 (2010), p. 1056-1074.
- [77] Shusen YANG et al. « Using social network theory for modeling human mobility ». In : *IEEE network* 24.5 (2010), p. 6-13.

- [78] Daniel FISCHER, Klaus HERRMANN et Kurt ROTHERMEL. « GeSoMo—A general social mobility model for delay tolerant networks ». In : *The 7th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (IEEE MASS 2010)*. IEEE. 2010, p. 99-108.
- [79] Aarti MUNJAL, Tracy CAMP et William C NAVIDI. « SMOOTH : a simple way to model human mobility ». In : *Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. ACM. 2011, p. 351-360.
- [80] Ha DANG et Hongyi WU. « Mobility models for delay-tolerant mobile networks ». In : *2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications*. IEEE. 2009, p. 55-60.
- [81] Saif AL-SULTAN et al. « A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network ». In : *Journal of network and computer applications* 37 (2014), p. 380-392.
- [82] Dirk HELBING. « Traffic and related self-driven many-particle systems ». In : *Reviews of modern physics* 73.4 (2001), p. 1067.
- [83] Jerome HARRI, Fethi FILALI et Christian BONNET. « Mobility models for vehicular ad hoc networks : a survey and taxonomy ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 11.4 (2009), p. 19-41.
- [84] Ben LIANG et Zygmunt J HAAS. « Predictive distance-based mobility management for PCS networks ». In : *INFOCOM'99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. T. 3*. IEEE. 1999, p. 1377-1384.
- [85] M BERGAMO et al. « System design specification for mobile multimedia wireless network (MMWN)(draft) ». In : *DARPA project DAAB07-95-C-D156* (1996).
- [86] Michal PIÓRKOWSKI, Natasa SARAFIJANOVIC-DJUKIC et Matthias GROSS-GLAUSER. « On clustering phenomenon in mobile partitioned networks ». In : *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models*. ACM. 2008, p. 1-8.
- [87] Siqi SHEN, Niels BROUWERS et Alexandru IOSUP. « Human mobility in virtual and real worlds : Characterization, modeling, and implications ». In : *Parallel and Distributed Systems Report Series* (2011).
- [88] Aniket PRAMANIK et al. « Behavioral study of Random Waypoint Mobility Model based energy aware MANET ». In : *Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2016 3rd International Conference on*. IEEE. 2016, p. 624-629.
- [89] Weiwei WANG et al. « Parameter Characteristics of Gauss-Markov Mobility Model in Mobile Wireless Sensor Networks. » In : *Adhoc & Sensor Wireless Networks* 34 (2016).
- [90] Taku NOGUCHI et Takahiko KOBAYASHI. « Adaptive Location-Aware Routing with Directional Antennas in mobile adhoc networks ». In : *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2017 International Conference on*. IEEE. 2017, p. 1006-1011.
- [91] Omar ALMOMANI et al. « Performance evaluation of position-based routing protocols using different mobility models in manet ». In : *International Journal of Computer Applications* 119.3 (2015).
- [92] Fahim MAAN et Nauman MAZHAR. « MANET routing protocols vs mobility models : A performance evaluation ». In : *2011 Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. IEEE. 2011, p. 179-184.

