

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة عمّار ثليجي بالأغواط  
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT  
كلية العلوم  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE

## Mémoire de Master

**Domain** : Mathématiques et Informatique

**Filière** : Informatiques

**Option** : Réseaux, Systèmes et Applications Réparties

*Réalisé par :*

M. BENCHAA Abdelkader

M. GUELOUZA Abdallah Nadhir

*THEME*

---

# Amélioration des modèles de mobilité pour les drones de surveillance

---

*Soutenu publiquement le 24-06-2023 devant le jury composé de :*

M. Zohra ABDELHAFIDI : Université Laghouat - Président  
M. Tahar BENDOUMA : Université Laghouat - Examineur  
M. Abdelmajid BENARFA : Université Laghouat - Examineur  
M. Tahar ALLAOUI : Université Laghouat - Encadreur

Année Universitaire : 2022/2023

# Remerciements

*Tout d'abord nous tenons à remercier "Allah" le Tout-Puissant, pour nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience nécessaires à la réalisation de ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur de ce mémoire, M. Tahar Allaoui, pour son encadrement inestimable tout au long de ce processus. Ses conseils avisés, sa disponibilité et sa patience ont été d'une importance capitale pour la réussite de ce travail. Sa passion pour le sujet et son expertise ont été une source d'inspiration constante.*

*Nous tenons également à exprimer notre gratitude aux membres de notre comité de lecture, M. Benaarfa, M. Bendouma et Mlle. Abdelhafidi. Leurs commentaires constructifs, leurs suggestions pertinentes et leur expertise ont grandement enrichi notre travail. Leurs précieux commentaires ont permis d'améliorer la qualité et la rigueur de ce mémoire.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous les enseignants, au personnel administratif et à nos collègues qui ont contribué à notre développement académique et personnel. Leur motivation pour apprendre, leur dévouement et leur volonté de partager leurs connaissances ont eu un impact significatif sur notre parcours académique.*

*En résumé, nous sommes profondément reconnaissants à tous ceux qui ont joué un rôle dans la réalisation de cette thèse. Votre soutien et votre collaboration ont été d'une importance capitale et nous vous en sommes infiniment reconnaissants.*

**MERCI**

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire :*

*A celle qui m'a donné la vie, qui n'a pas cessé de m'encourager et de  
prier pour moi, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ma  
tendre mère.*

*plus cher au monde, mon père.*

*que dieu les garde et les protège*

*A mes tantes.*

*A toute ma famille.*

*A mes professeurs qui m'ont inculqué leur savoir durant notre cursus.*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*Abdelkader*

# *Dédicaces*

*je dédie ce travail de fin d'études à :*

*Mes parents, ceux à qui je dois tant pour leur amour et leur support continu tout le long du cursus de mes études. Que ce travail soit le témoignage sincère et affectueux de ma profonde reconnaissance pour tout ce que vous avez fait pour moi. Grâce à leur collaboration, leur détermination dans le travail m'a soutenu au prix de sacrifices inoubliables.*

*Je voudrais également exprimer ma gratitude envers ma famille et mes amis pour leur soutien constant et leur encouragement indéfectible. Vos encouragements, vos mots d'encouragement et votre présence bienveillante ont été essentiels pour moi.*

*Ce mémoire de fin d'études est le fruit d'un travail d'équipe et de nombreuses personnes ont joué un rôle important dans sa réalisation.*

*Je suis profondément reconnaissant envers chacun d'entre vous et je vous dédie ce travail avec humilité et reconnaissance.*

***Abdallah***

في السنوات الأخيرة ، أصبحت شبكات الطيران المخصصة واحدة من أكثر التقنيات شيوعًا ، وذلك بفضل مجموعة تطبيقاتها الواسعة. أحد مجالات تطبيق هذا النوع من الشبكات هو المراقبة باستخدام الطائرات بدون طيار ، وهناك العديد من العوامل التي تحدد أداء هذه المهمة ، بما في ذلك استهلاك الموارد. أدى كل هذا إلى قيام الباحثين بتنفيذ نماذج تنقل جديدة في شبكة الجوال المخصصة ، وهو التحدي الرئيسي لضمان الاستهلاك الأمثل للطاقة. في هذه الأطروحة ، سوف نفهم بشكل أفضل شبكة الطائرات بدون طيار. بعد ذلك ، سوف ندرس نماذج التنقل المختلفة الموجودة وتشغيلها ، وسوف نقترح طريقة جديدة ، ولاختبارها والتحقق من صحتها ، سنستخدم محاكي اختبار الشبكة المعيارية الموضوعية من أجل مقارنة طريقتنا مع النماذج الأخرى من التنقل من حيث الطاقة المستهلكة.

**الكلمات المفتاحية :** الطائرات بدون طيار ، شبكات الجوال المخصصة ، طريقة المراقبة باستخدام الطائرات بدون طيار.

# Résumé

Ces dernières années, Flying Ad hoc Network (FANET) sont devenus l'une des technologies les plus populaires, grâce à son large éventail d'applications. L'un des domaines d'application des réseaux FANET est la surveillance en utilisant les drones ou Unmanned Aerial Vehicles (UAV), de nombreux facteurs déterminent la performance de cette mission, y compris la consommation des ressources. Tout cela a conduit les chercheurs à mettre en œuvre de nouveaux modèles de mobilité dans les FANET, ce qui constitue le principal défi pour garantir une consommation optimale d'énergie. Dans ce mémoire, nous allons mieux comprendre le réseau des drones. Ensuite, nous étudierons les différents modèles de mobilité existants et leur fonctionnement, et nous proposerons une nouvelle méthode, et pour le tester et le valider nous allons utiliser le simulateur Objective Modular Network Testbed (OMNet++) afin de comparer notre méthode avec les autres modèles de mobilité en termes d'énergie consommée.

**Mots clés :** UAV, OMNet++, méthode de surveillance en utilisant les drones, GM, RWP.

# Abstract

In recent years, Flying Ad hoc Network (FANET) has become one of the most popular technologies, thanks to its wide range of applications. One of the application areas of FANET networks is surveillance using drones or Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), with many factors determining the performance of this mission, including resource consumption.

All this has led researchers to implement new mobility models in FANETs, which is the main challenge in ensuring optimal energy consumption.

In this dissertation, we will gain a better understanding of the drone network. Then, we will study the different existing mobility models and how they work, and we will propose a new method, and to test and validate it we will use the Objective Modular Network Testbed (OMNet++) simulator to compare our method with other mobility models in terms of energy consumed.

**Key words :** UAV, OMNet++, surveillance method using drones, GM, RWP.

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>13</b>
<b>2 Généralités</b>	<b>14</b>
2.1 Fondamentaux des réseaux sans fil . . . . .	14
2.1.1 Introduction . . . . .	14
2.1.2 Historique . . . . .	14
2.1.3 Caractéristiques des canaux sans fil . . . . .	15
2.1.4 Types de réseaux sans fil . . . . .	15
2.2 Le Réseau Ad hoc . . . . .	18
2.2.1 Application des réseaux sans fil ad hoc . . . . .	18
2.2.2 Types de réseaux Ad Hoc sans fil . . . . .	19
2.3 Le Réseau FANET . . . . .	20
2.3.1 Les caractéristiques des FANETs . . . . .	20
2.3.2 Les modes de communication entre les drones[8] . . . . .	20
2.4 Surveillance à l'aide de drones . . . . .	22
2.4.1 Applications militaires . . . . .	22
2.4.2 Applications civiles . . . . .	22
<b>3 Étude comparative des modèles de mobilité</b>	<b>25</b>
3.1 Introduction . . . . .	25
3.2 Classification des modèles de mobilité . . . . .	25
3.2.1 Les modèles de mobilité individuelle . . . . .	26
3.2.2 Les modèles de mobilité de groupe . . . . .	26
3.3 Les modèles de mobilité aléatoire . . . . .	27
3.3.1 Définitions . . . . .	27
3.3.2 Le modèle Random Waypoint (RWP) . . . . .	28
3.4 Les modèles de dépendance temporelle . . . . .	30
3.4.1 Le modèle de mobilité de Gauss Markov . . . . .	30
3.4.2 Avantages du GM . . . . .	32
3.4.3 Limites du modèle de mobilité GM . . . . .	33
3.5 La différence entre les modèles aléatoires et les modèles réalistes . . . . .	33
3.6 Influence des modèles de mobilité sur les drones . . . . .	34
<b>4 Proposition d'une méthode de surveillance en utilisant les drones</b>	<b>35</b>
4.1 Introduction . . . . .	35
4.2 L'objectif de la méthode . . . . .	35

4.3	L'idée de base . . . . .	35
4.3.1	Déterminer les tâches de chaque niveau . . . . .	36
4.3.2	Affectation des drones aux zones . . . . .	37
4.3.3	le choix d'un modèle de mobilité . . . . .	38
4.4	Les avantages attendus . . . . .	39
4.5	Conclusion . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Simulation et analyse de performance</b>	<b>40</b>
5.1	Introduction . . . . .	40
5.2	Les techniques d'évaluation des performances . . . . .	40
5.2.1	Implémentation réelle . . . . .	40
5.2.2	Simulation . . . . .	41
5.3	L'outil de simulation . . . . .	41
5.4	L'environnement de travail . . . . .	41
5.5	Simulation et résultats . . . . .	42
5.5.1	Les paramètres de la simulation . . . . .	42
5.5.2	Les modèles de mobilité en comparaison . . . . .	42
5.5.3	Les scenarios . . . . .	43
5.6	Conclusion . . . . .	51
	<b>Conclusion</b>	<b>52</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>53</b>

# Table des figures

2.1	Types de réseaux sans fil. . . . .	16
2.2	Un réseau Ad hoc[4]. . . . .	17
2.3	Un Réseau cellulaire. . . . .	18
2.4	Les types de réseaux Ad Hoc[6]. . . . .	20
2.5	Architectures de communication des drones . . . . .	21
2.6	Utilisation des drones dans le domaine militaire . . . . .	22
2.7	Utilisation des drones dans l'agriculture . . . . .	23
2.8	Utilisation des drones dans la Détection des incendies . . . . .	23
3.1	La première classification des modèles de mobilité . . . . .	25
3.2	La deuxième classification des modèles de mobilité . . . . .	26
3.3	La troisième classification des modèles de mobilité . . . . .	26
3.4	Un exemple de mobilité RWP bidimensionnelle . . . . .	29
3.5	La zone tampon sectorisée du modèle de mobilité de Gauss-Markov . . . . .	32
5.1	Environnement matériel. . . . .	41
5.2	RWP vs GM (densité/EMC). . . . .	43
5.3	RWP vs Clustering RWP (densité/EMC). . . . .	44
5.4	GM vs Clustering GM (densité/EMC). . . . .	45
5.5	Clustering RWP vs Clustering GM (densité/EMC). . . . .	46
5.6	GM vs RWP (Surface/EMC). . . . .	47
5.7	GM vs Clustering GM (Surface/EMC). . . . .	48
5.8	RWP vs Clustering RWP (Surface/EMC). . . . .	49
5.9	Clustering GM vs Clustering RWP (Surface/EMC). . . . .	50

# Liste des tableaux

2.1	Différences entre les réseaux cellulaires et les réseaux Ad hoc . . . . .	19
5.1	Les paramètres de la simulation . . . . .	42
5.2	GM vs RWP (densité/EMC). . . . .	43
5.3	RWP vs Clustering RWP (densité/EMC). . . . .	44
5.4	GM vs Clustering GM (densité/EMC). . . . .	45
5.5	Clustering RWP vs Clustering GM (densité/EMC). . . . .	46
5.6	GM vs RWP (Surface/EMC). . . . .	47
5.7	GM vs Clustering GM (Surface/EMC). . . . .	48
5.8	RWP vs Clustering RWP (Surface/EMC). . . . .	49
5.9	Clustering GM vs Clustering RWP (Surface/EMC). . . . .	50

# Liste des algorithmes

1	Division des sous-zones . . . . .	37
2	Affectation des drones aux zones . . . . .	38

## Liste d'abréviations

<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Network.
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network.
<b>WMAN</b>	Wireless Metropolitan Area Network.
<b>WWAN</b>	Wireless Wide Area Network.
<b>CV</b>	Communication Véhiculaire.
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicles.
<b>MANET</b>	Mobile Ad hoc Network.
<b>VANET</b>	Vehicular Ad hoc Network.
<b>FANET</b>	Flying Ad hoc Network.
<b>RWP</b>	Random WayPoint.
<b>GM</b>	Gauss Markov.
<b>MN</b>	Mobile Node.
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant.
<b>GCS</b>	Ground Control Station.
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>EMC</b>	Energies Moyenne Consommé.
<b>OMNet++</b>	Objective Modular Network Testbed.

# Chapitre 1

## Introduction générale

Les réseaux ad-hoc sont des systèmes autonomes formés par un groupe de nœuds mobiles qui utilisent la transmission sans fil pour communiquer entre eux. Ils se caractérisent par leur capacité à s'autoorganiser, s'autoconfigurer et s'autocontrôler. Ces réseaux peuvent être déployés n'importe où et à tout moment, car ils nécessitent une infrastructure minimale et ne dépendent pas d'une administration centrale. Ils sont largement utilisés par différents utilisateurs, tels que les militaires, les chercheurs et les étudiants.

