



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université de Batna 2**

**Faculté des Mathématiques et de l'Informatique**

**Département d'Informatique**

**THESE**

En vue de l'obtention du diplôme de

**Doctorat en Sciences en Informatique**

Présentée par

**Lyamine GUEZOULI**

---

# **La Mobilité à la Disposition du Routage Ad hoc**

---

Soutenue publiquement le **02 Juillet 2018** devant le jury formé de :

|                        |                   |                                   |
|------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Pr. Azeddine BILAMI    | <b>Président</b>  | Prof. Université de Batna 2       |
| Dr. Souheila BOUAM     | <b>Rapporteur</b> | M.C. Université de Batna 2        |
| Pr. Mohamed BENMOHAMED | <b>Examineur</b>  | Prof. Université de Constantine 2 |
| Pr. Abdelmalik BACHIR  | <b>Examineur</b>  | Prof. Université de Biskra        |

*A mes parents,  
à ma grande famille,  
à tous ceux que j'aime,  
et à tous ceux qui m'aiment...*

# Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce présent travail.

Le travail réalisé tout au long de cette thèse n'a été possible qu'avec l'aide et le soutien de nombreuses personnes. Je profite de l'occasion qui m'est donnée pour leur exprimer toute ma gratitude.

Mes remerciements les plus sincères vont au Docteur **Souheila Bouam** pour son encadrement, sa disponibilité, et son sérieux, qui m'ont permis d'avancer et de progresser ainsi que les nombreux et précieux conseils qu'elle m'a prodigués au cours de ces années de thèse. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et mon admiration pour ses qualités scientifiques. Ce fut un réel plaisir que d'œuvrer à ses côtés.

Je remercie très chaleureusement notre Professeur **Azeddine Bilami** qui nous a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, pour son soutien moral et ses indéniables qualités humaines.

Je remercie également Messieurs le **Pr. Mohamed Benmohamed** et le **Pr. Abdelmalik Bachir** pour l'immense plaisir et honneur qu'ils me font en acceptant de consacrer leur temps pour examiner ce travail.

Je tiens à remercier mes parents et tous les membres de ma famille qui m'ont apporté le soutien et le confort qui m'ont accompagné durant ce parcours.

Ce travail n'a pu atteindre ses objectifs sans la contribution de près ou de loin de plusieurs personnes auxquelles j'adresse mes chaleureux remerciements.

# Résumé

La mobilité a toujours représenté un phénomène compliqué dans le processus de routage réseau. Cette complexité se concrétise essentiellement dans la manière d'assurer des liens fiables pour un acheminement efficace des données. Des variantes d'études ont été suivies depuis longtemps et basées sur des protocoles de routage dédiés aux environnements statiques pour pouvoir les adapter au contexte mobile. Dans le cadre de cette thèse, nous aurons une vision différente de la mobilité qui possède beaucoup d'avantages de par son principe 'mobile'. En effet, au lieu de chercher à éviter la mobilité et d'essayer, entre autres d'immobiliser 'momentanément' un environnement mobile pour assurer une tâche de routage, nous allons exploiter cette mobilité pour améliorer le routage. En se basant sur cette idée principale, nous avons réalisé un ensemble de travaux pour atteindre cet objectif.

Notre première contribution consiste à exploiter la mobilité dans un environnement non connexe. Cette contribution se résume par l'introduction du protocole '*Spray & Wait*' dans un réseau tolérant aux délais (*Delay Tolerant Network - DTN*). Par la suite, et sur la base de l'existant, nous avons constaté que la meilleure façon d'exploiter cette mobilité est de suivre un modèle de mobilité. De nombreux modèles ont été proposés dans la littérature et utilisés comme une source de données dans la majorité des travaux de recherche. Après une étude méticuleuse, nous nous sommes basés sur le modèle de mobilité *Random Waypoint* (RWP) pour assurer le routage dans un réseau de capteurs sans fil. D'abord, et comme deuxième contribution le modèle *Random Waypoint* (dans sa version de base) a été réalisé sur le simulateur TOSSIM et considéré comme une plateforme pour notre troisième contribution. Puis, dans cette troisième contribution nous avons proposé une approche basée RWP dans laquelle les nœuds du réseau peuvent collaborer entre eux sur la base de notre algorithme proposé. Une telle approche offre de nombreux avantages pour assurer le routage dans un environnement dynamique. Une quatrième et dernière contribution a fait l'objet de proposer une structuration et collaboration spéciale des nœuds relais dont le but est polyvalent, à savoir maximiser la durée de vie du réseau, fournir une connectivité entre tout capteur et la station de base, et aussi de minimiser la latence de réception des données envoyées à la station de base. Ainsi, nos contributions constituent des idées novatrices pour former une base solide à d'autres solutions qui viendront les enrichir.

**Mots clés :** Mobilité, RWP, RCSF, Routage, Modèle de Mobilité, DTN.

## ملخص البحث

الحركية تمثل ظاهرة معقدة في عملية التوجيه داخل الشبكة. ومما يسهل هذا التعقيد أساسا هي طريقة ضمان اتصالات موثوق بها لتوجيه البيانات بشكل أكثر كفاءة. تمت متابعة دراسات عديدة لفترة طويلة، و التي تتمركز أساسا على بروتوكولات التوجيه المخصصة لبيئات ثابتة من أجل التكيف مع البيئة المتنقلة. وفي سياق هذه الأطروحة، نحن لدينا رؤية مختلفة، حيث ان التنقل يحتوي على العديد من المزايا نظرا لمبدئها "التنقل". في الواقع، بدلا من السعي إلى منع التنقل و شل الشبكة للحظات من اجل تنظيم عملية التوجيه داخل الشبكة، سنستخدم هذه الحركية لتحسين التوجيه. وبناءا على هذه الفكرة الرئيسية، أجرينا سلسلة من الأعمال لتحقيق هذا الهدف.

لدينا أول مساهمة في استغلال التنقل في بيئة منفصلة. وتتلخص هذه المساهمة من قبل إدخال البروتوكول " Spray & Wait" في شبكة متسامحة في التأخير (DTN). وفي وقت لاحق، على أساس الاعمال الموجودة سابقا، وجدنا أن أفضل طريقة لاستغلال هذا الحراك هو اتباع نموذج التنقل. وقد تم اقتراح العديد من النماذج في السابق وتم استخدامها كمصدر بيانات في معظم الأبحاث. بعد دراسة متأنية، اعتمدنا على نموذج التنقل عشوائية الإحداثية (RWP) للتوجيه في شبكة استشعار لاسلكية. أولا، وكمساهمة ثانية تم تنفيذ نموذج التنقل عشوائية الإحداثية (في الإصدار الأساسي) في TOSSIM. هذا التنفيذ يعتبر منبرا للمساهمة الثالثة (والرئيسية) اين اقترحنا نهج قائم على RWP الذي من خلاله يمكن للوحدات أن تعمل معا على أساس الخوارزمية المقترحة لدينا. وقد اقترحت المساهمة الرابعة والأخيرة لتوفير هيكل خاص وتعاوني التي تهدف إلى لتعظيم عمر الشبكة، توفير الربط بين أي أجهزة الاستشعار ومحطة القاعدة، وأيضا لتقليل وقت الاستجابة لاستلام البيانات المرسله إلى محطة القاعدة.

ويوفر هذا النهج العديد من المزايا للتوجيه في بيئة ديناميكية. وهكذا، كل هذه المساهمات هي أفكار مبتكرة تشكل أساسا متينا لحلول أخرى من شأنها أن تثري مجال الشبكات.

**كلمات البحث:** التنقل، RWP، WSN، التوجيه، التنقل النموذجي، DNT.

# Abstract

Mobility has always represented a complicated phenomenon in the network routing process. This complexity is mainly facilitated in the way that ensures reliable connections for efficient orientation of data. Many years ago, different studies were initiated basing on routing protocols dedicated to static environments in order to adapt them to the mobile environment. In the present thesis, we have a different vision of mobility that has many advantages due to its 'mobile' principle. Indeed, instead of searching to prevent mobility and testing for example to immobilize momentarily a mobile environment to provide routing task, we will exploit this mobility to improve routing. Based on that, we carried out a set of works to achieve this objective.

Our first contribution is to take advantage of mobility in a non-connected environment. This contribution is summed up by including the protocol 'Spray & Wait' in a Delay Tolerant Network (DTN). Then, on the existing foundation, we found that the best way to make use of this mobility is to follow a mobility model. Many models have been proposed in the literature and employed as a data source in most studies. After a careful study, we focused on the Random Waypoint mobility model (RWP) in order to ensure routing in wireless networks. The second contribution involves a Random Waypoint model (in its basic version) that was achieved on the TOSSIM simulator, and it was considered as a platform for our third (and main) contribution, in which we suggested an approach based RWP where network nodes can collaborate and work together basing on our recommended algorithm. A fourth and final contribution has been proposed to provide a special structuring and collaboration of relay nodes whose purpose is versatile, namely to maximize the lifetime of the network, provide connectivity between any sensor and the base station, and also to minimize the data receiving latency sent to the base station. Such an approach offers many advantages to ensure routing in a dynamic environment. Finally, our contributions comprise innovative ideas for suggesting other solutions that will improve them.

**Keywords:** Mobility, WSN, RWP, Routing, Mobility Model, DTN.

# Table des Matières

|  |     |
|--|-----|
| REMERCIEMENTS .....  | II  |
| RESUME .....   | III |
| البحث ملخص .....   | IV  |
| ABSTRACT .....   | V   |
| INTRODUCTION GENERALE .....  | 1   |
| ORGANISATION DU DOCUMENT .....   | 3   |
| CHAPITRE 1: ROUTAGE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS MOBILES SANS FIL.....                 | 5   |
| 1. INTRODUCTION.....   | 6   |
| 2. PRESENTATION DES RESEAUX DE CAPTEURS MOBILES SANS FIL.....                          | 9   |
| 2.1. TYPE DE RCSF .....  | 9   |
| 2.2. DEFIS DE CONCEPTION DES RCMSF .....   | 10  |
| 2.3. ARCHITECTURE DE NŒUD DE CAPTEUR MOBILE .....                                      | 10  |
| 2.4. PROTOCOLES DE ROUTAGE POUR LES RCMSF .....  | 11  |
| 3. CLASSIFICATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE DEDIES AUX RCMSF.....                      | 11  |
| 3.1. CLASSIFICATION BASEE SUR LA STRUCTURE DU RESEAU .....                             | 11  |
| 3.1.1. <i>Protocoles de routage plats</i> .....  | 11  |
| 3.1.1.1. <b>Routage opportuniste</b> .....   | 12  |
| 3.1.1.2. <b>Meilleur chemin de routage</b> .....                                       | 13  |
| 3.1.2. <i>Routage hiérarchique</i> .....   | 13  |
| 3.1.2.1. <b>Hiérarchie plate</b> .....   | 14  |
| 3.1.2.2. <b>Hiérarchie de cluster</b> .....  | 14  |
| 3.1.2.3. <b>Hiérarchie de Zone</b> .....   | 15  |
| 3.1.2.4. <b>Routage basée sur la grille</b> .....                                      | 16  |
| 3.1.3. <i>Constataion</i> .....  | 17  |
| 3.2. CLASSIFICATION BASEE SUR L'ETAT DE L'INFORMATION.....                             | 18  |
| 3.2.1. <i>Routage basé sur la topologie</i> .....                                      | 18  |
| 3.2.1.1. <b>Routage proactif</b> .....   | 18  |
| 3.2.1.2. <b>Routage réactif</b> .....  | 18  |
| 3.2.1.3. <b>Routage hybride</b> .....  | 19  |
| 3.2.2. <i>Routage basé sur la localisation</i> .....                                   | 19  |
| 3.2.2.1. <b>Basé temps</b> .....   | 20  |
| 3.2.2.2. <b>Basé distance</b> .....  | 20  |
| 3.2.2.3. <b>Basé distance prédictive</b> .....   | 21  |
| 3.2.3. <i>Constataion</i> .....  | 21  |
| 3.3. CLASSIFICATION BASEE SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES TECHNIQUES DE ROUTAGE ..... | 22  |
| 3.3.1. <i>Contrôle de l'énergie d'émission</i> .....                                   | 22  |
| 3.3.2. <i>Approche basée sur l'économie d'énergie</i> .....                            | 23  |
| 3.3.3. <i>Constataion</i> .....  | 24  |
| 3.4. CLASSIFICATION BASEE SUR LA QOS .....   | 24  |
| 3.4.1. <i>SPEED</i> .....  | 24  |
| 3.4.2. <i>Sequential Assignment Routing</i> .....                                      | 25  |
| 3.4.3. <i>Real-Time Power-Aware Routing</i> .....                                      | 25  |
| 3.5. CLASSIFICATION BASEE SUR LA SECURITE DES PROTOCOLES DE ROUTAGE .....              | 26  |
| 3.5.1. <i>Protocoles de sécurité du routage multi-chemins</i> .....                    | 26  |
| 3.5.2. <i>Protocoles de sécurité du routage hiérarchiques</i> .....                    | 27  |
| 3.5.3. <i>Protocoles de sécurité du routage géographiques</i> .....                    | 27  |
| 3.5.3.1. <b>Le protocole IGF</b> .....   | 28  |
| 3.5.3.2. <b>Le protocole SIGF-0</b> .....  | 28  |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 3.5.3.3.   | <b>Le protocole SIGF-1</b> .....  | 28        |
| 3.5.3.4.   | <b>Le protocole SIGF-2</b> .....  | 28        |
| 3.5.4.   | <b>Constatation</b> .....   | 29        |
| 3.6.   | <b>CLASSIFICATION BASEE SUR LA TOLERANCE AU DELAI (DELAY TOLERANT)</b> .....                                    | 30        |
| 3.6.1.   | <b>Protocoles de routage basés sur le non-savoir</b> .....  | 32        |
| 3.6.2.   | <b>Protocoles de routage basés sur le savoir</b> .....  | 33        |
| 3.6.3.   | <b>Protocoles de routage basé sociale</b> .....   | 33        |
| <b>4.</b>  | <b>LE PROTOCOLE DE ROUTAGE SPRAY AND WAIT POUR LES RCSF MOBILE ET TOLERANT AU DELAI</b> .....                   | <b>35</b> |
| 4.1.   | <b>LES ENVIRONNEMENTS DTNS</b> .....  | 35        |
| 4.1.1.   | <i>Les algorithmes de routage dans les DTNs</i> .....   | 36        |
| 4.1.2.   | <i>Exemples de protocoles de routage pour les environnements DTNs</i> .....                                     | 37        |
| 4.1.2.1.   | <b>Epidemic Routing [79]</b> .....  | 37        |
| 4.1.2.2.   | <b>Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity (PROPHET) [80]</b> .....         | 37        |
| 4.1.2.3.   | <b>Spray and Wait [65]</b> .....  | 37        |
| 4.2.   | <b>SPRAY &amp; WAIT POUR LES RCSF : SIMULATION ET RESULTATS</b> .....   | 38        |
| 4.2.1.   | <i>Paramètres d'évaluation</i> .....  | 38        |
| 4.2.2.   | <i>Résultats des simulations</i> .....  | 39        |
| <b>5.</b>  | <b>CONCLUSION</b> .....   | <b>41</b> |
| <b>CHAPITRE 2: EFFET DE LA MOBILITE DES NŒUDS SUR LES RESEAUX SANS FIL</b> ..... |   | <b>44</b> |
| <b>1.</b>  | <b>INTRODUCTION</b> .....   | <b>44</b> |
| <b>2.</b>  | <b>FONCTIONNALITES ET MOBILITE DANS LES RCMSF</b> .....   | <b>46</b> |
| <b>3.</b>  | <b>CONTROL DE TOPOLOGIE DANS LES RCSF</b> .....   | <b>48</b> |
| 3.1.   | <b>CLASSIFICATION DES APPROCHES DEDIEES AU CONTROLE DE LA TOPOLOGIE</b> .....                                   | 48        |
| 3.1.1.   | <i>Homogène</i> .....   | 49        |
| 3.1.2.   | <i>Non-Homogène</i> .....   | 49        |
| 3.1.3.   | <i>Centralisée</i> .....  | 49        |
| 3.1.4.   | <i>Distribuée</i> .....   | 50        |
| 3.2.   | <b>TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LE CONTROLE DE LA TOPOLOGIE DANS LES RCSF</b> .....                                 | 50        |
| 3.3.   | <b>MESURES ET METRIQUES POUR LE CONTROLE DE LA TOPOLOGIE</b> .....  | 53        |
| 3.3.1.   | <i>Connectivité</i> .....   | 53        |
| 3.3.2.   | <i>Efficacité énergétique</i> .....   | 53        |
| 3.3.3.   | <i>Débit</i> .....  | 54        |
| 3.3.4.   | <i>Durée de vie du réseau</i> .....   | 54        |
| 3.4.   | <b>DOMAINES DE RECHERCHE OUVERTS</b> .....  | 54        |
| 3.4.1.   | <i>Durée de vie du réseau</i> .....   | 54        |
| 3.4.2.   | <i>Retransmission</i> .....   | 54        |
| 3.4.3.   | <i>Déploiement de nœud</i> .....  | 54        |
| 3.4.4.   | <i>Mobilité</i> .....   | 54        |
| <b>4.</b>  | <b>EFFET DE LA MOBILITE DES NŒUDS SUR LA TOPOLOGIE</b> .....  | <b>55</b> |
| 4.1.   | <b>CONNECTIVITE DU RESEAU</b> .....   | 55        |
| 4.1.1.   | <i>Optimisation de la connectivité du réseau dans les RCMSF</i> .....   | 56        |
| 4.2.   | <b>COUVERTURE DU RESEAU</b> .....   | 57        |
| 4.2.1.   | <i>Optimisation de la couverture du réseau dans les RCMSF</i> .....   | 58        |
| 4.3.   | <b>DUREE DE VIE DU RESEAU</b> .....   | 60        |
| 4.3.1.   | <i>Optimisation de la durée de vie du réseau dans les RCMSF</i> .....   | 61        |
| <b>5.</b>  | <b>ROUTAGE ET MOBILITE : RELATION TRANSITIVE BASEE COUVERTURE, CONNECTIVITE ET DUREE DE VIE DU RESEAU</b> ..... | <b>62</b> |
| <b>6.</b>  | <b>CONCLUSION</b> .....   | <b>63</b> |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>CHAPITRE 3: MODELES DE MOBILITE – CAS D’ETUDE: RANDOM WAYPOINT - ETUDE ET IMPLEMENTATION .....</b> | <b>65</b> |
| <b>1. INTRODUCTION.....</b>   | <b>65</b> |
| <b>2. MODELES DE MOBILITE POUR LES RESEAUX SANS FIL .....</b>   | <b>65</b> |
| 2.1. AVANT-PROPOS.....  | 65        |
| 2.2. FORMULATION DES MODELES DE MOBILITE .....  | 66        |
| 2.3. CLASSIFICATION DES MODELES DE MOBILITE .....   | 67        |
| 2.4. MODELES DE MOBILITE BASES ALEATOIRE .....  | 68        |
| 2.4.1. <i>Le modèle Random Waypoint</i> .....   | 68        |
| 2.4.2. <i>Le modèle Random Walk</i> .....   | 69        |
| 2.4.3. <i>Le modèle Random Direction</i> .....  | 69        |
| 2.5. MODELES DE MOBILITE AVEC DEPENDANCE TEMPORELLE.....  | 70        |
| 2.5.1. <i>Le modèle Gauss-Markov</i> .....  | 70        |
| 2.6. MODELES DE MOBILITE AVEC DEPENDANCE SPATIALE.....  | 71        |
| 2.6.1. <i>Le modèle Reference Point Group Model</i> .....   | 72        |
| 2.7. MODELES AVEC CONTRAINTES GEOGRAPHIQUES .....   | 72        |
| 2.7.1. <i>Le modèle de mobilité avec obstacles</i> .....  | 72        |
| 2.8. DISCUSSION SUR LES MODELES DE MOBILITE.....  | 74        |
| <b>3. ETUDE DU PROTOCOLE RWP .....</b>  | <b>75</b> |
| 3.1. AVANT-PROPOS.....  | 75        |
| 3.1.1. <i>Origine des phénomènes aléatoires</i> .....   | 75        |
| • <i>La loi des grands nombres</i> .....  | 75        |
| • <i>Conditionnement et Indépendance</i> .....  | 76        |
| 3.1.2. <i>Connectivité Vs Rayon de transmission</i> .....   | 76        |
| 3.2. PRESENTATION DU RWP .....  | 77        |
| 3.3. FONCTIONNEMENT DU RWP .....  | 79        |
| 3.4. ALGORITHME DU RWP.....   | 80        |
| 3.5. PROCESSUS STOCHASTIQUE DU RWP .....  | 81        |
| 3.5.1. <i>Les limites du modèle de mobilité RWP</i> .....   | 82        |
| 3.5.2. <i>Remède des limites du modèle de mobilité RWP</i> .....                                      | 83        |
| 3.5.3. <i>Variantes du modèle de mobilité RWP</i> .....   | 83        |
| • <i>RWP sur le domaine connecté général (General Connected Domain)</i> .....                         | 84        |
| • <i>RWP restreint</i> .....  | 84        |
| • <i>RWP sur sphère</i> .....   | 86        |
| • <i>RWP pondéré</i> .....  | 87        |
| • <i>Récapitulatif</i> .....  | 88        |
| <b>4. IMPLEMENTATION DU PROTOCOLE RWP SOUS TOSSIM .....</b>   | <b>88</b> |
| 4.1. AVANT-PROPOS.....  | 88        |
| 4.2. LES GRANDES ETAPES DE NOTRE IMPLEMENTATION.....  | 88        |
| 4.3. LE DEROULEMENT DE L’EXECUTION .....  | 91        |
| 4.3.1. <i>Avec Python</i> .....   | 92        |
| 4.3.2. <i>Avec TinyVis</i> .....  | 92        |
| 4.4. SIMULATION.....  | 92        |
| 4.4.1. <i>Taux de livraison de paquets (Packet Delivery Ratio (PDR))</i> .....                        | 93        |
| 4.4.2. <i>Moyenne du délai de bout en bout</i> .....  | 93        |
| <b>5. CONCLUSION .....</b>  | <b>93</b> |
| <b>CHAPITRE 4: EFFET DE LA COLLABORATION DES NŒUDS MOBILE SUR LE ROUTAGE DANS LES RCSF.....</b>       | <b>96</b> |
| <b>1. INTRODUCTION.....</b>   | <b>96</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>2. PROPOSITION ET IMPLEMENTATION D'UNE NOUVELLE APPROCHE DE ROUTAGE (R-RWP) BASEE SUR LE MODELE RWP SOUS TOSSIM.....</b> | <b>96</b>  |
| 2.1. TRAVAUX ANTERIEURES .....  | 96         |
| 2.1.1. <i>Travaux tenant compte de la mobilité des nœuds.....</i>   | 97         |
| 2.1.2. <i>Routage avec puits mobile.....</i>  | 98         |
| 2.1.2.1. <b>Mobilité aléatoire .....</b>  | 98         |
| 2.1.2.2. <b>Mobilité avec chemin prévisible/fixe.....</b>   | 98         |
| 2.1.2.3. <b>Mobilité contrôlée du puits.....</b>  | 99         |
| 2.1.3. <i>Mobilité totale.....</i>  | 99         |
| 2.1.4. <i>Mobilité d'un ensemble de nœuds agissant comme des nœuds relais.....</i>  | 100        |
| 2.1.5. <i>Immobilité d'un ensemble de nœuds agissant comme plateforme de routage .....</i>                                  | 101        |
| 2.1.6. <i>Constatation .....</i>  | 102        |
| 2.1.7. <i>Travaux tenant compte des modèles de mobilité.....</i>  | 103        |
| 2.2. ALGORITHME DE LA SOLUTION PROPOSEE .....   | 104        |
| 2.3. METRIQUE D'EVALUATION .....  | 104        |
| 2.3.1. <i>Métriques basées modèle de mobilité .....</i>   | 104        |
| 2.3.1.1. <b>Nombre moyen de Voisins .....</b>   | 105        |
| 2.3.1.2. <b>Coefficient Moyenne de Clustering.....</b>  | 105        |
| 2.3.2. <i>Métriques basées protocoles de routage .....</i>  | 105        |
| 2.3.2.1. <b>Packet Delivery Ratio (PDR).....</b>  | 105        |
| 2.3.2.2. <b>Latence .....</b>   | 105        |
| 2.4. SIMULATION ET RESULTATS .....  | 105        |
| 2.4.1. <i>Paramètres utilisés dans les scénarios de simulation .....</i>  | 106        |
| 2.4.2. <i>Résultats de simulation.....</i>  | 108        |
| 2.4.2.1. <b>Analyse des métriques de mobilité .....</b>   | 108        |
| 2.4.2.2. <b>Analyse des métriques de routage .....</b>  | 111        |
| 2.4.3. <i>Discussion .....</i>  | 114        |
| <b>3. UNE NOUVELLE APPROCHE BASEE CERCLE VIRTUEL MOBILE POUR PROLONGER LA DUREE DE VIE DES RCSF .....</b>                   | <b>115</b> |
| 3.1. OBJECTIF DE LA MOBILITE DANS LES RSCF .....  | 115        |
| 3.1.1. <i>Connectivité:.....</i>  | 115        |
| 3.1.2. <i>Coût .....</i>  | 115        |
| 3.1.3. <i>Fiabilité.....</i>  | 116        |
| 3.1.4. <i>Efficacité énergétique.....</i>   | 116        |
| 3.2. DISSIPATION D'ENERGIE DANS UN CAPTEUR .....  | 116        |
| 3.3. TRAVAUX ANTERIEURES .....  | 116        |
| 3.4. CONTRIBUTION - MOUVEMENT SYNCHRONISE ENTRE RELAIS MOBILES .....  | 119        |
| 3.4.1. <i>Preliminaires .....</i>   | 120        |
| 3.4.2. <i>Formules du cercle virtuel mobile .....</i>   | 121        |
| 3.5. PERFORMANCE DU CERCLE VIRTUEL.....   | 123        |
| 3.5.1. <i>Redondance de relais.....</i>   | 124        |
| 3.5.2. <i>Nombre de nœuds vivants .....</i>   | 124        |
| 3.5.3. <i>Latence de réception.....</i>   | 124        |
| 3.5.4. <i>Taux des paquets envoyés avec succès.....</i>   | 125        |
| 3.6. DISCUSSION .....   | 125        |
| <b>4. CONCLUSION .....</b>  | <b>127</b> |
| <b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>   | <b>127</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>  | <b>127</b> |

# Liste des Figures

|  |     |
|--|-----|
| FIGURE 1.1 : ARCHITECTURE D'UN NŒUD CAPTEUR MOBILE [20] .....  | 10  |
| FIGURE 1.2 : ROUTAGE A TRAVERS UN PUIIS MAITRE DANS LE PROTOCOLE M-GEOCAST [13] .....  | 20  |
| FIGURE 1.3 : TRANSMISSION DE DONNEES DANS LES DTMNS .....  | 31  |
| FIGURE 1.4 : LE TRANSFERT D'INFORMATION DANS LES ENVIRONNEMENTS DTNS .....   | 35  |
| FIGURE 1.5 : DTN SEMI-STATIQUE .....   | 35  |
| FIGURE 1.6 : DTN DYNAMIQUE .....   | 36  |
| FIGURE 1.7 : NOMBRE DE PAQUETS REÇUS PAR RAPPORT A LA VITESSE DES NŒUDS .....  | 39  |
| FIGURE 1.8 : DELAI PAR RAPPORT A LA VITESSE DES NŒUDS .....  | 40  |
| FIGURE 1.9 : DELAI PAR RAPPORT A LA TAILLE DE LA MEMOIRE TAMPON .....  | 40  |
| FIGURE 1.10 : PAQUETS REÇUS PAR RAPPORT A LA TAILLE DE LA MEMOIRE TAMPON .....   | 41  |
| FIGURE 2.11 : LE HANDY TALKY .....   | 44  |
| FIGURE 2.12: LE MICA2DOT DE CROSSBOW .....   | 44  |
| FIGURE 2.13 : (A) TAGBOT, (B) ROBOMOTES, (C) ROBOMOTE AVEC PANNEAU SOLAIRE POUR RECHARGER SA BATTERIE.....   | 48  |
| FIGURE 2.14 : TAXONOMIE DES APPROCHES DE CONTROLE DE TOPOLOGIE ( [88] [34]) .....  | 49  |
| FIGURE 2.15 : CONNEXION D'UN RESEAU PARTITIONNE EN UTILISANT DEUX NŒUDS RELAIS MOBILES. (A) CONNEXION DE L'ILE A ET B.<br>(B) CONNEXION DE L'ILE B ET C..... | 57  |
| FIGURE 3.16: MOUVEMENT D'UN NŒUD: (A) VECTEURS DE MOBILITE D'EPOQUE ET (B) VECTEUR DE MOBILITE RESULTANT [128] .....   | 66  |
| FIGURE 3.17 : CLASSIFICATION DES MODELES DE MOBILITE .....   | 68  |
| FIGURE 3.18 : EXEMPLE DE MOUVEMENT DE NŒUD AVEC <i>RANDOM WAYPOINT</i> [129] .....   | 68  |
| FIGURE 3.19 : EXEMPLE DE MOUVEMENT DE NŒUD AVEC <i>RANDOM DIRECTION</i> [131] .....  | 70  |
| FIGURE 3.20 : MOUVEMENTS AVEC OBSTACLES UTILISANT LE DIAGRAMME DE VORNOÏ [133] .....   | 73  |
| FIGURE 3.21 : EXEMPLE DE MOUVEMENT D'UN NŒUD MOBILE UTILISANT LE MODELE DE MOBILITE <i>RANDOM WAYPOINT</i> [130]. .....                                      | 77  |
| FIGURE 3.22 : DISTRIBUTION DE NŒUDS SOUS <i>RANDOM WAYPOINT</i> [135] .....  | 78  |
| FIGURE 3.23 : POURCENTAGE DE LA MOYENNE DES NŒUDS VOISINS EN FONCTION DU TEMPS [130]. .....  | 78  |
| FIGURE 3.24 : ALGORITHME DE FONCTIONNEMENT DU RWP .....  | 80  |
| FIGURE 3.25 : ALGORIGRAMME DE FONCTIONNEMENT DU RWP .....  | 80  |
| FIGURE 3.26 : RWP SUR UN NON-CONVEXE « SWISS FLAG DOMAIN » [142] .....   | 84  |
| FIGURE 3.27 : RWP RESTREINT SUR UN PLAN DE QUATRE CARRÉS [142] .....   | 85  |
| FIGURE 3.28 : RWP RESTREINT SUR UNE SURFACE <i>FISH IN A BOWL</i> [142] .....  | 86  |
| FIGURE 3.29 : RWP SUR SPHERE [142] .....   | 87  |
| FIGURE 3.30 : REPRESENTATION D'UN DEPLACEMENT DE NŒUD A PARTIR D'UNE POSITION (x, y, z) VERS UNE DESTINATION (x', y', z'),<br>.....                          | 88  |
| FIGURE 3.31 : REPRESENTATION D'UN DEPLACEMENT DE NŒUD A PARTIR D'UNE POSITION (x, y) VERS UNE DESTINATION (x', y') AVEC<br>UN ANGLE A. ....                  | 89  |
| FIGURE 3.32 : CODE SOURCE DE LA FONCTION <i>MOBILITYMODEL(X,Y,S)</i> .....   | 90  |
| FIGURE 3.33 : CODE SOURCE DE LA METHODE <i>RWP()</i> .....   | 91  |
| FIGURE 3.34 : ALGORIGRAMME DE FONCTIONNEMENT DU RWP AVEC LES FONCTIONS <i>MIBILITYMODEL()</i> ET <i>RWP()</i> .....  | 91  |
| FIGURE 3.35 : L'INTERFACE DU PLUGIN DE MOBILITE .....  | 92  |
| FIGURE 4.36 : RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL AVEC RELAIS MOBILES. ....  | 101 |
| FIGURE 4.37 : REPRESENTATION DU TINYVIZ.....   | 106 |
| FIGURE 4.38 : DISPERSION INITIALE DE NŒUDS DANS L'ENVIRONNEMENT .....  | 107 |
| FIGURE 4.39 : NOMBRE DE VOISINAGE DE LA SB (A UN SAUT) .....   | 108 |
| FIGURE 4.40 : NOMBRE DE VOISINAGE DE LA SB (A DEUX SAUTS).....   | 109 |
| FIGURE 4.41 : NOMBRE DE VOISINAGE DE LA SB (A UN ET DEUX SAUTS) .....  | 110 |
| FIGURE 4.42 : VOISINAGE DE LA SB AVEC R-RWP.....   | 110 |
| FIGURE 4.43 : EXEMPLE DE VOISINAGE DE LA SB .....  | 111 |
| FIGURE 4.44 : ZONE DE COUVERTURE AVEC RWP.....   | 111 |
| FIGURE 4.45 : ZONE DE COUVERTURE AVEC R-RWP .....  | 112 |
| FIGURE 4.46 : PRESENTATION DU VOISINAGE A UN ET DEUX SAUTS AVEC TINYVIZ .....  | 112 |
| FIGURE 4.47 : NOMBRE DE MESSAGES REÇUS PAR LA SB AVEC RWP ET R-RWP .....   | 113 |
| FIGURE 4.48 : COURBE DE TENDANCE .....   | 113 |
| FIGURE 4.49 : LATENCE MOYENNE AVEC RWP ET R-RWP .....  | 114 |
| FIGURE 4.50 : PRESENTATION D'UN RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL .....  | 117 |
| FIGURE 4.51: PLACEMENT DE NŒUDS DE RELAIS PROPOSE DANS [6] .....   | 118 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURE 4.52: (A) DISPOSITION INITIALE DES NOEUDS RELAIS DANS NOTRE APPROCHE (B) COUVERTURE DE NOEUD RELAIS MOBILE ...  | 120 |
| FIGURE 4.53: LES NŒUDS RELAIS SYNCHRONISENT LE MOUVEMENT, CHACUN DANS SA TRAJECTOIRE LINEAIRE FORMANT AINSI UN CERCLE VIRTUEL MOBILE ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$ ) ..... | 120 |
| FIGURE 4.54: LA DISTANCE «H» ENTRE LE NOEUD RELAIS ET LE CAPTEUR STATIQUE .....  | 121 |
| FIGURE 4.55: LA DIRECTION D'ENVOI VERS LA SB .....   | 123 |
| FIGURE 4.56: LATENCE MOYENNE .....   | 124 |
| FIGURE 4.57: TAUX DES PAQUETS ENVOYES AVEC SUCCES .....  | 125 |

## Liste des Tableaux

|   |     |
|---|-----|
| TABLE 1.1 : COMPARAISON ENTRE LES PROTOCOLES DE ROUTAGE LES PLUS POPULAIRE BASES CLUSTERS .....                   | 15  |
| TABLE 1.2 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE ROUTAGE PLAT ET HIERARCHIQUE DANS LES RCMSF .....                       | 17  |
| TABLE 1.3 : CATEGORISATION DES PROTOCOLES DE ROUTAGE BASES LOCALISATION DANS LES RCMSF.....                       | 21  |
| TABLE 1.4 : COMPARAISON DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE DES PROTOCOLES DE ROUTAGE DANS LES RCMSF .....                | 24  |
| TABLE 1.5 : COMPARAISON GENERALE ENTRE LES CLASSES DE SOLUTIONS DE SECURITE .....                                 | 29  |
| TABLE 1.6 : RECAPITULATIF DES PROPRIETES DES PROTOCOLES DE SECURITE DU ROUTAGE [55] .....                         | 30  |
| TABLE 1.7 : PARAMÈTRES DE SIMULATION .....  | 39  |
| TABLE 2.8 : RESUME DE LA LITTERATURE SUR LE CONTROLE DE TOPOLOGIE POUR LES RCSF ( [90] [109]) .....               | 52  |
| TABLE 3.9 : CARACTERISTIQUES DES MODELES DE MOBILITE .....  | 74  |
| TABLE 4.10 : COMPARAISON DES PROTOCOLES DE ROUTAGE BASEE SUR LA MOBILITE.....                                     | 102 |
| TABLE 4.11 : CLASSEMENT DES PROTOCOLES DE ROUTAGE PDR (%) PAR RAPPORT AUX DIFFERENTS MODELES DE MOBILITE [135] .. | 103 |
| TABLE 4.12 : LES VALEURS DES PARAMETRES UTILISES DANS LES SIMULATIONS .....                                       | 108 |
| TABLE 4.13: PARAMETRES DE SIMULATION .....  | 123 |

## Glossaire des Acronymes

|              |  |
|--------------|--|
| <b>AODV</b>  | Ad hoc On-Demand Distance Vector         |
| <b>CH</b>    | Cluster Head                             |
| <b>CT</b>    | Contrôle Topologie                       |
| <b>DSR</b>   | Dynamic Source Routing                   |
| <b>DTMN</b>  | Delay Tolerant Mobile Networks           |
| <b>DTN</b>   | Delay Tolerant Networks                  |
| <b>EM</b>    | Élément Mobile                           |
| <b>LEACH</b> | Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy |
| <b>MAC</b>   | Medium Access Control                    |
| <b>MANET</b> | Mobile Ad hoc Networks                   |
| <b>MWSN</b>  | Mobile Wireless Sensor Network           |
| <b>NS</b>    | Network simulator                        |
| <b>OLSR</b>  | Optimized Link State Routing             |
| <b>PDR</b>   | Packet Delivery Ratio                    |
| <b>QoS</b>   | Quality of Service                       |
| <b>RCMSF</b> | Réseaux de capteurs Mobile Sans Fil      |
| <b>RCSF</b>  | Réseaux de Capteurs Sans Fil             |
| <b>RCSSF</b> | Réseaux de Capteurs Statique Sans Fil    |
| <b>RPGM</b>  | Reference Point Group Model              |
| <b>R-RWP</b> | Routing-Random Waypoint                  |
| <b>RW</b>    | Random Walk                              |
| <b>RWP</b>   | Random Waypoint                          |
| <b>SB</b>    | Station de Base                          |
| <b>TP</b>    | Temps de pause                           |

# Introduction Générale

---

---

Les raisons du passage d'un réseau filaire à un réseau sans fil sont nombreuses. Pour en nommer quelques-unes : partager l'accès à Internet, les fichiers et les imprimantes, installer tout un réseau sans la nécessité de fils désordonnés, communiquer tout en se déplaçant, ...et la liste s'allonge encore et encore. Pour une solution plus mobile où un utilisateur doit accéder aux ressources du réseau en déplacement, la technologie radio est le seul choix logique.

La convergence des communications et des technologies de l'information, associée aux progrès récents de l'ingénierie, ouvre la voie à une nouvelle génération d'appareils mobiles, de capteurs et d'actionneurs peu coûteux. Par conséquent, il existe un besoin actuel et futur de technologie de réseau ad hoc dynamique. C'est le déploiement distribué et ponctuel des réseaux de ces appareils et capteurs qui promet d'avoir un impact significatif non seulement sur la science et l'ingénierie, mais également sur un large éventail d'applications liées à la protection et la sécurité des infrastructures critiques, aux soins de santé, l'environnement, l'énergie, la sécurité alimentaire, le traitement de la production, la qualité de la vie et l'économie.

Un réseau mobile ad hoc (MANET) est constitué de nœuds mobiles, qui sont libres de se déplacer arbitrairement. Les nœuds peuvent être situés dans ou sur des avions, des navires, des camions, des voitures, peut-être même sur des personnes ou sur de très petits dispositifs. Un MANET est un système autonome de nœuds mobiles. Le système peut fonctionner de manière isolée, ou peut avoir des passerelles vers (qui interagissent avec) un réseau fixe. A un instant donné, une connectivité sans fil sous la forme d'un graphe aléatoire multi-chaînes ou d'un réseau "ad hoc" existe entre les nœuds. Cette topologie ad hoc peut changer avec le temps lorsque les nœuds se déplacent ou ajustent leurs paramètres de transmission et de réception.

Avec l'avancement très rapide des réseaux ad hoc et la multiplication de leurs domaines d'utilisations, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont devenus une nouvelle classe dominante des réseaux ad hoc qui consiste en une collection de minuscules dispositifs de faible puissance possédant les caractéristiques des réseaux ad hoc en plus de quelques propriétés bien spécifiques. Comme ils permettent un suivi et une analyse fiables des environnements inconnus ou difficilement accessibles, ils devraient trouver un déploiement croissant dans un proche avenir.