- [93] Jogendra KUMAR. « Broadcasting Traffic Load Performance Analysis of 802.11 MAC in Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Using Random Waypoint Model (RWM) ». In : *International Journal of Information and Network Security* 1.3 (2012), p. 223.
- [94] Caleb PHILLIPS, Douglas SICKER et Dirk GRUNWALD. « A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods ». In : *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 15.1 (2013), p. 255-270.
- [95] N ASCHENBRUCK et al. « A Mobility Scenario Generation and Analysis Tool ». In : *Osnabruck, Germany* (2013).
- [96] Nisrine IBADAH et al. « Experimental Synthesis of Routing Protocols and Synthetic Mobility Modeling for MANET ». In : *Sensor Networks (SENSOR-NETS 2017), 6th International Conference on.* 2017, p. 168-173.
- [97] Ming ZHAO et Wenye WANG. « Analyzing topology dynamics in ad hoc networks using a smooth mobility model ». In : *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE.* IEEE. 2007, p. 3279-3284.
- [98] Martin FOLTIN. « Automated Maze Generation and Human Interaction ». In : *Brno : Masaryk University Faculty Of Informatics* (2011).
- [99] Bhawana SINGH et Anil Kumar PANDEY. « Maze using Hybrid Genetic Algorithm ». In : (2014).
- [100] Aliona KOZLOVA, Joseph Alexander BROWN et Elizabeth READING. « Examination of representational expression in maze generation algorithms ». In : *2015 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG).* IEEE. 2015, p. 532-533.
- [101] Jonas A KERSULIS et al. « Topological Graph Metrics for Detecting Grid Anomalies and Improving Algorithms ». In : *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC).* IEEE. 2018, p. 1-7.
- [102] Bojan MOHAR et al. « The Laplacian spectrum of graphs ». In : *Graph theory, combinatorics, and applications* 2.871-898 (1991), p. 12.
- [103] Aliona KOZLOVA, Joseph Alexander BROWN et Elizabeth READING. « Examination of representational expression in maze generation algorithms ». In : *Computational Intelligence and Games (CIG), 2015 IEEE Conference on.* IEEE. 2015, p. 532-533.
- [104] Andrew PECH et al. « Evolving Cellular Automata for Maze Generation ». In : *Australasian Conference on Artificial Life and Computational Intelligence.* Springer. 2015, p. 112-124.
- [105] Nisrine IBADAH et al. « Deep Validation of Spatial Temporal Features of Synthetic Mobility Models ». In : *Computers* 7.4 (2018), p. 71.
- [106] Elizabeth M ROYER, P Michael MELLIAR-SMITH et Louise E MOSER. « An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks ». In : *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on.* T. 3. IEEE. 2001, p. 857-861.
- [107] Nisrine IBADAH et al. « Flexible synthetic mobility modeling to discover trajectories for complex areas of mobile wireless networks ». In : *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2019), p. 1-14.
- [108] Christian BETTSTETTER, Christian WAGNER et al. « The Spatial Node Distribution of the Random Waypoint Mobility Model. » In : *WMAN 11* (2002), p. 41-58.

- [109] Eric BRAUN et al. « A lightweight web components framework for accessing generic data services in environmental information systems ». In : *From Science to Society*. Springer, 2018, p. 191-201.
- [110] Ioannis K CHANIOTIS, Kyriakos-Ioannis D KYRIAKOU et Nikolaos D TSELIKAS. « Is Node.js a viable option for building modern web applications? A performance evaluation study ». In : *Computing* 97.10 (2015), p. 1023-1044.
- [111] Amadou Dahirou GUEYE, Pape Mamadou Djidiack FAYE et Claude LISHOU. « Optimization of Practical Work for Programming Courses in the Context of Distance Education ». In : *Online Engineering & Internet of Things*. Springer, 2018, p. 764-777.
- [112] Rob REAGAN. « Other Tips and Tricks ». In : *Web Applications on Azure*. Springer, 2018, p. 381-414.
- [113] Aditya Ravi SHANKAR. « Essential Game Developer Toolkit ». In : *Pro HTML5 Games*. Springer, 2017, p. 409-420.
- [114] Huixian WANG et al. « VANET modeling and clustering design under practical traffic, channel and mobility conditions ». In : *IEEE Transactions on Communications* 63.3 (2015), p. 870-881.
- [115] Wu HE, Gongjun YAN et Li DA XU. « Developing vehicular data cloud services in the IoT environment ». In : *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10.2 (2014), p. 1587-1595.
- [116] Cheng-Ta CHIANG. « Design of a High-Sensitivity Ambient Particulate Matter 2.5 Particle Detector for Personal Exposure Monitoring Devices ». In : *IEEE Sensors Journal* 18.1 (2018), p. 165-169.
- [117] Nisrine IBADAH et al. « Smart Collection of Real-Time Vehicular Mobility Traces ». In : *Future Internet* 10.8 (2018), p. 78.
- [118] Fan BAI, Narayanan SADAGOPAN et Ahmed HELMY. « IMPORTANT : A framework to systematically analyze the Impact of Mobility on Performance of Routing protocols for Adhoc Networks ». In : *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428)*. T. 2. IEEE. 2003, p. 825-835.
- [119] Kyunghan LEE et al. « Slaw : A mobility model for human walks ». In : *IEEE INFOCOM 2009*. IEEE. 2009, p. 855-863.
- [120] Thrasyvoulos SPYROPOULOS, Konstantinos PSOUNIS et Cauligi S RAGHAVENDRA. « Efficient routing in intermittently connected mobile networks : The multiple-copy case ». In : *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)* 16.1 (2008), p. 77-90.
- [121] Vania CONAN, Jeremie LEGUAY et Timur FRIEDMAN. « Fixed point opportunistic routing in delay tolerant networks ». In : *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 26.5 (2008), p. 773-782.