La mobilité des nœuds est une caractéristique essentielle des scénarios et des applications des réseaux sans fil. Dans le Wireless Local Area Network (WLAN), les stations sans fil sont principalement constituées d'appareils mobiles tels que des ordinateurs portables, Personal Digital Assistant (PDA), etc. Dans le cas des réseaux ad hoc, les nœuds peuvent être des soldats en déplacement sur un champ de bataille, des membres d'une équipe de secours dans une zone sinistrée ou un essaim de drones en mission de surveillance. La mobilité joue également un rôle dans les réseaux de capteurs sans fil, dans certains scénarios. Par exemple, si des capteurs sans fil sont attachés à des animaux à des fins de suivi, leur mouvement influence directement la collecte et la transmission des données.

Le drone de surveillance constitue de nos jours un système technologique pour assurer la sécurité des biens et des personnes. L'une des caractéristiques techniques d'intérêt des drones, pour assurer la continuité de la mission de surveillance, est leur consommation d'énergie.

Ce mémoire est organisé en quatre (04) chapitres encadrés par une introduction générale et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les Véhicules aériens sans pilote (UAV) qui contiennent les caractéristiques des réseaux FANET, ses modes de communication, ainsi que l'utilité de la surveillance à l'aide de drones. Ensuite, dans le deuxième chapitre, notre attention sera portée sur les modèles de mobilité individuelle des UAV, en soulignant leur importance dans l'évaluation des performances des réseaux. Nous commencerons par mettre en évidence les raisons qui motivent leur étude approfondie. Ensuite, nous examinerons les différents modèles de mobilité existants. Enfin, nous procéderons à une comparaison de ces modèles afin d'en déterminer les caractéristiques et les avantages respectifs. Dans le troisième chapitre nous allons proposer une nouvelle méthode de surveillance à l'aide des drones, on peut aussi le considérer comme une amélioration du deux modèles de mobilité Random WayPoint (RWP) et Gauss Markov (GM). Enfin, Le but du dernier chapitre est de simuler les modèles de mobilité mentionné dans les chapitres 3 et 4 avec le simulateur OMNet++, afin de faire une étude comparative pour évaluer la performance de ces méthodes.

# Chapitre 2

## Généralités

### 2.1 Fondamentaux des réseaux sans fil

#### 2.1.1 Introduction

Les réseaux sans fil utilisent des canaux de fréquences radio comme support physique pour la communication[10].

La communication entre les appareils permet de fournir des services innovants. Cette communication est considérée comme un mécanisme très puissant, mais également complexe, ce qui entraîne beaucoup de complexité dans les systèmes actuels. Cela rend non seulement le réseautage difficile, mais limite également sa flexibilité. Au cours des dernières années, de nombreuses normes et technologies de connectivité sans fil ont émergé. Ces technologies permettent aux utilisateurs de connecter facilement et simplement une large gamme d'appareils informatiques et de télécommunications, sans avoir besoin d'acheter, de transporter ou de connecter des câbles. Ces technologies offrent des opportunités de connexions ad hoc rapides et automatiques entre les appareils, et chaque appareil doit prendre en charge plusieurs normes pour assurer l'interopérabilité entre les différents appareils[4]. Les réseaux sans fil sont utilisés pour fournir des services de réseau dans des endroits où il peut être très difficile ou trop coûteux de poser des câbles pour un réseau filaire[10].

#### 2.1.2 Historique

En 1897, Guglielmo Marconi a inventé le premier système de communication radio sans fil. En 1901, il a démontré avec succès son système de télégraphie sans fil au monde entier en transmettant des signaux radio à travers l'océan Atlantique, de l'Angleterre à l'Amérique, sur une distance de plus de 1 700 miles (Environ 2.736 Km)[10].

Les réseaux sans fil sont devenus un élément essentiel de la communication au cours du siècle dernier. Les premiers utilisateurs de la technologie sans fil ont été les militaires et les services d'urgence. Des scènes de films de la Seconde Guerre mondiale, par exemple, montrent des soldats équipés de matériel de communication sans fil transportés dans des sacs à dos et des véhicules. Le premier service de radiotéléphonie pour les clients a été lancé par la compagnie de téléphone Bell aux États-Unis en 1950. Cependant, ce réseau était petit et ne pouvait accueillir que très peu d'abonnés. En 1964, le concept de ressources partagées a été introduit. Cette innovation a permis une allocation dynamique des ressources radio. En conséquence, un plus grand nombre d'abonnés ont pu être pris en charge par les réseaux radio[1].

### 2.1.3 Caractéristiques des canaux sans fil

Les réseaux sans fil ont plusieurs caractéristiques qui définissent leurs performances et leurs capacités.

— **La Bande passante :**

La bande passante d'un réseau sans fil détermine la quantité de données pouvant être transmises sur le réseau à un moment donné. Une bande passante plus élevée signifie des taux de transfert de données plus rapides.

— **La Portée :**

La portée d'un réseau sans fil fait référence à la distance maximale sur laquelle il peut transmettre des données. La portée d'un réseau sans fil peut être affectée par des facteurs tels que des obstacles, des interférences et la puissance du signal sans fil.

— **La Mobilité :**

Les réseaux sans fil permettent aux utilisateurs de se déplacer librement. Cette caractéristique est particulièrement importante pour les appareils mobiles tels que les smartphones et les tablettes.

— **La Sécurité :**

Les réseaux sans fil sont vulnérables aux menaces de sécurité telles que le piratage et l'écoute clandestine. Des protocoles de cryptage et d'autres mesures de sécurité sont utilisés pour protéger les réseaux sans fil de ces menaces.

— **L'itinérance :**

L'itinérance fait référence à la capacité d'un appareil sans fil à se déplacer de manière transparente entre différents points d'accès sans perdre la connectivité.

— **L'Évolutivité :**

Les réseaux sans fil doivent être conçus pour s'adapter à l'augmentation de nombre d'appareils et d'utilisateurs sur le réseau, le réseau doit être en mesure de gérer le trafic supplémentaire sans dégradation des performances.

— **L'Efficacité énergétique :**

Les réseaux sans fil doivent être conçus pour minimiser la consommation d'énergie et réduire l'impact environnemental.

### 2.1.4 Types de réseaux sans fil

Il existe de nombreuses normes et technologies apparues dans le domaine des réseaux sans fil, les plus importantes d'entre elles sont mentionnées dans la **figure 2.1**.

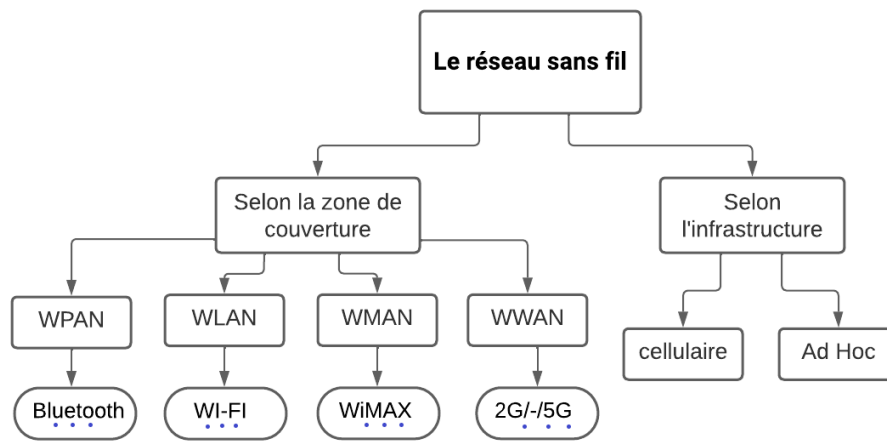


FIGURE 2.1 – Types de réseaux sans fil.

#### 2.1.4.1 Type de réseaux selon la zone de couverture

##### — Réseaux personnels sans fil (WPAN)

Il s'agit de réseaux sans fil à courte portée qui connectent des appareils dans une petite zone. La portée d'un WPAN peut aller jusqu'à environ 30 pieds (Environ 9 mètres), la technologie utilisée pour la communication dans ce type de réseau est le bluetooth[2].

La nécessité pour les appareils personnels de communiquer sans fil entre eux, sans infrastructure établie, a conduit à l'émergence des réseaux personnels (PAN)[10].

##### — Réseau local sans fil (WLAN)

Il s'agit de réseaux sans fil qui utilisent des ondes radio. Il y a généralement au moins un câble qui permet d'accéder à l'internet jusqu'au routeur, qui diffuse ensuite le signal sans fil vers d'autres appareils. Les WLAN sont utilisés pour se connecter aux ressources locales et à l'internet. La portée peut être limitée à une seule pièce ou à une maison, ou s'étendre à l'ensemble d'un bâtiment ou d'un campus[2].

Le WLAN permet une transmission à faible coût avec une plus grande largeur de bande[7].

##### — Réseau métropolitain sans fil (WMAN)

Groupe de réseaux qui fournit une connectivité sans fil à une zone métropolitaine. L'objectif du WMAN est d'étendre la zone couverte par le réseau LAN de manière à ce que le réseau soit rentable et supporte une vitesse élevée, sans étendre la connexion câblée dans un réseau[7].

##### — Réseaux étendus sans fil (WWAN)

Ils peuvent être maintenus sur de vastes zones, telles que des villes ou des pays, par l'intermédiaire de plusieurs systèmes de satellites, d'antennes ou de signaux de téléphonie mobile. Avec une zone de couverture étendue, les WWAN permettent de rester connecté lorsque d'autres formes d'accès au réseau sans fil ne sont pas disponibles[2].

#### 2.1.4.2 Type de réseaux selon l'Infrastructure

##### — Les réseaux Ad hoc

Un réseau ad hoc est un ensemble de nœuds mobiles sans fil formant dynamiquement un réseau temporaire sans l'utilisation d'une infrastructure de réseau ou d'une station de base

existante[4]. Les réseaux sans fil ad hoc peuvent être déployés rapidement n'importe où et à tout instant parce qu'ils éliminent la complexité de la mise en place d'une infrastructure. Ces réseaux trouvent des applications dans plusieurs domaines tels que les communications militaires (établissement d'une communication entre un groupe de soldats pour des opérations tactiques), les systèmes d'urgence (par exemple, établissement d'une communication entre le personnel de secours lors du tremblement de terre en Turquie et en Syrie ou dans d'autres zones touchées par des catastrophes). Un réseau sans fil ad hoc est un réseau sans fil composé de dispositifs informatiques mobiles qui utilisent la transmission sans fil pour communiquer, sans infrastructure fixe (une administration centrale telle qu'une station de base dans un réseau cellulaire sans fil ou un point d'accès dans un réseau local sans fil)[10].

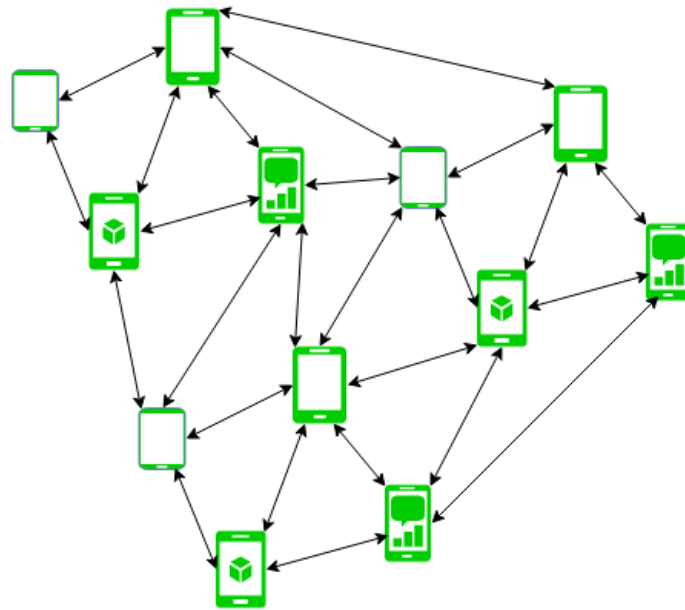


Figure - Mobile Ad Hoc Network

FIGURE 2.2 – Un réseau Ad hoc[4].

### — Les réseaux cellulaire

Les réseaux cellulaires sont basés sur une topologie centralisée, cette technologie consiste à diviser la zone totale en cellules, chaque cellule étant équipée d'une station de base.

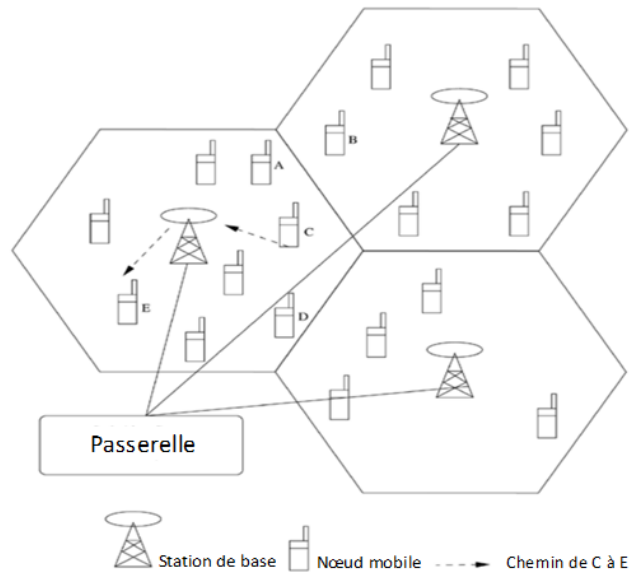


FIGURE 2.3 – Un Réseau cellulaire.