Les MANET, y compris les réseaux de capteurs sans fil, ont plusieurs caractéristiques importantes, telles que les topologies dynamiques, la bande passante limitée, la faible disponibilité de l'énergie et la fragilité de la sécurité et de la fiabilité. Ces caractéristiques uniques créent un ensemble d'hypothèses et de problèmes de performance pour la conception des réseaux mobiles qui vont au-delà de ceux influant la conception du routage dans les réseaux traditionnels et posent d'énormes défis aux chercheurs et aux concepteurs dans le domaine des réseaux mobiles.

Au cours des dernières années, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont attirés l'attention des chercheurs grâce à la large gamme d'applications en matière de surveillance environnementale, la surveillance des processus industriels, la surveillance préventive, la surveillance de l'habitat, le contrôle du trafic, les situations d'urgence, la surveillance militaire, l'agriculture etc. Une particularité des réseaux de capteurs consiste en la nécessité d'interagir avec l'environnement, ce qui conduit ces réseaux d'être très différents des réseaux conventionnels. Actuellement, les réseaux de capteurs déployés ont prouvé une bonne efficacité dans la collecte d'information détectée en provenance du monde physique, où, dans certains cas, les capteurs sont utilisés pour percevoir l'environnement et d'agir à la place du système de perception humaine, par exemple le système auditif ou tactile.



Dans les RCSF, les nœuds capteurs individuels sont généralement supposés être statiques. Cependant, certaines applications récentes dans les RCSF (par exemple dans les soins médicaux et d'intervention en cas de catastrophe) font usage de nœuds capteurs mobiles, ce qui pose des défis uniques pour les chercheurs dans ce domaine précis.

La mobilité des nœuds est la principale valeur ajoutée dans les réseaux Ad hoc et réseaux de capteurs sans fil. En général, la mobilité joue un rôle suprême dans ces réseaux. L'effet de la mobilité sur les systèmes de gestion et les protocoles est pertinent à plusieurs couches. De plus, l'effet de la mobilité présente des comportements adaptatifs des utilisateurs, des protocoles et des applications.

La mobilité affecte toutes les couches de la pile protocolaire d'un réseau. Au niveau de la couche liaison, elle détermine à quelle vitesse les caractéristiques de la liaison changent et si la connectivité de la liaison est stable ou non au fil du temps. Lors de la couche du contrôle d'accès au support (MAC), elle affecte le temps nécessaire pour prendre des prélèvements relative vis-à-vis aux conditions du canal. A la couche réseau, la mobilité a des implications majeures sur la performance des différents protocoles de routage. L'impact de la mobilité sur les performances du réseau détermine quelles applications peuvent être prises en charge sur un réseau fortement mobile.

Les modèles de mobilité tentent de saisir le comportement de déplacement d'un nœud dans un réseau mobile. De toute évidence, il peut y avoir peu de consensus sur ce qui est le meilleur modèle. Par exemple, un modèle de mobilité de la circulation routière ou d'un piéton dans un campus diffère considérablement d'un modèle pour le mouvement des particules au sein d'une cellule microscopique. Cependant, il est généralement admis que les modèles de mobilité doivent être en mesure de capturer un élément de hasard, en particulier dans la mesure où ce caractère aléatoire exprime le degré de mobilité indépendant de l'entité mobile elle-même. Cela étant dit, ce composant qui doit être modélisée comme un processus aléatoire, par exemple la direction, la vitesse, les temps de pause, etc. est encore en voix de recherche et de la spéculation.

Plusieurs modèles de mobilité existent dans la littérature, à titre d'exemple le modèle *Gauss Markov* [1], le modèle *Random Waypoint* (RWP) [2], le modèle *Reference Point Group Mobility* [3]. Cependant, celui qui est largement utilisé est le modèle RWP. Ce dernier possède suffisamment de degrés de liberté pour produire un ensemble assez riche de scénarios de mobilité, à savoir sa liberté pour la sélection du sens de déplacement, la sélection de la vitesse, etc. Le RWP est largement utilisé dans l'étude des réseaux mobiles Ad hoc (MANET) et, en particulier, pour l'étude des algorithmes de routage dans les MANET.

Dans cette thèse, nous développons une définition novatrice de la mobilité qui, contrairement à de nombreux travaux, ne tend pas à s'intéresser au côté négatif de cette mobilité. Nous appréhendons la mobilité de façon similaire à la notion de qualité de services car c'est une notion qui se définit à plusieurs niveaux, et par plusieurs paramètres. De même que la qualité de service est définissable au travers de sa perception par l'application, nous avons défini la mobilité par son influence sur le routage et considéré son expression selon plusieurs métriques.

Cette étude a nécessité un travail de synthèse bibliographique important, pour identifier au cours des nombreux travaux protocolaires les propositions se rapportant à la notion de mobilité.

Nous avons tout d'abord étudié la mobilité dans un contexte bien défini pour lequel nous avons projeté notre 1<sup>ère</sup> contribution permettant d'émerger le protocole de routage *Spray and Wait* au niveau des réseaux DTN (Delay Tolerant Networks) dans le but d'assurer un routage dans un tel type de réseaux non-connexe.

Par la suite, nous voulons assurer la mobilité suivant un modèle de mobilité, pour cela nous avons fait une étude détaillée sur les modèles de mobilité existants dans la littérature. Une multitude de modèles ont attirés notre attention, nous avons basé notre choix sur la fréquence d'utilisation par la communauté des chercheurs.

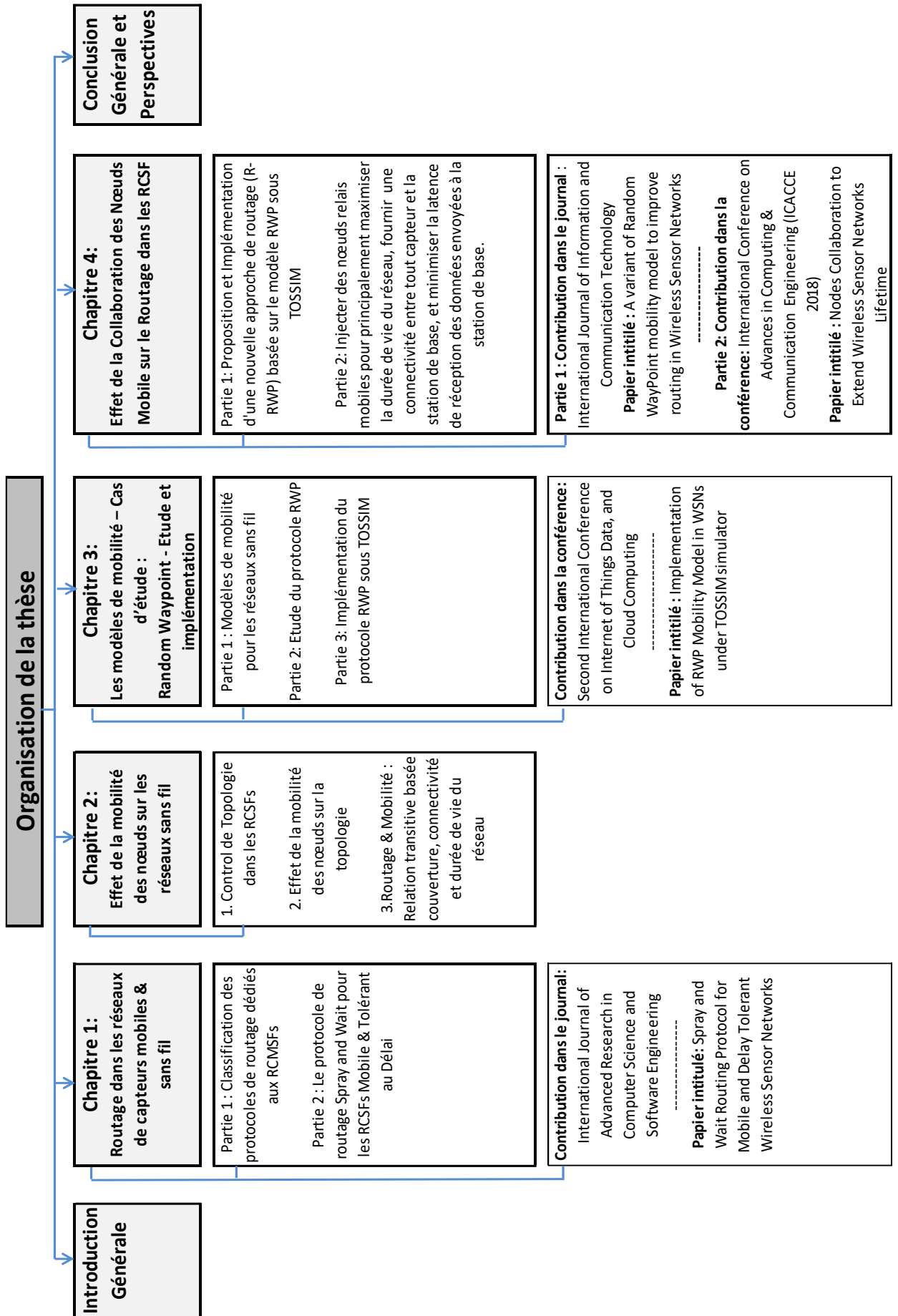
Le modèle choisi, à savoir le *Random Waypoint*, a fait l'objet de notre 2<sup>ème</sup> contribution où nous l'avons intégré dans un simulateur réseaux dédié aux réseaux de capteurs sans fil (RCSF), cette intégration nous a été primordiale dans le but d'utiliser ce modèle par la suite.

Bien évidemment, notre but essentiel au cours de notre thèse, est d'assurer un routage optimal sans nécessité de baser notre étude sur un des protocoles de routage compliqués dédiés aux réseaux sans fil. En effet, notre 3<sup>ème</sup> contribution consiste à apporter des modifications sur le modèle *Random Waypoint* afin de nous permettre d'assurer un routage optimal pour les réseaux de capteurs mobiles sans fil (RCMSF).

Par la suite, nous avons présenté notre 4<sup>ème</sup> contribution qui nous a permis de bien assimiler les secrets relatifs à la consommation énergétique au niveau d'un nœud capteur comme au niveau du réseau complet. Notre contribution présente une solution concurrente à d'autres existantes dans la littérature, permettant ainsi de faire fonctionner le réseau avec une consommation énergétique raisonnable.

## **Organisation du document**

La présentation de notre thèse s'organise en quatre chapitres comme indiqué ci-après:



# Chapitre 1

---

---

## Routage dans les réseaux de capteurs mobiles sans fil

# 1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont émergé et ont déplacé l'attention des réseaux Ad hoc vers des réseaux avec des nœuds capteurs statique ou mobiles capables de détecter les différents types d'événements. En outre, ils peuvent changer leurs positions fréquemment dans une zone de détection spécifique. Les applications des RCSF peuvent être largement divisées en applications basées sur le temps, pilotées par les événements, à la demande et basées sur le suivi. L'architecture des nœuds capteurs mobiles, l'utilisation de l'énergie résiduelle, la mobilité, la topologie, l'évolutivité, la localisation, le routage de collecte de données, la qualité de service (QoS), etc... sont les facteurs clés pour concevoir des RCSF.

Un réseau de capteurs mobile et sans fil (RCMSF) est constitué de nœuds capteurs qui ont la capacité de se déplacer dans le réseau [4]. Un nœud capteur est un petit appareil qui comprend trois éléments de base: un sous-système de détection pour l'acquisition de données à partir de son environnement, un sous-système de traitement pour le traitement local de données et leur stockage, et un sous-système de communication sans fil pour la transmission de données [5].

Des études préliminaires montrent que l'introduction de la mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil est avantageuse [6], [7]. La mobilité peut être réalisée en équipant les nœuds capteurs avec des mobilisateurs pour changer leurs emplacements [5], les capteurs peuvent être équipés par des ressorts [8] ou des roues [9] ou ils peuvent être attachés à des transporteurs comme les véhicules, les animaux, robots [10], etc...

Parfois, les nœuds capteurs peuvent se déplacer en raison de l'environnement (maritime ou aérien) dans lequel ils sont placés. Des recherches récentes prouvent que les réseaux de capteurs mobiles et sans fil surpassent les réseaux de capteurs statiques et sans fil car ils offrent les avantages suivants [4], [5] :

- Une architecture rare peut être considérée comme une conception de réseau de capteurs mobiles
- Un RCMSF a une topologie dynamique qui influe dans le choix des protocoles de routage, des protocoles de niveau MAC et des caractéristiques physiques
- Dans un RCSF statique, un réseau connecté peut se transformer en un ensemble de sous-réseaux déconnectés en raison d'une défaillance matérielle ou de l'épuisement de l'énergie, mais dans un RCMSF, les nœuds peuvent être utilisés pour la réorganisation du réseau
- La durée de vie d'un réseau de capteurs peut être augmentée en utilisant des nœuds capteurs mobiles [11]
- Les capteurs mobiles peuvent se déplacer après leur déploiement initial afin d'atteindre l'exigence de densité désirée et à réduire les trous de l'énergie dans le réseau
- La mobilité peut réduire la consommation d'énergie lors de la communication [11]
- Un RCMSF a plus de capacité de canal par rapport à un RCSF statique
- Un meilleur positionnement peut être réalisé en utilisant les RCMSF

- La fidélité des données peut être réalisée par les RCMSF en réduisant le nombre de sauts suivant lequel la probabilité d'erreur décroît

Quelques-unes des applications où les réseaux de capteurs mobiles et sans fil peuvent être utilisés comprennent un groupe de surveillance de l'écologie des oiseaux migrateurs, un travailleur mobile (peut-être un robot ou un humain) équipée d'un (des) capteur(s) de collecte et de transmission de données vers le puits (station de base ou station de collecte) au sujet de la production de l'agriculture, ville intelligente, le vote électronique, système de trafic intelligent, les pompiers se déplaçant dans un immeuble en feu, etc [4], [12]. Certaines des applications peuvent avoir besoin de l'appui des puits mobiles tels que les soldats équipés d'assistants numériques personnels (PDA) se déplaçant dans un champ de bataille pour la détection de l'ennemi et un sauveteur qui est équipé de PDA se déplaçant dans une zone sinistrée à la recherche de survivants.

Mais l'introduction de la mobilité dans un réseau de capteurs sans fil est très difficile puisque la rupture de chemin se produit fréquemment en raison de la défaillance du canal, les interférences, la mobilité et l'échec du nœud. La Pré-construction des messages de livraison ne seront pas d'une grande aide ici puisque la topologie change trop souvent. Les mises-à-jours fréquentes de localisation depuis un nœud mobile peut conduire à une décharge excessive de l'approvisionnement de la batterie du nœud capteur et peut également augmenter les collisions [13]. En raison de ces facteurs (comme la mobilité des nœuds), des restrictions de bande passante, des ressources limitées, etc... doivent être prisent en compte dans la conception des RCMSF. Sur la base du type de communication, deux types de RCMSF existent [4]:

- Avec infrastructure, l'unité mobile est reliée à la station de base la plus proche qui se trouve dans son rayon de communication.
- Sans infrastructure, dans ce type de réseau, aucun routeur fixe n'est nécessaire et toutes les unités mobiles sont capables de mouvement. Elles sont auto-organisatrices avec la capacité d'établir une communication d'une manière arbitraire.

Le routage est le fait de déplacer un paquet de données de la source à la destination. Le chemin de chaque message destiné à la station de base dans un réseau de capteurs est crucial en termes de durée de vie du réseau.

Les longs trajets peuvent augmenter le délai du réseau, même pour le routage via la route la plus courte envisage d'impliquer des nœuds intermédiaires, dans ce cas de figure nous constatons un épuisement rapide de l'énergie conduisant au partitionnement du réseau. Le meilleur protocole de routage est celui qui couvre l'ensemble des états d'un réseau spécifique et ne consomme pas trop de ressources réseau. Les nœuds capteurs possèdent une énergie limitée, pour cela, la minimisation de la consommation énergétique est essentielle pour les RCMSF.

La prise en charge de la mobilité avec l'efficacité énergétique dans un réseau de capteurs sans fil apporte des défis importants pour le routage [14] :

- Il est impossible de construire un système d'adressage global pour le déploiement d'un grand nombre de nœuds capteurs car elle conduit à un alourdissement de la maintenance de l'overhead,

- La nature hautement dynamique de RCMSF et le changement fréquent dans les liens de la topologie et de la communication réseau, en raison de la mobilité de nœud ou la rupture de lien rend le routage un véritable défi,
- Le traitement d'énergie et les capacités de stockage des nœuds capteurs mobiles sont limités. En raison de la nature dynamique de la topologie du réseau, différents nœuds épuiseront leurs réserves énergétiques et abandonnent le réseau conduisant à la segmentation de ce dernier,
- De multiples capteurs peuvent détecter la survenance d'un événement et générer des données simultanément. Ce trafic de données doit être agrégé pour améliorer l'efficacité énergétique et l'utilisation de la bande passante,
- Les réseaux de capteurs sont généralement reliés à une application spécifique. Les exigences de conception d'un RCMSF changent avec l'application,
- La connaissance de la position des nœuds capteurs mobiles est importante puisque la collecte des données est basée sur la localisation. Un protocole de routage peut être conçu pour faciliter cette localisation,
- Le protocole de routage doit être adaptable à l'auto-organisation naturelle des nœuds.
- L'architecture de groupement (*clustering*) dynamique devrait être adaptée par le protocole de routage, à titre d'exemple la dégradation de l'énergie du *clusterhead* (CH) peut être évitée afin de prolonger ainsi la durée de vie du réseau,
- Le choix de chemin randomisé devrait être considéré comme des chemins multiples à une destination avec des overheads bas pouvant aider dans la mise en équilibre de la charge de réseau et la tolérance de l'échec de nœuds,
- De bons seuils peuvent être définis pour transférer les données capturées. Ceci économiserait l'énergie en limitant des transmissions inutiles.

Beaucoup de chercheurs proposent différents protocoles de routage basés sur des critères divers mais aucun protocole de routage ne peut être qualifié de parfait, et chaque protocole de routage peut être approprié pour une certaine application, mais il peut y avoir des lacunes lorsqu'il est évalué sous un autre point de vue. Donc, il faut adapter le protocole de routage aux contextes des applications suivant le besoin.

## 2. Présentation des réseaux de capteurs mobiles sans fil

Les réseaux de capteurs mobiles sans fil (RCMSF) jouent un rôle essentiel dans les applications du monde réel dans lesquelles les nœuds de capteurs sont mobiles. Les RCMSF sont beaucoup plus polyvalents que les RCSF statiques car les nœuds capteurs peuvent être déployés dans n'importe quel scénario et faire face à des changements rapides de topologie. Les nœuds capteurs mobiles sont constitués d'un microcontrôleur, de divers capteurs (pour lumière, température, humidité, pression, mobilité, etc.), d'un émetteur-récepteur radio et d'une batterie. Les principales applications des RCMSF sont l'économie, la surveillance environnementale, l'exploitation minière, la météorologie, la surveillance sismique, la détection acoustique, les applications de santé, la surveillance des processus, la protection des infrastructures, le calcul contextuel, la navigation sous-marine, les espaces intelligents et la surveillance militaire tactique.

Il y a deux séries de défis pour les RCMSF; matériel et environnement. Les contraintes matérielles principales sont la puissance de la batterie limitée et les exigences à faible coût. C'est-à-dire que les nœuds capteurs mobiles doivent suivre des algorithmes à faible consommation d'énergie, à faible complexité, requis pour les microcontrôleurs et n'utiliser qu'une radio simplex [15].

Dans les RCMSF, les principaux facteurs environnementaux sont le milieu partagé et la topologie variable. Le support partagé indique que l'accès au canal doit être régulé d'une manière ou d'une autre. Par conséquent, la topologie du réseau joue un rôle important dans la conception du protocole de routage et décide également du chemin de transmission des paquets de données pour atteindre la destination désirée [16]. À signaler que les nœuds capteurs basé mobilité, les performances des topologies de réseau telles que les topologies plates/non structurées, de chaîne, d'arbre et de cluster sont inadéquates pour les RCMSF à grande échelle. Pour résoudre ce genre de problèmes, une topologie de réseau hybride est la meilleure option pour les environnements à grande échelle. En outre, le protocole de routage détermine un chemin efficace et fiable pour la transmission de données. Par conséquent.

### 2.1. Type de RCSF

Habituellement, les nœuds capteurs sont déployés dans des environnements terrestres, souterrains et sous l'eau et forment un RCSF. Basé sur le déploiement des nœuds capteurs, un réseau de capteurs fait face à différents défis et contraintes. Les types de RCSF sont des RCSF terrestres, multimédias, souterrains, multimédias et mobiles. Selon les ressources des nœuds capteurs sur un RCMSF, il peut être classé en RCMSF homogènes et hétérogènes. RCMSF homogène se compose de nœuds capteurs mobiles identiques et ils peuvent avoir des propriétés uniques. Mais, RCMSF hétérogène se compose d'un nombre de nœuds capteurs mobiles avec différentes capacités dans la propriété de nœud tels que la puissance de la batterie, la taille de la mémoire, la puissance de calcul, la portée de détection, la portée de transmission et la mobilité. Plus complexe que RCMSF homogène [17].



## 2.2. Défis de conception des RCMSF

Les principaux défis de conception des RCMSF sont le coût matériel, l'architecture système, le déploiement, la taille de la mémoire et de la batterie, la vitesse de traitement, la topologie dynamique, la mobilité, la couverture, la consommation énergétique, la conception, l'évolutivité, la localisation, hétérogénéité de réseau, défaillance de nœud, auto-configuration, conception de couches croisées (*cross layer*), trafic équilibré, tolérance aux pannes, connectivité sans fil et sécurité [18].

## 2.3. Architecture de nœud de capteur mobile

Habituellement, les nœuds capteurs sont conçus avec un ou plusieurs capteurs (température, lumière, humidité, pression, luminosité, proximité, etc.), microcontrôleur, mémoire externe, émetteur-récepteur radio, convertisseur analogique-numérique (ADC), antenne et batterie. Aussi à noter que les nœuds sont limités au stockage embarqué, à la puissance de la batterie, au traitement et à la capacité radio en raison de leur petite taille [19]. Cependant, l'architecture du nœud capteur mobile est presque similaire au nœud capteur normal. Mais, certaines unités supplémentaires sont considérées sur les nœuds capteurs mobiles tels que les localisateurs / positionneurs, le mobilisateur et le générateur d'énergie. L'architecture d'un nœud capteur mobile est représentée sur la Figure 1.1. L'unité de localisation ou de localisation de position est utilisée pour identifier la position du nœud capteur et le mobilisateur assure la mobilité pour un nœud capteur. L'unité de génération de puissance est responsable de générer une puissance pour satisfaire les besoins énergétiques supplémentaires du nœud capteur en appliquant des techniques spécifiques telles que la cellule solaire.

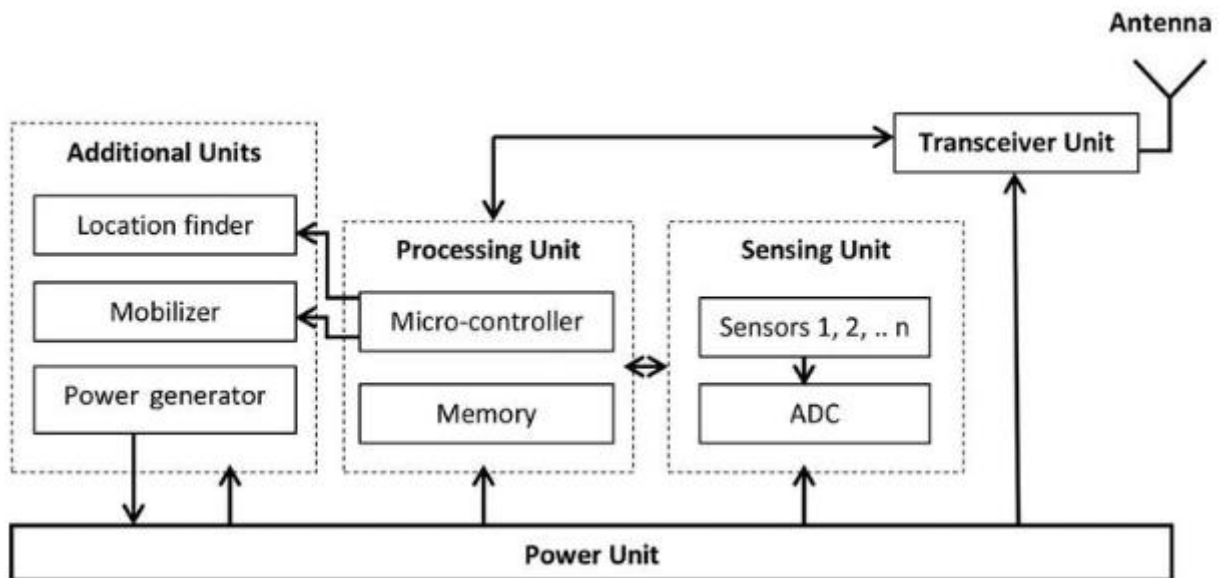


Figure 1.1 : Architecture d'un nœud capteur mobile [20]

## 2.4. Protocoles de routage pour les RCMSF

Les approches de routage pour les RCMSF peuvent être centralisées, distribuées ou hybrides. Une conception de protocole de routage efficace et fiable pour les RCMSF prend en compte la topologie réseau, la mobilité des nœuds, la consommation d'énergie, la couverture réseau, les méthodes de transmission, la QoS, la connectivité, l'agrégation de données, l'hétérogénéité, l'évolutivité et la sécurité. La partie suivante évoque les protocoles de routage existants pour les RCMSF.

## 3. Classification des protocoles de routage dédiés aux RCMSF

Les protocoles de routage pour les RCMSF peuvent être classés principalement en fonction de leur :

- Structure de réseau,
- L'état de l'information,
- L'efficacité énergétique des techniques de routage,
- Qualité de services,
- Sécurité des protocoles de routage,
- Tolérance au délai

### 3.1. Classification basée sur la structure du réseau

#### 3.1.1. Protocoles de routage plats

Quand des protocoles de routage sont basés sur une architecture plate, tous les nœuds capteurs dans le réseau sont traités de manière égale. Ce sont principalement les protocoles de routage centrés données. Les nœuds collaborent pour effectuer la tâche de routage en envoyant des requêtes à certaines régions et de collecter les données en provenance des capteurs situés dans cette région.

Dans les réseaux de capteurs statiques de nombreux protocoles de routage sont à base plate à savoir, SPIN [21] et Directed Diffusion [22], etc... Ils essaient d'économiser l'énergie par la négociation et l'élimination des données redondantes. Mais avec l'introduction de la mobilité des nœuds, ces protocoles ne peuvent pas être utilisés dans RCMSF puisque la rupture de la liaison est très fréquente.

Par la suite nous allons exposer quelques protocoles de routage basés mobilité pour une architecture plate.

### 3.1.1.1. Routage opportuniste

Ce type de protocoles sélectionne un ensemble de voisins du prochain saut et affecte une priorité en fonction de certaines caractéristiques. Il peut exploiter la nature de diffusion des transmissions sans fil et sélectionne le prochain saut par paquets sur la base des conditions de perte dynamique. Il permet de réduire le nombre de transmissions nécessaires pour la livraison fiable d'un paquet, car il évite les retransmissions aussi longtemps que le paquet progresse vers la destination. Mais il est menacé par le renvoi double depuis plusieurs nœuds qui ignorent les transmissions des autres. D'où le routage opportuniste fonctionne bien seulement si le paquet est transmis par le nœud qui possède la plus haute priorité.

Guangcheng et al. [23] suggèrent un routage opportuniste pour les réseaux de capteurs sans fil mobiles basés sur l'indicateur d'intensité du signal reçu « *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) ». La probabilité opportuniste (OP) est basée sur le RSSI des paquets depuis le puits, et le vecteur de Mobilité (MV) est établi. Depuis ces données, le meilleur nœud avec la plus grande OP disponible à cet instant est utilisé pour stocker et transmettre des paquets à chaque saut, après cela les paquets sont diffusés. Le puits envoie des paquets de balise périodiquement avec une puissance élevée de signal. Les autres nœuds établissent et actualisent leur valeur OP avec les informations RSSI.

Le nœud qui doit envoyer les données, diffuse des paquets qui comprennent la valeur OP au puits dans son en-tête. Les nœuds dans FCS (*Forward Candidate Set*) examinent l'en-tête de chaque paquet. Si la valeur de l'OP dans l'en-tête de paquet est inférieure à sa propre OP, il garde une copie du paquet et le transmet. Le taux de délivrance avec succès sur la base de RSSI a été jugée trois fois mieux qu'AODV, car il n'est pas basé sur le tracé existant et a plus de chances de livrer des paquets avec succès. Mais le retard pris est observée à être très élevé.

Lian et al. [24] ont proposé '*Receiver based Opportunistic Forwarding Protocol*' (ROF) pour RCMSF qui n'a pas besoin d'établir un routage global entre le nœud source et le puits, mais permet aux nœuds voisins de faire un acheminement direct sous certaines conditions et permet de résoudre le conflit dans la transmission des données. Le droit de transfert est calculé en fonction de la distance à parcourir, la zone de couverture supplémentaire du puits et de l'énergie résiduelle du nœud. Les nœuds qui obtiennent le droit de transfert, transmettent les paquets de données tandis que d'autres rejettent les paquets. Le délai et la consommation d'énergie de communication du ROF est faible quand le nombre de nœuds est petit et est modéré quand il y a une augmentation de nœuds. Il est moins influencé par la vitesse des nœuds car ROF raccourcit le temps de transmission correcte par un mécanisme de double canal de communication.

Andrea et al. [25] proposent un protocole de routage opportuniste basé sur l'estimation de la mobilité du puits. Ici, les paquets de données sont transmis à partir d'une source d'information statique depuis un puits mobile à travers un RCSF multi-sauts. Alors que la source et les nœuds capteurs sont situés à des positions fixes, le puits mobile estime et suit la trace de leurs états utilisant le filtre de Kalman [25]. Le puits mobile transmet un message '*UPDATE STATE*' contenant l'estimation actuelle de son état à tous les nœuds. Les nœuds dans le groupe {Si} qui décodent avec succès ce paquet entrent dans une procédure de contention distribuée pour sélectionner le nœud qui doit transmettre les informations de l'émetteur vers le puits. Le routage géographique de base est effectué pour délivrer les données. *Mobility Prediction Routing* (MPR) économise

l'énergie en déclenchant le message 'UPDATE STATE' uniquement lorsque cela est nécessaire. Il minimise le trafic nécessaire pour suivre de manière fiable le puits en comparant la fréquence de transmission 'UPDATE STATE' pour le modèle de mouvement réel du puits. MPR offre une grande fiabilité même lorsque le réseau doit prendre en charge un niveau élevé de trafic et est en mesure de fournir des informations d'une façon beaucoup plus rapide. Donc, ce protocole est très approprié pour les applications qui ont des contraintes élevées en termes de temps de latence. Une valeur plus élevée de l'accélération du puits génère un faible taux de livraison de paquets.

### 3.1.1.2. Meilleur chemin de routage

Ces types de protocoles de routage tentent d'identifier le meilleur chemin entre la source et la destination à l'aide de quelques métriques et des transferts de paquets vers le saut suivant. Ils déclenchent de nombreuses retransmissions de paquets et de découvertes de chemin.

Le et al. [26] ont proposé l'algorithme PAGER -M, qui utilise les informations de localisation du nœud capteur et de la station de base afin d'attribuer à chaque nœud capteur un coût, qui est représenté par la longueur euclidienne du chemin le plus court depuis un capteur vers la station de base. Un paquet est transmis à la station de base autant que possible. Le coût pour chaque capteur est lui-même assigné en utilisant la phase d'extension et la phase de propagation des coûts. Cela aide à réduire les échecs de transmissions provoqués par la mobilité. Il est à noter que PAGER -M permet d'obtenir une moyenne de taux de délivrance > 99% avec un intervalle de balise 3-4 secondes. Lorsque le nombre de nœuds est augmenté, la moyenne de taux de délivrance de PAGER -M est supérieure au protocole de routage AODV. C'est parce que la longueur du chemin d'AODV est supérieure à celle de PAGER -M d'un saut.

Kihun et al. [27] ont expliqué l'emplacement basé 'Energy Efficient Intersection Route Protocole' (EELIR). Pendant le début de la phase d'annonce, le rayon de couverture d'un nœud est limité par le nœud émetteur. Il est réalisé en formant un segment avec l'intersection de deux cercles. Le segment est la distance minimale à partir du nœud vers le puits. Le premier cercle a pour centre le nœud avec le rayon  $r$  égal à la distance maximale de transmission du nœud. Le deuxième est un point qui se trouve dans le segment. Les positions de deux cercles sont découvertes et l'intersection des deux cercles forment l'espace de routage limité. Le nœud émetteur 'A' transmet un message d'annonce vers les nœuds voisins. Dans la phase de réponse conditionnelle, les nœuds voisins de 'A' décident de répondre ou non au message d'annonce.

## 3.1.2. Routage hiérarchique

La structure des réseaux à architecture plate ne sera pas pertinente si la taille du réseau est importante puisque le puits est surchargé lorsque le nombre de nœuds augmente. Cela provoque un goulot d'étranglement, ce qui provoque des retards dans la cadence des communications à cause desquels il peut avoir des pertes de paquets. Une architecture unique de passerelle n'est pas extensible pour un plus grand ensemble de capteurs couvrant une zone d'intérêt plus large, puisque les capteurs ne sont pas généralement capables de supporter des communications longues distances. La défragmentation du réseau en groupes peut fournir une solution à ces problèmes. Les nœuds du réseau sont dynamiquement organisés en groupes en fonction de certains paramètres tels que la distance, l'énergie résiduelle etc... Une hiérarchie sur la base de nœuds capteurs est créée quand un sous-ensemble de nœuds a plus de responsabilités que les

autres nœuds du réseau. Dans un routage hiérarchique, certains nœuds jouent un rôle passif comme l'écoute tandis que d'autres jouent un rôle actif comme relais de trafic, gestion du voisinage, etc... Au lieu de transmettre des données directement au puits, tous les nœuds transmettent leurs données aux *clusterheads* (CHs) respectifs appelés aussi agrégateurs [28]. Le CH effectue l'agrégation des données et élimine les informations redondantes. L'objectif principal de ce type de routage est de parvenir à l'efficacité énergétique. Il contribue également à réduire la complexité de l'organisation de l'overhead du réseau, qui est proportionnel au nombre de nœuds dans le réseau.

### 3.1.2.1. Hiérarchie plate

En hiérarchie plate, tous les nœuds du réseau ont le même potentiel, mais ils ont des responsabilités différentes. Le RRP (*Robust cooperative Routing Protocol*) proposé par Xiaoxia et al. [29] se compose de plusieurs nœuds qui essaient de transmettre le même paquet à un autre nœud d'une façon collaborative. Les auteurs ont supposé que tous les nœuds possèdent la même portée d'émission et qu'un chemin doit être établi au préalable entre une source et une destination.

M-Geocast proposé par Lynn et al. [13] est un protocole de routage géométrique robuste et économique en énergie avec plusieurs récepteurs mobiles. L'un des puits mobiles est choisi comme un puits maître et il agit en tant que fournisseur de service de localisation, collecteur de données et serveur de diffusion. Un routage géographique simple est utilisé par tous les nœuds pour envoyer un message au puits maître. Deux techniques d'optimisation à savoir, la projection de l'historique de chemin et la prédiction du vide géographique sont appliquées dans cet algorithme. Une analyse de simulation a montré que M-Geocast délivre avec succès plus de 99% de tous les événements, même si le nombre de puits augmente. Bien que la vitesse des nœuds est augmentée, le retard occasionné par M-Geocast reste stable car le routage géométrique n'entraîne pas une charge supplémentaire, indépendamment de sa vitesse, aussi longtemps que les informations de localisation de la destination restent les mêmes.

Dans [30], Muthukumaran et al. ont proposé une amélioration de l'efficacité énergétique au niveau des nœuds et d'augmenter la durée de vie du réseau en proposant un modèle de routage appelé *ENergy-Efficient Clustering* (ENEFC) basé sur un schéma de routage hiérarchique. L'ENEFC propose trois schémas de routage hiérarchiques différents: le routage hiérarchique utilisant l'identification de cluster (HRCI), le routage hiérarchique utilisant le multi-hop (HRMH) et le routage hiérarchique utilisant le multi-niveau (HRML). Le HRML attribue un niveau à chaque *clusterhead* lors de la publication de la station de base sur l'ensemble du réseau. Lors de la coupure du chemin, HRML établit efficacement un nouveau niveau pour la route entre la station de base et les *clusterheads*. Les résultats expérimentaux et les analyses pour les trois schémas montrent que HRML est plus efficace en termes d'efficacité énergétique que les deux autres schémas.

### 3.1.2.2. Hiérarchie de cluster

Dans cette architecture, les capteurs s'organisent en groupes et chaque groupe possède un chef appelé *clusterhead* 'CH'. Le CH rassemble et transmet l'information à travers d'autres CH vers la station de base. La durée de vie des batteries des nœuds est redressée; améliorant ainsi la durée

de vie du réseau, mais les ressources du CH se voient parfois épuisées étant donné que toutes les communications passent par lui.

*Shortest Path* (SP) évite souvent l'élection de CH et économise une importante quantité d'énergie. On constate que les nœuds dans LEACH [31] meurent plus rapidement que les nœuds de SP. La durée de vie des nœuds, à l'aide du protocole de routage SP, est augmentée 13 fois par rapport à LEACH.

Santar Pal Singh et al. [32] sont arrivés à récapituler leurs travaux dans la **Table 1.1** qui résume la comparaison entre les protocoles de routage les plus populaires sur la base de l'efficacité énergétique, retard de livraison, la stabilité des clusters, l'équilibrage de charge, et de la complexité algorithmique.

| Nom du protocole | Efficacité énergétique | Délai de livraison | Stabilité du cluster | Scalabilité | L'équilibrage de charge | Complexité algorithmique |
|------------------|------------------------|--------------------|----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|
| LEACH            | Médiocre               | Très rapide        | Elevée               | Très basse  | Moyen                   | Souple                   |
| HEED             | Moyenne                | Moyen              | Elevée               | Moyenne     | Moyen                   | Moyenne                  |
| UCS              | Médiocre               | Rapide             | Elevée               | Basse       | Mauvais                 | Moyenne                  |
| EECS             | Moyenne                | Rapide             | Elevée               | Basse       | Moyen                   | Très élevée              |
| CCM              | Médiocre               | Rapide             | Elevée               | Très basse  | Moyen                   | Moyenne                  |
| LECH-VF          | Moyenne                | Rapide             | Elevée               | Très basse  | Moyen                   | Moyenne                  |
| TEEN             | Très bonne             | Rapide             | Elevée               | Basse       | Parfait                 | Elevée                   |
| GAF              | Moyenne                | Très rapide        | Moyenne              | Elevée      | Moyen                   | Moyenne                  |
| PANEL            | Moyenne                | Moyen              | Basse                | Basse       | Parfait                 | Elevée                   |
| TTDD             | Médiocre               | Très lent          | Très élevée          | Basse       | Parfait                 | Souple                   |
| SLGC             | Moyenne                | Très rapide        | Moyenne              | Très basse  | Moyen                   | Moyenne                  |
| PEGASIS          | Faible                 | Très lent          | Basse                | Très basse  | Moyen                   | Elevée                   |
| CCS              | Faible                 | Lent               | Basse                | Basse       | Très mauvais            | Moyenne                  |
| TSC              | Moyenne                | Moyen              | Moyenne              | Moyenne     | Mauvais                 | Moyenne                  |

**Table 1.1 : Comparaison entre les protocoles de routage les plus populaires basés clusters**

### 3.1.2.3. Hiérarchie de Zone

Il s'agit d'une extension du système à hiérarchie plate. Le réseau est divisé en différentes zones. En réduisant la portée de la réorganisation de la topologie, la scalabilité peut être augmentée. Ceci est réalisé si chaque zone effectue un routage distributif. Certains protocoles sont capables de créer des zones sans chevauchement tandis que d'autres ne le sont pas. Il réduit la complexité de la réorganisation déduite par le mouvement du nœud.

Un protocole de routage à base de clusters pour les réseaux de capteurs mobiles a été proposé par Liliana et al. [33]. Ils conçoivent un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil à haute densité où les clusters sont formés sur la base des schémas de mobilité des capteurs mais la surcharge provoquée par l'information sur la mobilité n'est pas très élevée. Tous les nœuds capteurs sont supposés être homogènes et leurs emplacements sont connus. La station de base est supposée être stable. Le domaine de capture est divisé en différentes zones carrées. Chaque zone possède un ID de zone unique correspondant aux coordonnées du point de la zone qu'il couvre dans le plan de l'origine. La taille de la zone détermine les nœuds voisins d'un nœud capteur. Chaque zone a un chef de zone qui sert de passerelle entre les capteurs d'un cluster et

les CHs. L'acheminement se fait uniquement par le chef de zone. Le nœud destination recueille plusieurs chemins lorsqu'il reçoit des messages *Route Request* (RREQ) à partir du nœud source dans une période de temps et sélectionne le chemin le plus stable, ensuite il envoie des messages *Route Reply* (RREP) de retour le long du trajet. Ce protocole de routage peut assurer une meilleure stabilité de routage.