Résumé

Les communications sans fil sont devenues omniprésentes dans notre vie quotidienne. De nos jours, une grande diversité des équipements mobiles sont interconnectée grâce aux avancées technologiques fructueuses. Les chercheurs dans les universités et l'industrie se penchent constamment sur les enjeux qui exigent des protocoles et des services plus efficaces et novateurs, sans lacunes de communication et offrant une bonne qualité de service (QoS) aux utilisateurs. La mise au point de modèles de mobilité appropriés est l'une des décisions majeures pour améliorer les performances des réseaux sans fil. La pertinence des modèles de mobilité repose essentiellement sur leur capacité à simuler et évaluer les performances globales des réseaux mobiles sans fil et à concevoir les algorithmes et protocoles qui en dépendent. La mobilité fréquente représente l'un de ces défis où il est examiné en profondeur en considérant les réseaux mobiles hautement dynamiques, ce qui pousse les modèles de mobilité à se concentrer sur la caractérisation du mouvement des nœuds. Ce qui mène à démontrer que le modèle de mouvement adopté a un impact majeur sur l'ensemble des performances du réseau.

Notre travail de thèse offre des approches intelligentes pour une modélisation réaliste de la mobilité dans des réseaux mobiles sans fil à travers : une validation approfondie des caractéristiques spatio-temporelles des modèles de mobilité synthétique. Ensuite, une modélisation flexible de la mobilité synthétique pour la découverte des trajectoires dans les environnements complexes. Et finalement par une collecte intelligente des traces de la mobilité des véhicules en temps réel. Nos résultats confirment l'efficacité et la robustesse de nos solutions proposées.

Mots-clefs (5) : MANET, Protocoles de routage, modèle de mobilité, NS2, Boonmotion, Analyse des performances.

Abstract

Wireless communications have become omnipresent in our daily life. Nowadays, a wide diversity of mobile devices can be interconnected, due mainly to successful technological advances. In consequence, challenging issues requiring more efficient and novel protocols and services without communication gaps and offering a high quality of service (QoS) are constantly being addressed by both academia and industry. The achievement of appropriate mobility models is one of the most impacting developments to improve the performance of wireless networks. The relevance of mobility models relies on the fact that they are used for simulating and evaluating mobile wireless networks overall performance and to design and assess algorithms and protocols which are based on. Frequent mobility represents one of those challenging issues where it is deeply examined by considering highly dynamic mobile networks, leading the network mobility models to aim at characterizing the nodes movement. Several researchers have demonstrated that the adopted motion model significantly impacts the whole network performance.

Our thesis work offers intelligent approaches for realistic modeling of mobility in mobile wireless networks through: a deep validation of spatial temporal features of synthetic mobility models. Then, flexible synthetic mobility modeling to discover trajectories for complex areas of mobile wireless networks. And finally by a smart collection of real-time vehicular mobility traces. Our results confirm the efficiency and robustness of our proposed solutions.

Key Words (5): MANET, Routing protocols, mobility models, NS2, Boonmotion, Performance analysis.