## 2.2 Le Réseau Ad hoc

### 2.2.1 Application des réseaux sans fil ad hoc

Les réseaux sans fil ad hoc, en raison de leur déploiement rapide et économiquement moins exigeant, trouvent des applications dans plusieurs domaines. En voici quelques-uns :

— **Applications militaires :**

Les réseaux sans fil ad hoc peuvent être très utiles pour établir une communication entre un groupe de soldats dans le cadre d'opérations tactiques. La mise en place d'une infrastructure fixe pour la communication entre un groupe de soldats en territoire ennemi ou sur des terrains inhospitaliers peut s'avérer impossible. Les réseaux sans fil ad hoc fournissent rapidement le mécanisme de communication requis[10].

— **Informatique collaborative et distribuée :**

L'informatique collaborative et distribuée est un autre domaine dans lequel les réseaux sans fil ad hoc trouvent des applications. Prenons l'exemple d'un groupe de chercheurs qui souhaitent partager leurs résultats de recherche ou leurs documents de présentation lors d'une conférence, ou d'un conférencier qui distribue ses notes à la classe à la volée[10].

— **Opérations d'urgence :**

Les réseaux sans fil ad hoc sont très utiles dans les opérations d'urgence telles que la recherche et le sauvetage.

Les principaux facteurs qui favorisent les réseaux sans fil ad hoc pour de telles tâches sont l'auto-configuration du système avec un coût minimal[10]. Voici une comparaison entre le réseau cellulaire et le réseau Ad hoc

<b>Réseau cellulaire</b>	<b>Réseau Ad hoc</b>
Basé sur une infrastructure fixe	Sans infrastructure
Liaisons sans fil à saut unique	Liaisons sans fil à sauts multiples
Routage centralisé	Routage distribué
Coût et temps de déploiement élevés	Déploiement rapide et rentable
Les domaines d'application comprennent principalement les secteurs civils et commerciaux	Les domaines d'application comprennent les champs de bataille, les opérations de recherche et de sauvetage d'urgence et l'informatique collaborative.
Les hôtes mobiles sont relativement peu complexes	Les hôtes mobiles requièrent plus d'intelligence (ils doivent disposer d'un émetteur-récepteur ainsi que de capacités de routage/commutation).

TABLE 2.1 – Différences entre les réseaux cellulaires et les réseaux Ad hoc

## 2.2.2 Types de réseaux Ad Hoc sans fil

On distingue principalement Trois (3) types de réseaux, à savoir :

### 2.2.2.1 Réseaux mobiles ad hoc (MANET)

Les réseaux mobiles ad hoc (MANET) sont devenus l'un des domaines de recherche dont la croissance est la plus rapide. Ce nouveau type de réseau auto-organisé associe la communication sans fil à un degré élevé de mobilité des nœuds. Ils sont dépourvus d'infrastructures telles que des points d'accès ou des stations de base[11]. Parmi les principales applications des MANET sont :

- 1- Applications de défense.
- 2- Applications d'aide au sauvetage en cas de catastrophe.
- 3- Applications civiles (environnement, transport, surveillance).
- 4- Applications de recherche.

### 2.2.2.2 Réseaux ad hoc volants (FANET)

FANET est un type de MANET, et le réseau est formé par des véhicules aériens sans pilote (UAV) en tant que nœuds qui peut être piloté soit à distance par un pilote au sol soit de manière autonome par un ordinateur de bord.

### 2.2.2.3 Réseaux ad hoc véhiculaires (VANET)

VANET peut être considéré comme un cas particulier de MANET. Avec l'augmentation du nombre de véhicules dans les rues, les constructeurs automobiles recherchent des services à valeur ajoutée pour fournir à leurs clients une sécurité et des informations accrues. La communication véhiculaire (VC) joue un rôle majeur. La VC repose sur l'utilisation de radios à courte portée dans chaque véhicule, ce qui permet aux différents véhicules de communiquer entre eux et avec l'infrastructure routière. Ces véhicules formeraient alors une création des réseaux ad hoc dans les véhicules, communément appelés réseaux ad hoc véhiculaires (VANET)[11].

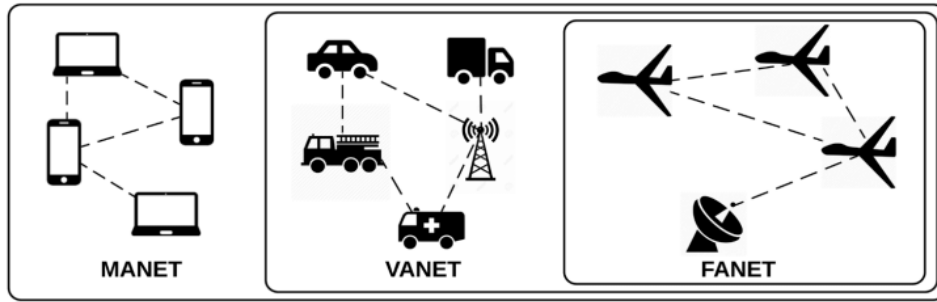


FIGURE 2.4 – Les types de réseaux Ad Hoc[6].

## 2.3 Le Réseau FANET

Les UAVs communiquent entre eux pour former un réseau auto-organisé, sans infrastructure préexistante telle qu'une station de base ou un contrôleur centralisé. Voici quelques acronymes de noms de drones

- **RPV** : Remotely Piloted Vehicle (véhicule piloté à distance).
- **RPA** : Remotely Piloted Aircraft (Avion piloté à distance).
- **ROA** : Remotely Operated Aircraft (avion télécommandé).
- **UAS** : Unmanned Aircraft Systems (systèmes d'aéronefs sans pilote).

### 2.3.1 Les caractéristiques des FANETs

— **Mobilité des nœuds :**

Le degré de mobilité des drones est important par rapport à MANET et VANET. Les drones peuvent changer de place dans un intervalle de temps beaucoup plus court, ce qui peut entraîner des problèmes de communication entre les drones[8].

— **Densité des nœuds :**

Dans les réseaux FANET, les nœuds doivent être dispersés dans le ciel et séparés par de grandes distances, en raison de la nature du vol. Par conséquent, la densité des nœuds dans les réseaux FANET est beaucoup plus faible que dans les réseaux MANET et VANET.

— **Topologie du réseau :**

Dans les FANET, la topologie du réseau change fréquemment en raison du degré de mobilité plus élevé des drones.

— **Localisation :**

Il est difficile de déterminer la localisation précise des drones dans les FANET en raison de leur grande mobilité. Les données de localisation doivent être mises à jour dans des intervalles de temps très courts.

### 2.3.2 Les modes de communication entre les drones[8]

L'architecture de communication spécifie les règles et les mécanismes qui déterminent comment l'information circule entre le Ground Control Station (GCS) et plusieurs UAVs ou entre les UAVs. Nous distinguons quatre (4) types de communication dans FANET :

— **Communication directe entre drones :**

Un lien de communication direct peut être utilisé entre le GCS et chaque drone. Il s'agit de l'architecture la plus simple, dans laquelle le GCS agit comme un nœud central auquel tous les drones ou UAV sont connectés. En outre, le GCS représente la vulnérabilité de FANET, par exemple si le GCS rencontre des problèmes, l'ensemble du réseau de drones tombera en panne. Ce système de communication n'est donc pas robuste.

— **Communication entre drones via des réseaux de satellites :**

Pour communiquer entre deux points très éloignés, situés dans des régions où il est impossible d'avoir une infrastructure fixe, la communication par satellite est la meilleure solution. Les satellites peuvent assurer la communication entre le GCS et l'UAV. Ainsi, les communications entre UAV peuvent également passer de la même manière. Cependant, cette approche présente quelques points faibles, tels que le coût de la location du satellite. De plus, les drones et le GCS doivent être sur la ligne de vue du satellite.

— **Communication entre drones via des réseaux cellulaires :**

Ce type de communication basé sur une topologie centralisée, cette technologie consiste à découper un territoire en zones (cellules), chacune étant desservie par une station de base (le point central). Toutes les communications doivent passer par ce point central qui a pour rôle de les acheminer jusqu'à leur destination. Contrairement aux réseaux satellitaires, les réseaux cellulaires utilisent des émetteurs de faible puissance. Pour cela, il peut être une solution de faire communiquer les drones en utilisant l'infrastructure de l'opérateur téléphonique déjà existante afin d'éliminer le coût de déploiement.

— **Communication entre drones via des réseaux Ad-Hoc :**

Cette architecture de réseau fait partie du MANET dans lequel les nœuds communiquent entre eux sans avoir besoin d'une infrastructure centrale. Chaque drone est considéré comme un système final. Tous les drones doivent collaborer et s'organiser pour relayer l'information.

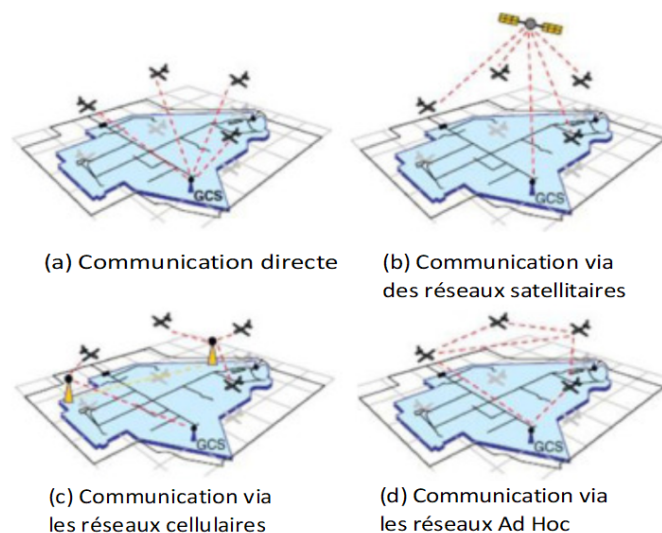


FIGURE 2.5 – Architectures de communication des drones

## 2.4 Surveillance à l'aide de drones

Les véhicules aériens sans pilote (UAV) ont été largement utilisés dans les applications militaires et civiles pour la surveillance, en raison de leur faible coût de déploiement. L'un des principaux avantages de l'utilisation des drones pour la surveillance est leur capacité à accéder à des zones difficiles d'accès, offrant un champ de vision plus large que les méthodes de surveillance traditionnelles. Les drones peuvent également opérer à différentes altitudes et se déplacer rapidement d'un endroit à l'autre, ce qui les rend plus flexibles que d'autres appareils de surveillance.

Les domaines d'application de la surveillance par drone sont nombreux. Les plus courantes sont les suivantes :

### 2.4.1 Applications militaires

- **Sécurité des frontières :**

Nous pouvons utiliser les drones pour détecter tout mouvement ou activité non autorisée.

- **Attaque et défense :**

Les drones sont couramment utilisés par les organisations militaires et de défense pour des missions de surveillance, ainsi qu'à des fins de ciblage et d'attaque.



FIGURE 2.6 – Utilisation des drones dans le domaine militaire

### 2.4.2 Applications civiles

- **Agriculture :**

Les agriculteurs peuvent utiliser les drones pour surveiller la santé des cultures et détecter les maladies dans leurs champs.



FIGURE 2.7 – Utilisation des drones dans l’agriculture

— **Recherche et sauvetage :**

Les drones peuvent être utilisés pour localiser des personnes disparues dans des zones difficiles d’accès.

— **Détection des incendies de forêt :**

Les applications de détection des incendies de forêt couvrent tous les cas où la surveillance de la chaleur et du risque d’incendie est nécessaire pour prévenir tout type de catastrophe.



FIGURE 2.8 – Utilisation des drones dans la Détection des incendies

# Conclusion

Les réseaux ad-hoc sont des systèmes autonomes qui forment un groupe de nœuds mobiles utilisant une transmission sans fil pour communiquer. Ils sont auto-organisés, auto-configurés et auto-contrôlés. Ce type de réseau peut être mis en place ou déployé n'importe où et à tout moment, car il ne nécessite qu'une infrastructure très simple et aucune administration centrale. Ces réseaux sont principalement utilisés par différents utilisateurs, tels que les militaires, les chercheurs et les étudiants[4].

Dans ce chapitre, nous parlons dans la section 2.1 des principes fondamentaux des réseaux sans fil, suivis par des caractéristiques de ces derniers, et enfin de cette section nous avons parlé sur une classification des réseaux sans fil. La deuxième section 2.2 parle sur les applications des réseaux Ad hoc, aussi leur classification. la section 2.3 parle spécifiquement sur les réseaux FANET. La dernière section 2.4 traite l'importance de l'utilisation des drones pour la surveillance dans différents secteurs. L'une des propriétés les plus importantes des réseaux sans fil ad hoc est le modèle de mobilité associé aux nœuds, C'est sur ce point que nous nous concentrerons dans le prochain chapitre.

# Chapitre 3

## Étude comparative des modèles de mobilité

### 3.1 Introduction

La mobilité des nœuds est une caractéristique importante dans les scénarios et les applications des réseaux sans fil. Dans les réseaux WLAN, les stations sans fil sont principalement des appareils mobiles, tels que des ordinateurs portables, des PDAs, etc. Dans les réseaux Ad hoc, les nœuds du réseau sont généralement mobiles. Les nœuds peuvent être des soldats se déplaçant sur le champ de bataille, des membres d'une équipe de secours se déplaçant dans une zone sinistrée ou un essaim de drones en mission de surveillance. La mobilité joue également un rôle dans les réseaux de capteurs sans fil, dans certains scénarios. Par exemple, si des capteurs sans fil sont montés sur des animaux à des fins de suivi.