Getsy et al. [34] ont proposé un routage hybride multi-chemins où la réduction de la dissipation d'énergie et de la transmission fiable de données est une obligation. Malgré la forme réelle du domaine de capture, l'ensemble de la zone est circonscrite dans un grand carré et ensuite divisé en différentes zones. Chaque zone est constituée d'un nœud appelé nœud chef, qui est choisi sur la base de l'énergie excédentaire du nœud. Chaque nœud dans une zone communique avec le nœud chef en utilisant une communication à saut unique. Lorsqu'un événement est détecté, le nœud capteur communique tout d'abord avec le nœud chef. Le nœud chef vérifie si la destination est dans sa zone.

Si c'est le cas, de manière proactive, l'événement est envoyé à la destination. C'est ce qu'on appelle le routage intra-zone. Pour transférer les données vers d'autres zones, le routage inter-zones est employé et utilise le EA (*Energy Aware Selection Mechanism*). Le concept de routage hybride utilisé dans cet algorithme permet de réduire le gaspillage de la bande passante et le contrôle d'overhead. Il réduit le trafic de contrôle produit par des inondations périodiques des informations de routage dans le routage dynamique.

#### 3.1.2.4. Routage basée sur la grille

Dans le protocole proposé par Jae Min Choi et al. [35], une grille est proposée au niveau de la zone de captage. Tous les capteurs stockent leurs informations de localisation et leurs identifications de grille par GPS. Un groupe est formé sur la base de l'ID de la grille. Initialement, les CHs sont choisis au hasard. Le puits mobile sélectionne un maximum de quatre CHs voisins les plus proches pour former l'Agent *clusterhead* (ACH). Quand un événement aura lieu dans un domaine de capture, la source détecte l'événement, construit le paquet de l'annonce et le transmet à ses CHs. Le CH fait de la fusion des données du paquet d'annonce et envoie les données sous la direction de l'ACH stocké. L'ACH transmet le paquet au moyen d'informations de localisation vers le puits mobile. Le protocole proposé réduit considérablement le nombre de paquets de contrôles, car il connaît la structure de grille et la configuration du cluster.

GBEER (Grid Based Energy Efficient Routing) [36] aborde le problème de la transmission de paquets depuis plusieurs sources vers plusieurs puits mobiles dans un réseau de capteurs à grande échelle. La zone de détection est divisée en une structure de grille et des nœuds capteurs décident leurs appartenances aux cellules en fonction des informations de localisation et le CH est choisi aléatoirement. Pour annoncer les données détectées par un nœud capteur, le CH envoie le paquet d'annonce de données à d'autres CHs. Le nœud capteur qui détecte un événement devient la source et il génère un paquet *Data Announcement* (DA) et l'envoie à son CH en utilisant le transfert géographique. Le CH regroupe les données et compresse ces paquets. Ensuite, il transmet le paquet à travers la cellule à laquelle il appartient. Durant la propagation du paquet DA, chaque CH stocke les informations de paquet de transmission. Les résultats des simulations montrent que GBEER n'est pas affectée par la vitesse des puits. Le modèle de

diffusion de données à deux niveaux TTDD (*The Two Tier Data Dissemination model*) possède un taux moyen de délivrance avec succès légèrement supérieur à GBEER.

Sanu et al. [37] proposent une nouvelle façon d'attribuer une adresse (à un nœud capteur dans un réseau de capteurs sans fil à base de grille). Les adresses de cellules de la grille sont affectées de sorte que les adresses de cellules adjacentes diffèrent d'un seul bit. Ensuite, les adresses adjacentes sont combinées comme dans le cas de la méthode de simplification de la carte de Karanaugh. Cela permet une compression des données en réduisant la taille des données d'adresse du capteur par rapport à un système d'adressage plat. L'idée repose sur l'établissement d'une liaison directe entre chaque adresse de nœud capteur et sa localisation géographique, ce qui rend le routage géographique multi-saut direct et efficace.

### 3.1.3. Constatation

La **Table 1.2** résume les principaux avantages et inconvénients du routage plat et hiérarchique dans les RCMSF.

| Méthodologie de routage | Avantages  | Inconvénients  |
|-------------------------|--|--|
| Routage plat            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adapté pour les petits réseaux</li> <li>• Routage opportuniste peut parvenir à une meilleure robustesse contre la mobilité du puits.</li> <li>• Haute fiabilité</li> <li>• peut être utilisé pour les applications avec fortes contraintes de retard</li> <li>• Meilleur chemin de routage permettant de réduire les paquets de contrôle</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne supporte pas un niveau de mobilité élevé</li> <li>• Ne fonctionne pas bien à des taux de transmission élevés</li> <li>• La latence du meilleur chemin de routage augmente avec l'augmentation de la vitesse du nœud</li> </ul> |
| Routage hiérarchique    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduit le routage des paquets inutiles</li> <li>• Routage hybride réduit le gaspillage de la bande passante, réduit le trafic de contrôle et diminue le phénomène de la collision</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Complexité dû à la sélection et à la maintenance des CHs.</li> </ul>  |

**Table 1.2 : Avantages et inconvénients de routage plat et hiérarchique dans les RCMSF**



## 3.2. Classification basée sur l'état de l'information

### 3.2.1. Routage basé sur la topologie

La topologie se réfère à la configuration ou à la forme du réseau. Elle est définie comme l'ensemble des liens de communication entre les paires de nœuds utilisés explicitement ou implicitement par le mécanisme de routage [38]. Un bon algorithme de contrôle de topologie est nécessaire pour améliorer la durée de vie du réseau, réduire les interférences, augmenter la capacité du réseau, réduire les délais de bout en bout et augmenter la robustesse aux défaillances fréquentes de nœuds [39]. Le routage basé sur la topologie implique une création judicieuse de routes depuis la source vers la destination.

Le contrôle de la topologie trouve sa justification soit dans les protocoles proactifs en réduisant les mises à jour périodiques des tables de routage soit dans les protocoles de diffusion en utilisant des méthodes de routage hiérarchiques. Il essaie de minimiser l'*overhead* de diffusion et la puissance pour atteindre tous les nœuds du réseau. Mais la complexité du routage se produit en raison de mouvement des nœuds qui déstabilise le réseau augmentant ainsi la maintenance de routes et de l'erreur de trajet. Le routage basé sur la topologie tente de minimiser le nombre de liens entre les nœuds en veillant à ce qu'il n'y ait aucune entrave à la connectivité du réseau et réduit aussi la puissance nécessaire pour les transmissions. Si un nœud est créé et la topologie est maintenue, l'algorithme appartient à un contrôle de topologie centralisé (*Centralized Topology Control*). Dans les algorithmes de routage, si un sous-ensemble de nœuds sont créés et la topologie est maintenue, ils appartiennent à un contrôle de topologie décentralisé (*Decentralized Topology control*) [40].

#### 3.2.1.1. Routage proactif

Les protocoles de routage qui stockent des informations dans une table de routage avant même qu'ils n'en ont besoin sont appelés protocoles de routage proactifs ou protocoles de routage conduits par des tables. Ils gardent une trace des itinéraires pour toutes les destinations du réseau. Les protocoles de routage proactif présentent un retard initial minimum et la route peut être immédiatement obtenue à partir de la table de routage.

Le CEER [41] est une approche de routage basée sur le nombre de sauts. Elle utilise la théorie des couleurs basée sur l'algorithme de localisation dynamique. Le modèle réseau se compose de quatre ancres qui collectent et agrègent les données reçues des *clusterheads*.

En OR-RSSI [23], les paquets puissants qui sont périodiquement envoyés par le puits sont utilisés par les autres nœuds pour établir des valeurs de probabilité opportunistes (OP). Une fois que les paquets sont diffusés par la source, le meilleur nœud avec la plus haute valeur d'OP disponibles à cet instant est utilisé pour stocker et transmettre les paquets à chaque saut.

#### 3.2.1.2. Routage réactif

Les protocoles de routage réactif ou protocoles de routage sur la demande acquièrent les informations de routage seulement lorsque cela est nécessaire. Ils consomment moins de bande

passante pour maintenir les tables de routage au niveau de chaque nœud. Le temps de latence pour nombreuses applications augmentera considérablement.

Dans [36], le nœud capteur qui détecte un événement, génère le paquet d'annonce de données et l'envoie au *clusterhead*. Le *clusterhead* propage le paquet *Data Announcement* (DA). Le puits envoie le *Data Request* (DR). Lorsque le *clusterhead* reçoit le paquet DR avec le paquet DA, il récupère le paquet DA et vérifie le temps de génération de données pour décider si les données sont toujours valides. Si les données sont valides, le *clusterhead* envoie le paquet DR au *clusterhead* de la source qui à son tour transmet le paquet DR à la source. La source génère le paquet de données et le transmet au puits.

### 3.2.1.3. Routage hybride

Le protocole de routage hybride limite la portée de la procédure proactive au voisinage local du nœud, mais la recherche dans le réseau, bien que globale, se fait en interrogeant seulement un sous-ensemble de nœuds du réseau. Le réseau est divisé en clusters ou zones. Au sein d'un cluster, le protocole de routage évalue continuellement le chemin de sorte que, lorsqu'un paquet doit être transmis, le chemin est déjà connu et peut être utilisé immédiatement. Entre clusters, la communication se fait via routage réactif [42].

Dans (*Anycast based Lightweight routing protocol*) [43], le puits diffuse un message HELLO périodiquement et les nœuds reçoivent dans leurs caches les informations avec une estampille temporelle. A chaque top d'horloge, les nœuds vérifieront leurs caches pour tout puits disponible. Si aucun puits n'est disponible, la découverte de route est initiée avec le mécanisme anneau RREQ. Les nœuds ayant des informations de puits actif génèrent RREP et la transmission de données est démarrée.

(*Energy Efficient Mobile Wireless Sensor network*) [34] est un protocole de routage hybride multiple. Lors de l'acheminement intra-cluster, les nœuds se trouvant dans une zone communiquent périodiquement avec le *clusterhead* de fusion et leurs informations sont stockées dans une table de routage au niveau du nœud de fusion. Pour le routage inter-cluster, les nœuds de fusion permettent la sélection des meilleurs chemins à partir du calcul de l'énergie nodal excédentaire maximale.

### 3.2.2. Routage basé sur la localisation

Les protocoles de routage qui fournissent des paquets pour des nœuds en fonction de leur localisation géographique sont les protocoles de routage basés sur la localisation.

Ils supposent que tous les nœuds du réseau sont connaisseurs de leurs emplacements géographiques. La destination de routage est définie soit comme un nœud avec un emplacement donné ou comme une région géographique. Chaque paquet contient une quantité supplémentaire limitée d'informations de routage pour enregistrer son dernier passage dans le réseau [44]. Il existe différents critères qui assurent que les informations de localisation des nœuds capteurs jouent un rôle très important pour le routage. Par exemple, la connaissance de l'emplacement devient cruciale pour calculer la distance entre deux nœuds particuliers pour que

la consommation d'énergie puisse être estimée. La requête peut être diffusé directement à une région particulière qui à son tour réduit le nombre de transmissions.

### 3.2.2.1. Basé temps

Lynn et al. [13] ont conçu un routage en fonction du temps de mise à jour de la localisation appelé M-Geocast (**Figure 1.2**). Ce temps marque chaque paquet avec les informations de localisation de sa destination. Le nœud émetteur fait un choix optimal localement en sélectionnant l'un de ses voisins qui est le plus proche de la destination. Chaque nœud possède les informations de localisation de tous ses voisins à travers le processus de découverte de voisinage. Dans le processus de découverte de voisinage, chaque nœud diffuse périodiquement ses informations de localisation à l'aide de son voisin par une diffusion de niveau MAC, y compris son propre identifiant.

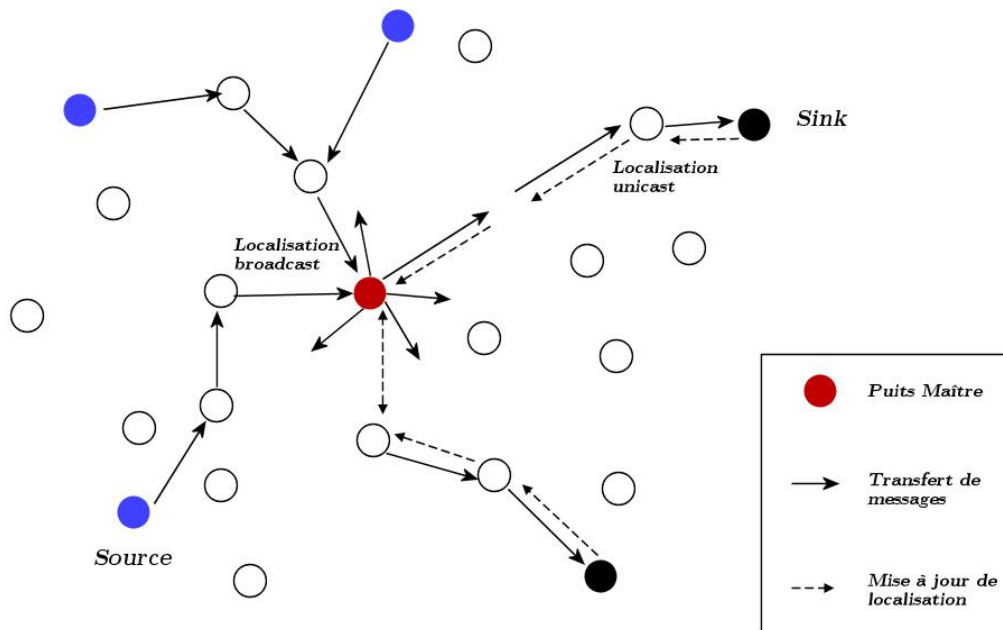


Figure 1.2 : Routage à travers un puits maître dans le protocole M-Geocast [13]

Le protocole de routage élastique proposé par Yu et al. [12] est un nouveau système de routage géographique pour puits mobiles dans les réseaux de capteurs sans fil. Le puits envoie des messages périodiques informant son emplacement à ses nœuds voisins et informe son emplacement actuel vers le nœud à partir duquel il a reçu le dernier paquet. La source obtient la localisation du puits mobile et transmet les paquets de données d'une façon continue au puits.

### 3.2.2.2. Basé distance

Dans [26], Le Zouet al. ont proposé un protocole de routage basé distance nommé '*Partial partitioning Avoiding GEographic Routing—Mobile*' (PAGER-M). Il utilise les informations de localisation de nœuds capteurs et de la station de base afin d'attribuer à chaque nœud capteur

un coût. Le coût est calculé sur la base de la distance euclidienne du chemin le plus court vers la station de base.

Le protocole de routage proposé par Jae Min Choi et al. dans [35] suppose que tous les nœuds connaissent leur propre emplacement par 'Global Positioning System' (GPS). Dans la zone de captage, la grille est construite et les clusters sont formés sur la base d'un ID réseau. Le puits mobile sélectionne les quatre *clusterheads* les plus proches et les désigne comme Agent *clusterheads* (ACH). Il calcule sa distance vers les ACH utilisant l'ID du réseau. Tous les ACH transmettent leurs informations de localisation au CH qui leur sont liées. Le puits transmet des paquets de contrôles contenant ses informations de localisation seulement à l'ACH. Lorsqu'un événement se produit, la source construit des paquets d'annonce et les transmet au *clusterhead* du cluster dont elle appartient. Le CH envoie des données vers l'ACH enregistré. La transmission des données se fait à travers la distance la plus courte. Si un puits se déplace et l'ACH est décalé, le précédent ACH attendra jusqu'à ce qu'il reçoive les informations de localisation d'une nouvelle ACH, puis transmet les données.

### 3.2.2.3. Basé distance prédictive

M-LEACH [45] suppose que tous les nœuds connaissent leurs localisations en utilisant le GPS ou autre schéma de localisation et les nœuds capteurs sont regroupés en clusters. La distance entre le *clusterhead* et le nœud est calculée. Sur la base de la distance prévue, le clustering et le routage sont effectués. Les *clusterheads* sont choisis en fonction de leurs emplacements tels qu'ils minimisent la consommation de l'énergie totale. Chaque nœud envoie son emplacement, la vitesse et le niveau d'énergie vers la station de base qui est fixe. La station de base sélectionne le *clusterhead*. Ce dernier diffuse des messages d'annonce sur la base du protocole MAC 'Carrier Sense Multiple Access' (CSMA).

### 3.2.3. Constatation

| Protocole | Type                     | Scalabilité | M.à.J de localisation | Complexité d'implémentation | Localisation | Robustesse | Overhead du traitement | Consommation énergétique |
|-----------|--------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|------------|------------------------|--------------------------|
| M-Geocast | Basé temps               | Oui         | Périodique            | Modérée                     | Non          | Elevée     | Basse                  | Faible                   |
| PAGER-M   | Basé distance            | Oui         | Basée événement       | Modérée                     | Non          | Elevée     | Basse                  | Faible                   |
| ACH       | Basé distance            | limitée     | Basée événement       | Elevée                      | Oui          | Moyenne    | Basse                  | Moyen                    |
| M-Leach   | Basé distance prédictive | limitée     | Basée événement       | Elevée                      | Oui          | Moyenne    | Elevée                 | Faible                   |
| ROF       | Basé distance prédictive | limitée     | Basée événement       | Modérée                     | Non          | Elevée     | Moyenne                | Moyen                    |

Table 1.3 : Catégorisation des protocoles de routage basés localisation dans les RCMSF

### 3.3. Classification basée sur l'efficacité énergétique des techniques de routage

Les nœuds capteurs possèdent une énergie limitée et une puissance de calcul limitée [46]. Donc, ils peuvent ne pas être en mesure d'exécuter des protocoles de routages sophistiqués. La durée de vie d'un nœud capteur dépend principalement de l'alimentation électrique à partir d'une batterie limitée. La stabilité d'un réseau de capteurs est proportionnelle à la longévité de la durée de vie des nœuds capteurs. Par conséquent, les nœuds capteurs doivent être capables de survivre avec une source limitée d'énergie [47].

En raison des caractéristiques de déploiement aléatoire et à faible coût des nœuds capteurs, ça devient difficile et inutile de les recharger une fois que leur énergie est épuisée. Les nœuds proches du puits épuisent leur énergie rapidement, ce qui rend le puits inaccessible. Le traitement d'*overhead* et le retard au niveau des nœuds augmentent si le nombre de sauts augmente en raison du fait que les paquets doivent être mémorisés au niveau de plusieurs nœuds sur le chemin. Ceci conduit finalement à la perte de paquets. La perte de paquets induit une retransmission, ce qui augmentera la consommation d'énergie [48].

Le gaspillage d'énergie se produit lorsqu'un nœud reçoit plus d'un paquet en même temps faute de collision. Ecouter des paquets qui sont destinés à d'autres nœuds consomme énormément d'énergie. L'écoute passive et l'émission exagérée dégrade significativement l'économie d'énergie. [49]. Tous ces facteurs nécessitent la conception de techniques de routage novatrices pour réduire la consommation énergétique. Par conséquent la consommation d'énergie représente un défi majeur pour les algorithmes et les protocoles de routage.

#### 3.3.1. Contrôle de l'énergie d'émission

Kihun Kim et al. [27] ont proposé un protocole de routage qui minimise la puissance de transmission en utilisant des informations de localisation ainsi que les niveaux d'énergie des nœuds capteurs. Le nœud source connaît la position du puits. Il transmet un message d'annonce pour les nœuds voisins. Les nœuds voisins décident de répondre ou non au message reçu. S'ils répondent, ils ajoutent ces informations du niveau énergétique résiduel et la distance vers le puits.

Après réception de la réponse de tous les nœuds voisins, le nœud source donne la priorité à un nœud qui possède un haut niveau énergétique et une distance plus courte vers le puits. Ces nœuds requièrent une puissance de transmission minimale pour transmettre les données. Ce protocole est plus performant que d'autres protocoles de routage basés sur l'inondation car il ne recueille des informations sur les voisins que lorsque les nœuds doivent découvrir le chemin, ce qui réduit considérablement la charge du réseau et la consommation d'énergie.

Le travail d'Andrea et al. [25] prouve que la consommation d'énergie d'émission est minimisée par le déclenchement du message '*STATE UPDATE*' uniquement lorsque cela est nécessaire. Il ne présente qu'une légère augmentation de la consommation d'énergie dans des conditions difficiles car il minimise le trafic nécessaire pour suivre de manière fiable le puits en faisant correspondre la fréquence de transmissions du message '*STATE UPDATE*' à la structure de mouvement réel de la station mobile.

### 3.3.2. Approche basée sur l'économie d'énergie

Majid Nabi et al. [50] utilisent la stratégie des commérages [51] comme un protocole de routage de transmission de données multi-sauts vers le puits le plus proche. Une couche MAC efficace est utilisée avec le processus commérages afin de réduire le délai et économiser de l'énergie. Les nœuds stockent des données des autres nœuds dans le cache, ensuite il y a transmission d'une petite partie des données qui sont choisis au hasard à partir du cache avec les données captées par le nœud lui-même. Ce paquet est propagé vers les voisins. Le protocole '*Mobile Cluster MAC*' (MCMAC) consacre une partie des emplacements actifs pour les clusters mobiles (MCS) et l'autre partie aux nœuds statiques dans le réseau. Chaque emplacement est affecté à un seul nœud du cluster. S'il y a beaucoup de clusters, ils partagent la partie MCS. Les résultats des simulations montrent qu'il y a une amélioration par rapport aux protocoles existants en termes de temps de latence au niveau applicatif et de fiabilité.

Le protocole M-Geocast [13] est conçu de manière à ce que lorsqu'il existe plusieurs puits, un seul puits sera sélectionné en tant que puits maître. Seul le puits maître met à jour régulièrement ses informations de localisation. Les autres puits demandent au puits maître de leur fournir des informations concernant leurs emplacements. Tous les nœuds envoient leurs données au puits maître qui à son tour transmet les données vers les autres puits. Donc M-Geocast consomme moins d'énergie lorsque le nombre de puits est augmenté par rapport à AODV et Geocast. Cela est dû au fait qu'il nécessite la mise à jour de l'emplacement d'un puits maître tandis qu'AODV et Geocast nécessitent un overhead important en raison de la diffusion des positions des puits.

L'algorithme de GBEER [36] construit une structure de grille permanente en utilisant des informations globales d'emplacement après que les nœuds capteurs soient déployés. Les demandes de données et de réponse sont envoyées à la source et au récepteur, respectivement le long de la grille. Cela rend l'overhead de la communication (provoqué par la mobilité du puits) limité à la cellule de la grille. Aucune consommation d'énergie supplémentaire ne se produit ici en raison de plusieurs événements car une seule structure de grille est construite indépendamment de l'événement.

Li et al. [52] proposent un cadre d'agrégation de données pour une communication efficace et en temps réel. En particulier, ils considèrent l'agrégation comme un facteur au cours de la procédure de sélection de lien du routage pour améliorer les chances de fusion de données aux nœuds de routage intermédiaires et réduire le nombre total de transmissions de messages. En outre, une heuristique est appliquée pendant la phase de construction de la super-trame pour allouer les transmissions de paquets dont les données peuvent être agrégées sur des nœuds de routage intermédiaires en intervalles de temps proches. Pendant la redéfinition de la super-trame, ils assurent que le délai de bout en bout prédéfini pour chaque paquet est satisfait tant que le réseau entier est ordonnancable sans agrégation de données. Les résultats expérimentaux montrent que, par rapport aux algorithmes de routage existants, cette solution proposée améliore considérablement les économies d'énergie et prolonge la durée de vie globale du réseau.

### 3.3.3. Constatation

| Protocole | Taux de consommation d'énergie | Délai de bout en bout | Mécanisme d'évitement de collision | Délais de livraison                            | Agrégation de données |
|-----------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|--|-----------------------|
| MCMAC     | Moyen                          | Faible                | TDMA + CSMA                        | Elevé  | Non                   |
| M-Geocast | Faible                         | Faible                | -                                  | Élevé, mais se dégrade avec la vitesse du nœud | Non                   |
| GBEER     | Faible                         | -                     | -                                  | Modéré   | Oui                   |

Table 1.4 : Comparaison de l'efficacité énergétique des protocoles de routage dans les RCMSF

## 3.4. Classification basée sur la QoS

Le réseau doit garantir une qualité de service (QoS) en plus de la facilité de déploiement, l'efficacité énergétique et le faible coût. L'un des principaux objectifs de conception de RCSF est la communication de données fiables sur la base d'une consommation minimale énergétique afin de prolonger la durée de vie du réseau. Ceci peut être réalisé par des techniques de gestion d'énergie.

En raison de leur mauvaise conservation d'énergie, les protocoles de routage traditionnels ne sont pas adaptés pour les applications des RCSF. Il est bien souhaitable d'utiliser une découverte de chemin à faible consommation énergétique et des techniques d'acheminement de données afin de transférer les données entre les nœuds capteurs et la station de base. Certains des problèmes de routage et de conception qui ont un effet direct sur le processus de routage lui-même dans les RCSF sont: le déploiement des nœuds, la méthode de communication des données, hétérogénéité entre nœud/liens, la tolérance aux pannes, la scalabilité, les supports de transmission, l'agrégation de données, la connectivité, la couverture et la qualité de service.

Dans les protocoles de routage à base de QoS, le réseau doit trouver un équilibre entre la consommation d'énergie et la qualité de transmission des données. En particulier, le réseau doit répondre à certains paramètres de qualité de service (retard, énergie, bande passante) lors de la livraison des données vers la station de base.

Dans ce contexte, nous examinons trois protocoles de routage, telles que 'SPEED', 'Sequential Assignment Routing' et 'Real-time Power-Aware Routing'.

### 3.4.1. SPEED

SPEED [53] est un protocole de routage géographique conçu pour la communication en temps réel dans les réseaux de capteurs. SPEED gère la congestion et permet une communication temps réel en utilisant le contrôle du feedback et la transmission géographique non-déterministe. Il fournit également une façon différente de gérer les chemins sans issus identique à la façon dont il gère la congestion. La transmission géographique non-déterministe est utilisée pour équilibrer la charge entre plusieurs chemins.

Un nœud calcule une vitesse relais à chacun de ses voisins en divisant la distance vers la destination par le délai estimé pour transmettre le paquet à ce voisin. Le nœud transmet alors le paquet à un voisin proche de la destination qui a une vitesse supérieure à un certain seuil, avec une probabilité sur la base de cette vitesse de voisinage par rapport à d'autres voisins.

Si aucun voisin n'a une vitesse supérieure à la vitesse souhaitée, une boucle de feedback de voisinage détermine s'il faut laisser tomber le paquet ou le rediriger dans le but de réduire la congestion.

### 3.4.2. Sequential Assignment Routing

Le protocole de routage par affectation séquentielle '*Sequential Assignment Routing*' (SAR) présenté dans [54] est l'un des premiers protocoles de routage pour les réseaux de capteurs afin d'introduire la notion de qualité de service dans les décisions de routage. Le protocole SAR crée des arbres d'acheminement depuis un voisin à un saut du puits en prenant en considération la métrique de QoS, la source d'énergie à chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet. En utilisant les arbres créés, plusieurs chemins depuis le puits vers des capteurs sont formés. En outre, l'un des chemins peut être choisi en fonction des ressources énergétiques et de la qualité de service sur chaque chemin.

Ainsi, une décision de routage dans SAR dépend de trois facteurs: les ressources énergétiques, la qualité de service sur chaque chemin, et le niveau de priorité de chaque paquet.

Pour éviter l'échec de chemin unique, une approche multi-chemin est utilisée et des schémas de restauration de chemin localisé sont utilisés. L'objectif de l'algorithme SAR est de minimiser la moyenne pondérée de la métrique de QoS à travers la durée de vie du réseau.

### 3.4.3. Real-Time Power-Aware Routing

Le protocole '*Real-time Power-Aware Routing*' (RPAR) [55] réalise des délais de communication à faible coût énergétique en adaptant dynamiquement la puissance de transmission et les décisions de routage.

RPAR propose une politique de transmission et un gestionnaire de voisinage efficace qui sont optimisés pour les capteurs sans fil avec ressources limitées.

RPAR aborde les questions pratiques importantes dans les réseaux de capteurs sans fil, y compris les liens avec perte, l'évolutivité, la taille réduite de la mémoire et les contraintes de bande passante. RPAR a deux caractéristiques principales:

- Il améliore le nombre de paquets qui respectent leurs délais à faible coût énergétique.
- Il dispose d'un gestionnaire de voisinage efficace qui découvre rapidement le choix de transmission (voisin + puissance de transmission) qui répondent à des délais de paquets tout en introduisant un overhead avec une faible communication et une faible consommation énergétique.



RPAR suppose que chaque paquet lui sera affecté un délai programmable par l'application, qui spécifie la destination souhaitée sur le délai de bout en bout d'un paquet. L'objectif principal de RPAR est d'augmenter le nombre de paquets qui répondent à leurs délais tout en minimisant la consommation énergétique pour transmettre des paquets sous leurs contraintes de délais.

RPAR se concentre sur la réduction de l'énergie consommée dans les transmissions de paquets. RPAR a la capacité d'adapter dynamiquement sa puissance de transmission et ses décisions de routage basé sur la charge de traitement et les délais de paquets, y compris les pertes des liens et des contraintes de ressources extrêmes en termes de mémoire, bande passante et d'énergie.

RPAR est un protocole localisé qui prend des décisions basées uniquement sur des informations de voisinage à un saut. Cette propriété permet à RPAR une évolutivité efficace pour les grands RCSF.

Deepa et al. [56] proposent *Optimized QoS-based Clustering with Multipath Routing Protocol* (OQoS-CMRP) pour les RCSF qui réduit la consommation d'énergie dans la zone de couverture des puits en appliquant le *Modified Particle Swarm Optimization* (PSO) basé sur l'algorithme de clustering pour former des clusters afin de sélectionner le clusterhead dans la zone de couverture du puits et résoudre ainsi le problème de trou d'énergie. Le résultat de la simulation montre que OQoS-CMRP atteint une communication de données importante avec une conservation d'énergie raisonnable. Il réduit également les délais de transmission et l'overhead de communication en garantissant un bon résultat pour l'ensemble du réseau.

## 3.5. Classification basée sur la sécurité des protocoles de routage

La conception des protocoles qui assurent un routage sécurisé dans les réseaux de capteurs a dernièrement attiré l'attention des chercheurs du domaine d'une façon considérable. Ceci est traduit par les différentes solutions qui se développent continuellement. Ces solutions consistent à encapsuler les protocoles de routage préexistants par des mécanismes sécuritaires, ou bien à développer de nouveaux protocoles de routage qui considèrent dès le début la sécurité comme objectif à atteindre.

### 3.5.1. Protocoles de sécurité du routage multi-chemins

Puisque la détection et la révocation des intrusions est parfois très difficile, les protocoles de sécurité du routage multi-chemins essaient de tirer profit de la tolérance implicite aux fautes qui caractérise le routage multi-chemins tout en le sécurisant. Dans ce qui vient, on étudie quelques protocoles issus de cette classe.

INSENS [57] est un protocole de routage sécurisé caractérisé par son comportement tolérant qui lui permet d'opérer correctement même en cas de présence des intrusions. Ceci est traduit par la construction et le maintien de plusieurs chemins indépendants entre le puits et tous les nœuds capteurs du réseau, ce qui fait que les nœuds attaquants ne pourront altérer que les chemins qui les traversent. Dans le protocole INSENS, c'est au puits de construire l'arbre de routage, de baliser les différents chemins et de calculer les tables de routages de tous les nœuds capteurs en toute sécurité. Chaque nœud capteur partage avec le puits une clé secrète qui servira à l'épreuve de

l'authenticité et de l'intégrité des messages échangés par le principe de la cryptographie symétrique, ces clés sont supposées pré-chargées dans les nœuds capteurs. L'opération du protocole est divisée en trois phases : la phase de construction de l'arbre du routage, la phase de calcul des chemins et de tables du routage et dernièrement la phase de relais des données.

SeRINS [58] est un autre exemple de protocoles de routage multi-chemins sécurisés qui est un peu différent, les informations concernant les chemins multiples menant vers le puits sont partielles et elles sont calculées localement par les nœuds capteurs sans l'intervention du puits. En plus de ça, SeRINS est caractérisé par sa capacité de détection et d'isolation des nœuds de compromissions responsables des tentatives perturbatrices, ce qui contribue à la minimisation des impacts des menaces possibles. Comme c'est le cas pour le protocole INSENS, c'est au puits de construire la topologie du réseau en diffusant périodiquement des requêtes de reconstruction des routes. Au fur et à mesure de la circulation de ces requêtes, les nœuds estimant une malveillance auprès des nœuds de leur voisinage directe, envoient au puits un message la signalant.

### 3.5.2. Protocoles de sécurité du routage hiérarchiques

Les protocoles de cette classe tentent de sécuriser les processus du routage hiérarchiques qui offrent une meilleure supervision du réseau et un apport concret dans l'économie d'énergie. Dans ce qui suit, on étudie quelques protocoles issus de cette classe.

SecRout [59] est un protocole de routage hiérarchique sécurisé. Le réseau est organisé en clusters ayant chacun un chef. Le puits est supposé connaître cette organisation du réseau, et doit maintenir localement une table contenant une clé secrète et un identificateur unique de chaque nœud capteur. Ces informations sont pré-chargées dans chaque nœud. De plus, chaque cluster doit posséder une clé partagée entre le chef et les membres pour la sécurisation des échanges intra-cluster. Le protocole SecRout ne spécifie pas l'algorithme de construction des clusters, et suppose que les clusters ainsi que leurs clés sont établis par un autre protocole. Le protocole SecRout se déroule en trois phases essentielles, la phase de découverte du chemin de routage, la phase de relais de la réponse et la phase de dissémination des données.

Le protocole RLEACH [60] est une version sécurisée du protocole du routage LEACH, il traite le problème de sécurisation des communications intra-clusters. Pour ce faire, il utilise un schéma de gestion de clé probabiliste dit RPK (*Random Pair-wise Keys*) qui n'était pas directement applicable sur le protocole LEACH malgré ses avantages, car il ne peut pas garantir que chaque pair de nœuds aura une clé partagée. C'est pourquoi, il fallait l'améliorer pour l'adapter au protocole LEACH (par l'introduction d'une fonction de hachage à sens unique). L'opération du protocole RLEACH est divisée en quatre phases, la phase de pré-distribution, la phase de découverte de clés partagées, la phase de construction des clusters et la phase de relais des données.

### 3.5.3. Protocoles de sécurité du routage géographiques

Puisque le routage géographique est généralement nécessaire pour certaines applications critiques des réseaux de capteurs sans fil comme les applications militaires, il est obligatoire de leurs garantir un service de sécurité. Une autre motivation des préoccupations par la sécurisation

et le développement des protocoles du routage géographique réside dans le fait qu'ils sont par nature moins exposés aux attaques visant le routage.

SIGF [61] est une collection des protocoles de sécurité du routage géographiques qui explicite le compromis entre la sécurité fournie et l'état qui doit être sauvegardé et maintenu. Il comprend trois protocoles SIGF-0, SIGF-1 et SIGF-2 qui sont tous fondés sur le protocole de routage géographique IGF (*Implicit Geographic Forwarding*).

### **3.5.3.1. Le protocole IGF**

Le protocole de routage IGF est complètement indépendant de la topologie du réseau, il est non déterministe ; la décision du routage est prise localement au niveau de chaque nœud recevant le message de données. Les nœuds ne maintiennent aucune information relative à l'état des nœuds du contexte. IGF réunit les activités de la couche réseau et la couche MAC en un seul protocole (c'est pourquoi il est dit un protocole réseau / MAC).

### **3.5.3.2. Le protocole SIGF-0**

Ce protocole préserve les caractéristiques et le principe de fonctionnement du protocole IGF avec une offre d'une protection probabiliste qui consiste à ce que chaque nœud source maintient une liste locale contenant les identité des nœuds émetteurs des messages. Le nœud source choisit aléatoirement un nœud dans la liste afin qu'il soit la prochaine destination des messages de données. Néanmoins, ceci va réduire et non pas annuler la possibilité de sélectionner un intrus dans la liste établie.

### **3.5.3.3. Le protocole SIGF-1**

Il s'agit d'une extension du protocole SIGF-0 avec un renforcement de sa résistance contre les dangers inhérents. Ceci est traduit par l'état local que doit maintenir chaque nœud sur les interactions avec les nœuds de son voisinage immédiat, cet état est présenté par une valeur de réputation qui correspond à chacun des voisins est estimé en observant plusieurs critères comme par exemple : le nombre de messages qui ont été reliés par les voisins, le délai écoulé, la dernière position de ce même voisin...etc. Donc, la sélection du prochain nœud dépend de sa valeur de réputation qui doit être élevée.

### **3.5.3.4. Le protocole SIGF-2**

Même la valeur de réputation ne peut pas nous garantir que le voisin n'est pas un intrus, ce dernier peut se comporter d'une façon normale pendant un certain temps pour avoir la confiance des nœuds légitimes, ensuite il pourra analyser, modifier ou rejouer en toute liberté les messages qui lui arrivent. Dans le but de garantir la confidentialité, l'intégrité et l'authenticité des messages, le protocole SIGF-2 a été introduit avec prise en compte de ces lacunes.

### 3.5.4. Constatation

|   | Les avantages   | Les inconvénients  |
|---|---|--|
| Les protocoles de sécurité du routage multi-chemins | <ul style="list-style-type: none"> <li>+ la tolérance aux fautes.</li> <li>+ impact restreint des menaces.</li> <li>+ l'attaquant a besoin de capturer un nombre important de nœuds capteurs pour perturber la totalité du réseau.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>_ la nécessité de construction et de maintien de plusieurs chemins introduit une charge et un délai supplémentaires.</li> <li>_ prédisposition à des attaques de type DoS.</li> </ul>       |
| Les protocoles de sécurité du routage hiérarchiques | <ul style="list-style-type: none"> <li>+ les nœuds capteurs sont dans la plus part des temps endormis, ce qui les éloigne de l'exposition à l'attaque déni de service DoS.</li> <li>+ une fois que les clusters émergent, la route liant les nœuds sources avec le puits se trace automatiquement. Donc aucun message d'annonce n'est nécessaire et les attaques wormhole et sinkhole ne peuvent avoir lieu.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>_ même s'ils ne peuvent pas effectuer un acheminement sélectif, les nœuds de compromissions peuvent dans la plus part des cas corrompre le puits par des informations falsifiées</li> </ul> |
| Les protocoles de sécurité du routage géographiques | <ul style="list-style-type: none"> <li>+ le processus de routage est par nature orienté spontanément vers la localisation géographique du puits, donc ils sont peu exposés à l'attaque wormhole.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>_ si le nombre d'attaquants internes devient important, les protocoles ne peuvent pas résister.</li> </ul>  |

Table 1.5 : Comparaison générale entre les classes de solutions de sécurité

| Protocoles | Les Objectifs sécuritaires |           |              |           | Les attaques                     |          |          |               |       |                |     |  |
|------------|----------------------------|-----------|--------------|-----------|----------------------------------|----------|----------|---------------|-------|----------------|-----|--|
|            | Confidentialité            | Intégrité | Authenticité | Fraîcheur | Altération des tables de routage | sinkhole | wormhole | Ach .sélectif | sybil | Hello Flooding | DoS |  |
| INSENS     |                            | +         | +            | +         | X                                | X        | X        | ++            |       |                | ++  |  |
| SeRINS     |                            | +         | +            |           | X                                | X        |          | X             | ++    | X              |     |  |
| SecROUT    | +                          | +         | +            | +         | X                                | ++       |          | X             | ++    |                |     |  |
| RLEACH     | +                          | +         | +            |           | ++                               | ++       |          | X             | X     | X              | X   |  |
| SIGF0      |                            |           |              |           | X                                | X        | X        | ++            | ++    | X              | ++  |  |
| SIGF1      |                            |           |              |           | X                                | X        | X        | X             | X     | X              | ++  |  |
| SIGF2      | +                          | +         | +            | +         | X                                | X        | X        | X             | X     | X              | X   |  |

Table 1.6 : Récapitulatif des propriétés des protocoles de sécurité du routage [61]

### 3.6. Classification basée sur la tolérance au délai (*Delay Tolerant*)

Le concept des réseaux tolérant les délais a été initialement proposé comme une approche pour l'Internet Interplanétaire (IPN) [62].