Dans ce chapitre, nous allons concentrer sur les modèles de mobilité individuelle des UAVs, en commençant par motiver leur importance dans le processus d'évaluation des performances du réseau. Nous examinerons ensuite les modèles de mobilité existants. Enfin, nous les comparerons.

### 3.2 Classification des modèles de mobilité

Les modèles de mobilité ont pour principal objectif de mimer certains types de mobilité (humaine, véhiculaire, animale, etc.). Il existe plusieurs classifications des modèles de mobilité, dont les plus importantes sont les suivantes :

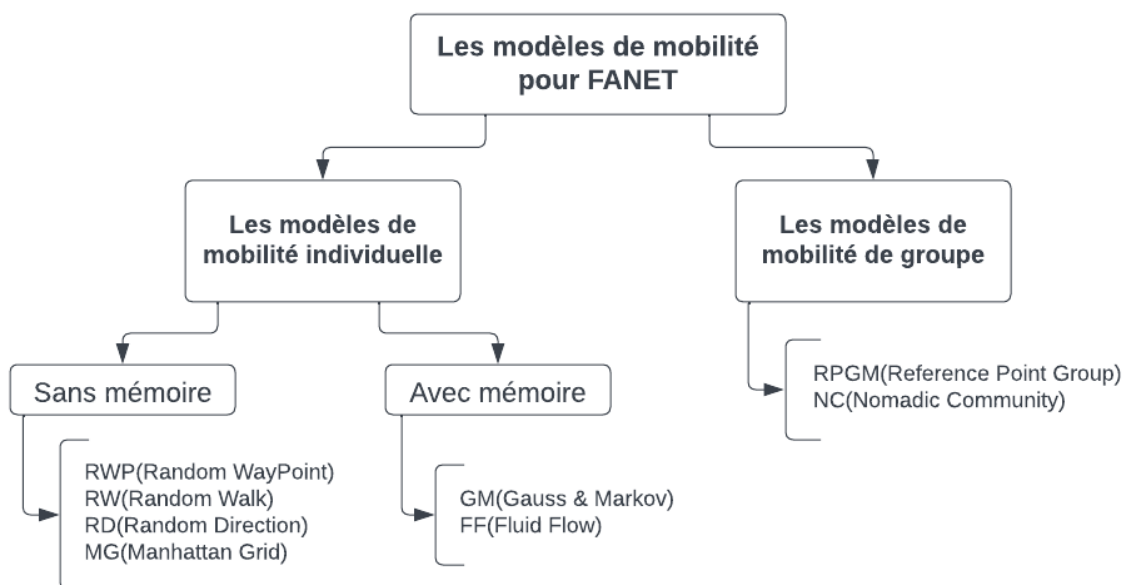


FIGURE 3.1 – La première classification des modèles de mobilité

### 3.2.1 Les modèles de mobilité individuelle

Ce type se concentre sur le mouvement et le comportement d'un seul UAV, en tenant compte d'un groupe de facteurs tels que l'altitude de vol, la trajectoire de vol, la vitesse de vol et l'évitement d'obstacles.

### 3.2.2 Les modèles de mobilité de groupe

Ce modèle se concentre sur le comportement d'un groupe d'UAV en tenant compte de facteurs tels que la communication, la coordination et l'évitement des collisions.

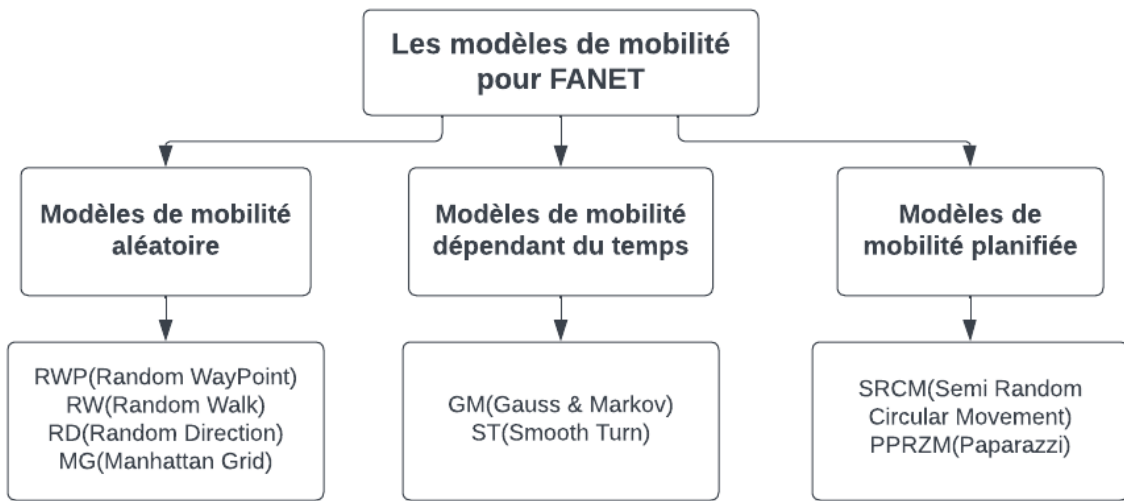


FIGURE 3.2 – La deuxième classification des modèles de mobilité

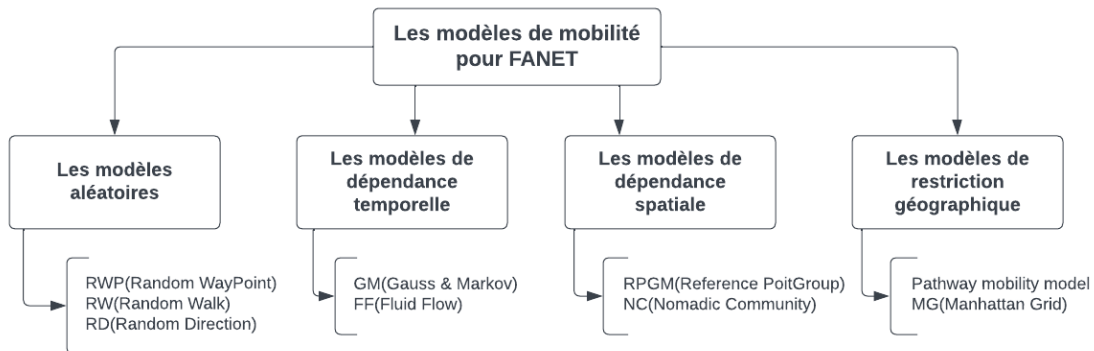


FIGURE 3.3 – La troisième classification des modèles de mobilité

## 3.3 Les modèles de mobilité aléatoire

De nombreuses entités dans la nature se déplacent de manière extrêmement imprévisible. Dans les modèles de mobilité basés sur le hasard, les nœuds mobiles se déplacent librement sans restriction et de manière aléatoire. Cela signifie que la destination, la vitesse et la direction sont toutes choisies au hasard. Nous avons choisi le modèle Random Waypoint très couramment utilisé dans les travaux de simulation. Avant de les expliquer, nous faisons quelques définitions importantes[4].

### 3.3.1 Définitions

Dans cette section, nous présentons les définitions et la terminologie de base qui seront utilisées pour décrire les différents modèles de mobilité aléatoire[3].

— **Un domaine spatial dans lequel les nœuds se déplacent :**

Le domaine spatial est généralement une région  $R$  de l'espace uni, bi ou tridimensionnel. Une définition informelle (par exemple, un ensemble de routes est défini, et les nœuds sont contraints de se déplacer uniquement le long des routes)[3].

— **La position initiale des nœuds :**

La position des nœuds au début doit être déterminée. Généralement, cela se fait en sélectionnant aléatoirement les positions des nœuds selon une certaine distribution de probabilité spatiale, la distribution uniforme des nœuds étant le choix le plus courant[3].

— **Comment effectuer un déplacement :**

Un déplacement peut être défini de plusieurs manières : par exemple, en spécifiant un point de destination et un chemin géographique - la trajectoire - reliant la position actuelle du nœud au point de destination. Notez que le point de destination et la trajectoire doivent être entièrement contenus dans le domaine spatial  $R$ . Il est également possible de définir la direction du mouvement et la durée du voyage[3].

— **Comment choisir la vitesse :**

La vitesse d'un trajet est généralement choisie au hasard. Un choix courant consiste à sélectionner la vitesse uniformément au hasard dans un intervalle  $[v_{\min}, v_{\max}]$ , où  $v_{\min}$  et  $v_{\max}$  représentent respectivement la vitesse minimale et maximale possible[3].

— **La transition d'un trajet à l'autre :**

Une règle de transition courante est basée sur la notion de temps de pause, c'est-à-dire qu'un nœud est supposé rester stationnaire au point de destination pendant un certain temps avant de commencer le voyage suivant[3].

— **La règle de la frontière :**

dans certains modèles de mobilité, il est possible qu'un nœud atteigne la frontière du domaine spatial  $R$  au cours d'un déplacement. Dans ce cas, puisque les nœuds ne sont pas autorisés à sortir de  $R$ , une règle de frontière doit être définie pour décrire comment gérer cette situation. Une règle de frontière typique est la réflexion[3].

## 3.3.2 Le modèle Random Waypoint (RWP)

### 3.3.2.1 Introduction

Le modèle Random WayPoint a été proposé pour la première fois par Johnson et Maltz. Il est rapidement devenu un modèle de mobilité "de référence" pour évaluer les protocoles de routage MANET. Le succès de ce modèle de mobilité s'explique par le fait qu'il peut être considéré comme une première tentative de définition d'un modèle de mobilité simple visant à modéliser le mouvement humain intentionnel, qui fait maintenant partie de la norme IEEE 802.11. Le modèle RWP appartient à la classe des modèles de mobilité individuelles. En particulier, cela signifie que la mobilité des différents nœuds est modélisée par des processus stochastiques indépendants[2].

### 3.3.2.2 Principe de fonctionnement[3]

Le modèle de mobilité RWP dans un domaine spatial d-dimensionnel  $R$  est défini par la sélection initiale de la position du nœud de manière uniforme et aléatoire dans  $R$ . Après un temps de pause prédéfini  $t_p$ , choisi aléatoirement par le logiciel de simulation selon une distribution de probabilité (distribution uniforme ou exponentielle, etc.), le nœud sélectionne une destination - appelée Waypoint - uniformément au hasard dans  $R$ , et commence à se déplacer le long d'une trajectoire droite vers le point de passage avec une vitesse constante  $v$  choisie uniformément au hasard dans un intervalle  $[v_{min}, v_{max}]$ , où  $v_{min}$  et  $v_{max}$  représentent la vitesse minimale et la vitesse maximale, respectivement. Une fois le point de passage atteint, le nœud fait une pause au point de passage pendant le temps  $t_p$ . Ensuite, il commence un nouveau trajet selon les mêmes règles. Plus formellement, un nœud mobile RWP est défini par le processus stochastique suivant :

$$\{D_i, T_i, V_i\}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots,$$

Où  $D_i$  est une variable aléatoire d-dimensionnelle correspondant aux coordonnées du  $i$ ème Waypoint (le point de destination doit être inclus dans  $R$ ),  $T_i$  est le temps de pause au  $i$ ème Waypoint, et  $V_i$  est une variable correspondant à la vitesse du nœud (Vélocité) choisie au hasard dans  $[v_{min}, v_{max}]$  pendant le voyage vers le  $i$ ème Waypoint. La position du nœud initial  $D_0$  est également choisie uniformément au hasard dans  $R$ . Un exemple de mobilité RWP dans le carré unitaire  $R = [0, 1]^2$  est illustré dans la figure 3.4 suivante, le point de départ étant le point noir. La figure présente la trajectoire suivie par le nœud au cours de 11 étapes de mobilité.

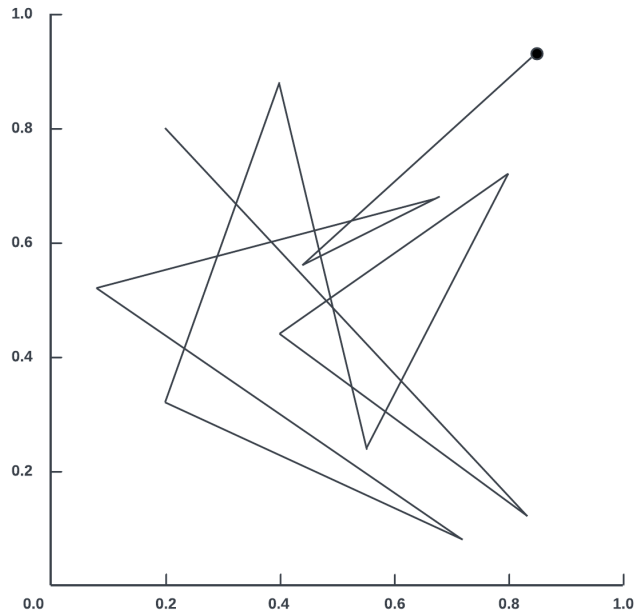


FIGURE 3.4 – Un exemple de mobilité RWP bidimensionnelle

Dans ce modèle, nous avons deux paramètres clés,  $V_{max}$  et  $T_{pause}$ , qui déterminent le comportement des nœuds en matière de mobilité. Si le  $V_{max}$  est petit et le  $T_{pause}$  long, la topologie du réseau ad hoc devient relativement stable. En revanche, si le nœud se déplace rapidement (c'est-à-dire si le  $V_{max}$  est grand) et que le  $T_{pause}$  est petit, la topologie devrait être très dynamique[4]. Le choix aléatoire du temps de pause a pour but de simuler le comportement imprévisible des modèles de mobilité dans le monde réel.

Johansson. A proposé la métrique de mobilité pour capturer et quantifier cette notion de vitesse du nœuds. La mesure de la vitesse relative entre les nœuds  $i$  et  $j$  à l'instant  $t$  est la suivante :

$$RS(i,j,t) = |V_i(t) - V_j(t)|$$

### 3.3.2.3 Propriétés du modèle RWP

Nous présenterons une caractérisation de la vitesse nodale moyenne pour un réseau mobile RWP.

#### — La vitesse nodale moyenne du modèle RWP :

La vitesse nodale moyenne stationnaire, qui est formellement définie comme suit. Supposons que  $n$  nœuds se déplacent indépendamment dans un domaine spatial  $R$  selon le modèle de mobilité RWP, et désignons par  $v_i(t)$  la vitesse instantanée du  $i$ ème nœud à l'instant  $t$ . La vitesse nodale moyenne stationnaire  $V_{rwp}$  est définie comme suit[3]

$$V_{RWP} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n v_i(t)}{n}$$

### 3.3.2.4 Limites du modèle Random Way Point (RWP)

Les deux principales limites du modèle de mobilité RWP sont les suivantes :

— **Modèle non réaliste :**

Dans ce type de modèle de mobilité, des arrêts et des départs soudains peuvent se produire. De plus, un changement excessif de direction peut se produire en raison du contrôle aléatoire de la vitesse et de la direction. C'est l'une des raisons pour lesquelles le Random Way Point est considéré comme un modèle de mobilité non réaliste.

— **L'effet de frontière :**

Révèle que les trajectoires d'un nœud mobile RWP se déplaçant dans une région limitée sont plus susceptibles de traverser le centre que la frontière du domaine de mouvement R. En d'autres termes, la distribution spatiale des nœuds stationnaires du RWP dans un domaine limité n'est pas uniforme, un nœud mobile RWP est relativement plus susceptible d'être positionné au centre qu'à la frontière de R. Le fait que la densité spatiale des nœuds à la frontière soit relativement faible est connu sous le nom d'effet de frontière. Par conséquent, la règle de la frontière est rarement appliquée (réflexion ou autre règle)[2].

## 3.4 Les modèles de dépendance temporelle

Dans le modèle RWP, la vitesse d'un nœud mobile est un mécanisme aléatoire sans mémoire, c'est-à-dire que la vitesse à l'époque actuelle est indépendante de l'époque précédente. Par conséquent, certains comportements de mobilité extrêmes, tels que l'arrêt soudain ou l'accélération soudaine, peuvent fréquemment se produire dans le modèle à points de cheminement aléatoires. Cependant, dans de nombreux scénarios réels, la vitesse des véhicules s'accélère progressivement. C'est ce qui intéresse ce type de modèle, en plus du fait que le mouvement d'un nœud mobile est susceptible d'être affecté par l'historique de ses mouvements. Pour bien expliquer comment ça fonctionne cette classe, Nous avons choisi le modèle de mobilité de Gauss Markov[4].

### 3.4.1 Le modèle de mobilité de Gauss Markov

Le modèle de mobilité de Gauss-Markov (GM) est un modèle de mobilité largement utilisé, connu pour sa mémoire qui permet un mouvement souple des nœuds, la vitesse et la direction à un pas de temps donné dépendent de manière probabiliste de la vitesse et de la direction au pas de temps précédent. En outre, les nœuds mobiles sont forcés de s'éloigner des limites de la simulation afin d'éviter les mouvements non naturels tels que les rebonds sur les limites de la simulation. Cela se fait à l'aide d'une zone tampon définie comme la région entre les limites de la simulation et la zone intérieure. Au départ, chaque nœud mobile se voit attribuer une position, une vitesse et un angle de direction. La vitesse et la direction sont mises à jour à chaque étape à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_n &= \alpha S_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{S} + \sqrt{(1 - \alpha)Sx_{n-1}} \\ \mathbf{d}_n &= \alpha d_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{d} + \sqrt{(1 - \alpha)dx_{n-1}} \end{aligned}$$

Où  $s_n$  est la vitesse et  $d_n$  la direction au pas de temps  $n$ . Le mémoire du modèle est contrôlée par le paramètre  $\alpha$  qui varie entre 0 et 1,  $s_{n-1}$  et  $d_{n-1}$  représentent sa vitesse et sa direction précédentes au pas de temps  $n-1$ , Les termes  $(1-\alpha)^{-s}$  et  $(1-\alpha)^{-d}$  représentent la vitesse et la direction moyennes de tous les nœuds mobiles du réseau au pas de temps  $n-1$ . Tandis que  $s_{xn-1}$  et  $d_{xn-1}$  sont des variables aléatoires issues d'une distribution gaussienne (distribution normale).

Lorsque  $\alpha$  est proche de zéro, la mobilité de l'utilisateur tend à suivre un comportement très aléatoire. Si  $\alpha$  augmente, l'incertitude du mouvement sera plus faible et les vitesses et directions au cours des intervalles de temps précédents auront un impact plus important sur la sélection des valeurs futures, ce qui permettra au modèle de mobilité d'être plus dépendant du temps. Ces termes  $(1-\alpha)^{-s}$  et  $(1-\alpha)^{-d}$  sont ajoutés à l'équation pour fournir une valeur de référence de vitesse et de direction pour le nœud, ce qui permet d'éviter que sa vitesse et sa direction ne s'écartent trop de la vitesse et de la direction de tous les nœuds du réseau[9].

Il est important de noter qu'il s'agit d'un modèle de mobilité bidimensionnel dans lequel les positions des nœuds mobiles sont mises à jour par les équations :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_n &= x_{n-1} + S_{n-1} \cos(d_{n-1}) \\ \mathbf{y}_n &= y_{n-1} + S_{n-1} \sin(d_{n-1}) \end{aligned}$$

Où  $(x_n, y_n)$  est la position sur le plan  $xy$ . Lorsqu'un nœud mobile se trouve à proximité d'un bord, il en est éloigné en modifiant la direction moyenne  $-d$  en fonction des secteurs de la zone tampon indiqués dans la figure suivante. La zone tampon comporte 8 secteurs distincts. Lorsqu'un nœud entre dans la zone tampon, le secteur dans lequel il réside doit être déterminé afin de l'éloigner des limites. Par exemple, lorsque le nœud mobile est proche du bord droit de la grille de simulation, la valeur  $-d$  est modifiée à 180 degrés. Ainsi, la nouvelle direction du Mobile Node (MN) s'éloigne du bord droit de la grille de simulation[5].

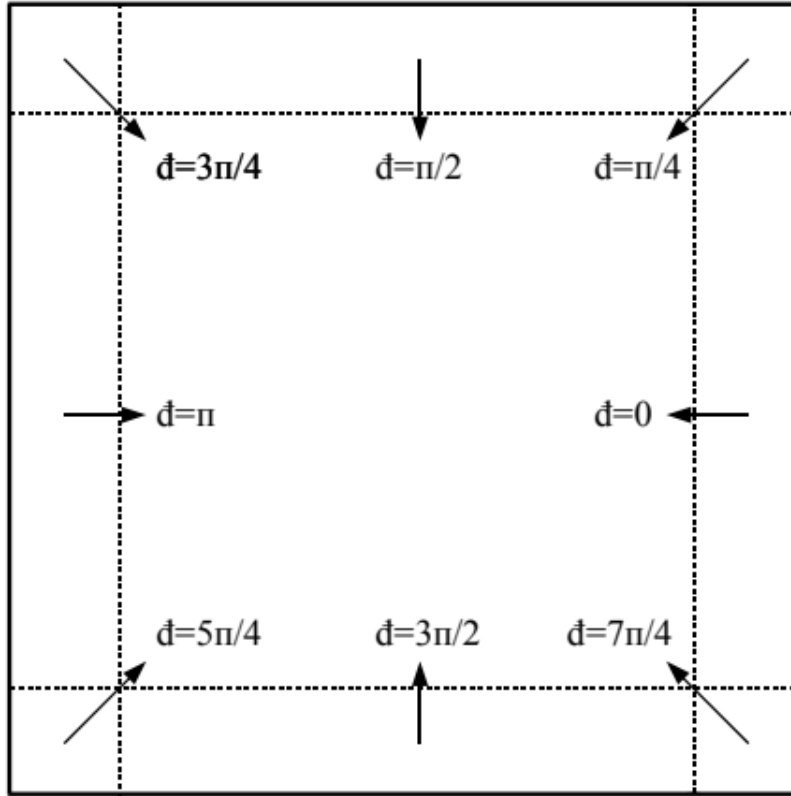


FIGURE 3.5 – La zone tampon sectorisée du modèle de mobilité de Gauss-Markov

Dans le modèle de mobilité de Gauss et de Markov en 3D (3D-GMMM), les nœuds se déplacent à l'intérieur d'une boîte de simulation tridimensionnelle. Le mouvement dans la direction  $z$  est contrôlé par l'angle  $p_n$  donné par

$$P_n = \alpha P_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{P} + \sqrt{(1 - \alpha)P}x_{n-1}$$

Où  $p_n \in [-\pi/2, +\pi/2]$ . La sectorisation de la zone tampon en 3D-GMMM donnerait 26 secteurs en raison de la troisième dimension.

Le principe de sectorisation dans le GM en 2D et 3D n'est pas encore implémenté dans OMNet++.

### 3.4.2 Avantages du GM

— **Mouvement réaliste :**

Le modèle de Gauss-Markov est basé sur des observations réelles des modèles de mobilité humaine. Le fait d'avoir une mémoire dans le GMMM réduit la possibilité de mouvements brusques des nœuds mobiles, comme cela est observé avec d'autres modèles de mobilité tels que les modèles de mobilité basés sur l'aléatoire.

— **Simplicité :**

Le modèle de Gauss-Markov est relativement simple à mettre en œuvre et ne nécessite que quelques paramètres d'entrée, ce qui le rend plus accessible aux chercheurs ayant une expérience limitée de la programmation.

— **Flexibilité :**

Le modèle de Gauss-Markov peut être adapté à différents scénarios. Par exemple, les cher-

cheurs peuvent l'utiliser pour simuler des modèles de mobilité pour les piétons, les véhicules ou les drones.

### 3.4.3 Limites du modèle de mobilité GM

— **Manque de diversité :**

Le modèle de Gauss-Markov génère des modèles de mobilité basés sur quelques hypothèses statistiques concernant les mouvements des utilisateurs, telles que la vitesse moyenne et la vitesse maximale. Cependant, ces hypothèses peuvent ne pas refléter la diversité des schémas de mobilité humaine dans les scénarios réels. En outre, les modèles de mobilité dans le monde réel peuvent être très divers et complexes, et peuvent dépendre de facteurs tels que l'âge, le sexe et le statut social de l'utilisateur, ainsi que de l'environnement dans lequel il se déplace. Par exemple, les habitants des zones urbaines peuvent avoir des schémas de mobilité différents de ceux des zones rurales.

— **Absence d'interactions dynamiques :**

Le modèle de Gauss-Markov ne prend pas en compte les interactions dynamiques entre les utilisateurs ou avec l'environnement. Par exemple, il ne tient pas compte de l'impact de la congestion ou des obstacles sur les schémas de mobilité des utilisateurs.

— **Précision temporelle limitée :**

Le modèle de Gauss-Markov suppose que les schémas de mobilité des utilisateurs sont homogènes dans le temps, c'est-à-dire que les mêmes statistiques de mobilité s'appliquent à tout moment. Cependant, dans les scénarios réels, les schémas de mobilité des utilisateurs peuvent changer au fil du temps en raison de facteurs tels que les conditions météorologiques, les heures de pointe ou les événements.

Tous ces points peuvent limiter le réalisme des modèles de mobilité générés et affecter la précision des résultats de la simulation.

## 3.5 La différence entre les modèles aléatoires et les modèles réalistes

Les travaux de Wang et al[6], présentent plusieurs raisons d'utiliser des modèles de mobilité réalistes plutôt que de simples modèles aléatoires :

- Le modèle de mobilité est un facteur important affectant les performances d'un FANET, il est donc important d'établir un modèle de mouvement réaliste.
- La distribution de l'emplacement des nœuds a un impact sur de nombreuses caractéristiques du réseau telles que la connectivité du réseau, la longueur moyenne du chemin et la capacité du réseau.
- Les modèles aléatoires peuvent être très différents des modèles de mouvement réels trouvés dans le monde réel.
- Enfin, les modèles de mobilité aléatoires sont presque toujours basés sur des schémas linéaires simples qui diffèrent de nombreux scénarios réels. Les drones imitent généralement le mouvement de volées d'oiseaux ou de bancs de poissons. Dans ce cas, ils doivent se déplacer le long

de trajectoires continues et courbes plutôt que sur une simple ligne droite.

### 3.6 Influence des modèles de mobilité sur les drones

Les modèles de mobilité jouent un rôle important dans la conception, le développement et le déploiement des drones. Un modèle de mobilité peut être utilisé pour prédire la trajectoire du drone, sa vitesse et d'autres paramètres. L'une des principales utilisations des modèles de mobilité dans les drones est la planification et l'optimisation des itinéraires. En utilisant un modèle de mobilité, il est possible de calculer la trajectoire optimale qu'un drone doit emprunter pour atteindre sa destination de la manière la plus efficace possible. Cela permet de réduire la consommation d'énergie, d'augmenter le temps de vol et d'améliorer les performances globales. Les modèles de mobilité peuvent également être utilisés pour simuler le comportement des drones dans différents environnements. Cela peut être utile pour tester et valider la conception des drones, ainsi que pour prédire l'impact de facteurs environnementaux tels que les conditions météorologiques.