Fall et al. ont proposé une architecture DTN (Delay Tolerant Network) globale dans [63], et cela fonctionne au-dessus de la couche de transport pour fournir des services tels que le stockage en réseau et la retransmission de données.

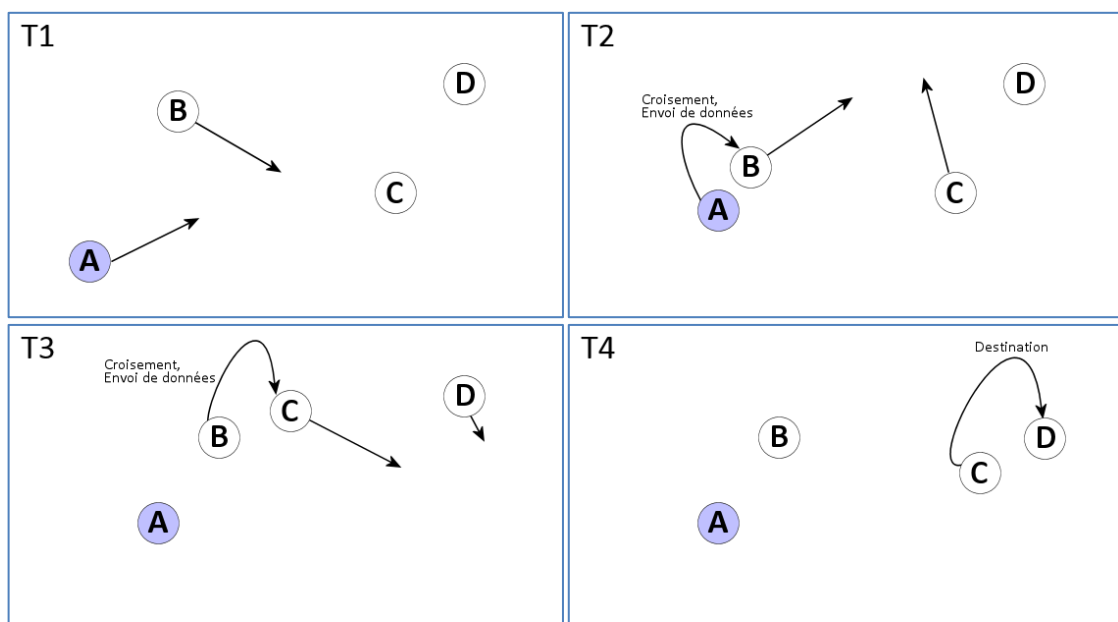
La technologie DTN a été introduite dans le réseau sans fil Ad hoc au cours des dernières années. Selon la mobilité des nœuds, le réseau peut être classé en deux catégories :

- (1) Réseau avec quelques nœuds contrôlables : Dans ce type de réseau, la plupart des nœuds sont statiques et seulement quelques nœuds sont mobiles. La gestion des nœuds mobiles pourra combler la dispersion dans un réseau, stocker les données à partir des nœuds statiques, et les transporter vers la destination. Cette méthode permet d'économiser sensiblement l'énergie des nœuds car ils ne transmettent que sur une courte distance.
- (2) Réseau avec nœuds mobiles : Dans la seconde catégorie, la plupart des nœuds sont mobiles et ils ont à transmettre des données occasionnellement quand ils entrent en contact les uns avec les autres, introduisant de nouveaux défis pour le routage des messages.

DTMN (Delay Tolerant Mobile Network) se distingue des réseaux conventionnels par les caractéristiques suivantes :

- (1) **Connectivité intermittente** : La connectivité dans les DTMNs est très pauvre. Dans la plupart des cas, il est impossible d'avoir un chemin de bout en bout. Un nœud ne se connecte à d'autres nœuds qu'occasionnellement et le lien représente la ressource la plus rare dans le réseau.
- (2) **Retard tolérable** : La latence de transmission de bout-en-bout est dominée par le retard dans la file d'attente. Les messages doivent être stockés dans la file d'attente jusqu'à ce que le nœud rencontre un nœud voisin. Évidemment, la connexion opportuniste entraînera une longue période de latence afin que les applications puissent supporter le grand retard de transmission.
- (3) **Densité clairsemée** : La densité des nœuds est normalement beaucoup plus faible dans les DTMNs par rapport aux réseaux traditionnels densément déployés, qui détériore davantage la connectivité du réseau.
- (4) **Mobilité des nœuds** : La topologie du réseau change fréquemment étant donné que les nœuds sont attachés à des objets se déplaçant de manière aléatoire. En outre, la taille du buffer des nœuds capteurs est généralement limitée. Les données peuvent être stockées dans la file d'attente du buffer pour un temps assez long avant d'être envoyées. La gestion de la file d'attente est un défi sérieux à relever.

De toute évidence, un nœud transmet seulement ses messages vers le prochain saut quand il rencontre d'autres nœuds et choisit un voisin approprié. Comme le montre le **Figure 1.3**, le nœud A veut envoyer un message au nœud D au temps T1 mais il n'y a pas de lien directe entre eux. Le nœud A stocke les messages et les porte tout en se déplaçant. Quand il croise le nœud B au temps T2, il lui transmet ses messages puisque le nœud B se déplacera vers le nœud D. Ensuite, le nœud B croise le nœud C au temps T3 et relaie les messages de A vers C. Le nœud C porte les messages et croise le nœud D au temps T4, alors les messages seront envoyés vers le nœud de destination.



**Figure 1.3 : Transmission de données dans les DTMNs**

### 3.6.1. Protocoles de routage basés sur le non-savoir

Dans ce type d'approche, le protocole de routage essaie de relayer des messages vers le nœud voisin sans aucune information sur le prochain saut. Par exemple, le nœud ne connaît pas la probabilité de croisement du prochain saut avec le nœud destinataire, et le nœud choisit le saut suivant de manière aléatoire ou par diffusion.

L'inondation est un mécanisme qui nécessite des nœuds relais pour stocker et transmettre des copies de messages indépendamment par la création de plusieurs copies d'un message dans le réseau. Cette méthode pourrait améliorer considérablement le rapport de la livraison et de réduire les délais de livraison moyens au détriment de la consommation énorme des ressources réseau. De nombreuses approches d'optimisation ont été présentées sur la base de l'inondation qui prend en considération la consommation raisonnable des ressources.

La transmission directe [64] est une technique typique de routage basé sur le non-savoir. Lorsqu'un nœud source génère des messages, il porte les messages pendant son déplacement. Une fois qu'il entre en contact avec le nœud de destination, les messages sont envoyés directement à la destination. La transmission directe est très simple et il n'y a qu'une seule copie du message et une seule transmission. Cependant, le protocole n'utilise pas les liens opportunistes et souffre des livraisons tardives en raison de la longue période d'attente dans la mémoire tampon, en particulier lorsque c'est difficile que le nœud source croise le destinataire.

Gossip [65] est également la technique de routage à base du non-savoir. Par rapport à l'inondation simple, Gossip tente de réduire la consommation des ressources réseau en choisissant aléatoirement le nœud de relais plutôt que de livrer un message à tous les nœuds qu'il croise. Il est clair que le nombre de copies d'un message est contrôlé et les consommations de ressources diminuent. Cependant, le prochain saut choisi au hasard pourrait ne pas être un nœud relais approprié et aura une influence négative sur la performance.

L'architecture '*Shared Wireless Infostation Model*' (SWIM) proposée par Small et Haas [66] utilise le nœud spécial appelé 'Infostations' à divers endroits. Les 'Infostations' sont statiques. Chaque 'Infostation' est considérée comme une destination tel que les 'Infostations' soient connectées. Les nœuds mobiles transmettent des données à des 'Infostations' quand ils entrent en contact avec l'un d'eux.

Shah et al. [67] présentent un système appelé 'Data MULE'. Le nœud spécial dans le système est appelé MULE. Les MULES sont des nœuds mobiles qui se déplacent autour de la zone de capture au hasard. Les MULES tentent de recueillir des données à partir des nœuds capteurs statiques et les transporter à la station de base.

Chen et al. [68] appliquent le codage d'effacement, mais ce codage est combiné avec des techniques de réplique. Liao et al. [69] proposent également une méthode où le message est codé puis acheminé en utilisant le routage basé sur l'estimation. Les mêmes auteurs améliorent encore cette approche dans [70] en utilisant la connaissance du schéma de mobilité du réseau pour acheminer les blocs codés.

### 3.6.2. Protocoles de routage basés sur le savoir

Les stratégies de routage à base du non-savoir acheminent les messages à l'aveuglette et consomment de grandes ressources réseau. Pour transmettre des messages de manière efficace, avoir une idée sur la structure du réseau peut être utile pour optimiser les stratégies de routage et améliorer sa performance. Les connaissances sur le réseau comprennent les métriques de lien, historique de croisement, schéma de mobilité, et la topologie du réseau. Selon cette connaissance, un nœud peut sélectionner le prochain saut qui a la plus forte probabilité pour communiquer avec le nœud de destination.

Jain et al. ont utilisés des métriques de liaison pour le routage dans les réseaux à tolérance du retard dans [71]. Leur but est de minimiser la latence de livraison de bout en bout. L'idée est que cette approche minimise le temps pendant lequel un message réside dans un tampon, et donc il convient également de maximiser le taux de livraison car il y a plus d'espace disponible pour d'autres messages. Leur travail utilise une métrique, c'est le temps nécessaire pour qu'un message soit acheminé sur chaque lien. Etant donné que cette valeur peut dépendre du temps d'arrivée d'un message sur un nœud, les auteurs présentent une version à variation temporelle de l'algorithme du plus court chemin (Dijkstra).

ZebraNet [72] est l'un des premiers systèmes à prendre des décisions de routage par l'historique des rencontres. L'objet du projet est de surveiller les mouvements des zèbres dans leur habitat et les nœuds sans fil sont fixés aux zèbres. Chaque nœud mobile a un niveau d'hierarchie, qui est calculée à partir de la fréquence de son contact avec la station de base. Le niveau hiérarchique de chaque nœud varie avec le temps, en fonction de sa fréquence de contact avec la station de base. Quand un nœud croise d'autres nœuds, il transmet les messages vers le nœud qui possède le niveau hiérarchique supérieur. De cette manière, l'historique des rencontres du nœud avec la station de base est la métrique utilisée pour le transfert de données.

Leguay et al. ont proposés 'MobySpace' [73], qui utilise la configuration de mobilité de nœuds comme informations de contexte. Un MobySpace est composé de Mobypoints. Chaque Mobypoint résume certaines caractéristiques du modèle de mobilité d'un nœud. Les nœuds avec des modèles de mobilité similaires sont proches dans MobySpace.

'*Greedy Perimeter Stateless Routing*' (GPSR) présenté par Karp et Kung [74] est un protocole de routage typique pour les réseaux sans fil Ad hoc qui utilise les positions des routeurs et la destination d'un paquet pour prendre des décisions de transmission de paquets. GPSR effectue des décisions de transfert en utilisant uniquement des informations sur les voisins directs d'un routeur dans la topologie du réseau. Lorsqu'un paquet arrive à une zone où le transfert est impossible, l'algorithme se débrouille pour faire un acheminement autour du périmètre de la région.

### 3.6.3. Protocoles de routage basé sociale

Dans les dernières années, les structures sociales ont été utilisées pour aider à la transmission dans les réseaux connectés par intermittence. L'analyse du comportement social a été mise en place pour résoudre les problèmes de routage lorsque les nœuds sont attachés à l'humain et



pourraient atteindre de meilleures performances en utilisant les relations sociales ou du comportement humain dans un environnement réel.

Hui et Crowcroft ont proposés un algorithme de routage appelé 'LABEL' qui tire profit des communautés afin d'assurer le routage des messages [75]. LABEL fait la répartition des nœuds dans des communautés basées uniquement sur des informations d'affiliation. Ensuite chaque nœud dans le réseau a une étiquette portant son affiliation. Un nœud unique choisit de transmettre des messages vers les destinations, ou vers les prochains sauts appartenant au même groupe (même label) que les destinations. LABEL améliore de façon significative la transmission en utilisant leur ensemble de données, mais il manque de mécanismes pour transférer les messages à partir de la source lorsque les destinations sont socialement loin.

Le modèle 'LocalCom' proposé par Li et Wu [76] est un modèle de transmission épidémique sur la base de la communauté dans les réseaux tolérants aux ruptures. LocalCom détecte la structure de la communauté en utilisant l'information locale limitée et améliore l'efficacité de la transmission en fonction de la structure de la communauté. Il définit les mesures de similarité selon l'historique de croisement de nœuds pour représenter la relation de voisinage entre chaque paire de nœuds. Un algorithme distribué, qui utilise uniquement l'information locale, est ensuite appliquée pour détecter les communautés.

Le système '*Expected Shortest Path Routing*' (ESPR) [77] utilise la propriété stable des êtres humains qu'ils ont des emplacements de préférence dans leurs traces de mobilité, et la distance directe entre les paires de nœuds peut être calculée en fonction de la similitude de leur emplacement de préférences. Ensuite, un '*Expected Shortest Path Length*' (ESPL) peut être obtenue par l'algorithme de Dijkstra. Les messages sont transmis à des nœuds qui sont plus près de la destination tirés depuis l'historique. En outre, ESPR emploie également la priorité de message dans la gestion de la file d'attente.

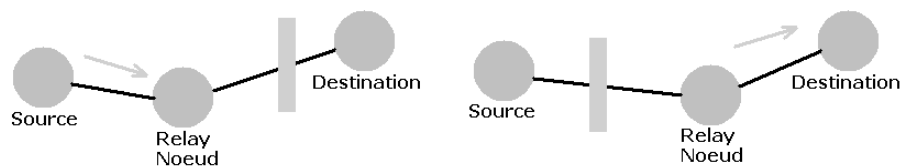
Le protocole '*Hot Area-based Routing Protocol*' (HARP) présenté dans [78] est basée sur l'observation qu'il y a des zones chaudes avec une densité nodale plus élevée, et un nœud dans une zone chaude a une probabilité plus élevée de transmission vers la destination. Dans HARP, la probabilité de distribution est déterminée par le rang de transmission et le degré populaire. Le classement de transmission indique la probabilité que les nœuds capteurs communiquent avec les nœuds puits. Et le degré populaire reflète la popularité de nœuds capteurs. Dans le monde réel, certains nœuds peuvent être plus populaires et interagissent avec les nœuds puits plus souvent que d'autres dans le réseau.

## 4. Le protocole de routage Spray and Wait pour les RCSF Mobile et Tolérant au Délai

Les réseaux mobiles connectés par intermittence sont des réseaux sans fil, où, souvent, il n'y a pas de chemin complet entre les nœuds source et destination, et le réseau est considéré comme un ensemble de groupes déconnectés. Cette définition est liée au *Delay Tolerant Networks* (DTN). Ainsi, plusieurs études ont été réalisées pour concevoir des protocoles de routage prenant en considération 'sensiblement' la contrainte de tolérance au délai. Dans ce qui suit, nous étudions la projection du protocole de routage Spray and Wait, qui est dédié aux Réseaux Tolérant au Délai (*Delay Tolerant Networks - DTNs*) pour les RCSF. Les résultats obtenus à partir de l'évaluation des performances intensive de notre proposition prouvent évidemment l'efficacité du protocole Spray and Wait pour les RCSF.

### 4.1. Les environnements DTNs

Les réseaux DTN se réfèrent à des réseaux qui assurent des transmissions d'informations de bout en bout, même lorsque le réseau n'est pas connecté en permanence. La **Figure 1.4** montre un exemple de DTN.

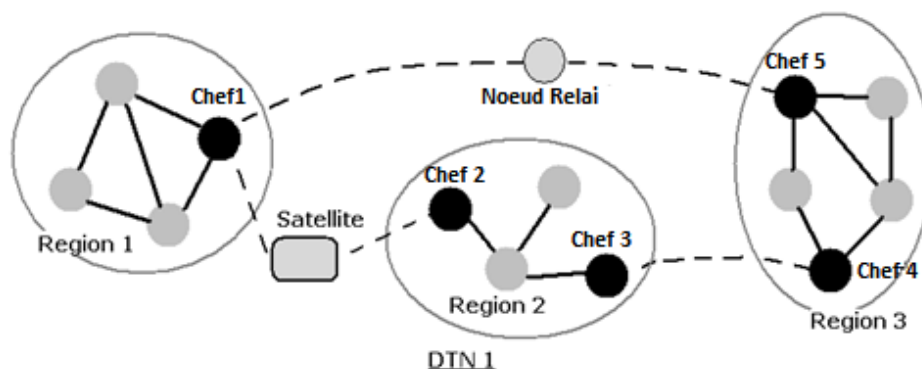


**Figure 1.4 : Le transfert d'information dans les environnements DTNs**

En fonction de sa position actuelle, le nœud relai est soit connecté au nœud source, soit il est connecté à la destination, mais jamais aux deux simultanément. Par conséquent, il n'y a pas de connexion de bout en bout. Certains protocoles (par exemple, pour les protocoles TCP/IP) ne fonctionnent pas dans ces conditions.

Selon les caractéristiques de la mobilité des nœuds, on distingue trois catégories de DTN:

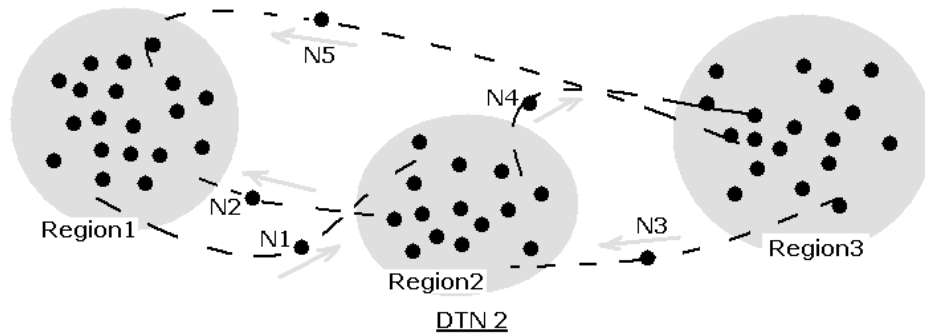
- Les nœuds sont immobiles, ou peu de nœuds sont mobiles [71]



**Figure 1.5 : DTN Semi-Statique**

Dans la **Figure 1.5**, nous observons trois régions principales. Les connexions internes au sein de chaque région sont fiables (avec ou sans fil). Cependant, les intra-connexions entre les régions ne sont pas fiables. Elles peuvent être fournies par des liaisons satellitaires (entre Chef1 et Chef2), des nœuds se déplaçant entre deux régions (nœud relais entre Chef1 et Chef5), ou par liaisons radio de faible qualité (entre Chef3 et Chef4). Par exemple, un bus circulant entre deux villages ou un ascenseur entre le sommet et le sous-sol d'un immeuble.

- Tous les nœuds sont mobiles, ils communiquent par des liaisons sans fil comme pour les réseaux Ad hoc, mais le réseau a une densité hétérogène [34].



**Figure 1.6 : DTN Dynamique**

Dans le scénario illustré sur la **Figure 1.6**, la densité des nœuds est suffisamment importante dans les trois régions. La connectivité de chaque région interne est garantie. Cependant, il n'y a pas de connexion permanente entre deux régions, la communication entre deux régions ne dépend que du mouvement de certains nœuds. Par exemple, la Région 1 peut être une bibliothèque du campus et la région 2 une salle de conférence. Une personne (N1) qui se déplace à partir de la bibliothèque vers la salle de conférence peut assurer l'acheminement d'un certain volume de données. Nous supposons qu'un nœud qui se déplace fréquemment entre deux régions a une forte probabilité de refaire le mouvement.

- Tous les nœuds sont mobiles, mais la densité des nœuds est très faible. En outre, il n'y a pas de connexions de bout en bout et le routage des messages se fait par le mouvement des nœuds. Lorsque deux nœuds se rencontrent, ils échangent les messages qu'ils ont à transmettre.

#### 4.1.1. Les algorithmes de routage dans les DTNs

Dans les réseaux traditionnels, le routage permet de trouver le meilleur chemin vers la destination, en fonction de paramètres spécifiques. Dans les réseaux DTN, les concepts de chemin et la topologie sont différents, parce que les contacts peuvent être intermittents en raison de la mobilité des nœuds. Pour cette raison, la topologie est variable dans le temps. Par conséquent, les protocoles de routage traditionnels ne conviennent pas pour DTNs.

Dans les réseaux DTNs, les objectifs de routage sont:

- Réduction des taux d'erreurs de transmission et / ou de la perte de paquets.
- Réduire le délai de bout en bout.

- Réduire autant que possible le nombre total de retransmissions obligatoires pour la transmission d'un paquet donné.

Le principal objectif du mécanisme de routage est de fournir une délivrance efficace des paquets à partir de la source à la destination. Par conséquent, le taux de perte est toujours le paramètre de routage le plus important.

Cependant, pour certaines applications, un paquet qui arrive trop tard est inutile. Par conséquent, le délai de bout en bout doit être réduit, ce qui est une tâche très difficile et éprouvante. La plupart des réseaux DTNs sont des réseaux sans fil, ce qui laisse à déduire que les liens ne sont pas fiables, des liaisons à faible bande passante, les tailles des files d'attente ne sont pas importantes, et les nœuds doivent économiser de l'énergie. Ainsi, pour améliorer les performances du système, il faut réduire le nombre total de transmission de paquets, aussi que le nombre de copies de chaque paquet. Ainsi, l'*overhead* lié à l'information de signalisation (qui doit être échangée) doit essentiellement être réduit au minimum.

## 4.1.2. Exemples de protocoles de routage pour les environnements DTNs

### 4.1.2.1. Epidemic Routing [79]

C'est l'algorithme le plus célèbre et le plus simple pour les DTNs. Dans ce protocole, chaque nœud conserve une file d'attente unique, dans laquelle les messages générés par le nœud local et d'autres nœuds sont insérés dans la même file d'attente. Chaque nœud crée un résumé en utilisant une fonction de hachage. Ce résumé contient une liste de tous les messages appartenant à ce nœud. Lorsque deux nœuds A et B se rencontrent (ie. Ils peuvent communiquer directement), ils initient une session appelée *Anti-Entropy*. Au cours de cette session, ils échangent leurs résumés. Lors d'une réception d'un résumé, chaque nœud compare sa propre liste avec celle reçue pour qu'il découvre les nouveaux messages.

### 4.1.2.2. Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity (PRoPHET) [80]

Le principe du protocole PRoPHETE est similaire au protocole *Epidemic Routing*. Lorsque deux nœuds se rencontrent, ils échangent leurs vecteurs d'état qui, dans ce cas, contiennent des informations sur la prédiction du message de délivrance. Cette information est utilisée pour mettre à jour le vecteur de la prédictibilité de la délivrance interne. Par conséquent, les informations stockées dans le vecteur d'état sont utilisées pour déterminer le nœud auquel le message sera transmis, sur la base d'une stratégie de transmission donnée.

### 4.1.2.3. Spray and Wait [65]

Le protocole *Spray and Wait*, comme son nom l'indique, consiste à pulvériser quelques copies d'un message dans le réseau et attendre pour qu'elles soient en contact avec le nœud cible. En général, *Spray and Wait* propage une quantité importante de paquets de messages dans le réseau et attend une durée limitée de temps jusqu'à ce que l'un des nœuds du réseau soit en contact directe avec le nœud de destination.

Le *Spray and Wait* [81] dépasse les autres systèmes de routage traditionnels avec son ratio moyen de livraison de message, le nombre de sauts pour atteindre la destination et la performance globale de routage.

Le protocole *Spray and Wait* détient deux phases à savoir la phase de pulvérisation et la phase d'attente.

- Phase de pulvérisation: Pour chaque message en provenance d'un nœud source,  $L$  copies de message sont initialement créées et transmises par la source vers les nœuds se trouvant au sein de sa zone de couverture.
- Phase d'attente: Si la destination n'a pas été trouvée dans la phase de pulvérisation, chacun des  $L$  nœuds portant une copie du message effectue une transmission directe (i.e. transmet le message uniquement à sa destination).

Le protocole *Spray and Wait* combine la vitesse du protocole *Epidemic Routing* avec la simplicité et la parcimonie de la transmission directe. D'abord il pulvérise des copies de message d'une manière similaire au protocole *Epidemic Routing*. Lorsque suffisamment de copies ont été diffusées (pour garantir qu'au moins une d'entre elles puisse trouver rapidement la destination), il arrête la pulvérisation et permet à chaque nœud portant une copie d'effectuer la transmission directe à la destination lors d'une rencontre.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à étudier la performance de ce protocole pour les RCSF.

## 4.2. Spray & Wait pour les RCSF : Simulation et Résultats

Dans cette section, nous présentons notre évaluation de performances du protocole *Spray and Wait* dans les environnements RCMSF et DTNs. Pour cette fin, nous avons utilisé le simulateur de réseau NS-2.

### 4.2.1. Paramètres d'évaluation

Pour évaluer la performance du protocole de routage *Spray and Wait*, nous avons considéré deux paramètres principaux: le nombre de paquets reçus, le délai de bout en bout.

- **Nombre de paquets reçus** : Les données transférées à partir des nœuds de capteurs à la station de base sont souvent sensibles. Pour cette raison, les protocoles de routage efficaces minimisent le nombre de paquets perdus. En d'autres termes, ces protocoles doivent garantir un taux important de paquets reçus.
- **Délai de bout en bout** : Le délai moyen de bout en bout est le temps écoulé entre le moment de l'envoi d'un paquet par la source et le moment de sa réception par le destinataire. Il inclut par conséquent le temps de latence de découverte de route, le temps de résider dans les files d'attente des nœuds intermédiaires et le temps de transmission à chaque saut. Nous mesurerons le délai de bout en bout au niveau de tous les paquets reçus au cours de la simulation. Par la suite, nous calculerons la moyenne. Ce

paramètre représente l'efficacité du protocole en termes de temps de réponse et en termes de choix des chemins optimaux.

## 4.2.2. Résultats des simulations

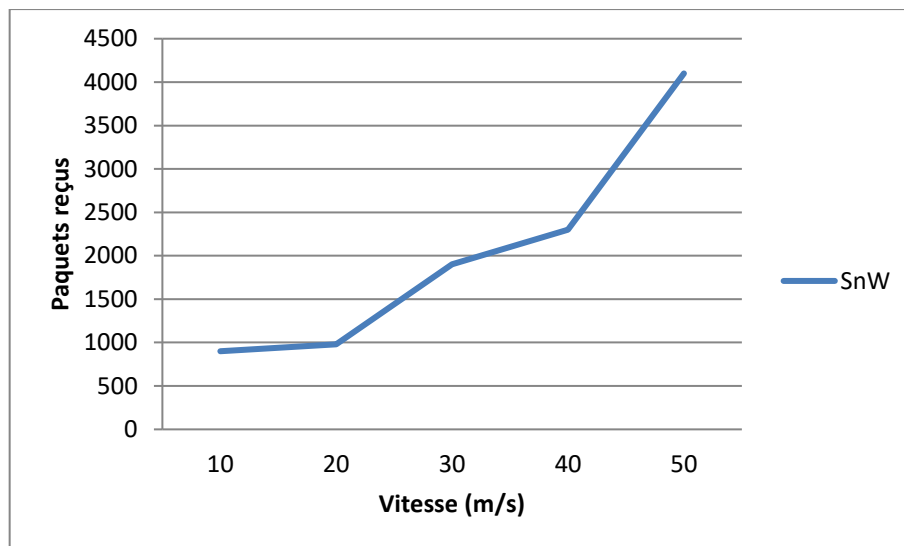
Dans cette section, nous présentons les résultats de l'évaluation du protocole *Spray and Wait* du point de vue de plusieurs critères.

Le protocole de routage *Spray and Wait* a été évalué en utilisant le simulateur NS2. L'ensemble des paramètres utilisés sont donnés dans le **Table 1.7**.

|   |         |
|---|---------|
| <b>Période de Simulation</b>                  | 100     |
| <b>Nombre de nœuds</b>                        | 150     |
| <b>Zone de déploiement (<math>m^2</math>)</b> | 100×100 |
| <b>Puissance de transmission (dbm)</b>        | 3       |
| <b>NS Version</b>                             | NS 2.35 |
| <b>Buffer Max</b>                             | 100     |
| <b>Vitesse Max (m/s)</b>                      | 50      |

**Table 1.7 : Paramètres de simulation**

En analysant les résultats représentés sur la **Figure 1.7** et **Figure 1.8**, nous constatons qu'il y a une relation proportionnelle entre la vitesse des nœuds mobiles et la quantité de paquets reçus. Cela se justifie par le fait que la probabilité de rencontrer un autre nœud est élevée, de ce fait le nombre de paquets reçus augmente, ce qui implique qu'il y ait un délai raisonnable pour les paquets envoyés.



**Figure 1.7 : Nombre de paquets reçus par rapport à la vitesse des nœuds**

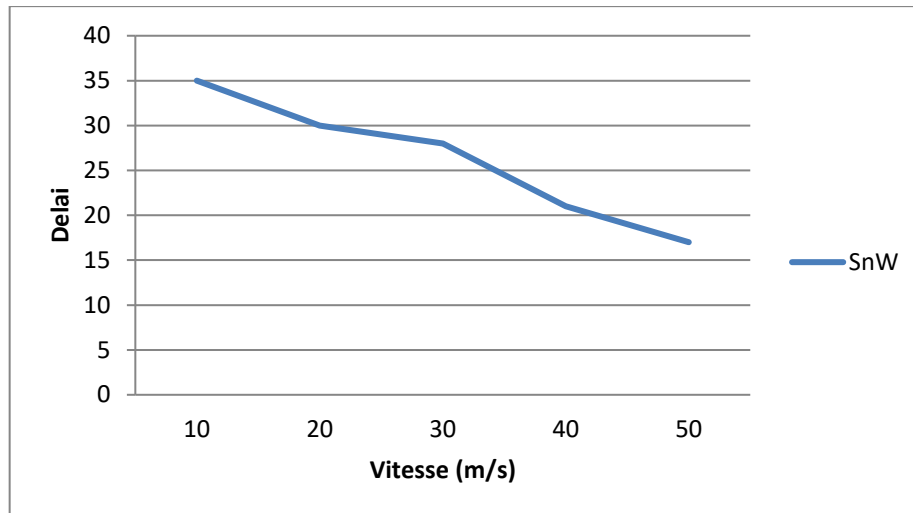


Figure 1.8 : Delai par rapport à la vitesse des nœuds

La **Figure 1.9** et la **Figure 1.10** montrent clairement qu'il y a une relation proportionnelle entre la taille de la mémoire tampon et les paquets livrés, ainsi qu'avec le délai. De toute évidence, on ne considère que les paquets livrés dans l'estimation du délai de bout en bout. Ainsi, les résultats obtenus dans la **Figure 1.9** sont logiques, vu qu'il y a un nombre croissant de paquets mis en mémoire tampon, le retard de la délivrance augmente aussi. En outre, la **Figure 1.10** montre que le nombre de paquets fournis est important lorsque la taille de la mémoire tampon est suffisamment importante. Ceci est expliqué par le fait que le taux de perte de paquets est réduit avec une augmentation de la taille de la mémoire tampon.

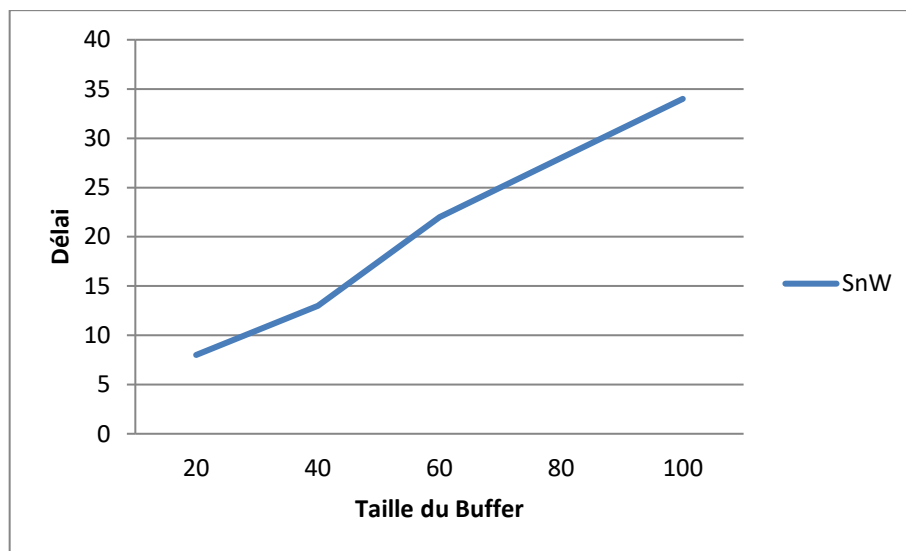


Figure 1.9 : Délai par rapport à la taille de la mémoire tampon

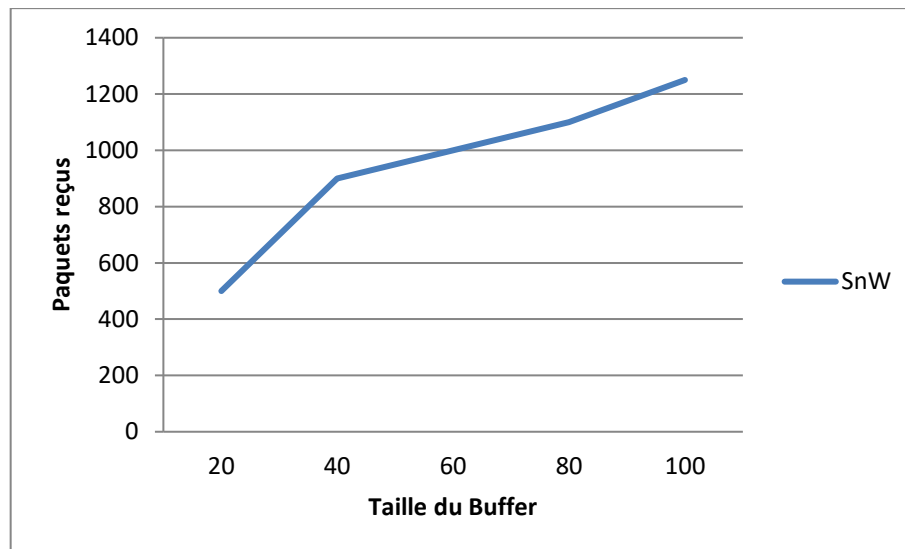


Figure 1.10 : Paquets reçus par rapport à la taille de la mémoire tampon

Depuis l'ensemble des résultats de simulation, nous pouvons en déduire que la performance du protocole *Spray and Wait* peut être affectée par les paramètres suivants:

- La vitesse des nœuds mobiles.
- La taille de la mémoire tampon.
- Le taux de paquets transmis.

Habituellement, lorsque le réseau comprend un nombre élevé de nœuds mobiles, le protocole *Spray and Wait* semble suffisamment efficace, notamment en termes de nombre total de paquets reçus et délai de communication. Malheureusement, ce n'est pas le cas lorsque la mobilité est limitée, ou lorsque la mobilité locale est prédominante.

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent tout d'abord sur les différentes classifications des protocoles de routage dédiés aux réseaux de capteurs mobiles et sans fil. En effet, les différentes classifications déduites des multiples lectures de la littérature présentent une plateforme aussi riche pour bien comprendre les mécanismes utilisés pour répondre à l'exigence de l'optimisation de routage dans de tels environnements difficiles. A la fin de cet état de l'art, nous avons présenté une classification basée sur les réseaux DTNs, de tels réseaux qui, sans la notion de mobilité, ne pourront jamais garantir un routage entre les composants d'un réseau donné. Un des exemples de protocoles de routage spécial DTN est le protocole *Spray and Wait*, un protocole que nous avons adopté comme protocole de base pour notre contribution.

Nous avons abordé la question de routage au niveau des RCMSF dans le contexte des environnements DTNs. Nous avons discuté l'adoption du protocole *Spray and Wait* qui exploite la fonctionnalité de mobilité dans le routage des données. Les résultats de la simulation ont prouvé que le protocole *Spray and Wait* peut être appliqué efficacement dans les RCMSF (même si la mobilité est fréquente), en particulier, en termes de délai de communication et faible



congestion. Bien que ses divers avantages, *Spray and Wait* présente un inconvénient qui est la dégradation des performances dans le cas de mobilité localisée et limitée.

Notre contribution a fait l'objet d'une publication internationale au sein du journal :

"International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering"

Le papier est référencé comme suit :

Lyamine GUEZOULI, Youcef MEZACHE, Somia SAHRAOUI, and Souheila BOUAM, "Spray and Wait Routing Protocol for Mobile and Delay Tolerant Wireless Sensor Networks," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 4, no. 8, pp. 32 - 40, August 2014.

## Chapitre 2

---

---

# Effet de la mobilité des nœuds sur les réseaux sans fil

## 1. Introduction

Aujourd'hui, il est difficile d'imaginer les difficultés pour envoyer des informations sur de grandes distances avant l'invention de la communication radio. Tout d'abord, de tels dispositifs étaient si grands et lourds qu'ils ne pouvaient pas être transportés ailleurs, ils étaient donc transportés par des véhicules. Ainsi, l'histoire de la communication mobile avait commencé avec des appareils radio disposés sur les bateaux qui ont émergé dans les années 1890 et ont aidé les navires océaniques pour surmonter l'isolation dans des situations de navigation et d'urgence. Il a fallu un certain temps jusqu'à ce que l'émetteur-récepteur radio mobile puisse être utilisé sur des véhicules non-marins. Cette technologie était disponible dans les années 1930 quand un émetteur-récepteur radio peut être utilisé sur une bicyclette et un émetteur radio pourrait être utilisé dans un avion. Ces deux cas présentés ne sont pas vraiment pratiques. A la fin des années 30 les solutions portables étaient disponibles sous forme du célèbre "Talkie-Walkie", ce qui pourrait être porté par une seule personne. Au début des années 1940, un émetteur-récepteur radio était disponible et qui pourrait se tenir dans une seule main: «Le Handy-Talky», voir Figure 2.11. Inutile de rappeler que ces dispositifs de communication ont joué un rôle important dans la seconde guerre mondiale. L'arrivée des transistors et la nouvelle technologie de la batterie ont permis de miniaturiser incroyablement la taille des appareils radio. Aujourd'hui, on peut acheter des nœuds capteurs entièrement équipés avec émetteur-récepteur radio et microcontrôleur avec une taille d'une petite pièce de monnaie (et avec des prix raisonnables), voir Figure 2.12.



Figure 2.11 : Le handy talky

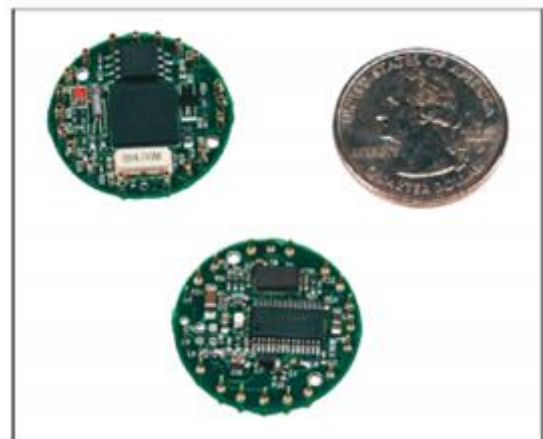


Figure 2.12: Le Mica2Dot de Crossbow

Aussi la technologie de communication radio a beaucoup changé avec le temps, depuis le signal de diffusion analogue aux réseaux numériques multi-sauts. De tels dispositifs de radio communication orientés paquets ont été développés dans les années 1970 et qui pouvaient remplir l'intérieur d'une camionnette. Ensuite, la radio par paquets a subi un processus de miniaturisation et la radiocommunication par paquets est devenue la technologie de radio dominante jusqu'à présent.

Pour les deux raisons, les stations centrales de communications radios sont utilisées comme relais pour transmettre les signaux radio. Beaucoup de ces stations relais centrales partitionnent la portée radio en des cellules. Dans de tels réseaux cellulaires, la mobilité des utilisateurs (plus ou moins) fera référence à des problèmes de transfert d'une station radio à une station adjacente. Les réseaux sans cette infrastructure centralisée sont appelés réseaux mobiles Ad hoc. Dans ce cas, l'impact de la mobilité est beaucoup plus élevé, puisque tout est en mouvement. On peut facilement imaginer l'impact négatif possible de la mobilité sur les réseaux sans fil. Les résultats récents soulignent que la mobilité a également un impact positif.