### Conclusion

Un modèle de mobilité doit tenter d'imiter les mouvements des nœuds mobiles réels, le choix du modèle de mobilité pour les drones doit être adapté à chaque mission et application spécifique. L'objectif de ce chapitre est de présenter un certain nombre de modèles de mobilité afin d'offrir aux chercheurs des choix plus éclairés lorsqu'ils décident d'un modèle de mobilité à utiliser dans leurs évaluations de performance, et de présenter des résultats de simulation qui illustrent l'importance du choix d'un modèle de mobilité dans la simulation d'un protocole de réseau ad hoc.

# Chapitre 4

## Proposition d'une méthode de surveillance en utilisant les drones

### 4.1 Introduction

Le drone de surveillance constitue de nos jours un système technologique pour assurer la sécurité des biens et des personnes. L'une des caractéristiques techniques d'intérêt des drones, pour assurer la continuité de la mission de surveillance, est leur consommation d'énergie. C'est sur ce point que nous allons nous concentrer dans ce chapitre.

Nous voulons proposer une nouvelle méthode de surveillance à l'aide des drones, on peut aussi le considérer comme une amélioration du deux modèles de mobilité RWP et GM. Dans la section 4.3, de ce chapitre, nous allons expliquer l'idée de base de notre méthode, que nous développerons, suivie également de ses avantages dans la section 4.4.

### 4.2 L'objectif de la méthode

Dans un système de surveillance à l'aide de drones, la consommation d'énergie est considérée comme un point sensible, et qui joue un rôle important dans la précision de la qualité de ce système. Notre principal objectif est de créer une méthode de surveillance en utilisant les drones, et que cette méthode doit minimiser la consommation d'énergie.

### 4.3 L'idée de base

Dans notre nouvelle méthode, nous allons utiliser le terme « clustering » qui consiste à regrouper des objets similaires. On a plusieurs types, dans notre étude nous avons choisis un type très connu qui est le « Clustering hiérarchique (top-down) ». Le nombre de niveaux dans notre méthode est fixe, qui est égal à trois (03).

Les paramètres retenus sont énumérés ci-après : La zone à surveiller  $(x, y)$ , le nombre total de drones. De ce fait, la démarche retenue est décrite dans les trois (03) phases suivantes :

### 4.3.1 Déterminer les tâches de chaque niveau

Nous divisons les drones qui vont participer à la surveillance sur trois niveaux :

1- Le premier niveau (le plus haut niveau) contient un seul drone qu'on l'appelle Master, qui a pour missions : **(A)** Divisé la zone complète à surveiller en quatre (04) sous-zones, puis envoi au drones du deuxième niveau, qui sont au nombre quatre (04) des sous-zones plus haut citées, les points  $(x_i, y_i)$ . **(B)** Envoyé aux quatre (04) drones le nombre de drones du troisième niveau qui leurs appartient (c.-à-d, le nombre de drones de chaque sous-zone qui fait la surveillance). **(C)** Collecté les données à partir des quatre drones de deuxième niveau.

2- Le deuxième niveau contient quatre (04) drones, chaque drone est le leader de sa sous-zone, chacun de ces quatre (04) drones est chargé de : **(A)** Le leader reçoive les coordonnées  $(x_i, y_i)$ , ainsi il reçoive aussi le nombre de drones qui fait la surveillance et qu'il lui appartient (ces paramètres sont envoyés par le master), **(B)** Envoyer à chaque drone de surveillance du troisième niveau les points  $(x_i, y_i)$ , **(C)** Collecte des données à partir des drones du troisième niveau qui lui appartient, **(D)** Suivre une stratégie sur le cas où la présence des difficultés liées à la faiblesse de batteries ou de panne imprévue, l'objectif de cette dernière tâche est d'assurer la continuité de la mission de surveillance.

3- Le troisième niveau (bas niveau) contient les drones qui font la surveillance des sous-zones. Le drone de surveillance doit informer le leader s'il y a des changements, ainsi si le niveau de la batterie est faible.

#### **Remarque :**

Nous avons deux méthodes pour choisir le Master et les leaders :

1. La première méthode est d'utiliser un algorithme d'élection (Par exemple l'algorithme de Chang et Roberts (1979) ou l'algorithme de Bully). Cette méthode a un inconvénient, consistant à l'augmentation de l'énergie consommé à cause de ses calculs supplémentaires, liés à l'envoi et la réception des messages d'élection.
2. La deuxième méthode est d'utiliser par convention le master qui à l'indice 0 (Host[0]) et les leaders à partir de l'indice 1 à 4 (Host[1..4]).

Dans les pseudos algorithmes ci-dessous nous avons choisir la deuxième méthode.

---

**Algorithm 1:** Division des sous-zones

---

**Input:** nbrDrones, ConstraintMaxX, ConstraintMaxY;

```
1 Host[0].isMaster := true;
2 if (1 <= nbrDrones <= 4) then
3   | nbrNiveau := 1;
4   | for (i = 0 à (nbrDrones -1)) do
5   |   | Host[i].isSurv := true; //Tous les drones fait la surveillance.
6 else if (5<= nbrDrones <13) then
7   | Host[0].isSurv := false;
8   | nbrNiveau := 2;
9   | for (i = 1 à (nbrDrones -1)) do
10  |   | Host[i].isSurv := true; //Tous les drones fait la surveillance sauf le master.
11 else
12  | Host[0].isSurv := false;
13  | nbrNiveau := 3;
14  | nbrSousZones := 4;
15  | for (i = 1 à 4) do
16  |   | Host[i].isLeader := true; //les leaders des sous-zones.
17  |   | Host[i].leaderOf := Host[i] mod 4;
18  |   | Host[i].isSurv := false;
19  | for (j = 5 à (nbrDrones -1)) do
20  |   | Host[j].isSurv := true; //Les drones fait la surveillance.
21 Affectation des nœuds au zone (nbrDrones, ConstraintMaxX, ConstraintMaxY, nbrNiveau);
```

---

### 4.3.2 Affectation des drones aux zones

Le principe d'affectation des drones au sous-zone est d'affecter les drones qui ont un nombre d'identification successive dans des sous-zone différentes, En d'autres termes, à chaque itération en inclut le drone actuel dans une sous-zone différente que la précédente, on répète ce processus jusqu'à ce que le nombre de drone soit égal a zéro (0).

Le calcul des coordonnées (x, y) est fait comme suit :

Par convention, le **Master** doit être mobile dans toute la zone que vous souhaitez surveiller.

---

**Algorithm 2:** Affectation des drones aux zones

---

```
Input: nbrDrones, ConstraintMaxX, ConstraintMaxY, nbrNiveau ;
1 if (nbrNiveau = 1) then
2   for (i = 0 à (nbrDrones-1)) do
3     Host[i].minX := Host[i] * (ConstraintMaxX/nbrDrones);
4     Host[i].minY := 0;
5     Host[i].maxX := Host[i] + 1 * (ConstraintMaxX/ nbrDrones);
6     Host[i].maxY := ConstraintMaxY;
7 else
8   Host[0].minX := ConstraintMinX;
9   Host[0].minY := ConstraintMinY;
10  Host[0].maxX := ConstraintMaxX;
11  Host[0].maxY := ConstraintMaxY;
12  for (i = 1 à (nbrDrones-1)) do
13    inclusDans := Host[i] mod 4; if inclusDans = 1 then
14      Host[i].minX := 0;
15      Host[i].minY := 0;
16      Host[i].maxX := ConstraintMaxX / 2;
17      Host[i].maxY := ConstraintMaxY / 2;
18    else if inclusDans = 2 then
19      Host[i].minX := 0;
20      Host[i].minY := ConstraintMaxY / 2;
21      Host[i].maxX := ConstraintMaxX / 2;
22      Host[i].maxY := ConstraintMaxY;
23    else if inclusDans = 3 then
24      Host[i].minX := ConstraintMaxX / 2;
25      Host[i].minY := ConstraintMaxY / 2;
26      Host[i].maxX := ConstraintMaxX;
27      Host[i].maxY := ConstraintMaxY;
28    else
29      Host[0].minX := ConstraintMaxX / 2;
30      Host[0].minY := 0;
31      Host[0].maxX := ConstraintMaxX;
32      Host[0].maxY := ConstraintMaxY / 2;
```

---

### 4.3.3 le choix d'un modèle de mobilité

La troisième phase consiste à choisir un modèle de mobilité pour assurer une couverture complète de la zone. On peut considérer que cette phase est la phase d'amélioration des modèles de mobilité GM et RWP. Dans ces deux derniers modèles, déjà mentionné dans le chapitre 3, le drone a un mouvement dans toute la zone, ce qui rend la quantité d'énergie consommée importante.

Notre approche est de diminuer la mobilité de chaque drone par l'utilisation de la notion de clustering, la mobilité de drone est proportionnelle à la quantité d'énergie consommée par lui. Autrement dit, si nous réduisons la mobilité de chaque drone, cela sera suivi d'une diminution de l'énergie consommée.

## 4.4 Les avantages attendus

En nous montrant les avantages que nous attendons de notre méthode :

1. **Equilibrage de charge** : l'utilisation d'un modèle hiérarchique permet de diviser les tâches entre les différents niveaux dans ce système (le master qui déclenche la mission et fait les calculs, les leaders qui reçoivent les données, les drones esclaves qui fait la surveillance).
2. **Temps de surveillance** : la diminution de mobilité permet de sauvegarder plus d'énergie dans la batterie, ce qui entraîne une augmentation du temps de surveillance.
3. **Préservation de la batterie** : l'économie d'utilisation d'énergie permet d'augmenter la durée de vie de la batterie.
4. **Minimiser le nombre de message échangées** : la prédéfinition de Master et des leaders par leurs numéros, au lieu d'utiliser un algorithme d'élection, permet de minimiser le nombre de message échangés et donc permet une augmentation du temps de surveillance et de la durée de vie de la batterie.
5. **La flexibilité** : nous pouvons ajouter un nombre de drones si on a remarqué que l'ancien nombre de drones est insuffisant, comme on peut aussi réduire le nombre de drones.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre système « Clustering based » qui est un système de surveillance à l'aide de drones. La première section de ce chapitre est construite autour d'une description théorique détailler sur le système proposé, Il contient également un ensemble des pseudo algorithmes qui nous ont aidés de programmer ce système. Nous avons également parlé sur les avantages qui concernent ce système. L'amélioration de certains critères conduit à l'émergence des défaillances dans d'autres aspects.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter une simulation comparative entre les modèles de mobilité mentionné dans le troisième chapitre et notre nouveau modèle.

# Chapitre 5

## Simulation et analyse de performance

### 5.1 Introduction

Les avancées technologiques ont permis aux systèmes informatiques en général, et aux réseaux informatiques en particulier, d'évoluer et de devenir de plus en plus complexes. Pour résoudre les problèmes liés à un système donné, on fait appel à des protocoles, ou nous créons de nouveaux protocoles. Ces derniers doivent être testés et évalués pour les valider, nous pouvons faire ça à l'aide d'un outil de simulation. Le but de ce chapitre est de simuler les modèles de mobilité mentionnés dans les chapitres 3 et 4 avec le simulateur OMNet++, afin de faire une étude comparative pour évaluer la performance de ces méthodes.

Dans la section 4.2 nous allons expliquer les différentes techniques d'évaluation des performances, ou plutôt, nous allons présenter les moyennes possibles pour tester et évaluer les protocoles, dans la section 4.3 nous voulons parler brièvement sur le simulateur utilisé. Ensuite, la section 4.4 concerne la machine utilisée pour simuler les modèles concernés.

### 5.2 Les techniques d'évaluation des performances

Il existe différentes techniques pour l'évaluation des performances d'un système :

#### 5.2.1 Implémentation réelle

Le principe de cette technique est de faire des mesures et de les analyser directement sur un système réel. Cette technique permet de comprendre le vrai comportement du système. Mais elle n'est pas toujours réalisable à cause de plusieurs raisons :

1. **Coût élevé** : L'exécution d'un algorithme dans le réel peut nécessiter des ressources matérielles coûteuses, telles que des équipements spécifiques, des capteurs, dispositifs de surveillance ou des dispositifs de mesure, etc.
2. **Difficulté de contrôle** : Dans un environnement réel, il peut être difficile de contrôler toutes les variables et de reproduire exactement les mêmes conditions d'exécution pour chaque expérience. Les facteurs environnementaux, les interférences externes et d'autres variables non maîtrisables peuvent influencer les résultats et rendre difficile l'analyse précise de l'algorithme.
3. **Risques et sécurité** : Dans certains cas, l'exécution d'un algorithme dans le réel peut comporter des risques pour la sécurité. Par exemple, dans le domaine des drones, des erreurs d'exécution peuvent entraîner des accidents potentiellement dangereux. Il peut également y avoir des risques pour la confidentialité des données lors de l'utilisation de données réelles sensibles.

4. **Temps** : L'exécution d'un algorithme dans le réel peut prendre du temps, en particulier lorsque des contraintes de temps strictes sont présentes. Certaines expériences peuvent nécessiter des périodes d'observation prolongées pour collecter suffisamment de données.