Au cours des dernières années, les réseaux de capteurs sans fil (RCSF [82]) ont été l'objet d'une intense activité de recherche, le résultat de nombreuses améliorations et avancées sur la technologie de base et les aspects clés non fonctionnels (par exemple, la robustesse et l'efficacité) communément appelé Qualité de Service [83]. La grande partie des applications les plus avancées proposent des environnements statiques: le réseau est capable de s'auto-configurer dynamiquement afin de fournir des solutions fiables en présence de conditions environnementales imprévisibles et variables (par exemple, les interférences, les obstacles, etc.), mais les positions physiques des nœuds restent inchangées au cours de l'exécution des tâches.

La mobilité des nœuds est généralement limitée à des mouvements passifs déterminés par des forces extérieures (par exemple le vent, l'eau) ou des changements limités de la topologie (RSCFs nomade). Plus récemment, en raison du manque de disponibilité des appareils GPS à faible coût montés sur des nœuds capteurs sans fil, plusieurs applications civiles et militaires supposent que les nœuds sont hébergés sur des structures mobiles (par exemple des humains ou des véhicules).

Les Réseaux de Capteurs Mobiles Sans Fil sont généralement classés comme un sous-ensemble de MANET (Mobile Adhoc Networks [84] [85]). Les MANET et Les RCMSF sont les deux concepts de systèmes complexes et prometteurs et les deux nécessitent de nouveaux types d'architectures et de protocoles par rapport aux réseaux «traditionnels» filaires/sans fil. Les deux solutions supposent la communication multi-sauts sans fil, le besoin de l'efficacité énergétique et de l'auto-configuration/gestion; mais un RCMSF possède une infrastructure centrée sur les données implicites; cette approche différente pour la mise en réseau résulte principalement dans une topologie de référence différente:

- un modèle complet distribué ou P2P potentiel pour un MANET
- et une approche centralisée pour RSCFs, puisqu'il y aura nécessité de la (des) station(s) de base,

Les MANETs supposent généralement un équipement plus puissant (et coûteux) (Energie, calcul et communication) afin de soutenir les applications gourmandes en ressources. Les RCMSF dépendent beaucoup plus des spécificités de l'application/domaine. L'interaction environnementale est le noyau fonctionnel des RSCFs, ce noyau est absent dans un MANET. La taille des RCMSF est généralement considérée comme étant beaucoup plus grande que celle des MANETs. Les protocoles de routage ont tendance à être complexes dans les MANETs, mais doivent être plus simples dans les réseaux de capteurs (un fonctionnement à faible puissance est crucial dans un RCSF), bien que la technologie sans fil exige généralement une faible consommation énergétique dans un RCMSF, mais pas toujours en MANET.

Dans ce chapitre nous présentons tout d'abord la façon de faire mobiliser un capteur, ensuite nous abordons la notion de contrôle de topologie avec les différents travaux de

recherche effectués dans ce domaine, par la suite l'influence de la mobilité sur les métriques influant sur la topologie sera défendue. La fin de ce chapitre présente une discussion ouvrant la porte sur l'effet de la mobilité sur le routage en se basant sur les métriques discutées bien avant.

## 2. Fonctionnalités et mobilité dans les RCMSF

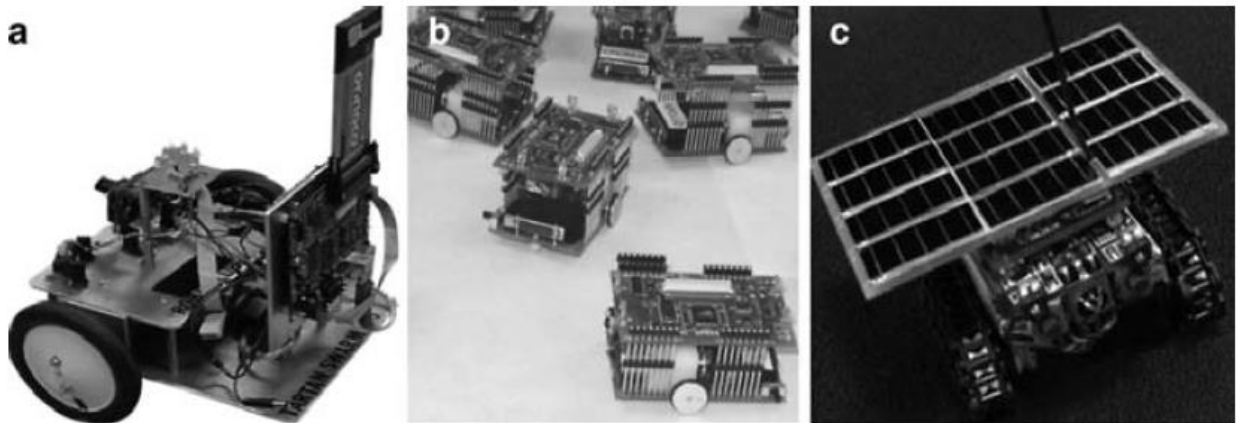
Dans un RCMSF, il y a au moins une entité mobile et les capteurs restants sont statiques. Conformément à l'objectif de conception, les entités mobiles, le cas échéant sont capables de communiquer avec les capteurs voisins. En outre, s'il y a plusieurs entités mobiles, elles sont capables de former un réseau local comme un MANET, qui est auto-configurable, adaptable à l'environnement changeant, robuste et évolutif. Conformément au rôle joué, les entités mobiles peuvent être soit station de base (SB) mobile, qui agit comme collecteur de données de réseau, ou des capteurs mobiles qui détectent les changements de l'environnement ou servent comme nœuds relais de données. Les schémas de mobilité de la SB mobile ou des capteurs mobiles pourraient être utilisés pour améliorer les performances du réseau telles que la durée de vie du réseau. En outre, une entité mobile pourrait être un nœud relais ou un *clusterhead* dans le réseau en fonction de la stratégie de déploiement, de l'architecture du réseau, et de l'application. Avant d'illustrer le détail de la mobilité et des stratégies de déploiement, nous décrivons les fonctionnalités sous-jacentes de ces entités mobiles suivies par leurs trajectoires de mobilité.

- **SBs Mobiles** ([86] [87] [88]). Le rôle fondamental de la SB est de collecter les données générées à partir de divers capteurs. En outre, la station mobile montée sur une unité mobile peut effectivement augmenter la durée de vie de façon périodique ou continue en changeant ses emplacements selon une stratégie prédéfinie. L'augmentation de la durée de vie est due à deux raisons. Au début, il n'y a pas un ensemble fixe de capteurs à proximité de la SB lorsqu'elle est en mouvement, cela aide à disperser les capteurs de goulot d'étranglement autour du réseau qui dissipe l'énergie. En second lieu, le nombre de sauts de transmission du capteur vers la station de base peut être réduit suite à une planification efficace de transmission de données. Par exemple, le capteur dans une application tolérant le retard pourra transmettre ses données collectées vers la station mobile quand cette dernière sera déplacée vers sa zone de transmission.
- **Capteurs mobiles.** La fonctionnalité de base d'un capteur est de détecter l'environnement et de transmettre ses données à la station de base périodiquement. D'autre part, le capteur mobile peut être utilisé pour augmenter l'efficacité de transmission de données et de contrôle de la topologie du réseau. Les capteurs mobiles peuvent être distribués dans le domaine du réseau avec une intervention humaine minimale comme les autres capteurs statiques. Dans un Réseau de Capteurs Statique Sans Fil (RCSSF), la couverture et la connectivité sont fixées une fois la phase de déploiement est effectuée. Cependant, le capteur mobile pourrait être utilisé pour former une topologie idéale qui pourrait améliorer la couverture et la connectivité.
- **Nœuds relais mobiles** ([89]). Les nœuds relais mobiles sont des capteurs mobiles spéciaux conçus pour libérer la charge de relais de certains capteurs dans le réseau. Le nœud relais mobile est capable de se déplacer de manière à servir comme nœud relais à la place des capteurs. Par exemple, ils pourraient être *Mobile Ubiquitous LAN Extensions (MULEs)* [67] ou Message Ferry [89], qui sont des dispositifs mobiles spécialement conçus pour se déplacer pour recueillir des données provenant de capteurs à proximité et de les livrer à la SB.

- **Clusterheads mobiles** [90]. Un *clusterhead* mobile peut être l'un des capteurs mobiles grâce à un processus d'élection ou d'un nœud spécial placé manuellement. Ils forment des groupes dans le réseau et transmettent les informations recueillies au sein de leur propre groupe à la SB. Contrairement aux *clusterheads* statiques, les *clusterheads* mobiles peuvent augmenter l'efficacité énergétique et former intelligemment une topologie adaptative du groupe selon l'environnement ou selon des changements dans la mission du réseau.

Ces unités mobiles peuvent être introduites naturellement ou placées artificiellement. Le modèle de mobilité de chaque entité mobile est généralement déterminé en fonction de l'application spécifique et de la taille du RCSF. Sur la base des modèles de mobilité, les unités mobiles peuvent être classées en trois types:

- **Unités mobiles contrôlables.** Elles suivent des trajectoires prédéfinies telles que des robots mobiles que le responsable du réseau peut programmer pour répondre aux exigences. Un exemple de ceci est un TagBot de la Figure 2.13a [91], qui est conçu par l'Université Carnegie Mellon. TagBot est un robot perfectionné qui peut communiquer avec un capteur particulier comme MicaZ ou Telos. Il peut se déplacer vers l'avant et vers l'arrière, et tourner dans toutes les directions par un programme de contrôle, qui est placé dans un processeur Intel. Trois Robomotes [92] de la Figure 2.13b sont de petite taille. Le Robomote sur la Figure 2.13c est équipé d'un panneau solaire pour recharger la batterie et déplacer de manière contrôlable tel que conçu par un programmeur.
- **Unités mobiles incontrôlables et imprévisibles.** Elles se déplacent de manière aléatoire de telle sorte que le prochain mouvement ne peut pas être prédit. Par exemple, le mouvement d'un animal ou humain, qui porte un capteur, est généralement considéré dans cette catégorie. En effet, si le capteur est monté sur un éléphant en Afrique pour trouver le comportement de son groupe, la mobilité du capteur est aléatoire suivant le déplacement de l'éléphant.
- **Unités mobiles incontrôlables mais prévisibles.** Elles sont comme le bus ou le train qui se déplacent selon un programme prédéfini. Par conséquent, le mouvement du capteur porté dans le bus ou le train n'est généralement pas aléatoire et suit une trajectoire prédéterminée. Cependant, elles ne peuvent être contrôlées par le capteur lui-même. Par exemple, la trajectoire de déplacement d'un bus pour recueillir des données du capteur peut ne pas être la meilleure pour la performance du RCSF.



**Figure 2.13 : (a) TagBot, (b) Robomotes, (c) Robomote avec panneau solaire pour recharger sa batterie**

En réalité, la mobilité et la conception de déploiement d'un RCMSF est un problème complexe qui implique des exigences de conception, capacité de mobilité des capteurs mobiles, environnement réseau, et les contraintes d'application telles que les exigences de délai. Par exemple, l'exigence en temps réel exige une connectivité complète à partir des capteurs jusqu'à la SB mobile. Selon ces contraintes de conception, la stratégie de mobilité, le modèle de collaboration, les paquets de données, et le protocole de routage devraient être abordés avec précaution en termes de performances du réseau.

### 3. Control de Topologie dans les RCSF

Les Réseaux de capteurs sans fil sont utilisés dans une variété de domaines d'application, comme le domaine militaire, de surveillance des véhicules, de surveillance des forêts, de l'environnement, de la santé, des applications commerciales biologiques, industrielles et autres [93]. Les réseaux de capteurs représentent les innovations importantes dans le domaine de la technologie des capteurs, qui sont composés de nœuds capteurs capables de détecter et de transmettre de l'information recueillie, ces réseaux ont eu un impact remarquable sur diverses applications [93].

Le composant principal des RCSF sont les nœuds capteurs alimentés par batterie ayant un faible coût et énergie. Par conséquent, afin d'utiliser les ressources limitées en énergie, ils doivent être gérés avec soin afin de prolonger la durée de vie du réseau [93]. Les nœuds capteurs communiquent entre eux en utilisant les différents types de topologies comme maillage, arbre, chaîne, etc. Il est donc important de former une topologie efficace qui assure un voisinage à une distance minimale, réduire le nombre de messages perdus entre les capteurs, réduire les interférences, ce qui réduit le temps d'attente des capteurs pour transmettre les données.

De même, l'agrégation des données effectuée par la topologie aide à réduire la consommation d'énergie c.-à-d. cela donne une durée de vie plus longue pour le réseau de capteurs. De plus, la topologie caractérise le groupe, et l'ajout/suppression de nœuds dans le groupe. La portée de transmission radio et l'ordonnement des nœuds influent sur la perturbation de la topologie du réseau de capteurs. Par conséquent, beaucoup d'énergie pourrait être sauvée si le contrôle de la topologie est possible. Ainsi le contrôle de la topologie joue un rôle important dans la conservation énergétique et augmente la durée de vie globale du réseau.

#### 3.1. Classification des approches dédiées au contrôle de la topologie

La puissance d'émission ainsi que le voisinage de chaque nœud dans le réseau décident du type de contrôle de la topologie utilisé dans un réseau sans fil. Le concept principal derrière le contrôle de la topologie (CT) est de minimiser l'ensemble des nœuds qui sont considérés comme des voisins d'un nœud donné. Une taxonomie des CT mentionnée sur la Figure 2.14, décrit les différentes approches proposées dans la littérature pour le contrôle de la topologie.

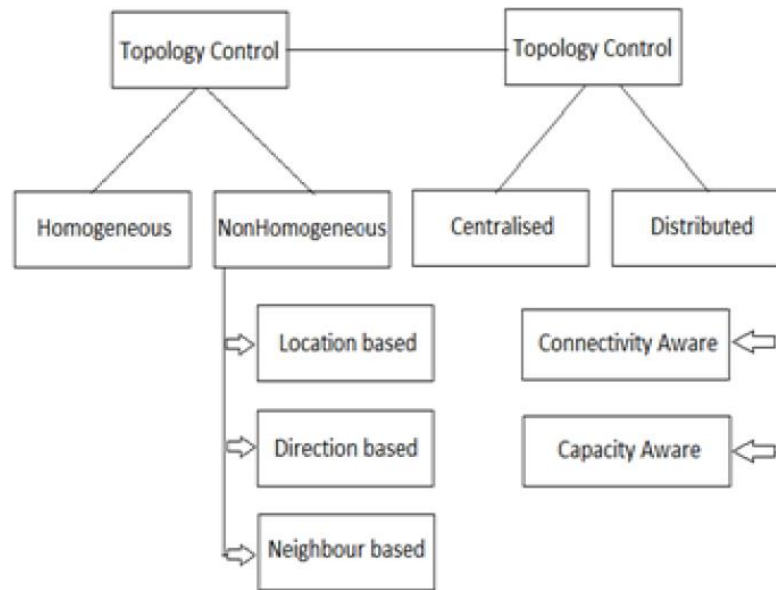


Figure 2.14 : Taxonomie des approches de contrôle de topologie ( [94] [40])

### 3.1.1. Homogène

Les nœuds capteurs utilisent la même puissance d'émission et en tenant compte d'une portée de transmission critique (portée qui produit des liens de communication pour que les nœuds puissent se connecter avec une forte probabilité). Différentes approches pour la détermination de la portée de transmission critique ont été examinées dans [95], basé sur le scénario analytique et pratique. Dans les réseaux homogènes, une portée de transmission critique pour des nœuds dispersés a été analysée en utilisant la distribution de probabilité pour maintenir une bonne connectivité [94].

### 3.1.2. Non-Homogène

Les nœuds sont autorisés à sélectionner leurs puissances d'émission d'une façon différente et individuelle jusqu'à certain niveau qu'ils peuvent supporter, c.-à-d. qu'ils auront des portées de transmission variées. Le problème rencontré est lié à l'attribution de la plage et cela peut être affronté en utilisant la géométrie computationnelle. Le domaine de la théorie des graphes fournit la solution pour ce type d'approches. Le contrôle de topologie peut également être sous-catégorisé [40] selon le type d'information utilisée pour générer la topologie (basé sur la localisation, direction ou voisinage).

### 3.1.3. Centralisée

Une topologie de réseau est l'estimation basée sur un nœud particulier et les emplacements des autres nœuds du réseau. Par conséquent, elle peut fournir des informations globales de nœuds, mais leurs implémentations sont coûteuses en raison de l'*overhead* de communication, en particulier dans un réseau constitué d'un grand nombre de nœuds capteurs [40]. En outre, des algorithmes centralisés nécessitent un ou plusieurs nœuds avec des capacités de ressources supplémentaires pour agir en tant qu'administrateur centralisé pour former une topologie globale du réseau, tandis que les réseaux de capteurs manquent généralement d'une administration centralisée. De même, les informations de localisation ainsi que la portée de transmission des nœuds individuels sont utilisées pour former une liaison entre une paire de



nœuds. Si la mobilité est prise en compte lors de l'opération de contrôle de la topologie, cela nécessite des messages *d'overhead* considérables pour recalculer la topologie sous une mobilité modérée et élevée.

### 3.1.4. Distribuée

Un contrôle de topologie distribué permet aux nœuds capteurs de générer des liens efficaces et de préserver l'énergie de manière indépendante avec une meilleure fiabilité. Cette classification distribuée est classée en deux types principalement, basée connectivité et basée capacité [40]. L'approche suivie dans les algorithmes de contrôle de topologie basés connectivité consiste à ajuster le nombre de voisinages pour maintenir la connectivité et la stabilité du réseau sachant que chaque nœud maintient ses propres informations de voisinage. La portée de transmission des nœuds possède un impact sur le nombre de voisins, et l'information de voisinage est périodiquement mise à jour quand un nœud se déplace hors/dans la portée de communication.

L'approche suivie par le contrôle de topologie à base de capacités représentant les nœuds du réseau qui provoquent des interférences influe principalement sur la communication des autres nœuds dans le domaine. La transmission des nœuds environnants affecte la qualité du signal des autres communications du réseau.

## 3.2. Travaux de recherche sur le contrôle de la topologie dans les RCSF

Le contrôle de topologie est une technique importante dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil. La plupart des chercheurs contribuent dans ce domaine et certains travaux sont présentés dans la Table 2.8.

| Référence | Technique / Protocole / Approche                    | Problème ciblé   | Domaine d'application Future                          |
|-----------|---|--|---|
| [96]      | Cooperative Topology Control with Adaptation (CTCA) | Durée de vie du réseau                                   | Développement et version généralisée                  |
| [97]      | Jointly used MAC and routing protocol               | Planification (Chemin de la source à la destination)     | Faire des piles de protocoles légères                 |
| [98]      | k-connected k-dominating set (k-CDS) as a backbone  | L'équilibrage de l'efficacité et la tolérance aux pannes | Multi saut CDS  |
| [99]      | Extended MCDS AWF algorithm                         | Economie d'énergie du nœud                               | Backbone pour couvrir sa zone de couverture à 3-sauts |
| [100]     | A3 algorithm  | Economie d'énergie et prolongation de la durée de vie    | Optimisation du protocole                             |

|       |   |   |  |
|-------|---|---|--|
| [101] | A1- A CDS based topology control algorithm                      | Economie d'énergie et prolongation de la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil  | Maintenance de topologie avec contrôle               |
| [95]  | Cooperative, lightweight and fully distributed                  | Correspondre les contraintes de connectivité locale                                     | Mobilité des nœuds                                   |
| [102] | HCT (Hierarchical Cooperative Technique) algorithm.             | Efficacité énergétique du réseau  | Optimisation à l'aide des algorithmes génétiques     |
| [103] | Discrete PSO (DPSO) with local Search                           | Optimisation du placement de la station de base   | Preuve de simulation des résultats donnés            |
| [104] | Energy-aware weighted dynamic topology control (WDTC) algorithm | Prolonger la durée de vie et équilibrage de l'énergie                                   | Solution par graphe pondéré général.                 |
| [105] | Energy Balanced Topology Control (EBTC) algorithm               | équilibrage de l'énergie et la durée de vie du réseau                                   | Déploiement uniforme de nœuds                        |
| [106] | Color Based Topology Control (CBTC) algorithm                   | Minimiser la perte d'énergie dans les RCSF dense et élimination des trous de couverture | Déploiement spécifique de nœuds                      |
| [107] | Reliable energy-efficient topology control (RETC) algorithm     | Construction de topologie et maintenance avec application réel                          | Mobilité des nœuds ou mobilité de la station de base |
| [108] | Cellular automata   | Durée de vie du réseau, par le maintien de la connectivité et de la couverture          | Examen des formes plus complexes de randomisation.   |
| [109] | Centralized and distributed PRR maximization algorithm          | Débit du réseau, efficacité énergétique et délai de bout en bout des paquets            | Déploiement spécifique de nœuds                      |

|       |  |  |  |
|-------|--|--|--|
| [110] | Borel Cayley graphs based algorithm                                    | Affectation des ID aux nœuds                                       | Effets des interférences sur les BCG basés réseaux.  |
| [111] | Distributed cone-based topology control algorithm                      | Lutte contre la longévité du réseau                                | Mobilité des nœuds et Changement de la topologie du réseau   |
| [112] | Directional Topology Control algorithms                                | Augmenter la capacité de réseau et conservation de l'énergie       | Contrôle de topologie directionnelle pour les RCSF avec antenne directionnelle   |
| [113] | Recursive algorithm  | Maximiser la durée de vie topologique du réseau                    | placement des nœuds et techniques de fragmentation, impact sur l'emplacement de la SB et arrangements internodale de communication |
| [114] | A non-dominated discrete particle swarm optimization (NDPSO) algorithm | Haute redondance de connectivité et faible robustesse de structure | Améliorer l'efficacité de la convergence des NDPSO   |
| [115] | PLTC algorithm   | Déterminer la qualité de liaison                                   | Déploiement spécifique de nœuds  |

**Table 2.8 : Résumé de la littérature sur le Contrôle de Topologie pour les RCSF ( [96] [115])**

Xiaoyu Chu et Harish Sethu [96] introduisent un algorithme de contrôle de topologie (CTCA) qui adapte dynamiquement les niveaux d'énergie dans différents nœuds. Une approche de la théorie des jeux est utilisée pour fixer le problème de la maximisation de la durée de vie du réseau dans un cadre de jeu ordinaire. La consommation d'énergie pour un autre nœud est réduite en augmentant la puissance d'émission. Pour la connectivité des nœuds, le concept de la théorie des graphes ne suffit pas à cause du trafic hétérogène dans les RCSF. Donc un chemin d'applicabilité des nœuds capteurs pour relier le trafic le long d'une direction donnée est une représentation souhaitable [97].

Le contrôle de topologie basé sur des protocoles localisés [98] construit k-ensembles connectés dominants (k-CDS) jouant le rôle d'un *backbone* virtuel des réseaux sans fil. L'extension de base de l'ensemble dominant proposée par Jie Wu et al. [99] où chaque nœud dans un réseau Ad hoc est couvert soit par un voisin dominant ou plusieurs voisins dominants à 2-sauts basé sur la communication coopérative, mais le nœud en question transmet des copies indépendantes d'un paquet, qui créent des effets d'atténuation.

Paolo Costa et al. [95] proposent une approche répartie coopérative qui ajuste de manière dynamique la puissance d'émission des nœuds capteurs en fonction des contraintes de connectivité. La solution pour le contrôle de la topologie dans un environnement distribué est obtenue par la formulation d'une programmation mathématique. En considérant la mise en œuvre sur une architecture à deux niveaux, Roslin S. et al. [102] proposent un HCT basé sur un algorithme pour surmonter le comportement oscillatoire face à l'approche coopérative conventionnelle.

L'emplacement du puits est important dans les RCSF afin de minimiser la consommation énergétique par des nœuds capteurs. Haidar Safa et al. [103] proposent un algorithme méta-heuristique efficace qui utilise le DPSO pour résoudre le problème de la mise en place du puits, le nombre de puits nécessaires et leur emplacement. *Traffic Flow Analysis* basé sur l'approche des puits multiples est également expérimenté pour calculer le mauvais cas du délai maximum.

Pour la topologie physique, l'attribution d'un ID à un nœud est importante, Junghun Ryu et al. [110] ont proposés l'approche *graphique Borel Cayley* en minimisant la distance de communication entre les nœuds, ce qui maximise le nombre d'arêtes du graphe. Ces protocoles de consensus proposés donnent de meilleures performances pour le problème des affectations d'identité.

Les méthodes traditionnelles sont confrontées au problème de la grande redondance de la connectivité. De ce fait, l'approche heuristique d'optimisation PSO est utilisée pour contrôler la topologie [114]. L'optimisation *A non dominated discrete particle swarm optimization (NDPSO)* a été conçue en transformant le problème en mcd-MST. Cette approche permet la consommation de faible puissance avec une structure robuste et une communication contrôlable ce qui prolonge efficacement la durée de vie des RCSF.

Un réseau homogène possède la même puissance d'émission que pour un réseau hétérogène qui utilise des nœuds avec différentes puissances d'émission. Nan Xi Luo and Jie Bao [115], proposent un contrôle de topologie distribué appliqué sur un réseau hétérogène avec arrangement supplémentaire pour les nœuds se déplaçant lentement.

### 3.3. Mesures et métriques pour le contrôle de la topologie

Les différentes approches qui sont utilisées pour contrôler la topologie et ces approches ([96] [115]) sont jugées sur la base de certains paramètres d'évaluation et ces paramètres comprennent la connectivité, l'efficacité énergétique, le débit et la durée de vie du réseau [116]

#### 3.3.1. Connectivité

Logiquement, les nœuds sont reliés par un graphe, et une exigence de base pour un algorithme de contrôle de topologie est qu'il ne faut pas déconnecter un graphe connexe [117]. S'il y a un chemin multiple entre les nœuds, l'algorithme devrait également offrir la possibilité de maintenir la connectivité entre les nœuds pour partager un message.

#### 3.3.2. Efficacité énergétique

L'énergie consommée pour une transmission et une réception entre les nœuds est directement proportionnelle à la distance entre les nœuds. Le facteur de prolongation d'énergie et le facteur d'augmentation du nombre de sauts sont considérés pour déterminer l'efficacité d'énergie [117].

### 3.3.3. Débit

Le contrôle de topologie requière un haut débit, où il essaye de maintenir une quantité comparable de trafic à la topologie du réseau d'origine avant TC [117]. Parmi les mesures de débit qui peuvent être utilisées [116] nous citons le bit/mètre. Le débit du réseau est alors le nombre de bits transportés (mètres par seconde).

### 3.3.4. Durée de vie du réseau

La durée de vie globale du réseau est nécessaire pour maintenir la connectivité et la couverture du réseau. Lorsqu'un nœud échoue et comme il n'est pas en mesure de basculer son énergie vers un autre nœud, la durée de vie globale du réseau diminue.

## 3.4. Domaines de recherche ouverts

Afin de faire face au problème de la consommation d'énergie et des interférences radio, la communauté des réseaux de capteurs sans fil est de plus en plus attirée par le contrôle de la topologie au cours des dernières années, comme en témoigne la recherche dans ce domaine dans les articles [96] [115]. Cependant, plusieurs aspects liés au contrôle de la topologie ne sont pas encore été soigneusement étudiés. Dans cette section, nous présentons certains d'entre eux et qui peuvent motiver les chercheurs à entreprendre des études supplémentaires sur ce domaine.

### 3.4.1. Durée de vie du réseau

Durant la communication de nœuds, réduire la consommation d'énergie et les interférences pourraient s'avérer des objectifs contradictoires. D'avantage de recherches sont nécessaires dans le domaine du contrôle de la topologie distribuée pour réduire la consommation d'énergie et améliorer la durée de vie globale du réseau [100] [101] [102] [105].

### 3.4.2. Retransmission

Dans un RCSF, la probabilité de perte de paquets aux frontières de la zone de couverture est idéalement zéro, mais dans le scénario réel la probabilité de perte des paquets est loin d'être nulle, d'où l'examen des différentes stratégies de retransmission qui doivent être étudiées [109].

### 3.4.3. Déploiement de nœud

Le déploiement des nœuds capteurs se fera d'une façon uniforme ou aléatoire. Ainsi, l'analyse des performances des différentes propriétés du réseau en présence de motif inhabituel est une autre étape dans le sens d'une caractérisation plus réaliste des réseaux de capteurs [105] [106] [109] [115].

### 3.4.4. Mobilité

La topologie devrait changer en raison de la mobilité et des nœuds, et c'est possible de restaurer la topologie souhaitée, mais ceci risque d'augmenter le nombre de messages d'overhead. En présence de la mobilité, les nœuds changent la portée de transmission d'une façon dynamique et une consommation d'énergie équilibrée est susceptible de se produire. Des recherches supplémentaires ([95] [107] [111]) doivent être faites pour trouver l'effet de la mobilité sur le contrôle de la topologie. De même, dans de nombreuses applications, le

mouvement des nœuds est réalisé en groupes. Ainsi, l'impact de la mobilité du groupe sur le contrôle de la topologie devrait également être considéré comme cible de recherche.

## 4. Effet de la mobilité des nœuds sur la topologie

La miniaturisation continue des nœuds capteurs peut conduire à de futures applications des RCSF où un grand nombre de nœuds capteurs alimentés par des batteries sont densément déployés aléatoirement dans le réseau et laissés 'sans surveillance' pour effectuer la surveillance et le suivi [118]. La préservation de la couverture et la connectivité sont les fonctions les plus essentielles pour garantir la qualité de service (QoS) dans le réseau de capteurs sans fil. Les problèmes de couverture dans un RCSF peuvent être généralement divisés en trois types: la couverture de zone où l'objectif est de surveiller une zone ou une région, la couverture de point où l'objectif est de surveiller un ensemble de points ou de cibles, et la couverture de la barrière où l'objectif est de réduire au minimum la probabilité d'une infraction non détectée d'une barrière contrôlée par un RCSF [119]. Nous faisons référence à un nœud capteur qui est en service pour détecter son environnement en tant que nœud capteur actif et à un capteur qui est hors service ou qui est en mode d'économie d'énergie comme un nœud capteur inactif. Dans un RCSF densément déployé, et comme plusieurs nœuds capteurs peuvent couvrir une sous-zone ou une cible, désactiver et activer des nœuds capteurs alternativement n'influe pas sur la couverture du réseau; aussi, la durée de vie du RCSF sera prolongée.

La préservation de la couverture est une fonction essentielle pour garantir la qualité de service (QoS) dans le réseau de capteurs sans fil. Outre la couverture, la connectivité est une autre question fondamentale dans un RCSF. L'exigence de connectivité garantit que tous les capteurs actifs dans le réseau sont capables de communiquer avec la SB à tout moment à l'aide de nœuds capteurs relais, si nécessaire. Une connectivité appropriée est essentiel pour parvenir à une communication robuste et lisse dans un RCSF. Par conséquent, l'objectif d'une stratégie optimale de déploiement du capteur est d'avoir un réseau connecté globalement, tout en optimisant la couverture en même temps. Cependant, un compromis existe entre la couverture et la durée de vie du réseau en raison de l'approvisionnement en énergie limitées des nœuds capteurs.

### 4.1. Connectivité du réseau

Chaque capteur déployé possède idéalement une portée de transmission sans fil  $r_t$  en opérant sur le canal sans fil partagé. La topologie du réseau peut être modélisée comme un graphe  $G = G(V, E)$ , où  $V$  est un ensemble de sommets représentant les capteurs et la station de base (SB) et  $E$  est un ensemble d'arêtes représentant les liens de communication. Nous ignorons la communication asynchrone entre une paire de nœuds et nous représentons le lien pour être bidirectionnel. Cela signifie que si le nœud  $U$  a une liaison sans fil avec la SB, ce lien peut être utilisé pour la communication depuis la SB vers  $U$ . Un graphe de réseau  $G$  est connecté si et seulement s'il y a au moins un chemin entre chaque paire de sommets dans  $V$ , sinon il est déconnecté. En d'autres termes, le réseau est déconnecté s'il contient un ou plusieurs nœuds isolés, de sorte que le graphe  $G$  du réseau est divisé en deux ou plusieurs graphes disjoints. L'inexistence de nœuds isolés est donc une condition nécessaire, mais pas la condition suffisante pour la connectivité réseau.

Dans un RCSF déployé d'une façon aléatoire, cette existence de nœuds isolés pourrait se produire fréquemment. Ceci est basé sur le phénomène lié au processus de graphe aléatoire,

dans lequel les liens entre les nœuds sont ajoutés uniformément au hasard, le réseau se connecte au moment où nous ajoutons le lien reliant le dernier nœud isolé avec une forte probabilité. La probabilité pour qu'un RCSF (avec  $n \gg 1$  capteurs et avec une densité de nœud  $\lambda$ ) soit connecté, est [120]:

$$p(G \text{ est connecté}) = \left(1 - \sum_{N=0}^{n_0-1} \frac{(\lambda \pi r_t^2)^N}{N!} e^{-\lambda \pi r_t^2}\right)^n \dots\dots\dots (2.1)$$

Avec une forte probabilité, où  $n_0$  est le degré de nœud minimum dans le réseau  $G$  [121]. Par exemple, si  $n_0$  est égal à 2, alors chaque nœud  $v \in V$  possède au moins deux voisins. Nous l'appelons un réseau 2-connectés et avec une probabilité élevée. De toute évidence, le réseau a une haute résistance à la défaillance du lien lorsque  $n_0$  est élevé. Aussi l'équation (2.1) montre que le réseau est probablement connecté si plusieurs capteurs sont déployés et la portée de transmission  $r_t$  soit élevée.

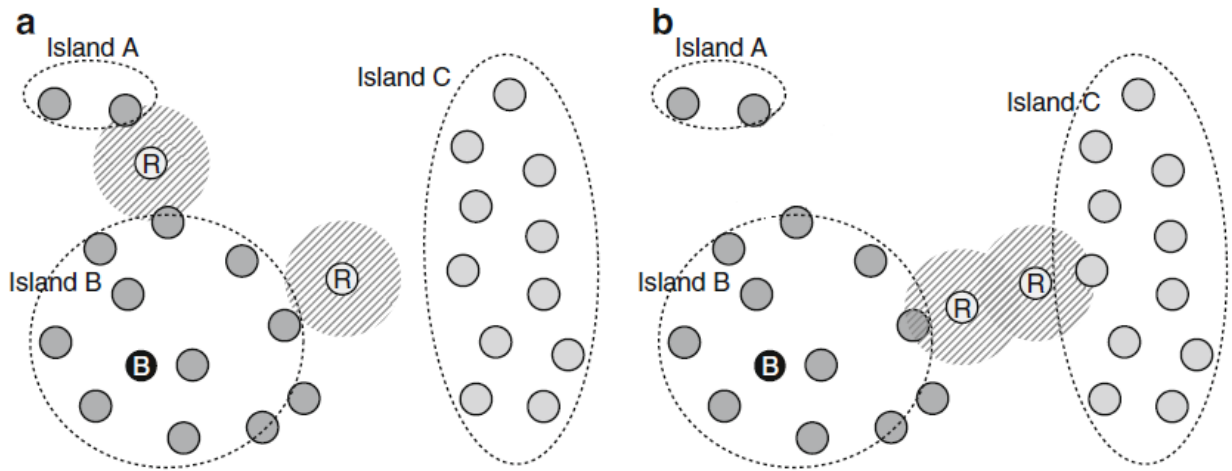
### 4.1.1. Optimisation de la connectivité du réseau dans les RCMSF

La connectivité du réseau est difficile à garantir pour chaque capteur dans un RCSF déployé aléatoirement. Même si le réseau initial est entièrement connecté en raison du placement structuré ou des capteurs statiques densément déployés, cependant la topologie du réseau peut être déconnectée en raison d'un défaut de fonctionnement des capteurs. Le groupe de capteurs déconnectés est appelé groupe isolé (ou île). Cela pourrait être dû à des défaillances matérielles de certains capteurs ou à des moyens de communications sans fil fiables. En conséquence, les paquets de données de ces capteurs ne peuvent pas être délivrés avec succès à la station de base. Si tous les capteurs sont mobiles, la topologie du réseau peut être maintenue sous forme de graphique relié par un système de collaboration. D'une autre part, les îles déconnectées peuvent également être reconnectées en utilisant uniquement des capteurs mobiles ou capteurs de relais. Dans cette partie, nous présentons un tel système qui permet de maintenir la connectivité par la programmation dynamique [122].

Si le réseau partagé est déployé avec de nombreux capteurs mobiles comme étant des nœuds relais, les îles déconnectées peuvent être facilement reconnectées avec la SB en la plaçant comme pont entre toutes les îles. Toutefois, en raison du coût de capteur mobile contrôlable, il est nécessaire de trouver un moyen pour fournir une connectivité complète en utilisant un nombre minimal de capteurs. A cet effet, la programmation dynamique [122] est utilisée pour trouver l'ensemble optimal des îles qui peuvent être connectées avec un nombre limité de nœuds relais mobiles.

Par exemple, l'existence de la partition est d'abord déterminée par l'inondation depuis la station de base B, comme indiqué sur la Figure 2.15. Ensuite, elle regroupe les capteurs dans un ensemble d'îles en validant si elles ont reçu le message inondé par la SB. Chaque capteur détecte ses voisins et tous les capteurs connectés directement et indirectement sont étiquetés 'membres' d'une île. Dorénavant, elle calcule  $D_{B,C}$  et  $D_{B,A}$ , qui représentent respectivement le nombre minimal de capteurs mobiles requis pour connecter l'île B et C, ou l'île B et A. Il y a deux alternatives pour connecter les îles. Nous pouvons relier l'île B et A, ou B et C, comme indiqué dans la Figure 2.15a, b, respectivement. Cependant comme nous avons seulement deux nœuds relais mobiles, nous ne pouvons pas connecter les trois îles. Quel serait le meilleur choix? De

toute évidence, c'est l'exemple donné dans la Figure 2.15b comme l'île C est plus grande que A, ce qui permet d'obtenir une couverture globale plus élevée.



**Figure 2.15 : Connexion d'un réseau partitionné en utilisant deux nœuds relais mobiles. (a) Connexion de l'île A et B. (b) Connexion de l'île B et C.**

La sélection de l'ensemble optimal des îles à connecter par un nombre limité de nœuds relais est effectuée en utilisant la programmation dynamique [122]. Soit  $I$  un ensemble d'îles qui ne sont pas connectées à la station de base, mais accessibles par des nœuds relais. Notons que  $b$  est une île avec la SB.  $W(G, m)$  représente la couverture maximale du réseau obtenue en connectant l'ensemble optimal des îles  $\{a_1, a_2, \dots, a_k\} \subset I$  par  $m$  nœuds relais, où :

$$G = \bigcup_{i=1}^k \{a_i\} \cup \{b\} \dots\dots\dots (2.2) [120]$$

La solution de trouver l'ensemble optimal des îles peut être exprimée comme une séquence de décisions, où la  $(i)$ ème décision est de choisir une île  $a_i$  comme  $(i+1)$ ème île pour être connectée avec la SB,  $i= 1, 2, \dots, k$ . Le problème dérivé, résultant d'avoir pris la première décision (pour sélectionner île  $a_1$ ) par la  $D_{G,a_1}$  nœuds relais, est de trouver un sous-ensemble d'îles de  $I - \{a_i\}$  qui donnent une couverture maximale du réseau. Nous vérifions aisément que si la couverture de l'ensemble  $\{b; a_1\}$  est optimale alors l'union de la couverture par l'ensemble  $\{a_2, \dots, a_k\} \subset I - \{a_1\}$  est une couverture maximale.

## 4.2. Couverture du réseau

Le domaine du réseau peut être divisé en deux régions en termes de couverture: zone couverte et zone non-couverte. La zone couverte signifie que n'importe quel point de la région se situe dans la couverture d'au moins un capteur. La zone non-couverte est le complément de la zone couverte. Chaque capteur possède une plage de capture et l'union de ces plages de tous les capteurs est appelée la couverture du réseau. Considérons un modèle de capteur idéal d'un capteur qui est une zone de capture circulaire représentée par un rayon de capture  $r_s$ . Si un événement se produit dans la zone de capture, il pourrait être détecté par le capteur. De manière équivalente, un événement peut être capté s'il y'aura dans son entourage un capteur à une distance  $r_s$ .



Considérons un RCSF déployé d’une façon aléatoire et les emplacements des capteurs sont uniformément et indépendamment distribués dans la région  $R$ . La répartition des capteurs peut être modélisée par un processus de Poisson stationnaire à deux dimensions. Désignons la densité du processus de poisson  $\lambda$ . Le nombre de capteurs situés dans une région  $R$ ,  $N(R)$ , suit une loi de Poisson de paramètre  $\lambda ||R||$ , où  $||R||$  représentent la surface de la région. La probabilité qu’un nombre  $k$  de capteurs soient situés dans  $R$  est donnée par:

$$P(N(R) = k) = \frac{e^{-\lambda||R||}(\lambda||R||)^k}{k!} \dots\dots\dots (2.3) [120]$$

Supposons que chaque capteur couvre un disque de rayon  $r_s$ , ensuite la configuration initiale du réseau de capteurs peut être décrite par un modèle de Poisson booléen  $B(\lambda, r_s)$ . La partie de la zone géographique couverte par au moins un capteur peut être donnée par:

$$C(\lambda, r_s) = 1 - e^{-\lambda\pi r_s^2} \dots\dots\dots (2.4) [120]$$

Elle montre que la couverture du réseau est déterminée par la configuration initiale du réseau: la portée  $r_s$  et de la densité du capteur  $\lambda$ . Si nous déployons plusieurs capteurs ou si nous utilisons le capteur qui peut détecter une plus grande surface, cela se traduit par une meilleure couverture.

Cependant, le problème est qu’un déploiement dense n’est pas toujours possible en raison du coût élevé (même si chaque capteur peut être pas cher, déployer un grand nombre de capteurs pourrait être cher), de sorte que le déploiement aléatoire pourrait ne pas garantir une couverture complète. Il est également à noter que les trous de couverture peuvent être créés par l'absence de capteurs.

### 4.2.1. Optimisation de la couverture du réseau dans les RCMSF

Dans un RCMSF, la couverture n’est pas déterminée que par la configuration initiale du réseau, mais dépend aussi du comportement de la mobilité des capteurs. Avec certains capteurs mobiles qui ont des unités mobiles contrôlables, la couverture du réseau peut être considérablement améliorée par un déploiement efficace des capteurs. Avec un plan de relocalisation à l'aide de capteurs mobiles contrôlables, une couverture complète peut être maintenue pendant une période plus longue par rapport à un réseau avec des capteurs statiques. Même si les capteurs mobiles sont incontrôlables et imprévisibles, ils peuvent encore être utilisés pour améliorer la couverture.

Contrairement à un RCSSF où la couverture du réseau est constante une fois les capteurs sont déployés, la couverture d'un RCMSF continue à changer au fil du temps s'il y a des capteurs mobiles. Sur la base de la mobilité des nœuds, la couverture d'un RCMSF est redéfinie par Benyuan Liu et al. dans [123]: Une zone de couverture d'un réseau de capteurs pendant l'intervalle de temps  $[0, t]$  est la partie de la zone géographique couverte par au moins un capteur dans cet intervalle de temps.

Dans les travaux de recherche, nous pouvons constater d'abord deux stratégies de déploiement qui améliorent la couverture de zone en utilisant les unités de capteurs contrôlables. Ensuite nous constatons la stratégie qui améliore la zone de couverture sur un intervalle de temps en utilisant les unités de capteurs mobiles incontrôlables et imprévisibles:

- Déploiement à l'aide de champs potentiels [124] :

Dans cette approche, les capteurs mobiles se déploient de manière autonome pour améliorer la zone de couverture. Pour atteindre cet objectif, le mouvement du capteur dans le robot est contrôlé par des champs potentiels pour répartir uniformément les capteurs dans le domaine, tout en évitant les obstacles.

Le déploiement de capteurs vise à placer les capteurs dans le réseau de telle sorte que la zone "couverte" par des capteurs soit maximisée et que tous les capteurs soient reliés au réseau. Pour ce faire, une approche basée sur le potentiel de champ est proposée par Andrew Howard et al. [124] qui considère que chaque capteur a la capacité de locomotion. L'idée de base de cette approche est que les champs sont conçus de telle sorte que chaque nœud est repoussé à la fois par les obstacles et les autres capteurs. Par conséquent, il force automatiquement le capteur de se propager dans tout le domaine du réseau.

L'état d'équilibre a les caractéristiques de propagation des capteurs uniformément autour de la région et accomplir la zone de couverture maximale avec un RCSF connecté. En supposant que chaque nœud capteur comprend des mécanismes d'entraînement holonome (c-à-d, il peut se déplacer aussi bien dans n'importe quelle direction).

- Déploiement assisté par le mouvement [125] :

Le trou de couverture est le lieu où il n'y a pas de couverture par tous les capteurs. Dans cette stratégie, le polygone Voronoi est utilisé pour détecter localement le trou de couverture et retirer le trou de couverture en déplaçant un capteur vers cette zone non couverte.

Pour parvenir à une couverture globale maximale, le déploiement assisté par le mouvement utilise un protocole comme suit:

1. Détection de trou de couverture : Chaque capteur construit un polygone Voronoi et examine le trou de couverture localement. En effet, Le polygone Voronoi est construit par une procédure d'échange d'informations de localisation entre les capteurs voisins. Un polygone Voronoi peut être défini par un ensemble de sommets et d'arêtes.
2. Amélioration de la couverture locale : Le trou de couverture est fixé en se déplaçant près du sommet le plus éloigné. En même temps, le mouvement doit être contrôlé de manière à éviter une situation dans laquelle le sommet initialement recouvert devient le sommet le plus éloigné. A cet effet, Wang et al. [125] ont mis au point un algorithme *Minimax* qui choisit l'emplacement ciblé du mouvement comme point à l'intérieur du polygone de Voronoi dont la distance entre le capteur et le sommet le plus éloigné soit minimisée.
3. Les étapes (1) et (2) sont répétées jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de trou de couverture ou aucune amélioration en ce qui concerne la couverture du réseau dans l'itération précédente.

- Stratégie de mobilité aléatoire [126] :

Cette stratégie tire profit de la mobilité aléatoire que chaque capteur se déplace en continu de manière aléatoire de sorte que la zone de couverture est améliorée pendant un intervalle de temps. En effet, chaque capteur mobile se déplace d'une manière complètement indépendante et aléatoire. Cependant, la mobilité aléatoire peut également améliorer la couverture du réseau

au fil du temps. La raison de ceci est que la surface couverte d'un capteur mobile donné augmente avec le temps.

Par exemple, un capteur statique A couvre environ en permanence une zone donnée de  $\pi r^2$ , considérant une période de temps  $\Delta t = t_1 - t_0$ . En revanche, un capteur mobile M est en mesure de couvrir  $\pi r^2 + 2rV_s\Delta t$  zone unitaire.

La stratégie de mobilité aléatoire pourrait être utilisée pour améliorer la couverture du réseau au fil du temps. Une fois que les capteurs mobiles sont préprogrammés pour se déplacer d'une manière aléatoire, il n'y a pas d'overhead supplémentaire nécessaire entre les capteurs pour collaborer leur mobilité et pas d'overhead élevé de calcul pour décider de leur prochain mouvement. Contrairement à d'autres protocoles de mobilité du capteur, il est très évolutif depuis que le mouvement de chaque capteur est complètement indépendant des autres.

### 4.3. Durée de vie du réseau

Il existe peu de variations dans le sens de la durée de vie d'un RCSF et c'est principalement dû à la nature spécifique de l'application et la modification dynamique de la topologie du réseau. Par exemple, la durée de vie d'un RCSF peut être définie comme le temps pour que le premier capteur soit mort dans une application de *data mining* (exploration de données) où les capteurs sont peu déployés [127]. Dans un tel réseau clairsemé, la perte d'un capteur pourra déconnecter une grande partie du réseau.

A l'inverse, la durée de vie d'un RCSF peut être définie comme étant le temps nécessaire pour la mort d'un certain pourcentage de capteurs dans un RCSF densément déployé. En effet, les capteurs survivants peuvent encore rester connectés et la fonctionnalité de réseau peut être encore bien accomplie par eux.

Alternativement, la durée de vie du réseau peut également être définie en termes de taux de livraison de paquets ou du nombre de flux vivant de sorte que la qualité de la communication dans le RCSF doit être optimale. Cependant, les définitions ci-dessus ne détériorent pas à la fonctionnalité de réseau qui est importante du point de vue de l'application. Manish Bhardwaj et al. [128] ont défini la durée de vie du réseau comme le temps jusqu'à la première perte de la couverture. La limitation de cette définition est qu'elle ne prend pas en considération la connectivité du réseau. La définition la plus générale de la durée de vie est définie par Douglas Blough M. et Paolo Santi [129] comme suit :

Etant donné  $G(t) = (V(t), E(t))$  est le graphe de communication du réseau de capteurs au moment  $t$ , et  $V(t)$  est l'ensemble des nœuds vivants au moment  $t$ , supposons que  $G(0)$  est connecté et  $V(0)$  couvre la région  $d$ -dimensionnelle  $R = [0, l]^d$  au moment  $t$ . où  $l$  est la longueur du domaine du réseau, il désigne  $n(t)$  comme la cardinalité de  $V(t)$  avec  $n = n(0)$ .

Pour faire simple, nous traitons séparément la question de la couverture de la durée de vie. Ainsi, la durée de vie est définie comme le temps accompli pour la mort du premier capteur. Cette définition possède moins de sens pour le réseau dense. En effet, la perte d'un capteur ajoute rapidement des charges supplémentaires pour ses capteurs voisins. Par conséquent, ils sont aussi susceptibles de mourir très bientôt et cet effet se propage comme une réaction en chaîne. Par conséquent, cette définition peut servir comme une indication de la fin proche de la durée de vie d'un capteur dans un réseau dense.

Selon cette définition, la durée de vie d'un RCSF est délimitée par des capteurs plus proches de la station de base étant donné qu'ils doivent transmettre plusieurs paquets de données depuis

ou vers la station de base. Par conséquent, quel que soit l'optimalité du protocole de routage, une telle limitation sera toujours présente dans un RCSF [86].

### 4.3.1. Optimisation de la durée de vie du réseau dans les RCMSF

Les trois algorithmes les plus reconnus proposés pour améliorer la durée de vie d'un RCSF en utilisant des unités mobiles sont: Joint Mobility and Routing Strategy [86], Predictable Observer Strategy [89], et Mobile Relay [6]. Les deux premiers algorithmes utilisent une SB mobile pour améliorer la durée de vie du réseau. Le premier utilise une unité mobile contrôlable tandis que le second utilise une unité mobile incontrôlable mais prévisible. Le troisième algorithme utilise également des unités mobiles pouvant être commandées, mais il se distingue des deux premiers par le fait que les unités mobiles sont des entités relais à la place d'une SB.

- Jointure de la mobilité avec une stratégie de routage

Étant donné que le nombre de stations de base est généralement plus faible par rapport au nombre de capteurs dans le réseau, l'utilisation de quelques stations de base mobiles au lieu de plusieurs nœuds mobiles est l'un des moyens les plus efficaces pour améliorer la durée de vie. Lier la mobilité avec une stratégie de routage est certainement une stratégie de mobilité pour la SB afin de maximiser la durée de vie du réseau alors que le trafic de données circule d'une façon continue depuis toutes les parties du réseau vers la SB mobile. En raison de la mobilité de la station de base, il faut concevoir un protocole de routage multi-sauts qui permet au capteur statique dans le réseau de transmettre ses données à la station de base à chaque fois qu'elle se déplace.

L'idée de base de l'utilisation de la stratégie de routage conjointement liée à la mobilité est que la SB mobile circule régulièrement autour du réseau et diffuse son modèle de mobilité. Au début, les capteurs connaissent bien leurs propres emplacements par un système de localisation. Ils apprennent à nouveau le modèle de mobilité de la SB afin de connaître l'emplacement de la SB à un moment donné. Jun Luo et Jean-Pierre Hubaux [86] précisent que le paquet de données est transmis sans générer un overhead (tel que le calcul de l'emplacement de la station de base mobile, aussi le chemin vers la station de base).

Cheng et al. [130] ont discuté de la façon dont les capteurs source peuvent localiser les SBs mobiles en mouvement constant et envoyer des paquets de données à travers un plus petit nombre de sauts. Deux algorithmes seront proposés, y compris *Trail-based Algorithm with virtual Guide line* (TAG) et *enhanced Trail-based Algorithm with virtual Guide line* (eTAG). TAG est un algorithme qui construit des lignes verticales de guidage virtuelles pour aider les capteurs source à trouver la localisation de la SB mobile. eTAG est un algorithme amélioré conçu pour réduire encore le nombre moyen de sauts des paquets de données. La principale différence entre TAG et eTAG est que eTAG construit non seulement des lignes de guidage virtuelles mais aussi des lignes de guidage virtuelles horizontales. L'efficacité des algorithmes proposés est vérifiée grâce à une comparaison avec d'autres algorithmes de collectes de données via des puits mobiles non contrôlés. Les résultats expérimentaux confirment que les algorithmes proposés peuvent garantir que tous les capteurs sources trouvent l'un des SB mobiles et peuvent réduire le nombre moyen de sauts des paquets de données.

- Stratégie d'observateur prévisible

La stratégie d'observateur prévisible implique une planification de transfert de données pour améliorer la durée de vie du réseau. Plutôt que d'utiliser un capteur mobile contrôlable, cette approche profite des avantages d'une SB mobile dont le mouvement est prévisible, mais incontrôlable par le réseau de capteurs.

Dans cette approche, en raison de la mobilité incontrôlable de la station de base, il est essentiel de prévoir la transmission à partir de chaque capteur de telle sorte qu'il puisse transmettre le paquet à l'observateur d'une manière rentable. Par exemple, un capteur hors portée de transmission directe de l'observateur pourra compléter sa transmission de données vers un proche par un capteur qui est relié directement à l'observateur, et ceci avant la mobilité de ce dernier.

A cet effet, la stratégie d'observateur prévisible doit avoir d'un côté un bon réglage de la puissance d'émission afin de minimiser l'interruption et d'un autre côté une planification d'émission de chaque capteur afin de minimiser la collision des transmissions concurrentes. Dans la Stratégie d'observateur prévisible, un protocole de communication est conçu pour déterminer ce temps d'attente en trois phases : Démarrage, Stable, et Echec.

- Stratégie de relais mobile

Cette stratégie est une autre technique utilisée dans un RCMSF pour prolonger la durée de vie d'un RCSF qui utilise les nœuds relais mobiles contrôlables. Cette approche a été développée pour le scénario dans lequel la station de base et les capteurs sont stationnaires. Les capacités des nœuds relais mobiles sont identiques à celles des capteurs mobiles habituels, mais ils ont assez de puissance pour se déplacer. Le nœud relais mobile se déplace et hérite des responsabilités de tous les capteurs qui sont sur le point de mourir pendant un certain temps ou de façon permanente. Les responsabilités comprennent l'environnement de détection, le traitement de données, et la transmission des données captées ou reçues à la SB.

Wei Wang et al. [6] constatent qu'un seul nœud relais mobile pourrait doubler la durée de vie du réseau avec une planification appropriée du nœud relais mobile. Pratiquement, les auteurs précisent que la durée de vie du RCSF pourrait être améliorée jusqu'à quatre fois avec un seul nœud relais mobile.

## **5. Routage et Mobilité : Relation transitive basée couverture, connectivité et durée de vie du réseau**

En optimisant la couverture, la stratégie de déploiement garantit que la zone optimale dans le champ de détection est couverte par des capteurs, tel que requis par divers types d'applications critiques impliquant une vaste surveillance du champ de bataille, les soins de santé médicaux, etc... Tandis que, en assurant que le réseau est connecté, c'est assurer que les informations détectées sont transmises à d'autres nœuds et, éventuellement, à une station de base centralisée qui prend des décisions pour les applications. Cependant, nous insistons sur l'existence d'un compromis entre la couverture et la durée de vie du réseau en raison de l'approvisionnement en énergie limité des nœuds capteurs.

Cependant, l'optimisation des facteurs de connectivité, couverture et durée de vie du réseau pourrait engendrer des circonstances négatives qui influent sur la topologie. De nombreuses applications supposent qu'il existe une certaine redondance entre les données de détection générées par des capteurs proches. Pour alléger ce phénomène, la technique des

clusters est à promouvoir. En effet, dans un cluster, un nœud particulier est considéré comme *clusterhead* (CH) et tous les autres nœuds de ce groupe sont considérés comme membres du cluster (CM). Un CH applique l'agrégation des données pour réduire le volume de données d'un cluster. Dans un réseau déployé aléatoirement, les nœuds ne contribuent pas équitablement à la couverture du réseau : une partie d'une zone de détection des nœuds est couverte par un minimum de nœuds capteurs. Dans un réseau partitionné en cluster, les nœuds ne consomment pas d'énergie avec la même cadence: un CH consomme plus d'énergie qu'un membre ordinaire. La mort d'un nœud qui assure une couverture critique due à la consommation excessive d'énergie au moment de servir en tant que CH peut conduire à une rupture précoce de la couverture du réseau. La question qui pourrait être posée est d'estimer les conséquences de la mobilité des nœuds sur les avantages apportés par cette technique de partitionnement en clusters !

La Mobilité dans un RCSF allonge sa durée de vie, car au fil du temps la SB mobile ou les nœuds relais mobiles peuvent être utilisés pour partager la charge de trafic entre les capteurs statiques qui souffrent d'une durée de vie minimale. La mobilité étend la couverture en déplaçant les nœuds mobiles à la région non couverte tout en étalant le réseau autant que possible, bien évidemment si la connectivité est maintenue. Dans le cas où les unités mobiles sont incontrôlables, la couverture peut être encore étendue au fil du temps puisque la durée de vie d'un des capteurs mobiles couvrant la cible non détectée est strictement supérieure à zéro. Tandis que, dans un RCSSF, une région non couverte reste toujours non couverte. En outre, les nœuds relais mobiles sont particulièrement bénéfiques à renouer les liens brisés dans le réseau en cas de partitionnement du réseau.

La présence des nœuds mobiles possède toujours un impact positif vu l'intérêt d'exploiter cette mobilité pour assurer à la fois une bonne couverture, une meilleure connectivité et bien évidemment prolonger la durée de vie du réseau. Par conséquent, la mobilité dans un RCMSF aura une forte influence sur le routage des données depuis les nœuds capteurs vers la station de base. En effet, la relation étroite entre le routage et les facteurs influant sur la topologie (à savoir couverture, connectivité et durée de vie du réseau), donne une dimension supplémentaire de promouvoir de nouvelles politiques de routage opérants sur l'optimisation des performances d'un réseau RCSF dans de nombreux aspects.

Exploiter la mobilité des nœuds, de façon à proposer une nouvelle politique de routage (différemment des protocoles de routage classique) est l'objectif de cette thèse.

## 6. Conclusion

On pourrait penser que la mobilité a un impact négatif sur le comportement des réseaux sans fil. Mais des travaux récents ont montrés que ce n'est pas le cas. La mobilité améliore la couverture des réseaux de capteurs sans fil, aide à la sécurité, comme elle pourrait être envisagée pour aider à la congestion du réseau. Par la suite et afin d'exploiter au mieux la notion de mobilité des nœuds, nous présentons dans le chapitre suivant une étude détaillée des modèles de mobilité, et nous mettons l'accent sur l'un de ces modèles qui sera un support de base pour un ensemble de nos travaux de recherche, à savoir le modèle *Random Waypoint*.

## Chapitre 3

---

---

**Modèles de mobilité – Cas  
d'étude :**

***Random Waypoint* - Etude et  
implémentation**

## 1. Introduction

La recherche dans le domaine des modèles de mobilité a été très fructueuse avec de nombreuses propositions et améliorations au cours du temps. Les modèles de mobilité sont des éléments importants dans les études fondées sur la simulation de réseaux sans fil. Les chercheurs dans ce domaine peuvent choisir parmi une variété de modèles qui ont été développés dans les communications sans fil et de la communauté de l'informatique mobile au cours des dernières décennies [131]. De plus, les modèles de mouvement connus en physique et en chimie - tels que *random walk* ou *Brownian motion* - et des modèles de la théorie de transport [132] sont utilisés dans des simulations de réseaux mobiles.

Ce chapitre est dédié principalement à étudier quelques modèles de mobilité existant dans la littérature, et plus précisément le modèle *Random Waypoint*, ensuite nous allons nous focaliser à présenter notre contribution de recherche dans le domaine de mobilité. Il s'agit d'une implémentation d'un des modèles de mobilité très populaire et couramment utilisé qui est le modèle *Random Waypoint* (RWP), cette implémentation est faite sous le simulateur TOSSIM.

Dans des travaux antérieurs [131], Bettstetter précise que la connaissance fondamentale du comportement de ce modèle est primordiale pour interpréter correctement les résultats de la simulation. Bien que de nombreux chercheurs utilisent le modèle RWP dans leurs simulations, une compréhension de base de son impact sur les résultats de la simulation fait toujours défaut.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, et par conséquent de ce nous avons évoqué, nous allons tout d'abord présenter le modèle RWP, son processus de fonctionnement, et nous donnons une étude détaillée de certaines caractéristiques stochastiques de ce modèle. Après, nous allons aborder la phase d'implémentation et d'intégration du modèle RWP dans un simulateur dédié aux réseaux de capteurs sans fils, à savoir le simulateur TOSSIM.

## 2. Modèles de mobilité pour les réseaux sans fil

### 2.1. Avant-Propos

Le modèle de mobilité est conçu pour décrire le modèle de mouvement des entités mobiles, et la façon dont leur emplacement, la vitesse et l'accélération changeront au fil du temps. Etant donné que les modèles de mobilité peuvent jouer un rôle important dans la détermination de la performance d'un protocole, il est souhaitable que les modèles de mobilité puissent imiter le modèle de déplacement des applications de la vie réelle de façon raisonnable. Dans le cas contraire, les observations faites et les conclusions tirées des études de simulation peuvent être trompeuses. Par conséquent, c'est important d'avoir une meilleure compréhension des modèles de mobilité et de leur impact sur les performances du protocole.

Une méthode intuitive pour créer des modèles de mobilité réalistes serait de construire des modèles de mobilité basée trace, dans lesquels des informations précises sur les traces de mobilité des entités mobiles pourrait être fournie. Toutefois, étant donné qu'en générale la difficulté d'implémenter et de déployer des réseaux sur une grande échelle, l'obtention de traces réelle de mobilité devient un défi majeur. Par conséquent, plusieurs chercheurs ont proposés différents types de modèles de mobilité, en essayant de capturer diverses caractéristiques de mobilité et de représenter la mobilité d'une façon proche de la «réalité».



Dans des études antérieures sur les modèles de mobilité dans les réseaux cellulaires sans fil [133], les chercheurs se concentrent principalement sur le mouvement des entités mobiles par rapport à un domaine particulier (i.e. une cellule) sur un niveau macroscopique, comme le taux de changement au niveau de la cellule, la probabilité de blocage... Cependant, pour modéliser et analyser les modèles de mobilité dans les réseaux d'une façon générale, nous sommes beaucoup plus intéressés par le mouvement des nœuds individuels, y compris l'emplacement du nœud et de sa vitesse par rapport à d'autres nœuds.

## 2.2. Formulation des modèles de mobilité

Les caractéristiques aléatoires des nœuds mobiles dans un MANET peuvent consister en un processus stochastique, et le mouvement de chaque nœud peut consister en une séquence d'intervalles de longueur aléatoire appelée époque de mobilité au cours de laquelle un nœud se déplace dans une direction constante à une vitesse constante.

La vitesse et la direction d'un nœud mobile peuvent varier en fonction des critères de mobilité sur la base des types de modèles de mobilité d'une époque à l'autre. En mobilité de groupe, le même peut être le cas pour un groupe de nœuds mobiles.

La Figure 3.16a décrit le mouvement d'un nœud sur certaines époque par un nœud aléatoire n de sa position n à une autre position n' sur un intervalle de temps de longueur t.

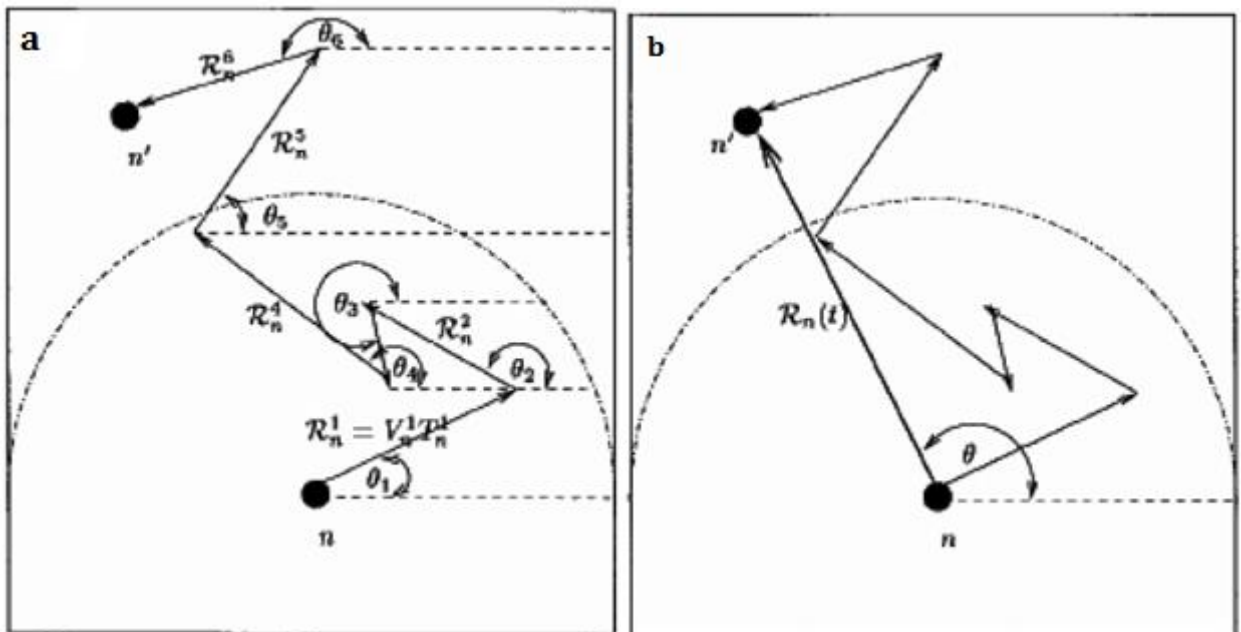


Figure 3.16: Mouvement d'un nœud: (a) vecteurs de mobilité d'époque et (b) vecteur de mobilité résultant [134]

Si nous supposons que le nœud n se déplace avec une vitesse  $V_n^i$  et une direction  $\theta_n^i$  à l'époque i et que la durée de l'époque i du nœud n est  $T_n^i$ , le nœud n se déplace sur une distance de  $V_n^i T_n^i$  avec un angle  $\theta_n^i$ .

Définissons la distance parcourue pendant l'intervalle de temps  $T_n^i$  par un nœud mobile à l'époque i comme vecteur de mobilité

$$R_n^i = V_n^i T_n^i \quad \dots\dots\dots (3. 5) [130]$$

En fait, la Figure 3.16b montre le vecteur de mobilité d'époque résultant ( $t$ ) et on peut voir que ce ( $t$ ) est la somme vectorielle des vecteurs d'époque individuels. Cependant, nous devons examiner les paramètres suivants afin d'articuler un modèle de mobilité:

Les longueurs d'époque peuvent être identiques ou non, et leur distribution peut être indépendante et distribuée de manière identique ou non. Les variables aléatoires, et leurs caractéristiques statistiques (moyenne, variance) doivent être connues.

Un nœud mobile peut ou non faire une pause à la fin d'une époque avant de commencer une nouvelle époque.

La direction du nœud mobile pendant chaque époque peut ou non être uniformément réparties sur  $(0, 2\pi)$  et ne peuvent rester constantes que pendant la durée de l'époque.

La vitesse à chaque époque peut être une variable aléatoire distribuée avec une certaine moyenne et variance et peut rester stable seulement pendant la durée de l'époque.

La vitesse, la direction et la longueur de l'époque peuvent ou non être corrélées. Le modèle de mobilité peut être non corrélé ou corrélé, et les défaillances de liaison peuvent être indépendantes ou dépendantes.

La fonction de densité de probabilité du modèle de mobilité de nœud individuel ou conjoint doit être déterminée en connaissant les paramètres statistiques du modèle de mobilité.

Tous les nœuds mobiles auront une portée de transmission limitée et devraient subir de fréquents changements de vitesse et de direction par rapport à la durée pendant laquelle une liaison reste active entre deux nœuds quelconques. La distribution des caractéristiques de mobilité de chaque nœud peut changer avec le temps, et c'est le cas pour le taux de rupture ou d'échec de la liaison. La distribution du nombre d'époques de mobilité doit également être considérée par rapport à la durée de vie d'un lien actif. Les statistiques du vecteur de mobilité  $R(t)$  doivent être connues.

## 2.3. Classification des modèles de mobilité

Dans la Figure 3.17 nous fournissons une catégorisation des différents modèles de mobilité en fonction de leurs caractéristiques spécifiques de mobilité. Pour certains modèles de mobilité, le mouvement d'un nœud mobile est susceptible d'être affecté par son historique de mouvement. Nous nous référons à ce type de modèle de mobilité comme modèle de mobilité avec dépendance temporelle. Dans certains scénarios de mobilité, les nœuds mobiles ont tendance à se déplacer d'une manière corrélée. Nous nous référons à ces modèles comme des modèles de mobilité avec dépendance spatiale. Une autre classe est le modèle de mobilité avec restriction géographique, où le mouvement des nœuds est délimité par les rues, les autoroutes ou les obstacles.

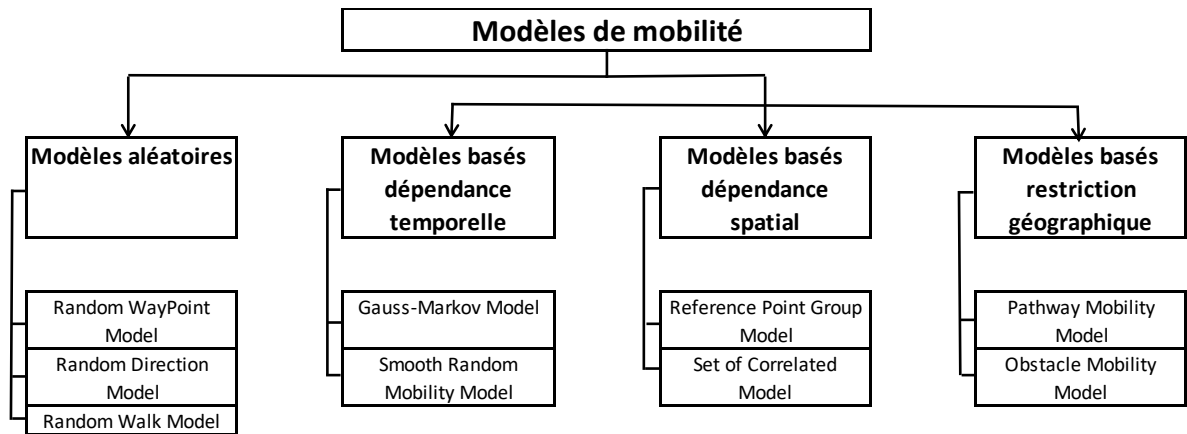


Figure 3.17 : Classification des modèles de mobilité

## 2.4. Modèles de mobilité basés aléatoire

Dans les modèles de mobilité aléatoires, les nœuds mobiles se déplacent de manière aléatoire et librement, sans restrictions. Pour être plus précis, la destination, la vitesse et la direction sont tous choisis au hasard et indépendamment des autres nœuds. Ce type de modèle a été utilisé dans de nombreuses études de simulation.

Un modèle de mobilité fréquemment utilisé est le modèle *Random Waypoint*, et certaines de ses propriétés stochastiques sont discutées dans la deuxième partie de ce chapitre. Puis, deux variantes du modèle *Random Waypoint*, à savoir le modèle *Random Walk* et le modèle *Random Direction*, sont décrits dans ce qui suit.

### 2.4.1. Le modèle Random Waypoint

Le modèle *Random Waypoint* a d'abord été proposé par Johnson et Maltz [2]. Peu après, et en raison de sa simplicité et sa grande disponibilité, il est devenu un modèle de mobilité «repère» pour évaluer les protocoles de routage des MANET (Mobile Ad hoc network). Pour générer la trace de nœud du modèle *Random Waypoint*, l'outil **setdest** du groupe CMU Monarch pourrait être utilisé. Cet outil est inclus dans le simulateur réseau ns-2 qui est largement utilisé [135].

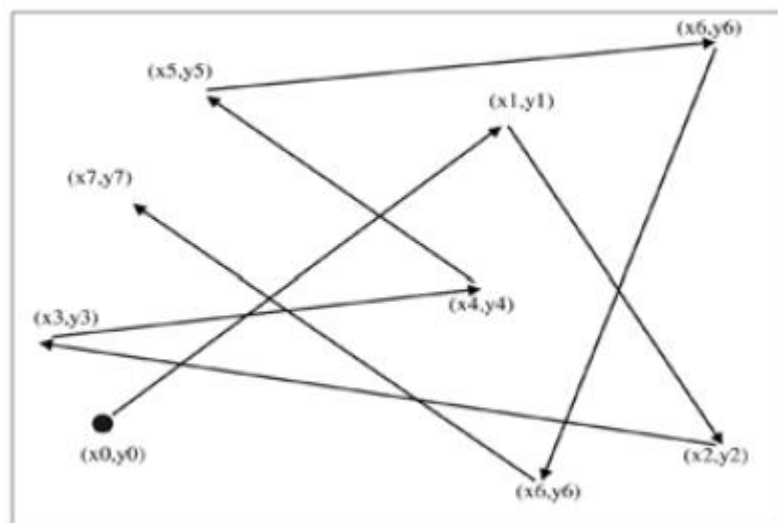


Figure 3.18 : Exemple de mouvement de nœud avec *Random Waypoint* [135]

Dans le simulateur réseau NS-2, la mise en œuvre de ce modèle de mobilité est comme suit: dès le démarrage de la simulation, chaque nœud mobile sélectionne au hasard un emplacement dans le domaine de la simulation en tant que destination. Il se déplace ensuite vers cette destination à une vitesse constante choisie de manière uniforme et aléatoire de  $[0, V_{\max}]$ , dans lequel le paramètre  $V_{\max}$  est la vitesse maximale admissible pour chaque nœud mobile. La vitesse et la direction d'un nœud sont choisies indépendamment des autres nœuds. En arrivant à la destination, le nœud s'arrête pour une durée définie par le paramètre "temps de pause" ( $T_{\text{pause}}$ ). Si  $T_{\text{pause}} = 0$ , ce qui conduit à une mobilité continue. Après cette durée, nous choisissons à nouveau une autre destination aléatoire dans le domaine de la simulation et le nœud se déplace vers cette nouvelle destination. L'ensemble du processus est répété encore et encore jusqu'à la fin de la simulation. A titre d'exemple, la trace de déplacement d'un nœud est représentée dans la Figure 3.18.

Dans le modèle *Random Waypoint*,  $V_{\max}$  et  $T_{\text{pause}}$  sont les deux principaux paramètres qui déterminent le comportement de mobilité des nœuds. Si  $V_{\max}$  est faible et le temps de pause  $T_{\text{pause}}$  est long, la topologie du réseau Ad hoc sera relativement stable. D'autre part, si le nœud se déplace rapidement (à savoir,  $V_{\max}$  est grand) et le temps de pause  $T_{\text{pause}}$  est faible, la topologie est censée être très dynamique. Varier ces deux paramètres, notamment le paramètre  $V_{\max}$ , le modèle *Random Waypoint* peut générer différents scénarios de mobilité avec différents niveaux de vitesse nodal.

Nous avons adopté ce modèle dans la suite de notre travail, pour cela, tous les détails sur ce modèle seront exposés dans le chapitre suivant.

## 2.4.2. Le modèle Random Walk

Le modèle *Random Walk* a été initialement proposé pour imiter le mouvement imprévisible de particules en physique. Il est également désigné sous le nom de mouvement brownien. Comme certains nœuds mobiles sont censés de se déplacer d'une manière inattendue, le modèle de mobilité *Random Walk* est proposé pour imiter leur comportement de déplacement [136]. Le modèle *Random Walk* présente des similitudes avec le modèle *Random Waypoint* puisque le mouvement de nœud est aléatoire dans les deux modèles. Nous pouvons considérer que le modèle *Random Walk* est similaire au modèle *Random Waypoint* avec un temps de pause égal à zéro.

Dans ce modèle, chaque nœud dans la simulation choisit aléatoirement un angle de direction entre  $[0, 2\pi]$  et une vitesse entre  $V_{\min}$  et  $V_{\max}$ . Le déplacement du nœud se fait pendant un temps  $t$  ou d'une distance  $d$ . A la fin de son voyage, le nœud choisit une nouvelle direction et une nouvelle vitesse et se déplace de nouveau.

Le modèle *Random Walk* est un processus de mobilité sans mémoire où les informations sur l'état précédent ne seront pas utilisées pour la future décision. Cela revient à dire, sa vitesse courante est indépendante de sa vitesse précédente et la vitesse future est également indépendante de sa vitesse actuelle.

## 2.4.3. Le modèle Random Direction

Le *Random Direction* proposé par Royer Melliar-Smith et Moser [137], a été créé pour éviter l'effet de concentration des nœuds au centre produit par le *Random Waypoint*. Dans ce modèle, chaque nœud choisit aléatoirement, comme dans le *Random Walk*, une direction qui est un angle entre  $[0, 2\pi]$  ainsi qu'une vitesse entre  $V_{\min}$  et  $V_{\max}$ . La différence entre ce modèle et le

*Random Walk* est qu'ici le nœud ne voyage pas pendant un certain temps ou d'une certaine distance mais se déplace suivant la direction choisie jusqu'à atteindre le bord de la surface de simulation où il prend un temps de pause. Une fois le temps de pause terminé, le nœud choisit de nouveau et aléatoirement une nouvelle direction et une nouvelle vitesse et répète le même processus. La Figure 3.19 montre un nœud utilisant le *Random Direction* comme modèle de mobilité. Le nœud commence à se déplacer et chaque fois il se déplace jusqu'au bord où il prend un temps de repos avant de changer sa direction et sa vitesse.

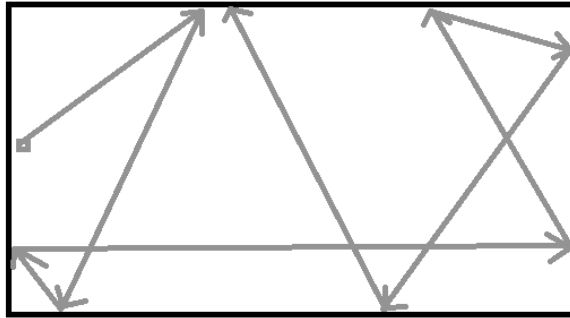


Figure 3.19 : Exemple de mouvement de nœud avec *Random Direction* [137]

Une autre variante du modèle de *Random Direct* est le modèle *Modified Random Direction* qui permet à un nœud de s'arrêter et de choisir une nouvelle direction avant d'atteindre la limite du champ de simulation. Pour les deux versions du modèle *Random Direction*, les auteurs Royer, Melliar-Smith et Moser [137] indiquent que le modèle *Random Direction* entraîne moins de fluctuation de densité de nœud que le modèle *Random Waypoint*.

## 2.5. Modèles de mobilité avec dépendance temporelle

La mobilité d'un nœud peut être restreinte et limitée par les lois de la physique de l'accélération, la vitesse et le changement de la direction. Par conséquent, la vitesse actuelle d'un nœud mobile peut dépendre de sa vitesse précédente. Ainsi, les différentes vitesses d'un nœud donné à différents intervalles de temps sont «corrélées». Nous appelons cette caractéristique de mobilité la dépendance temporelle à la vitesse.

Dans les modèles purement aléatoires que nous venons d'exposer, les changements de direction peuvent se faire instantanément, les modifications de la vitesse ne connaissent aucune transition et passent brusquement d'une valeur à une autre. Pour rendre les déplacements plus réalistes, certains travaux proposent de tenir compte de l'historique des mouvements à chaque modification de la trajectoire ou de la vitesse. Ces modèles présentent donc une dépendance temporelle.

Par la suite nous présentons un exemple de cette famille de modèles, à savoir le *Gauss-Markov*.

### 2.5.1. Le modèle Gauss-Markov

Dans [1], Ben Liang et Zygmunt J. Haas présentent le modèle de mobilité de Gauss-Markov. Dans ce modèle, le temps est discrétisé en intervalles de durée constante. A chaque instant  $t$ , un nouveau vecteur vitesse, noté  $\vec{v}_t$ , est choisi.