## 5.2.2 Simulation

Cette technique est basée sur l'implémentation d'un modèle simplifié du système à l'aide d'un programme de simulation adéquat. Cette méthode traduit le comportement du système à évaluer d'une manière réaliste. La simulation permet en plus de visualiser les résultats sous forme de graphes faciles à analyser et à interpréter.

Afin d'évaluer la performance des modèles de mobilité étudiés nous avons besoin de les simuler pour présenter les résultats qui permettent de réaliser une étude comparative entre ces modèles et de tester leurs fonctionnements.

## 5.3 L'outil de simulation

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) est un environnement de simulation écrit en C++, open-source et basé sur la programmation orientée objet, utilisé pour modéliser, simuler et analyser les réseaux de communication. Il est largement utilisé dans les réseaux pour étudier le comportement des protocoles de communication, la performance des réseaux, les algorithmes de routage, les systèmes de communication sans fil, etc.

Des modèles de simulation sont alors développés par plusieurs personnes et groupes de recherche et que, indépendamment d'OMNeT++, chacun suit son propre cycle de développement. Ils sont souvent groupés sous forme de paquetage(s), qu'on appelle Framework. Parmi eux, on peut citer essentiellement INET Framework qui englobe un large ensemble de modèles implémentant divers protocoles tels que les protocoles Internet (TCP, UDP, IPv4, IPv6, ...), les protocoles de la couche liaison (Ethernet, PPP, IEEE 802.11, ...), aussi les modèles de mobilité tel que (RWP, GM, ...).

## 5.4 L'environnement de travail

Nous avons réalisé la simulation sous Windows10. Le laptop utilisé dont la configuration est suivante :

### Spécifications de l'appareil

Nom de l'appareil	DESKTOP-85V11H4
Processeur	Intel(R) Core(TM) i5-1035G1 CPU @ 1.00GHz 1.19 GHz
Mémoire RAM installée	12,0 Go (11,8 Go utilisable)

FIGURE 5.1 – Environnement matériel.

## 5.5 Simulation et résultats

Avant de lancer la simulation et analyser les résultats, nous sommes obligées de spécifier Les paramètres de simulation, ainsi que les modèles de mobilité que nous allons réaliser une comparaison entre eux.

### 5.5.1 Les paramètres de la simulation

On distingue deux (02) types de paramètres, tels-que : (A) les paramètres variables (c.-à-d. les paramètres qu'ils change durant les scenarios), (B) les paramètres fixes qui ne change jamais. Le tableau suivant représente les paramètres utilisés dans tous les scenarios que nous allons mentionner ci-dessous.

Les paramètres variables	Les paramètres fixes
Surface (750*750, 1000*1000, 1500*1500)m <sup>2</sup>	Protocole de routage : AODV
Nombre de nœuds [10,50]	La portée de communication = 200 m
La vitesse [10, 15] m/s	Le débit de transmission = 1Mb/s
Temps de pause [30, 80] ms	La production d'énergie = 1mW
	Capacité minimum d'arrêt d'un nœud = 0.1 J
	Alpha = 0,9
	Capacité de démarrage du nœud 1000J height

TABLE 5.1 – Les paramètres de la simulation

**Le protocole de routage (AODV) :** Le protocole utilisé est le protocole AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) est un protocole réactif appartenant à la famille des protocoles On-Demand, il est basé sur deux mécanismes, la découverte de route et la maintenance de route, La raison d'utiliser ce protocole est qu'il limite l'entête des paquets (overhead).

### 5.5.2 Les modèles de mobilité en comparaison

1. RWP.
2. GM.
3. Clustering RWP.
4. Clustering GM.

**Remarque :**

- Dans les scenarios qui concernent la comparaison entre deux modèles pour l'observation de l'EMC en fonction de la densité (nombre de nœuds), on fixe la surface à surveiller dans (1000m \* 1000m).
- Dans les scenarios qui concernent la comparaison entre deux modèles pour l'observation de l'EMC en fonction de la surface à surveiller, on fixe le nombre de nœuds à trente (30).

### 5.5.3 Les scenarios

#### Scenario 1 :

Dans ce scenario nous allons comparer les deux modèles de mobilité Gauss Markov et RWP, afin d'observer l'EMC en fonction de la variation du nombre de nœuds, et de déterminer le meilleur modèle entre ces deux.

Nœuds /EMC	GM	RWP
10	0,0778602	0,0741099
20	0,08755985	0,08220415
30	0,136503767	0,105934433
40	0,1134825	0,097070575
50	0,16981282	0,09380952

TABLE 5.2 – GM vs RWP (densité/EMC).

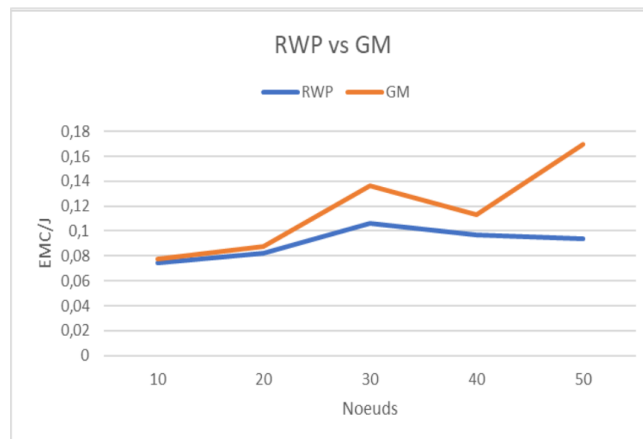


FIGURE 5.2 – RWP vs GM (densité/EMC).

A travers le graphique comparatif de la **figure 5.2** qui représente l'EMC en fonction de la densité des nœuds, on constate que le modèle **GM** a consommé la plus grande valeur d'EMC, qui a atteint (0,16981282 J) lors de l'utilisation de (50) nœuds. D'autre part, la valeur la plus optimale de l'EMC a été réussi par le modèle de mobilité **RWP** qui a égal a (0,0741099 J) lors de l'utilisation de (10) nœuds.

On remarque également que l'EMC du **RWP** est meilleure que l'EMC du **GM** dans tous les cas où la variation en nombre des nœuds. En conclure dans ce scénario que le modèle de mobilité **RWP** est mieux que **GM** en termes d'énergie consommé lors de la variation des nœuds.

### Scénario 2 :

Dans ce scénario, nous voulons comparer le modèle de mobilité RWP et notre méthode de surveillance en utilisant RWP, afin d'observer l'EMC en fonction de la variation du nombre de nœuds, et de déterminer la meilleure méthode entre ces deux.

Nœuds /EMC	RWP	Clustering RWP
10	0,0741099	0,0730834
20	0,08220415	0,07816255
30	0,105934433	0,080406267
40	0,097070575	0,072172225
50	0,09380952	0,08164854

TABLE 5.3 – RWP vs Clustering RWP (densité/EMC).

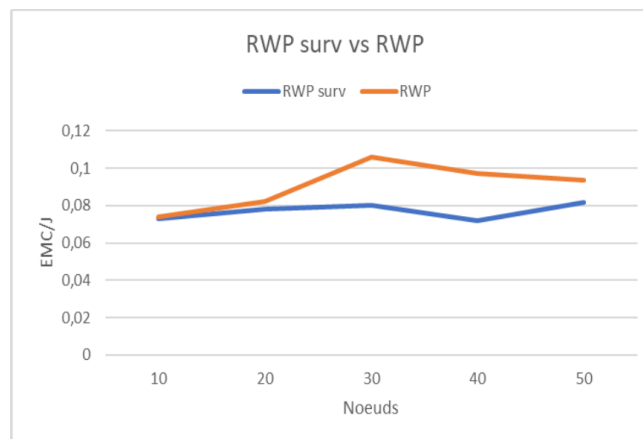


FIGURE 5.3 – RWP vs Clustering RWP (densité/EMC).

A travers le graphique comparatif qui représente l'EMC en fonction de la densité des nœuds, on constate que le modèle RWP a consommé la plus grande valeur d'EMC, qui a atteint (0,105934433 J) lors de l'utilisation de (30) nœuds. D'autre part, la valeur la plus optimale de l'EMC a été réussi par Clustering RWP qui est égal a (0,072172225 J) lors de l'utilisation de (40) nœuds. On remarque que l'EMC du Clustering RWP est meilleure que l'EMC du RWP dans tous les cas où la variation en nombre des nœuds. En conclure dans ce scenario que notre méthode en utilisant RWP (Clustering RWP) est meilleur que RWP en termes d'énergie consommé lors de la variation des nœuds.

### Scenario 3 :

Nous voulons comparer le modèle de mobilité GM et la méthode Clustering GM, afin d'observer l'EMC en fonction de la variation du nombre de nœuds, et de déterminer la meilleure méthode entre ces deux.

Nœuds /EMC	GM	Clustering GM
10	0,0778602	0,0732377
20	0,08755985	0,0692951
30	0,136503767	0,065382833
40	0,1134825	0,075092425
50	0,16981282	0,08537488

TABLE 5.4 – GM vs Clustering GM (densité/EMC).

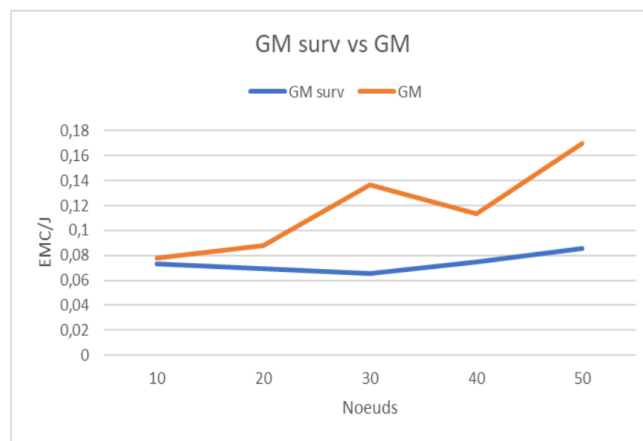


FIGURE 5.4 – GM vs Clustering GM (densité/EMC).

A travers le graphique comparatif qui représente l'EMC en fonction de la densité des nœuds, on constate que le modèle GM a consommé la plus grande valeur d'EMC, qui a atteint (0,16981282 J) lors de l'utilisation de (50) nœuds. D'autre part, la valeur la plus optimale de l'EMC a été réussi par le modèle Clustering GM qui a égal a (0,065382833 J) lors de l'utilisation de (30) nœuds.

On remarque également que l'EMC du Clustering GM est meilleure que l'EMC du GM dans tous les cas où la variation en nombre des nœuds. Donc, la conclusion est comme suit, dans ce scenario le modèle de Clustering GM est mieux que GM en termes d'énergie consommé lors de la variation des nœuds.

#### Scenario 4 :

Nous voulons comparer la méthode Clustering GM et la méthode Clustering RWP, afin d'observer l'EMC en fonction de la variation du nombre de nœuds, et de déterminer la meilleure méthode entre ces deux.

Nœuds /EMC	Clustering RWP	Clustering GM
10	0,0730834	0,0732377
20	0,07816255	0,0692951
30	0,080406267	0,065382833
40	0,072172225	0,075092425
50	0,08164854	0,08537488

TABLE 5.5 – Clustering RWP vs Clustering GM (densité/EMC).

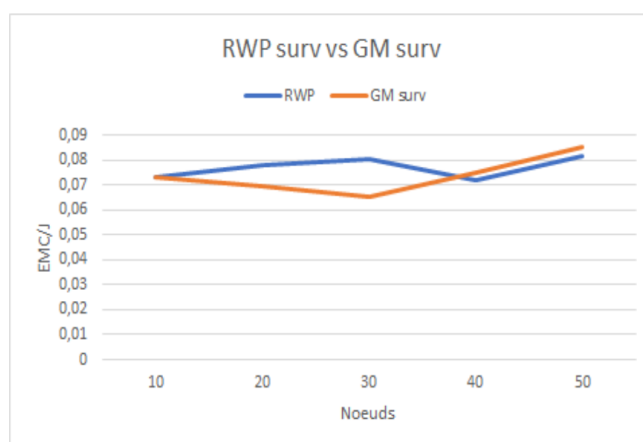


FIGURE 5.5 – Clustering RWP vs Clustering GM (densité/EMC).

A travers le graphique comparatif qui représente l'EMC en fonction de la densité des nœuds, on constate que le modèle de Clustering GM a consommé la plus grande valeur d'EMC, qui a atteint (0,08537488 J) lors de l'utilisation de (50) nœuds. Aussi, la valeur la plus optimale de l'EMC a été réussi par le modèle Clustering GM qui a égal a (0,065382833 J) lors de l'utilisation de (30) nœuds. Nous remarquons que les valeurs des deux courbes fluctuent jusqu'à 30 nœuds, ce qui signifie que le modèle de clustering RWP est meilleur que le modèle de clustering GM.

On note que dans tous les scénarios suivants, le nombre de drones est égal à cinquante (50).

### Scenario 5 :

Nous allons comparer le modèle de mobilité RWP et GM, et on observe l'EMC en fonction de la surface surveiller. Le tableau ci-dessous illustre les résultats obtenus après la simulation de ce scénario.

Surface /EMC	GM	RWP
750 * 750	0,12019782	0,1084214
1000 * 1000	0,16981282	0,09380952
1500 * 1500	0,09248764	0,0759286

TABLE 5.6 – GM vs RWP (Surface/EMC).