Le nom de ce modèle fait référence aux deux propriétés que possède le processus à l'origine du vecteur vitesse des mobiles. Ce processus est en effet markovien car son état futur

ne dépend pas des états passés mais uniquement de son état présent. Il contient également une composante gaussienne car pour pouvoir introduire une modification entre deux valeurs consécutives, ce processus fait intervenir une distribution normale. L'expression du vecteur vitesse dans un espace à deux dimensions est définie par :

$$\begin{cases} \overrightarrow{v_{t+1}} \\ v_x^{t+1} = \alpha v_x^t + (1 - \alpha) \mu_x + \sigma_x \sqrt{1 - \alpha^2} \omega_x^t \\ v_y^{t+1} = \alpha v_y^t + (1 - \alpha) \mu_y + \sigma_y \sqrt{1 - \alpha^2} \omega_y^t \end{cases} = \dots \quad (3.6)$$

Où  $\vec{\mu} = [\mu_x, \mu_y]$  représente le vecteur vitesse moyen et  $\vec{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y]$  son écart type.  $\vec{\omega} = [\omega_x, \omega_y]$  représente le vecteur d'un processus gaussien normalisé  $N(0,1)$ .

Le vecteur vitesse à un instant t+1,  $\overrightarrow{v_{t+1}}$ , dépend donc à la fois de sa vitesse à l'instant t,  $\overrightarrow{v_t}$ , mais également d'une composante totalement indépendante :  $\vec{\omega}_t$ .

La constante  $\alpha \in [0, 1]$  permet d'établir le niveau de dépendance temporelle du vecteur vitesse. Plus ce facteur est élevé, plus le vecteur vitesse à l'instant t+1 est proche de celui à l'instant t. Lorsque  $\alpha = 1$ , le modèle *Gauss-Markov* devient un modèle fluid-flow [138] caractérisé par un vecteur vitesse constant.

Au contraire, plus ce facteur est faible et plus les fluctuations du vecteur vitesse sont importantes. Lorsque  $\alpha = 0$ , il n'existe plus aucune dépendance avec le mouvement précédent. La trajectoire des mobiles est alors la même que pour le modèle *Random-Walk*.

## 2.6. Modèles de mobilité avec dépendance spatiale

Dans les modèles présentés jusqu'à maintenant, la trajectoire de chaque élément du réseau est indépendante de celle des autres mobiles. Cependant, lorsque l'on souhaite représenter le mouvement de mobiles se déplaçant en groupe ou convergeant vers une destination commune, il est important de pouvoir lier le déplacement de plusieurs mobiles.

Cette dépendance spatiale dans le déplacement des unités peut avoir un impact sur certaines caractéristiques de la communication comme la durée de vie des liens ou l'évolution du degré des mobiles.

En effet, les membres d'un même groupe suivent globalement la même trajectoire et sont proches les uns des autres. La durée de vie des connexions à l'intérieur d'un groupe est donc plus élevée qu'entre des mobiles appartenant à des groupes différents.

Dans le cas des modèles précédents, les unités étaient réparties de manière plus ou moins homogène sur la zone de simulation. Certaines zones pouvaient être plus denses mais cette augmentation de la densité était progressive, les fluctuations du degré se faisaient donc aussi de manière progressive. Dans le cas d'un déplacement en groupe les rencontres ne vont pas se faire mobile par mobile mais groupe par groupe. L'évolution du degré du mobile va donc se faire par palier dont la hauteur dépend de la taille des groupes. Toutes ces caractéristiques peuvent avoir un impact sur les performances d'un protocole. C'est pourquoi, certains travaux proposent des modèles qui prennent en compte cette dépendance spatiale.

Par la suite nous présentons un exemple de cette famille de modèles, à savoir le *Reference Point Group Model*.

### 2.6.1. Le modèle Reference Point Group Model

Xiaoyan Hong et al. [3] proposent un modèle de déplacement en groupe avec point de référence nommé RPGM (*Reference Point Group Mobility Model*) possédant les propriétés suivantes :

- chaque groupe dispose d'un chef qui sert de point de référence pour déterminer le déplacement global du groupe. Ce chef peut être un mobile comme un point virtuel,
- les membres d'un groupe suivent globalement le déplacement de leur chef tout en conservant une certaine liberté de mouvement,
- la trajectoire du chef de groupe est définie par le modèle *Random Waypoint* présenté avant.

Le vecteur vitesse d'un membre de groupe, noté  $\vec{V}_i^t$  est défini par :

$$\vec{V}_i^t = \vec{V}_{groupe}^t + \vec{RM}_i^t \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

Où  $\vec{V}_{groupe}^t$  représente le vecteur vitesse du chef de groupe. Le vecteur  $\vec{RM}_i^t$  définit la liberté de mouvement du mobile i par rapport au déplacement de son chef de groupe. Les coordonnées de ce vecteur sont calculées en fonction de deux variables aléatoires indépendantes :

- la distance r entre un mobile i et le chef du groupe est distribuée uniformément dans l'intervalle  $[0, r_{max}]$ , où  $r_{max}$  représente l'écart maximum autorisé entre un membre et son chef de groupe,
- l'écart, noté b, entre la direction d'un mobile i et celle de son chef de groupe est distribuée uniformément sur l'intervalle  $[0, 2\pi]$ .

Par conséquent, si le chef de groupe se déplace entre les points  $[x_0, y_0]$  et  $[x_1, y_1]$  et avec  $b \in [0, 2\pi]$  et  $r \in [0, r_{max}]$ , l'expression du vecteur est définie par :

$$\vec{RM}_i^t = \begin{cases} RM_{i,x}^t = r \times \cos(a + b) \\ RM_{i,y}^t = r \times \sin(a + b) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

## 2.7. Modèles avec contraintes géographiques

Dans la plupart des modèles, la zone de simulation se résume à un rectangle dans lequel les mobiles sont libres de se déplacer. Dans la réalité, il existe de nombreuses contraintes géographiques telles que des arbres, des plans d'eau ou des bâtiments qui doivent être évités. Pour être réaliste, un modèle doit donc tenir compte de ces obstacles et modifier la trajectoire des mobiles en conséquence.

Par la suite nous présentons un exemple de cette famille de modèles, à savoir le modèle de mobilité avec obstacles.

### 2.7.1. Le modèle de mobilité avec obstacles

Ce modèle a été conçu pour modéliser le mouvement des nœuds mobiles dans les terrains qui ressemblent à des topographies réelles. Des objets modélisent les bâtiments et d'autres

structures qui empêchent les mouvements des nœuds, ainsi que leur transmission sans fil. En modélisant un tel terrain, un utilisateur peut définir les positions, les formes et les tailles de ces objets. Ce modèle peut manipuler des formes et des positions arbitraires pour les objets, permettant de modéliser beaucoup de terrains réels.

Le deuxième composant du modèle de mobilité est un graphe de mouvement qui représente les déplacements des nœuds. Ce graphe planaire est le diagramme de Voronoï [139] des coins des obstacles (les arêtes sont des segments qui sont à une distance égale des deux coins d'un obstacle). Ainsi, ce modèle est basé sur l'intuition que les chemins tendent à se définir à mi-distance entre les bâtiments adjacents. Ce modèle permet également le mouvement à l'intérieur des bâtiments.

Le troisième composant du modèle est le choix des routes. Les nœuds utilisent les chemins les plus courts (en terme de distance euclidienne) pour se déplacer entre deux points du graphe du mouvement, c'est-à-dire qu'ils suivent le chemin le plus court dans le diagramme de Voronoï. Le placement des objets et des chemins les reliant sont calculés au début de la simulation et ne changent pas pendant toute la simulation. Les nœuds sont distribués au hasard le long des chemins, ils choisissent une destination et puis se déplacent vers cette destination en suivant le chemin le plus court à partir de sa position courante.

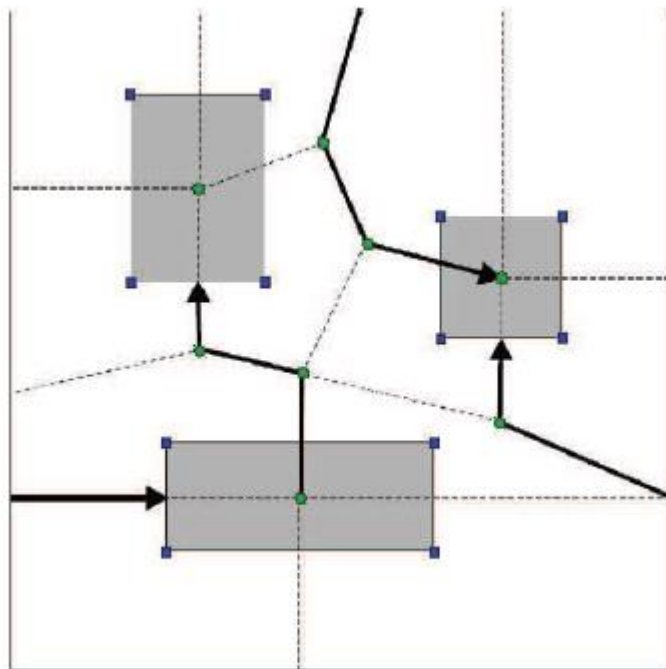


Figure 3.20 : Mouvements avec obstacles utilisant le diagramme de Voronoï [139]

Ainsi, chaque nœud calcule le chemin le plus court sur le graphe créé par les chemins et puis se déplace vers cette destination en utilisant le chemin calculé. Lorsqu'il atteint sa destination, le nœud fait une pause pour une certaine période de temps. Il choisit alors une nouvelle destination, calcule le chemin le plus court pour l'atteindre, et reprend le mouvement. Les nœuds peuvent se déplacer à l'intérieur des bâtiments car le plus court chemin entre deux endroits peut exiger le passage par l'intérieur d'un bâtiment.



## 2.8. Discussion sur les modèles de mobilité

La performance d'un protocole dans les réseaux sans fil peut changer de manière significative lorsque nous le testons avec différents type de modèles de mobilité, mais aussi quand le même modèle de mobilité est utilisé avec différents paramètres. Aussi, ce modèle doit se rapprocher le plus de la réalité.

De nombreux modèles de mobilité ont été proposés afin de représenter le déplacement de mobiles. Dans les premières solutions, la trajectoire des mobiles est purement aléatoire.

Le modèle de mobilité *Random Walk* avec comme paramètre d'entrée (distance ou temps) produit un mouvement Brownien et par conséquent évalue un réseau statique lorsqu'il est utilisé pour l'évaluation des performances. Cependant, avec l'utilisation d'un grand nombre de paramètres d'entrée, le *Random Walk* ressemble au modèle de mobilité *Random Waypoint* si nous ajoutons des temps de pause.

La principale différence entre ces deux modèles est que les nœuds composant le modèle RWP ont plus tendance à se regrouper au centre du secteur de simulation que les nœuds composant le modèle *Random Walk*, le modèle *Random Waypoint* est utilisé dans plusieurs études de protocoles dédiés aux réseaux sans fils, c'est un modèle flexible et réaliste mais l'inconvénient majeur de ce modèle est la ligne droite du mouvement suivi par le nœud mobile qui se déplace vers la prochaine destination choisie.

Ces approches relativement simples présentent cependant un certain nombre de propriétés indésirables mises en évidence par plusieurs études. Certains travaux ont cherché à représenter des mouvements plus proches de la réalité. Ils ont pour cela défini des modèles capables de prendre en compte des caractéristiques particulières telles que les dépendances spatiale et temporelle ou encore la gestion des contraintes géographiques.

Le modèle de mobilité Gauss-Markov fournit des modèles de mouvement auxquels nous pouvons s'attendre dans la réalité si nous choisissons les bons paramètres. En outre, la méthode utilisée pour forcer les nœuds à partir des bords du secteur de simulation (évitant ainsi les effets de bord de secteur) est intéressante.

La Table 3.9 présente de manière compacte les principales caractéristiques, comme la vitesse, la direction et la nature (réaliste ou non) de quelques modèles de mobilité étudiés dans cette partie de la thèse.

| Nom du modèle                               | Direction aléatoire | Vitesse aléatoire | Réalisme | Type d'application                   |
|---|---------------------|-------------------|----------|--------------------------------------|
| <i>Random Walk</i>                          | Oui                 | Oui               | Peu      | Mouvement brownien                   |
| <i>Random Waypoint</i>                      | Oui                 | Oui               | Oui      | WLAN                                 |
| <i>Gauss-Markov</i>                         | Non                 | Non               | Oui      | PCS (Personal Communication Service) |
| <i>Reference Point Group Mobility Model</i> | Oui                 | Oui               | Oui      | Situation de secours                 |

Table 3.9 : Caractéristiques des modèles de mobilité

## 3. Etude du protocole RWP

### 3.1. Avant-Propos

#### 3.1.1. Origine des phénomènes aléatoires

Durant l'évolution temporelle d'un phénomène, une succession d'événements sont dites erratiques ou aléatoires si elles n'obéissent visiblement à aucune loi, à aucune régularité qui permet de les prévoir. Dans ce sens, « aléatoire » est synonyme d'« imprédictible ». À titre d'exemple, la variation de la pression atmosphérique en un lieu donné est erratique et, de fait, imprédictible, tant il est vrai que la connaissance de son évolution passée n'en permet pas la prévision. Au contraire, la variation de la hauteur d'eau dans un port soumis à l'influence des marées est régulière et rigoureusement prévisible.

Le mot Hasard est un mot d'origine arabe : az-zahr (الزهر), le dé. Il est apparu en français pour signifier tout d'abord un jeu de dés, puis plus généralement un événement non prévisible, et par extension le mode d'apparition de ce type d'événement. Dans la vie quotidienne, chacun est familier avec le mot et même le concept de probabilité : probabilité qu'il pleuve la semaine suivante, probabilité d'avoir une fille aux yeux bleus, probabilité de gagner au loto ou celle d'être dans la bonne file au supermarché. Les assurances fixent le contrat d'assurance-vie d'un individu de 20 ans, grâce à une estimation de sa probabilité de survie à 80 ans. Dans de nombreux domaines, les probabilités interviennent : les entreprises cherchent à calculer le besoin probable de leurs produits dans le futur, les médecins cherchent à connaître les probabilités de succès de différents protocoles de soin, les compagnies pharmaceutiques doivent estimer les probabilités d'apparitions d'effets secondaires pour leurs médicaments. Un exemple récent et spectaculaire est celui de l'utilisation des probabilités en économie, et en particulier en finance. Nous pouvons citer également d'autres domaines d'applications extrêmement importants et en pleine expansion, aussi variés que le calcul de structures, la théorie du signal, l'optimisation et le contrôle des systèmes, l'imagerie médicale, la génomique et la théorie de l'évolution.

Deux idées majeures illustrent la théorie des probabilités et son extrême richesse :

- **La loi des grands nombres**

La notion de hasard, ou d'aléatoire, est souvent liée à la méconnaissance de paramètres intervenant dans une expérience, ou à la trop grande multitude de ceux-ci. Néanmoins, bien que ces comportements aléatoires soient a priori sujets à des variations imprévisibles, nous serons capables de donner des renseignements sur ce type de phénomènes. L'idée majeure est que ces informations seront données par la répétition de l'expérience. En effet, l'observation d'un grand nombre de répétitions d'un même phénomène aléatoire permet d'y déceler généralement des lois régissant les résultats, tout à fait déterminées, stables. Par exemple, pour toute pièce non truquée d'un jeu de Pile ou Face, et quel que soit l'endroit où se déroule le jeu, 1000 lancers de la pièce donneront environ 50% de piles et 50% de faces. De même, l'étude de la répartition des tailles d'un groupe d'individus, et quel que soit l'échantillon pris dans ce groupe, montre qu'il y aura toujours une courbe des répartitions de même type. Il va être ainsi possible de prévoir la fréquence d'apparition de chaque résultat, la valeur moyenne de ces résultats et les oscillations autour de cette valeur moyenne. C'est cette stabilité confirmée par l'expérience qui s'appelle **Loi des grands nombres**, et qui légitime l'utilisation d'un modèle mathématique

Il existe une origine naturelle à une évolution ou à une suite d'événements erratiques: c'est l'effet d'une loi des grands nombres. Le caractère désordonné est alors lié à la conjonction d'une multitude d'événements indépendants entre eux. Prenons le cas d'une suite de nombres tirés au hasard, comme celle qui est donnée par tirage du loto. Ces suites sont par définition imprédictibles, ce qui donne précisément tout leur sel aux jeux de hasard. La cause en réside bien évidemment dans la multitude des chocs que les boules, porteuses des numéros, subissent entre elles ou de la part des bras d'agitation.

De même, dans le domaine de la physique, le mouvement brownien d'une particule, mouvement aléatoire par excellence, est lié aux multitudes de chocs que subit cette particule de la part des molécules du fluide dans lequel elle se trouve en suspension. C'est ainsi que beaucoup de phénomènes erratiques sont liés à une loi des grands nombres, telle, par exemple, la turbulence développée, qu'illustre bien la complexité de la trajectoire d'une feuille morte ballottée dans le plus grand désordre par jour de grand vent. L'origine de ce désordre est due à la coexistence d'un grand nombre de tourbillons, de toutes tailles et de toutes vitesses, qui agitent la feuille dans tous les sens.

## ● Conditionnement et Indépendance

La construction d'un modèle probabiliste repose sur l'information connue a priori sur l'expérience aléatoire. Ce modèle permet de quantifier les probabilités de réalisation de certains résultats de l'expérience. Il est fondamental de remarquer que si l'information change, les probabilités de réalisation changent. Par exemple, la chance de choisir au hasard un homme de plus de 100 kilos parmi 1000 hommes depuis une population est plus grande si le groupe est composé d'hommes de plus de 1,80m que si le groupe est composé d'hommes de moins de 1,65m. La richesse du modèle probabiliste réside dans le fait que si l'information change par rapport au modèle initial, les nouvelles chances de réalisation pourront être calculées. Ce raisonnement lié à l'information a priori se résume en théorie des Probabilités par le mot conditionnement. Quand l'information donnée a priori sur un phénomène aléatoire n'a aucune influence sur la réalisation d'un autre phénomène, par exemple deux tours successifs de jeu de dés, ces phénomènes aléatoires sont dits indépendants. Cette hypothèse d'indépendance sera fondamentale dans toute la théorie, et simplifiera de nombreux calculs.

### 3.1.2. Connectivité Vs Rayon de transmission

Dans un MANET, il existe un chemin (impliquant éventuellement plusieurs sauts) à partir d'un nœud mobile vers tous les autres mobiles. Un lien existe entre deux nœuds quand ils se trouvent dans leurs rayons de transmission. Supposons que tous les nœuds utilisent le même rayon de transmission. En raison de la nature dynamique des liens (car les nœuds se déplacent à l'intérieur et à l'extérieur de portée l'un de l'autre), nous nous trouvons dans le besoin de vérifier si le MANET est connecté tout le temps ou non.

De ce fait, nous définissons la connectivité par le laps de temps pendant lequel chaque nœud peut être atteint (en un ou plusieurs liens) par tous les autres nœuds. Une connectivité de 1 indique que le graphe sous-jacent est en permanence connecté tout le temps, en dépit de la mobilité des nœuds. Trivialement, nous pouvons être certains que le graphe est connexe si le rayon de transmission de tous les nœuds est égale à la distance du mauvais cas entre deux nœuds:  $\sqrt{a^2 + b^2}$  (correspondant à la diagonale de la surface rectangulaire). De toute évidence,

nous sommes intéressés par le plus petit rayon possible, afin d'économiser l'énergie consommée pour la transmission, mais sans compromettre la connectivité.

## 3.2. Présentation du RWP

Le modèle de mobilité *Random Waypoint* (RWP) a été largement utilisé dans les simulations des réseaux mobiles Ad hoc. Ce modèle de mobilité est un modèle stochastique simple et directe. Dans RWP [140], un nœud mobile se déplace sur un plan continu fini à partir de sa position actuelle vers un nouvel emplacement en choisissant au hasard (ne suivant aucune loi de probabilité) ses coordonnées de destination, sa vitesse de déplacement, et le laps de temps qu'il fera une pause quand il atteint la destination. En arrivant à la destination, le nœud se met en pause pendant un certain temps répartis selon une variable aléatoire et le processus se répète. Après l'expiration du temps de pause, le nœud choisit une nouvelle destination, une vitesse et un temps de pause. Le mouvement d'un nœud à partir de la position de départ à sa prochaine destination est défini comme le mouvement d'une époque, d'une période de mouvement, ou d'un temps de transition. La distance parcourue entre les mouvements d'un nœud à partir du point de passage à partir de son point de passage suivant est définie comme étant la longueur de transition. Les points de destination sont uniformément choisis au hasard dans la zone de simulation.

La Figure 3.21 montre un exemple de mouvement d'un nœud mobile en utilisant le modèle de mobilité *Random Waypoint* à partir d'un point choisis aléatoirement; la vitesse du nœud mobile dans la figure est uniformément choisie entre 0 et 10 m/s [136]. Nous notons que le motif de déplacement d'un nœud mobile en utilisant le modèle de mobilité *Random Waypoint* est similaire au modèle de mobilité *Random Walk* si le temps de pause est égal à zéro. Dans la plupart des enquêtes de performance qui utilisent le modèle de mobilité *Random Waypoint*, les nœuds mobiles sont initialement répartis de manière aléatoire à l'intérieur de la zone de simulation. Cette distribution aléatoire de nœuds mobiles n'est pas représentative de la manière dont les nœuds se répartissent lors de leurs déplacements.

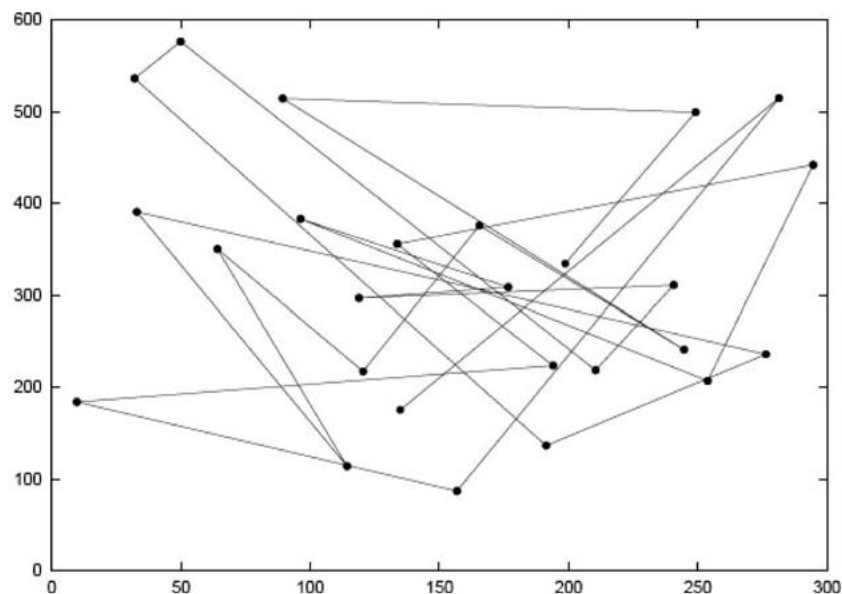


Figure 3.21 : Exemple de mouvement d'un nœud mobile utilisant le modèle de mobilité *Random Waypoint* [136].

En outre, nous pouvons voir sur la Figure 3.22 que, avec RWP, les nœuds se regroupent autour du centre de la région et passeront par les régions de frontières avec une très faible densité.

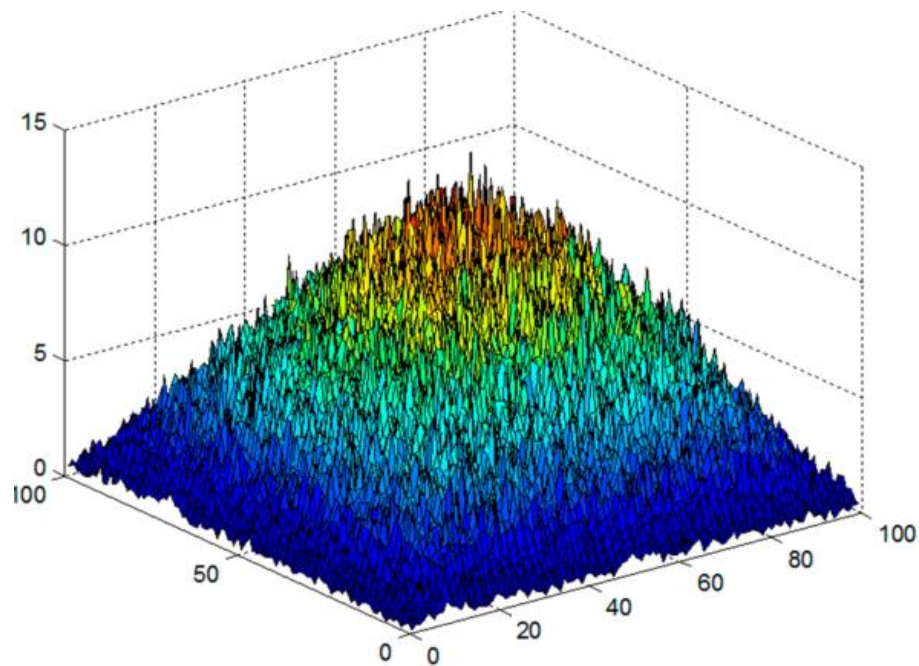


Figure 3.22 : Distribution de nœuds sous *Random Waypoint* [141]

La Figure 3.23 illustre le voisinage (en pourcentage moyen cumulatif) des nœuds mobile, sur la base du modèle de mobilité *Random Waypoint* au fil du temps (la vitesse est égale à 1 m/s et le temps de pause est égal à zéro).

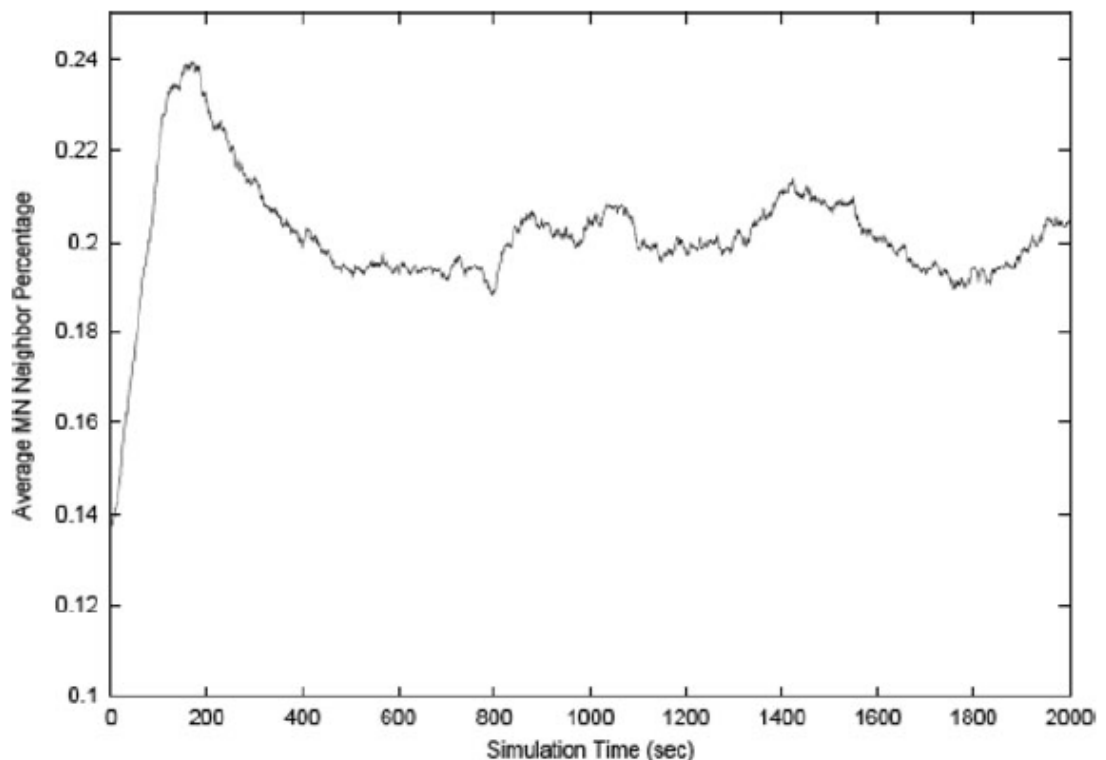


Figure 3.23 : Pourcentage de la moyenne des nœuds voisins en fonction du temps [136].

Par exemple, s'il y a 50 nœuds mobiles dans le réseau et chaque nœud possède 10 voisins, alors le pourcentage de voisinage actuel d'un nœud est 20. Un voisin d'un nœud mobile doit être impliqué dans sa portée de transmission. Comme le montre la Figure 3.23, il y a une grande variabilité dans les 600 premières secondes du temps de simulation. Cette grande variabilité produira une grande variabilité dans les résultats de performance.

L'une des solutions possibles pour éviter ce problème d'initialisation [136] est d'ignorer les premiers 1000 secondes de temps de simulation produite par le modèle de mobilité *Random Waypoint* dans chaque scénario de simulation. (Rejeter 1000 s de temps de simulation assure que le problème d'initialisation est soulevé même si les nœuds mobiles se déplacent lentement. En d'autres termes, nous pouvons ignorer quelques secondes de temps de simulation pour accélérer le déplacement des nœuds mobiles.) Ignorer les premiers 1000 s de temps de simulation garantit que chaque simulation a une configuration initiale aléatoire.

Il y a aussi une relation complexe entre la vitesse d'un nœud et le temps de pause dans le modèle de mobilité *Random Waypoint*. Par exemple, un scénario avec des nœuds mobiles rapides et des périodes longues de temps de pause produira un réseau plus stable qu'un scénario avec des nœuds mobiles lents et des périodes courtes de temps de pause. En effet, les périodes longues de temps de pause (c-à-d, plus de 20 s) produisent un réseau stable (c-à-d, quelques changements de liaison par nœud mobile), même à des vitesses élevées.

### 3.3. Fonctionnement du RWP

Le modèle RWP peut être entièrement décrit à l'aide de paramètres suivants:

- **N**; est le nombre de nœuds se déplaçant de façon indépendante, en capturant le nombre d'utilisateurs mobiles participant à la simulation;
- **R**; est le rayon de communication de chaque nœud (nous considérons le cas où R est le même pour tous les nœuds), moyennant quoi les deux nœuds peuvent communiquer directement que si elles se trouvent à une distance R de l'autre;
- **V<sub>m</sub>**; est la vitesse maximale d'un nœud;
- **P**; est le temps de pause en moyenne à un *waypoint*.
- Les deux derniers paramètres sont les deux dimensions de la limite rectangulaire bidimensionnelle.

Chaque nœud se déplace indépendamment des autres. Le mouvement d'un nœud donné est constitué de périodes de déplacement et de pause en alternance. Les points où les nœuds mobiles se mettent en pauses sont appelés *waypoints*. Dans le contexte d'une simulation, elle sera initialisée par la sélection, d'une manière uniforme, d'un emplacement initial des nœuds à l'intérieur de la région rectangulaire. Les *waypoints* sont également choisis de manière aléatoire uniformément à l'intérieur du rectangle. Par la suite, un nœud mobile sélectionne son prochain *waypoint*, il génère, de façon uniformément aléatoire, une vitesse comprise entre  $(0+\epsilon)$  et  $V_m$ : Le  $\epsilon$  est réglé de telle sorte que la vitesse moyenne à long terme des nœuds ne se détériore pas, c-à-d en suivant les lignes directrices énoncées par Ljubica Blazevic et al. dans [136]. Le nœud se déplace ensuite vers le nouveau *waypoint* avec cette nouvelle vitesse. Une fois qu'il atteint le *waypoint*, il sélectionne à partir d'une distribution exponentielle (avec une moyenne P), un temps de pause, et restera au *waypoint* pour ce laps de temps avant de bouger vers le prochain *waypoint*.

Les caractéristiques du RWP ont été analysées dans plusieurs travaux :

- Taux de changement de la topologie du réseau [142]
- Distribution stationnaire des nœuds [140]
- Connectivité dans le réseau [143]
- Évolution de la répartition des nœuds par le biais d'équations aux dérivées partielles [144]
- Etc...

### 3.4. Algorithme du RWP

Le modèle *Random Waypoint* est appliqué pour chaque mobiles  $p$  les instructions suivantes:

```

faire
{
  Etape 1: Choisir une nouvelle valeur pour DestP uniformément dans chaque direction.
  Etape 2: Choisir une nouvelle valeur pour Vp uniformément dans l'intervalle [ $V_{min}$ ,  $V_{max}$ ]
  Etape 3: Choisir une nouvelle valeur pour PauseP uniformément dans l'intervalle [ $P_{min}$ ,  $P_{max}$ ].
  Etape 4: Marquer une pause d'une durée PauseP;
  Etape 5: Déplacer ce mobile  $p$  vers DestP avec une vitesse Vp;
}
Jusqu'à (la fin de la simulation)
    
```

Figure 3.24 : Algorithme de fonctionnement du RWP

Tel que:

- **DestP**: coordonnées cartésiennes du point vers lequel se dirige le mobile  $p$ .
- **Vp**: vitesse du mobile  $p$  définie sur l'intervalle [ $V_{min}$ ,  $V_{max}$ ].
- **PauseP**: le nœud mobile  $p$  marquera une pause définie sur l'intervalle [ $P_{min}$ ,  $P_{max}$ ].

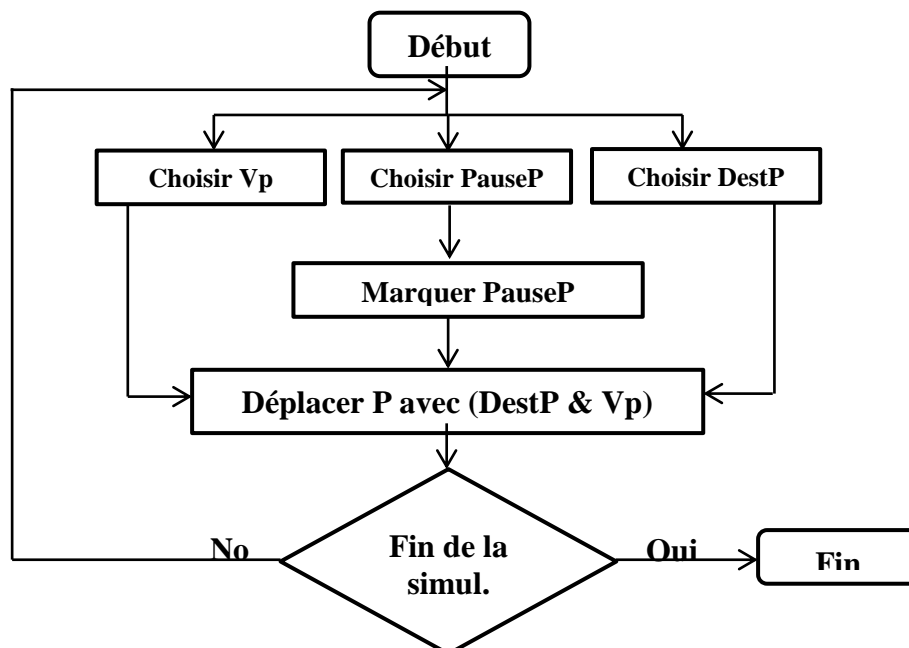


Figure 3.25 : Algorithme de fonctionnement du RWP

### 3.5. Processus stochastique du RWP

De nombreux paramètres statistiques ont été analysés pour le modèle de mobilité *Random Waypoint*, et ses caractéristiques peuvent être résumées comme indiqué dans [140]. Le modèle *Random Waypoint* est décrit comme étant un processus stochastique à temps discret. Sur la base de cette description, les paramètres stochastiques typiques de la distance parcourue et le temps de parcours d'un nœud pendant une transition de mouvement sont dérivés en utilisant des résultats classiques de la théorie des probabilités géométrique [140]. Pour la simplicité de l'analyse, les notations suivantes ont été utilisées:

- L'espace pour le mouvement du nœud mobile sous *Random Waypoint* peut être 1D ou 2D de l'espace A. Un espace 2D peut être considéré comme une zone de rectangle de taille  $a \times b$  ou une zone circulaire de rayon  $a$ .
- Les paramètres  $i$  et  $j$  indiquent une unité discrète de temps pour le déplacement d'un nœud et un nœud particulier, respectivement.
- Le vecteur  $P_i^{(j)}$  indique que le nœud  $j$  avec le modèle de mobilité *Random Waypoint* choisit sa période de mouvement  $i$ .

Avec cette définition, la trace de mouvement d'un nœud  $j$  peut être formellement décrite comme un processus stochastique à temps discret, donnée par la sélection d'un point aléatoire  $P_i^{(j)}$  pour chaque période de mouvement  $i$  [1]:

$$\{P_i^{(j)}\}_{i \in \mathbb{N}} = P_0^{(j)}, P_1^{(j)}, P_2^{(j)}, P_3^{(j)} \dots \quad (3.9)$$

Nous considérons que les points de déplacement sont indépendamment et identiquement distribués (i.i.d.) sur l'espace du système A avec une distribution aléatoire uniforme. Nous omettrons l'indice  $j$  en raison du fait que chaque nœud se déplace indépendamment des autres nœuds, et l'étude du processus stochastique d'un nœud unique est suffisante. Supposons qu'un nœud sélectionne une nouvelle vitesse  $V_i$  pour le mouvement de  $P_{i-1}$  à  $P_i$  et un temps de pause  $T_{p,i}$  au point  $P_i$  aléatoirement. Dans ce cas, le processus de déplacement du nœud peut être décrit comme il est indiqué ci-dessous:

$$\{(P_i, V_i, T_{p,i})\}_{i \in \mathbb{N}} = (P_1, V_1, T_{p,1}), (P_2, V_2, T_{p,2}), (P_3, V_3, T_{p,3}) \dots \quad (3.10)$$

Dans l'équation (3.10), un point supplémentaire  $P_0$  est nécessaire pour l'initialisation et  $\{(P_i, V_i, T_{p,i})\}_{i \in \mathbb{N}}$  est utilisé pour exprimer un exemple de ce processus. Le vecteur  $(P_{i-1}, P_i, V_i, T_{p,i})$  définit complètement la période de mouvement  $i$ , et nous pouvons simplement écrire  $P$ ,  $V$ , ou  $T_p$  pour désigner une seule variable aléatoire en omettant l'indice  $i$ . La fonction de densité de probabilité (pdf) du temps de pause est définie par  $FT_p(T_p)$  dans l'intervalle  $(0, T_{p,max})$  avec  $T_{p,max} < \infty$ , et la valeur attendue du temps de pause est une fonction bien définie par  $E(T_p)$ , et les valeurs du temps de pause (variable aléatoire) sont choisis parmi ces fonctions aléatoires en conséquence. De même,  $FT_p(T_p)$  est le pdf de la vitesse limitée par l'intervalle  $[V_{min}, V_{max}]$  avec  $V_{min} > 0$  et  $V_{max} < \infty$ , et les valeurs de la vitesse (variable aléatoire) sont choisis parmi ce pdf.



Radhika Ranjan Roy [145] a présenté le modèle analytique de certaines propriétés stochastiques du modèle de mobilité RWP. Par cette analyse analytique l'auteur a réussi de donner une meilleure compréhension de ce qui suit:

- La longueur et la durée d'un mouvement entre deux *waypoints*,
- La distribution spatiale des nœuds résultant et leurs dépendances au temps de pause,
- L'angle de direction choisie au début d'une transition de mouvement,
- Le nombre de changements entre les cellules, pour le modèle RWP utilisé dans une structure mobile cellulaire.

La fréquence de changement cellulaire est une métrique utile qui fournit une compréhension claire du degré de mobilité dans les réseaux mobiles Ad hoc. L'auteur a montré que la durée entre deux changements de direction est déterminée par la vitesse des nœuds aussi par la taille et la forme de la zone.

La connaissance de la distribution spatiale de nœuds est essentielle pour les investigations fondées sur la simulation relatives aux interférences entre les nœuds, le contrôle d'accès au support, et des problèmes de connectivité, pour ne citer que quelques-uns. Le résultat d'analyse de la distribution de direction dérivée explique le fait que les nœuds du modèle RWP ont tendance à se déplacer vers le milieu de la zone. Ce résultat est également soutenu par les résultats dans de nombreux travaux publiés dans le cadre des simulations pour RWP [140].

### 3.5.1. Les limites du modèle de mobilité RWP

Le RWP a été largement utilisé pour l'étude et l'analyse des réseaux mobiles Ad hoc. Dans ce modèle, chaque nœuds mobile choisit au hasard une destination et se déplace vers celle-ci avec une vitesse distribuée dans  $[V_{min}, V_{max}]$ ,  $V_{min} \geq 0$  où  $V_{min}$  et  $V_{max}$  sont respectivement la vitesse minimale et la vitesse maximale autorisées d'un nœud. Après avoir atteint la destination, le nœud se stabilise pour une durée définie par le paramètre Temps de pause.