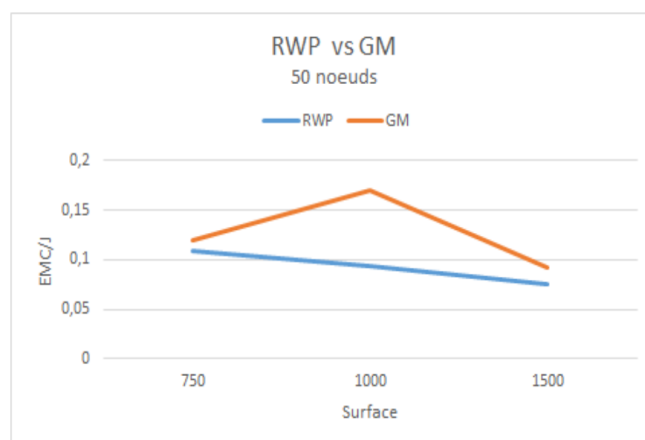


FIGURE 5.6 – GM vs RWP (Surface/EMC).

On observe d'après le graphique comparatif ci-dessus, qui représente l'EMC en fonction de la variation de la surface, que le modèle GM a consommé la valeur la plus élevée d'EMC, qui a atteint (0,16981282 J) lors de la surveillance d'une zone de (1000m \* 1000m). D'autre part, la valeur d'EMC la plus optimale a été obtenue par le modèle RWP, qui a atteint (0,0759286 J) lors de la surveillance d'une zone de (1500m \* 1500m). Dans les différentes valeurs restantes dans le graphique comparatif ci-dessus, nous observons que l'EMC de RWP est meilleure que l'EMC de GM dans tous les cas où la variation de surface. Ainsi, dans ce scénario, le modèle RWP est meilleur que GM en termes d'énergie consommée lors de la variation de surface.

**Scenario 6 :**

nous comparerons le modèle de mobilité GM et Clustering GM, et nous observerons l'EMC en fonction de la variation de surface indiquée dans le tableau ci-dessous.

Surface /EMC	GM	Clustering GM
750 * 750	0,12019782	0,07112186
1000 * 1000	0,16981282	0,08537488
1500 * 1500	0,09248764	0,08463708

TABLE 5.7 – GM vs Clustering GM (Surface/EMC).

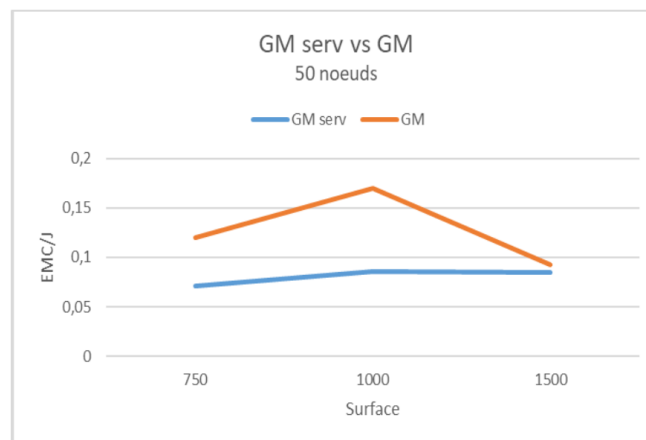


FIGURE 5.7 – GM vs Clustering GM (Surface/EMC).

On observe d'après le graphique comparatif ci-dessus, qui représente l'EMC en fonction de la variation de la surface, que le modèle GM a consommé la valeur la plus élevée d'EMC, qui a atteint (0,16981282 J) lors de la surveillance d'une zone de (1000m \* 1000m). D'autre part, la valeur d'EMC la plus optimale a été obtenue par le modèle Clustering GM, qui a atteint (0,07112186 J) lors de la surveillance d'une zone de (750m \* 750m). Dans les différentes valeurs restantes dans le graphique comparatif ci-dessus, nous observons que l'EMC de Clustering GM est meilleure que l'EMC de GM dans tous les cas où la variation de surface. Ainsi, dans ce scénario, le modèle Clustering GM est meilleur que GM en termes d'énergie consommée lors de la variation de surface.

### Scénario 7 :

Nous allons comparer le modèle de mobilité RWP et Clustering RWP, et on observe l'EMC en fonction de la surface surveiller. Le tableau ci-dessous illustre les résultats obtenus après la simulation de ce scénario.

Surface /EMC	RWP	Clustering RWP
750 * 750	0,1084214	0,07462666
1000 * 1000	0,09380952	0,08164854
1500 * 1500	0,0759286	0,0749347

TABLE 5.8 – RWP vs Clustering RWP (Surface/EMC).

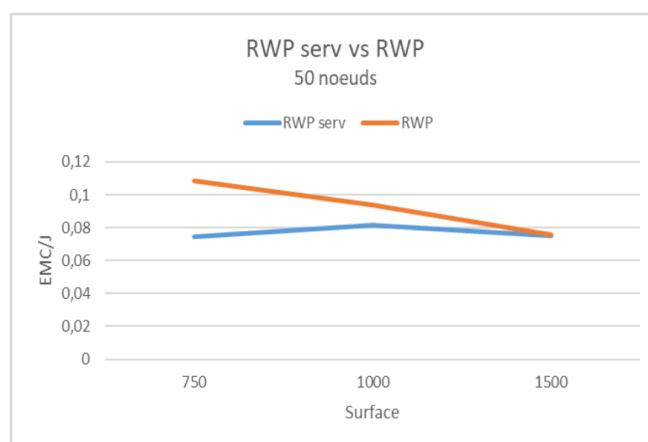


FIGURE 5.8 – RWP vs Clustering RWP (Surface/EMC).

On observe d'après le graphique comparatif ci-dessus, qui représente l'EMC en fonction de la variation de la surface, que le modèle RWP a consommé la valeur la plus élevée d'EMC, qui a atteint (0,1084214 J) lors de la surveillance d'une zone de (750m \* 750m). D'autre part, la valeur d'EMC la plus optimale a été obtenue par le modèle de Clustering RWP, qui a atteint (0,07462666 J) lors de la surveillance d'une zone de (750m \* 750m). Dans les différentes valeurs restantes dans le graphique comparatif ci-dessus, nous observons que l'EMC de Clustering RWP est meilleure que l'EMC de RWP dans tous les cas où la variation de surface. Donc, dans ce scénario, le modèle Clustering RWP est meilleur que RWP en termes d'énergie consommée lors de la variation de surface.

### Scénario 8 :

Nous allons comparer le modèle de Clustering GM et Clustering RWP, et on observe l'EMC en fonction de la surface surveiller. Le tableau ci-dessous illustre les résultats obtenus après la simulation de ce scénario.

Surface /EMC	Clustering GM	Clustering RWP
750 * 750	0,07112186	0,07462666
1000 * 1000	0,08537488	0,08164854
1500 * 1500	0,08463708	0,0749347

TABLE 5.9 – Clustering GM vs Clustering RWP (Surface/EMC).

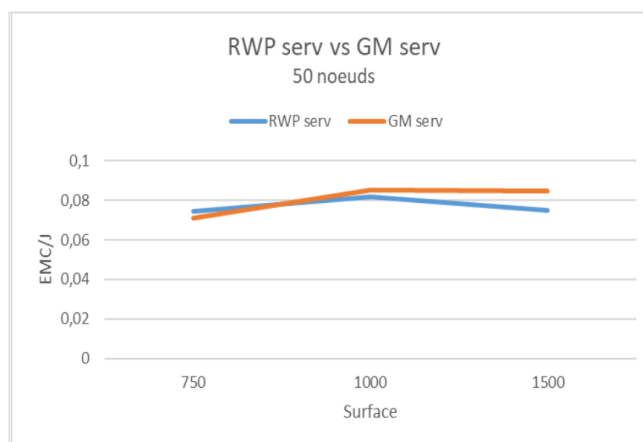


FIGURE 5.9 – Clustering GM vs Clustering RWP (Surface/EMC).

On observe d'après le graphique comparatif ci-dessus, qui représente l'EMC en fonction de la variation de la surface, que le modèle Clustering GM a consommé la valeur la plus élevée d'EMC, qui a atteint (0,08537488 J) lors de la surveillance d'une zone de (1000m \* 1000m). On a aussi, la valeur d'EMC la plus optimale a été obtenue par par le même modèle (Clustering GM), qui a atteint (0,07112186 J) lors de la surveillance d'une zone de (750m \* 750m). Dans les différentes valeurs restantes dans le graphique comparatif ci-dessus, on constate une convergence des deux courbes (Clustering GM et Clustering RWP), sauf dans le dernier cas, lors de la surveillance d'une zone de (1500m \* 1500m) l'EMC de Clustering RWP est meilleure que l'EMC de Clustering GM.

## 5.6 Conclusion

d'après les résultats de la simulation présentés dans ce chapitre révèlent que l'EMC augmente avec la croissance du nombre de noeuds, Ceci est dû au nombre de messages échangés, aussi on conclure que l'EMC diminue avec l'augmentation de la surface à surveiller, et que le modèle de mobilité GM est moins performant en termes de consommation d'énergie en raison de sa continuité de mouvement même s'il arrive à la destination, Contrairement à le modèle de mobilité RWP il s'arrête un temps de pause entre l'arrivée a une destination et le départ d'un nouveau mouvement, aussi RWP ne change pas leur vitesse dans le même voyage parce qu'il trace une ligne directe entre le point actuel et le point de destination. D'autre part, la meilleure méthode pour réduire la quantité d'énergie consommée est celle que nous avons proposée (clustering RWP), et le facteur qui a contribué de manière significative à cette réduction est la réduction de la zone de mobilité du drone. Nous concluons que la meilleure méthode est la méthode de clustering RWP.

# Conclusion et perspectives

Ces dernières années, les réseaux FANET sont devenus l'un des domaines d'application les plus populaires, en raison de leur nature polyvalente. L'un des domaines d'application des réseaux FANET est la surveillance par drones, pour assurer la sécurité des biens et des personnes.

Pour garantir la mission de surveillance avec une consommation de ressources optimale, plusieurs points contribuent à améliorer ce processus en termes de consommation de ressources, parmi eux : le modèle de mobilité des drones, sur lequel nous nous sommes concentrés dans ce travail, afin d'optimiser la consommation d'énergie.

Les réseaux ad-hoc ont introduit plusieurs modèles de mobilité, chacun avec ses propres forces et faiblesses. L'étude présentée dans ce mémoire se concentre sur la simulation de deux anciens modèles de mobilité, tels que RWP et GM, avec la simulation de notre nouvelle approche, en utilisant le simulateur OMNet++.

A travers les résultats présentés dans ce travail, nous pouvons dire que la méthode Clustering RWP est la meilleure méthode parmi ce que nous avons comparé. Cependant, il contient encore des limites tels-que : **(A)** Si où le master à sortir de la mission à cause d'une panne ou de sa faiblesse de batterie donc le processus de surveillance sera inutile, donc on a besoin d'ajouter un processus d'élection. **(B)** En raison de la mobilité de plusieurs drones dans la même sous-zone, il y a une possibilité de collision, donc nous allons ajouter une stratégie d'évitement de collision, pour rendre notre méthode plus performante. Ce sont les deux points que nous nous efforcerons d'améliorer dans un avenir proche.

# Bibliographie

- [1] <https://www.informit.com/articles/printerfriendly/98132>, 27-03-2023.
- [2] <https://www.cdw.com/content/cdw/en/articles/datacenter/what-are-the-different-types-of-wireless-networks.html>, 27-03-2023.
- [3] [https://www.researchgate.net/figure/MANET-VANET-and-FANET\\_fig2\\_325275675](https://www.researchgate.net/figure/MANET-VANET-and-FANET_fig2_325275675), 27-03-2023.
- [4] [https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA\\_enDZ1023DZ1023&q=ad hoc network&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj8uz--P\\_AhWSVKQEHRdsCpsQ0pQJegQIDBAB&biw=1280&bih=609&dpr=1.5#imgrc=o17ULype\\_62jgM](https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_enDZ1023DZ1023&q=ad hoc network&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj8uz--P_AhWSVKQEHRdsCpsQ0pQJegQIDBAB&biw=1280&bih=609&dpr=1.5#imgrc=o17ULype_62jgM), 27-06-2023.
- [5] Mohammed JF Alenazi, Shatha O Abbas, Saleh Almowuena, and Maazen Alsabaan. Rssgm : Recurrent self-similar gauss–markov mobility model. *Electronics*, 9(12) :2089, 2020.
- [6] Amira Chriki, Haifa Touati, Hichem Snoussi, and Farouk Kamoun. Fanet : Communication, mobility models and security issues. *Computer Networks*, 163 :106877, 2019.
- [7] C Siva Ram Murthy and BS Manoj. *Ad hoc wireless networks : Architectures and protocols, portable documents*. Pearson education, 2004.
- [8] Al-Sakib Khan Pathan. *Security of self-organizing networks : MANET, WSN, WMN, VANET*. CRC press, 2016.
- [9] Paolo Santi. *Mobility models for next generation wireless networks : ad hoc, vehicular and mesh networks*. John Wiley & Sons, 2012.
- [10] Subir Kumar Sarkar, Tiptur Gangaraju Basavaraju, and C Puttamadappa. *Ad hoc mobile wireless networks : principles, protocols and applications*. Auerbach publications, 2007.
- [11] S Shukla, KM Meghana, CR Manjunath, and N Shantosh. Comparison of wireless network over wired network and its type. *Int. J. Res. Granthaalayah*, 5 :14–20, 2017.