Après cette durée, il choisit à nouveau une destination aléatoire et répète l'ensemble du processus jusqu'à ce que la simulation se termine. Bien que le modèle de mobilité RWP a été largement utilisé dans les simulations des MANETs, il est insuffisant pour satisfaire les caractéristiques de mobilité suivantes [146] :

- **Dépendance Temporelle de la vitesse:** En raison des contraintes physiques de l'entité mobile, la vitesse du nœud mobile dans le modèle de mobilité RWP changera en continu et lentement. Autrement dit, la vitesse actuelle est fonction de la vitesse à l'instant précédent. Cependant et dans le modèle RWP, les vitesses à deux intervalles de temps différents sont indépendantes.
- **Dépendance spatiale de la vitesse:** Le déplacement d'un nœud mobile dans RWP peut être influencé par (et en corrélation avec) des nœuds de son voisinage, Cependant et dans le modèle RWP, chaque nœud mobile se déplace indépendamment des autres.
- **Restrictions géographiques de mouvement:** Dans de nombreux cas, le mouvement d'un nœud mobile dans le modèle de mobilité RWP pourrait être limité le long d'une rue ou d'une autoroute tant qu'une carte géographique pourrait définir ces frontières.

### 3.5.2. Remède des limites du modèle de mobilité RWP

La propriété sans mémoire du modèle de mobilité RWP peut également fournir une trajectoire de type oscillatoire avec des arrêts brusques et des virages serrés qui semblent être des modèles de mouvement irréalistes pour les réseaux Ad hoc. Le modèle *Random Direction Mobility* [131], une version modifiée du modèle RWP, qui pourra prendre soin de ce problème rendant le modèle libre de ces mouvements irréalistes.

La simulation doit être exécutée assez longtemps pour surmonter la grande variabilité initiale du nombre moyen de voisins ainsi que d'autres facteurs, et ensuite le point de départ initial des nœuds mobiles sera pris en considération dans toutes les futures simulations [136]. Autrement dit, cette solution simple garantit que les résultats des simulations initiaux produites par le modèle RWP sont ignorés assez longtemps dans chaque simulation afin que chaque simulation aurait une configuration initiale stable et aléatoire. Il y a aussi une relation complexe entre la vitesse du nœud et le temps de pause dans le modèle de mobilité RWP. Par exemple, un scénario avec des nœuds mobiles rapides et des temps de pause assez long produira un réseau plus stable qu'un scénario plus lent en terme de nœuds mobiles et plus courts en terme de temps de pause.

La distribution initiale des nœuds mobiles doit être faite d'une manière qui correspond à une répartition plus commune au modèle. Par exemple, en plaçant initialement les nœuds mobiles dans une distribution triangulaire peut distribuer les nœuds du modèle de mobilité RWP avec plus de précision que de les placer initialement de façon aléatoire dans la zone de la simulation.

Nous constatons dans les simulations de Jungkeun Yoon et al. [147] que la vitesse moyenne du nœud mobile diminue au cours du temps et tend vers 0 (au lieu de  $V_{max}/2$ ) avant d'atteindre la vitesse moyenne à l'état stable. Ceci contredit l'hypothèse que, pour le modèle RWP la vitesse moyenne reste la même au cours de la période de simulation. Il est démontré que, si le  $V_{min}$  de la vitesse minimale est réglé à zéro ou à une valeur très faible, ceci dit que la période de décroissance de la vitesse sera significative et, par conséquent, il faut plus de temps pour que le système se stabilise. Une solution simple à ce problème est de définir une valeur non nulle pour  $V_{min}$ . En faisant cela, les nœuds mobiles peuvent converger rapidement à une vitesse moyenne stable.

### 3.5.3. Variantes du modèle de mobilité RWP

Dans le modèle de la mobilité RWP classique, la surface est considérée comme étant convexe (par exemple, une zone rectangulaire ou un disque). Les chemins sont des segments de ligne droite. Il y a deux phases: déplacer et faire une pause. A un instant de transition, la règle de sélection de trajet alterne la phase de mouvement pour faire une pause ou vice versa. Ce modèle est bien connu et nous avons étudié ses propriétés stationnaires.

Cependant, il peut y avoir quelques variations de ces propriétés du modèle RWP. Nous envisageons une famille générique de modèles définis par une plateforme générale [148], y compris RWP et ses variantes.

- **RWP sur le domaine connecté général (General Connected Domain)**

Le RWP sur le domaine connecté général est une variante du modèle RWP classique, où nous relâchons l'hypothèse que la surface A est convexe, mais supposons que A est un domaine connecté sur lequel une distribution uniforme est bien définie. Pour deux points  $m, n$ , dans A, nous appelons  $l(m, n)$  la distance de  $m$  à  $n$  dans A, à savoir la longueur minimale d'un chemin entièrement à l'intérieur de A qui relie  $m$  et  $n$ . H est l'ensemble des chemins les plus courts entre les extrémités.

La règle de sélection de déplacement choisit uniformément destination dans A, et le prochain chemin est le chemin le plus court vers cette destination. S'il y a plusieurs chemins plus courts, l'un d'entre eux est choisi aléatoirement selon une certaine distribution de probabilité sur l'ensemble des chemins les plus courts. L'ensemble des phases est  $I = \{\text{pause, déplacement}\}$ .

La Figure 3.26 montre l'un des exemples de mobilité sous RWP sur le domaine connecté général avec un domaine non-convexe connu sous le nom de *Swiss flag domain* défini par la section transversale représentée sur cette figure. Un déplacement est défini comme le plus court chemin à l'intérieur du domaine d'un *waypoint*  $P_n$  à un autre. Les *Waypoints*  $P_n$  sont placés uniformément dans le domaine. Dans cette figure, le plus court chemin  $(P_n, P_{n+1})$  comporte deux segments avec une pause à K; les chemins les plus courts  $(P_{n-1}, P_n)$  et  $(P_{n-2}, P_{n-1})$  présentent chacun un segment, et  $P(t)$  est la position actuelle.

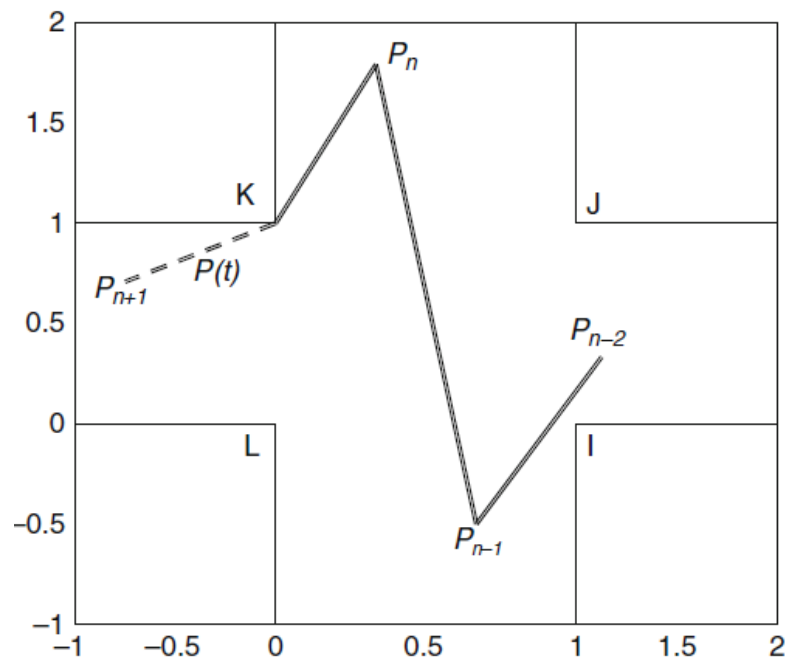


Figure 3.26 : RWP sur un non-convexe « Swiss flag domain » [148]

- **RWP restreint**

Une autre variante du modèle général RWP est le modèle RWP restreint [136] représenté sur la Figure 3.27 où le domaine A est connecté, mais pas nécessairement convexe et peut être utilisé pour les grands réseaux Ad hoc avec des obstacles.

La Figure 3.27 montre un exemple de RWP restreint sur un plan avec quatre carrés sous forme de sous-domaines. Elle montre une vision idéalisée de quatre villes représentées par des carrés. Un nœud mobile se déplace en fonction de RWP dans un carré avec un nombre aléatoire de visites et choisit un point uniformément au hasard dans un autre carré choisi aléatoirement comme destination. La figure montre un chemin exemple du mouvement d'un mobile. La vitesse du déplacement est choisie selon une distribution qui dépend des carrés d'origine et de destination.

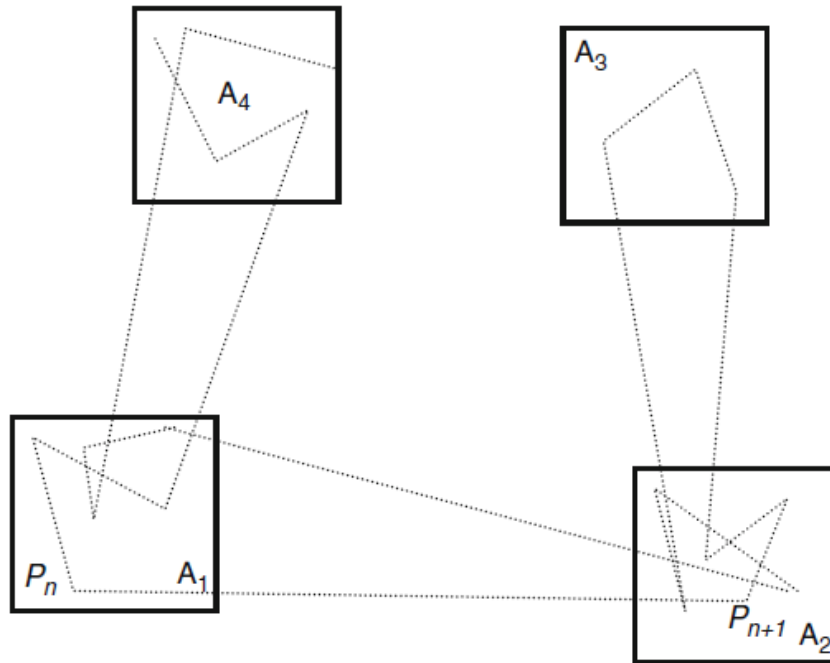


Figure 3.27 : RWP restreint sur un plan de quatre carrés [148]

Il existe  $K$  sous-domaines  $A_k \subset A$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . Le nœud mobile exécute un certain nombre de déplacements avec des destinations dans le même sous-domaine, puis choisit un nouveau point de destination dans un autre sous-domaine  $k'$  et se déplace le long d'un chemin le plus court.  $k'$  est choisi en fonction de la matrice de transition  $Q(K, K')$ , supposée irréductible tel que  $Q(k, k) = 0$ . Il existe une pause entre les trajets.

Plus précisément, une phase est une quadruple  $I = (k, k', r, \phi)$  avec  $[k, k' \in \{1, \dots, K\}]$ , (sous-domaines origine et destination),  $r \in B$  (nombre résiduel de déplacement dans le même sous-domaine, y compris celui-ci), et  $\phi \in \{\text{pause, déplacement}\}$ . Si  $k \neq k'$  alors  $r = 0$  sinon  $r \geq 1$ . La règle de sélection du déplacement est exécutée à la fin d'un voyage comme suit :

Si  $\phi = \text{Déplacement}$ , alors  $\phi$  est redéfini sur pause; une pause est exécutée à l'emplacement actuel, pour une durée choisie d'une distribution qui dépend du sous-domaine courant, et  $k, k', r$  sont les mêmes.

Sinon,  $\phi$  est redéfini sur déplacement, et  $k, k', r$  seront mis à jour comme suit :

Si  $r \geq 1$ ,  $r$  est décrémenté de 1.

Si  $r \geq 2$ ,  $k$  et  $k'$  sont inchangés (ils doivent être égaux).

Si  $r = 1$  (le déplacement précédent était le dernier avec des destinations dans le sous-domaine courant),  $k'$  est redéfini comme un nouveau sous-domaine de destination choisie en fonction de la matrice de transition  $Q(k, k')$ .

Si  $r = 0$  (le déplacement précédent était entre sous-domaines)  $k$  est redéfini sur la valeur de  $k'$ , et une nouvelle valeur de  $r$  est choisie d'une distribution de probabilité qui dépend de  $k'$ . Ensuite, un nouveau point de destination est choisi de manière uniforme dans  $A_k$ . Et le prochain déplacement suit un plus court chemin depuis la position actuelle vers cette destination.

Pour chaque déplacement, la vitesse numérique est sélectionnée en fonction d'une densité qui peut dépendre de l'origine et de destination des sous-domaines du déplacement.

En outre, un exemple particulier du modèle de mobilité RWP restreint est le poisson dans le bol (*Fish in a Bowl*). Ce modèle est un RWP restreint sur le domaine défini par le volume du bol comme le montre la Figure 3.28. Ainsi les waypoints du bol sont également limités. La figure montre uniquement le volume du bol, mais ne montre pas l'ensemble de la sphère. Le volume du bol est considéré comme étant le domaine  $A_1$ , et le volume de la sphère est considéré comme étant le domaine  $A$ .

Ainsi, le domaine  $A_1$  est le sous-ensemble du domaine  $A$ ,  $A_1 \in A$ . On peut aussi dire que les waypoints sont limités à la partie  $A_1$  du domaine  $A$ , où  $A_1$  est l'ensemble des points sur la surface du bol. L'ensemble des phases du modèle de mobilité RWP restreint est  $I = \{\text{pause, déplacement}\}$ .

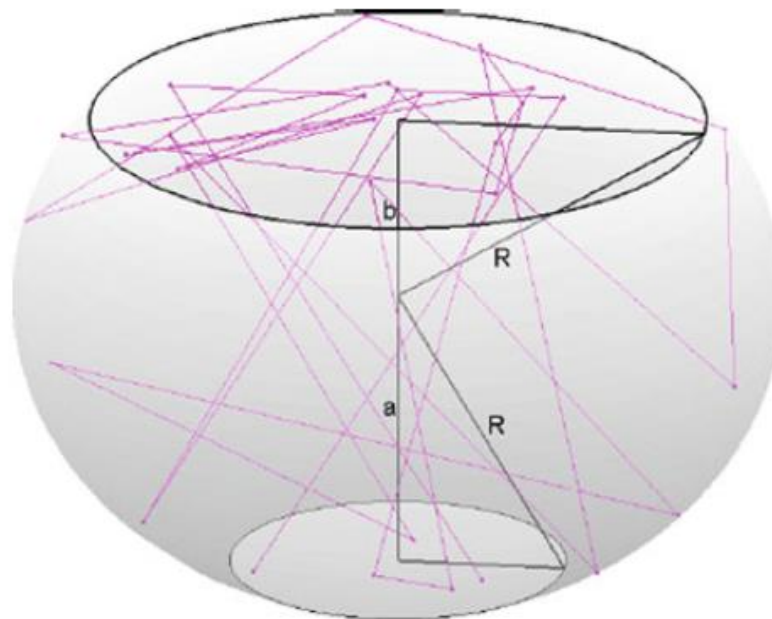


Figure 3.28 : RWP restreint sur une surface *Fish in a Bowl* [148]

### ● RWP sur sphère

En outre, il existe un cas particulier du modèle de mobilité RWP connu sous le RWP sur sphère [148]. La Figure 3.29 montre le RWP sur une sphère où le domaine  $A$  dispose de l'unité de la sphère. Ce modèle représente le modèle simple de circulation d'avion. Ici  $A$  possède une unité de la sphère de  $R^3$ .  $H$  est l'ensemble des chemins les plus courts, plus les pauses.

Le plus court chemin entre les deux points est l'arc la plus courte sur le grand cercle contenant les deux points (Figure 3.29). La règle de transition du déplacement prend un chemin vers la destination uniformément dans la sphère, et le chemin est le plus court chemin vers cette destination (s'il y en a deux, l'un est choisi avec une probabilité de 0,5). Encore une fois, l'ensemble des phases est  $I = \{\text{pause}, \text{déplacement}\}$ .

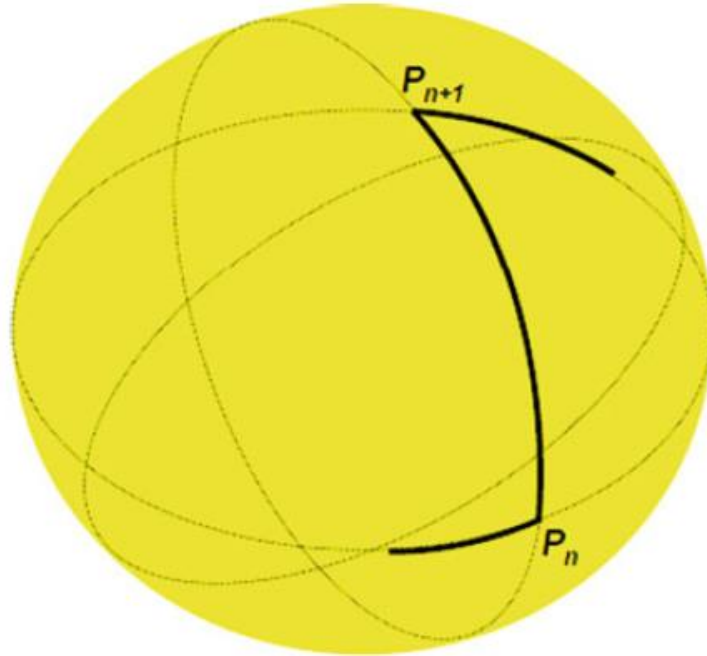


Figure 3.29 : RWP sur sphère [148]

La vitesse numérique est choisie de façon indépendante. Dans un premier temps, un point est choisi de manière uniforme. Ce modèle est en fait un cas particulier du RWP sur un domaine connecté, non convexe. Cependant, il a été mentionné séparément puisqu'il possède de quelques propriétés particulières.

### • RWP pondéré

Le modèle de mobilité waypoint pondéré (WWP) [149] est une variante du modèle RWP où la destination n'est pas purement aléatoire. Par exemple, les piétons sur le campus, les conducteurs dans une ville, et les bataillons dans les champs de bataille peuvent choisir leurs destinations en fonction des endroits habituellement populaires où les gens ont tendance à visiter plus souvent que d'autres, ou d'autres critères qui répondront à leurs besoins.

Les principales différences entre le modèle WWP et le modèle RWP sont les suivantes:

- Un nœud mobile ne choisit plus au hasard sa destination. Avec WWP, nous modélisons un tel comportement en identifiant les endroits populaires dans l'environnement à modéliser et par la suite attribuer des poids différents à ces endroits en fonction de la probabilité de choisir une destination de la zone.
- Le poids attribué pour choisir l'emplacement suivant de destination dépend à la fois de l'emplacement et de l'heure actuelle.
- La distribution du temps de pause est différente à chaque emplacement et est une propriété de cet emplacement.

## ● Récapitulatif

Le modèle de mobilité RWP a été largement utilisé dans l'analyse et la simulation de réseaux mobiles puisque les paramètres de mobilité de ce modèle peuvent représenter de nombreuses caractéristiques que nous pouvons les remarquer dans les schémas de mobilité des nœuds mobiles d'un MANET. Tous les paramètres de mobilité du modèle RWP sont décrits à l'aide d'un modèle analytique et ont un excellent accord avec les résultats de la simulation. De nombreuses limites du modèle de RWP existent et certaines propositions sont décrites pour surmonter ces limitations. En outre, de nombreuses variantes du modèle de RWP ont été proposées dans la littérature tels que RWP restreint, RWP sur sphère, RWP pondéré...

## 4. Implémentation du protocole RWP sous TOSSIM

### 4.1. Avant-Propos

Dans cette section, nous allons détailler les principales étapes pour mettre en œuvre le modèle de mobilité RWP au niveau du simulateur Tossim, et cela en utilisant deux langages de programmation Java et Python, la simulation par la suite est faite sous le simulateur Tossim.

### 4.2. Les grandes étapes de notre implémentation

Dans le simulateur TOSSIM, chaque nœud est représenté par la classe MOTE.java, qui est une extension de la classe SimObject.java. Pour assurer la mobilité des nœuds, nous devons ajouter une nouvelle fonction (appelée **mobilitymodel (X, Y, Z, S)**) dans la classe principale **SimObject.java**. Cette fonction déplace un nœud donné à partir d'une position (X, Y, Z) jusqu'à sa destination (X', Y', Z'), ce mouvement sera basé sur une vitesse prédéterminée S, comme indiqué ci-dessous.

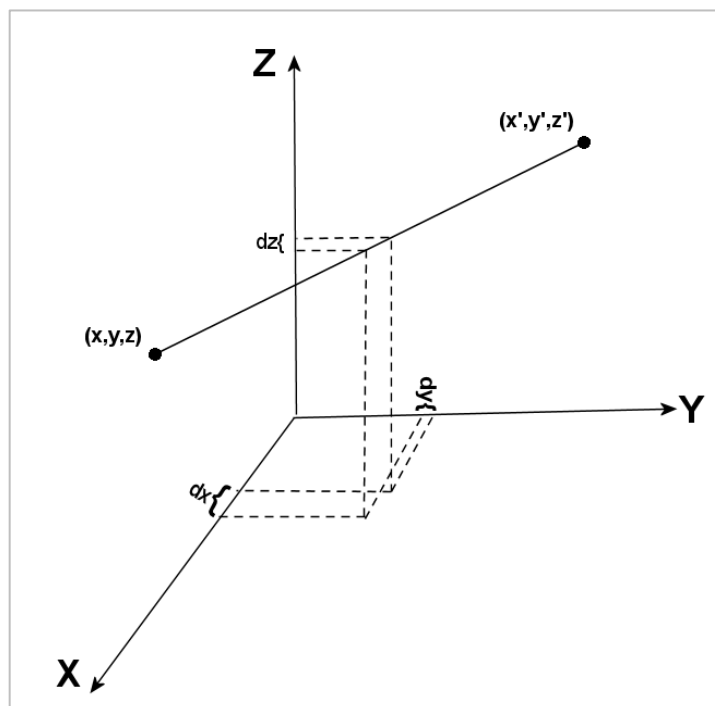


Figure 3.30 : Représentation d'un déplacement de nœud à partir d'une position (x, y, z) vers une destination (x', y', z'),

Cependant, afin d'atteindre la destination  $(x', y', z')$ , le nœud doit parcourir une distance :

$$d_e = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2} \dots\dots\dots (3.11)$$

Cette distance est représentée par un ensemble de sauts, le cardinal de cet ensemble (Nsteps) est calculé par la fonction CalcSteps (de) selon la distance de. Chaque saut doit être effectué dans un temps dt, tel que:

$$S = \frac{d}{t} \Rightarrow t = \frac{d}{s} \Rightarrow dt = \frac{d}{s.Nsteps} \dots\dots\dots (3.12)$$

Par la suite, nous continuons notre travail avec un plan 2D, le troisième axe Z aura pratiquement les mêmes résultats que ceux de X et Y. Pour que le nœud arrive à sa destination, le nœud en question fera un saut étape par étape. Pour sauter une étape, le nœud mettra à jour ses coordonnées actuelles  $(X_t, Y_t)$ , cette mise à jour est la représentation d'une projection d'une étape par les axes x, y comme suit:

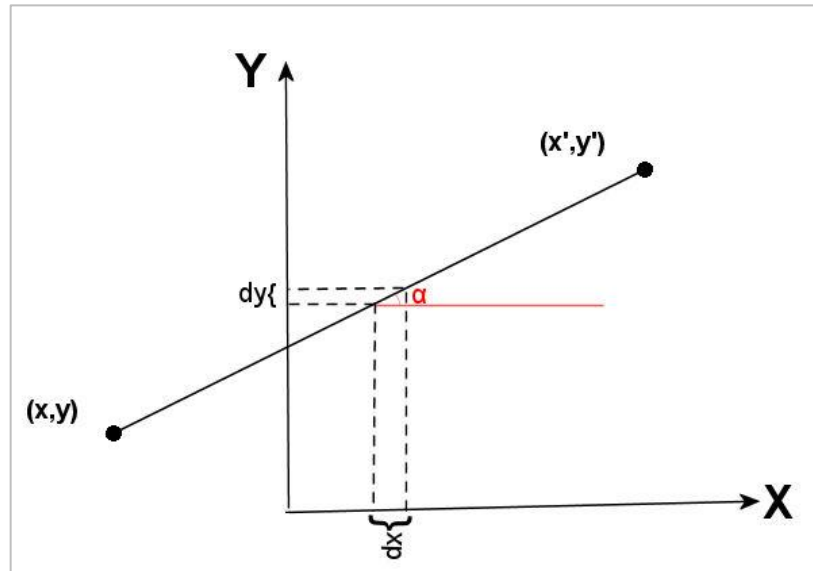


Figure 3.31 : Représentation d'un déplacement de nœud à partir d'une position  $(x, y)$  vers une destination  $(x', y')$  avec un angle  $\alpha$ .

Ci-après une représentation formelle de  $X_t$  et  $Y_t$

$$X_t = X_t + \cos(\alpha)Sdt \dots\dots\dots (3.13)$$

$$Y_t = Y_t + \sin(\alpha)Sdt \dots\dots\dots (3.14)$$

Au début  $X_t, Y_t$  posséderons comme position initiale la position X, Y, respectivement. Lorsque le nœud arrive à sa destination, nous pouvons conclure qu'il avait voyagé (le long de chaque axe) comme suit:

$$X' - X = \sum \cos(\alpha)Sdt \equiv X' = X + \sum \cos(\alpha)Sdt \dots\dots\dots (3.15)$$

$$Y' - Y = \sum \sin(\alpha)Sdt \equiv Y' = Y + \sum \sin(\alpha)Sdt \dots\dots\dots (3.16)$$



Comme le temps de parcours d'un seul saut ( $dt$ ) est vraiment limité (tend vers zéro), les équations mentionnées ci-dessus deviennent comme suit:

$$X' = X + \int_{ts}^{ts+t} \cos(\alpha) S dt \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$Y' = Y + \int_{ts}^{ts+t} \sin(\alpha) S dt \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

Tels que:  $ts$  est le temps de simulation à la position actuelle.

Maintenant, pour mieux optimiser nos fonctions, c'est préférable de calculer les  $\cos(\alpha)$  et  $\sin(\alpha)$  comme suit :

$$\cos(\alpha) = \frac{(X' - X)}{d_e} \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{(Y' - Y)}{d_e} \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

Pour finaliser ce travail, nous avons procédé à la programmation d'une fonction qui permet d'englober toutes ces équations, et pour assurer la mobilité d'un nœud, nous devons faire un simple appel à cette fonction nommée **mobilitymodel(X,Y,S)** avec des paramètres: Coordonnées de la nouvelle position et la vitesse. Ci-après, le code source de la fonction **mobilitymodel(X,Y,S)**.

```
public void mobilitymodel (double x, double y, double s){
    double De = getDistance(x, y); //Calculate the distance between the current and new position
    double NSteps = (CalcNSteps(De)); //Number of hops needed to reach the final destination
    //is calculated by the function CalcNSteps(De)
    double moteX = coord.getX(); //Retrieve the abscissa value of the current position
    double moteY = coord.getY(); //Retrieve the ordinate value of the current position
    double Dt = De / (s* NSteps); //Required time to make one hop
    double CosAlpha = (x-moteX)/De; //Calculate the cosine of Alpha
    double SinAlpha = (y-moteY)/De; //Calculate the sine of Alpha

    while(!Arrived()){ //function that checks the arrival of a node at its destination position
        moteX = CosAlpha*s*Dt;
        moteY = SinAlpha*s*Dt;
        moveSimObjectTo(moteX,moteY); //Make a jump to its new position
        try { Thread.sleep((long)Dt); //Time needed really to make one hop
        }catch (InterruptedException ex)
        { System.out.println ();}
    }
}
```

Figure 3.32 : Code source de la fonction **mobilitymodel(X,Y,S)**

Cette fonction représentée sur la Figure 3.32 peut être utilisée comme base pour définir n'importe quel modèle de mobilité afin de simuler le mouvement des nœuds dans un réseau. Toutefois, pour assurer la mobilité basée sur le modèle RWP, nous avons utilisé une nouvelle méthode (appelée **rwp()**) dans la classe SimObject.java. Cette méthode détermine pour chaque nœud N (sélectionné de façon aléatoire) :

1. Sa nouvelle position ( $X'$ ,  $Y'$ ) incluse dans la zone de simulation,
2. Sa vitesse «S» incluse dans l'intervalle [SpeedLow - SpeedHeight],

3. Son temps de pause 'Time' inclus dans l'intervalle [Pause TimeMin, Pause TimeMAX].

Evidemment, cette méthode appelle la fonction `mobilitymodel(X, Y, S)` avec comme paramètres les deux premiers définis ci-dessus (à savoir la position (X', Y') et S). Une fois à la position désirée, le nœud N marquera un temps de pause 'Time'.

Le processus sera répété pour chaque cycle jusqu'à la fin de la simulation.

Ci-après, le code source de la méthode `rwp()`.

```
public void rwp() {
    while(!Stop()){ //function that returns the simulation state, run or stop
        double x = Math.random()*getWidth(); //Randomly select x where x < width of the area
        double y = Math.random()*getLength(); //Randomly select y where y < length of the area
        double Speed = (double) (Math.random()*(getSpeedMax()-getSpeedMin()+getSpeedMin()));
        //getSpeedMax() and getSpeedMin() are functions that allows us to retrieve
        //the speedMax and speedMin value, either from the class MobilityPlugin or from Python script.
        double PauseTime = (double) (getPauseTimeMin()+Math.random()*(getPauseTimeMax()-getPauseTimeMin()));
        //getPauseTimeMax() and getPauseTimeMin() are functions that allows us to retrieve
        //the PauseTimeMax and PauseTimeMin value, either from the class MobilityPlugin or from Python script.
        mobilitymodel(x,y,Speed); //call method mobilitymodel
        try {
            Thread.sleep((long)PauseTime); //Time required for a node to make a break
        }
        catch (InterruptedException ex)
            { System.out.println ();}
    }
}
```

Figure 3.33 : Code source de la méthode `rwp()`

Dans le but de faciliter le processus d'exécution des codes cotés dans la Figure 3.32 et la Figure 3.33, et afin de suivre visuellement le mouvement des nœuds constituant le réseau au niveau de la zone de simulation, aussi pour déterminer les paramètres appropriés et choisir le modèle de mobilité appropriée, nous avons mis en œuvre dans TinyViz une nouvelle interface (nouveau plugin) appelé «Mobilité».

La Figure 3.34 présente une simplification du déroulement de RWP avec nos fonctions citées ci-dessus.

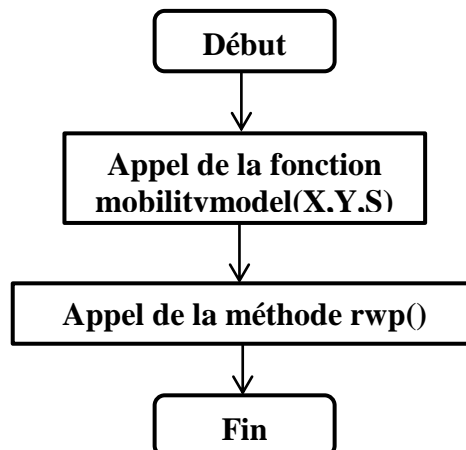


Figure 3.34 : Algorithme de fonctionnement du RWP avec les fonctions `mobilitymodel()` et `rwp()`

### 4.3. Le déroulement de l'exécution

Pour exécuter la simulation, nous pouvons choisir entre une exécution silencieuse avec un simple script python, ou en utilisant notre plugin 'Mobilité' dans TinyViz.

### 4.3.1. Avec Python

Dans ce type d'exécution, nous ne verrons aucune représentation visuelle de nœuds dans le réseau. Nous avons créé un script `mobility.py` où nous avons appelé la méthode `rwp()` pour chaque nœud avec classe `node`. Nous avons créé cette méthode dans le package `sim.script.reflect.*`.

### 4.3.2. Avec TinyVis

Pour créer un nouveau plugin, il doit être une sous-classe de `net.tinyos.sim.Plugin`. Dans un premier temps, nous avons ajouté une sous-classe `MobilityPlugin.java`. Cette sous-classe affiche une interface permettant à l'utilisateur de choisir le modèle de mobilité parmi d'autres, puis d'entrer les paramètres du modèle sélectionné (dans notre étude, nous nous sommes intéressés seulement par le modèle de RWP):

- 4 TextField représentant respectivement: **SpeedLow**, **SpeedHeight**, **PauseTimeMin**, **PauseTimeMax**.
- 2 Boutons: **Start**, qui permet de lancer la simulation, et **Stop** qui arrêtera la simulation.

Pour démarrer la simulation avec le bouton **Start**, cela lancera le modèle de RWP pour chaque nœud dans la zone de simulation.

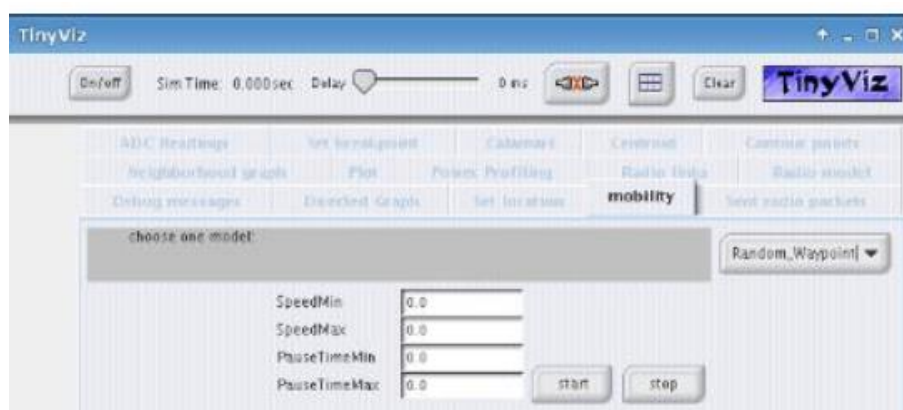


Figure 3.35 : L'interface du plugin de mobilité

## 4.4. Simulation

Il existe des mesures de mobilité qui peuvent être utilisées pour observer la mobilité des nœuds. La vitesse relative, la vitesse maximale, l'accélération et le temps de pause sont quelques exemples. Ces métriques peuvent être observées pour différents modèles de mobilité et peuvent conclure des conséquences liés aux caractéristiques de mobilité de ces modèles. En faisant varier ces caractéristiques, nous pouvons conclure combien ces métriques sont importantes pour le fonctionnement du protocole.

Pour notre étude, nous utilisons les métriques suivantes comme métrique d'évaluation afin de tester les performances de notre modèle de mobilité proposé (R-RWP proposé dans le chapitre suivant) par rapport au modèle de mobilité (RWP) :

#### 4.4.1. Taux de livraison de paquets (Packet Delivery Ratio (PDR))

Le PDR compte le nombre de paquets émis par la source et le nombre de paquets reçus par le récepteur. Pendant la communication, les nœuds se déplacent de leurs positions en continu avec une vitesse différente. Nous pouvons comparer le taux de paquets envoyés par l'émetteur et reçus par le récepteur pour évaluer l'effet de la mobilité sur les performances du réseau.

#### 4.4.2. Moyenne du délai de bout en bout

Le délai de parcours d'un paquet est le temps nécessaire pour qu'un paquet fait son parcours à partir du nœud de source vers un nœud de destination. Dans un MANET, les paquets passeront par plusieurs nœuds intermédiaires. Ainsi :

- Le délai pour parcourir un chemin d'accès est la somme de tous les liens le long de ce chemin.
- Lien est instable au moment de la mobilité des nœuds.
- Certains liens le long du trajet peuvent avoir un grand délai par rapport aux autres.
- La valeur moyenne donne la valeur qui pourrait être comparée à d'autres résultats.
- La moyenne de délai de paquets augmente avec la mobilité dans un MANET.

**Remarque :** Les résultats de simulation seront présentés et discutés dans le chapitre suivant, ceci pour faire les comparaisons nécessaires avec notre approche proposée par la suite.

## 5. Conclusion

Ce chapitre présente principalement une analyse de certaines propriétés stochastiques du modèle *Random waypoint*. Après avoir donné une description détaillée de la notion du hasard et de la connectivité dans un environnement mobile, nous avons étudié par la suite le modèle RWP dans le but de mieux comprendre son mécanisme de fonctionnement, nous avons aussi présenté quelques limites de ce modèle ainsi qu'une proposition de quelques remèdes trouvés dans la littérature. Des propriétés stochastiques ainsi que des variantes du RWP ont été présentés pour conclure que le modèle RWP malgré son ancienneté restera toujours réutilisable par la communauté des chercheurs. A la fin, une proposition d'une implémentation du RWP dans un simulateur dédié aux réseaux de capteurs sans fils a fait l'objet comme dernière partie de ce chapitre. Dans le chapitre qui suit, nous allons introduire nos prochaines contributions, qui consiste tout d'abord en une implémentation d'une nouvelle variante du modèle RWP (à savoir le R-RWP) afin d'optimiser le routage dans les réseaux sans fil. Ainsi qu'une nouvelle approche basée mobilité pour optimiser la durée de vie du réseau.

Notre contribution est acceptée au sein de la conférence internationale :

"Second International Conference on Internet of Things Data, and Cloud Computing"

Et nous avons reçu l'acceptation le mois d'Aout 2016. Notre papier est intitulé comme suit :

"Implementation of RWP Mobility Model in WSNs under TOSSIM simulator".

## **Chapitre 4**

---

---

# **Effet de la collaboration des nœuds mobiles sur le routage dans les RCSF**

## 1. Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil présentent une plate-forme distribuée en interaction avec le monde physique dont le domaine d'application s'étale de la surveillance environnementale à la détection d'intrusion. Le déploiement géographique est un point clé dans la conception de tels systèmes car il détermine à la fois la connectivité et la couverture du réseau. Ces deux caractéristiques reflètent la qualité du réseau dans le sens où ils décrivent la capacité de faire circuler l'information, et d'autre part sa capacité d'interagir avec le monde extérieur. Le problème de déploiement optimal (par exemple en utilisant le nombre minimum de capteurs) assurant une couverture totale d'une zone donnée, tout en assurant la connectivité du réseau a été largement étudiée [150], ce qui entraîne des configurations sur la base de modèles géométriques simples. Toutefois, une telle solution nécessite une phase préliminaire de calcul et ne précise pas comment établir un chemin entre deux entités de réseau.

Les progrès de la robotique a permis la conception de réseaux de capteurs sans fil intégrés d'unités mobiles dont le mouvement est contrôlé par l'application qui est exécutée par ces mobiles. Comme pour la localisation, le problème du routage se pose également pour les réseaux de capteurs mobiles. La mobilité des capteurs induit une connaissance limitée de l'environnement réseau et influe de ce fait sur les algorithmes de routage. Par exemple, le maintien d'une table de routage ne peut pas être envisagé.

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans un premier volet des travaux qui se sont intéressés à étudier le mécanisme de routage dans un environnement mobile, nous allons commencer par une exposition des travaux tenant compte de la mobilité des nœuds capteurs, puis nous allons nous focaliser sur les travaux tenant compte des modèles de mobilités. Par la suite, nous aborderons notre contribution qui consiste à présenter une nouvelle stratégie de routage basée sur un modèle de mobilité, des résultats de simulation vont être détaillés pour prouver l'efficacité de notre approche.

En deuxième volet de ce chapitre, nous allons mettre le point sur notre prochaine contribution dont laquelle nous allons proposer une nouvelle approche basée relais afin d'optimiser l'énergie globale du réseau en question.

## 2. Proposition et Implémentation d'une nouvelle approche de routage (R-RWP) basée sur le modèle RWP sous TOSSIM

La technique de routage dans les réseaux de capteurs mobiles qui est proposé dans la suite de ce chapitre permet de mettre en évidence le fonctionnement du routage dans le réseau indépendamment des positions des nœuds. En effet, c'est une solution basée sur un modèle de mobilité (vu dans le chapitre passé), la mobilité des nœuds capteurs est un facteur très influent sur ce type de réseaux. Nous essayons par la suite d'exploiter les avantages de cette mobilité.

### 2.1. Travaux antérieures

Dans la littérature, il existe deux catégories regroupant les méthodes dédiés au routage dans les réseaux mobiles. La première concerne les méthodes où les capteurs basent leurs arguments sur les positions de leurs voisins à un ou deux sauts. La seconde est composée de méthodes qui définissent une

région géographique et diffusent à l'intérieur de cette région un message pour atteindre la destination. Ces deux catégories se nomment respectivement routage basé voisinage et routage basé région.

Pour le routage basé voisinage, les méthodes dans cette catégorie sont dans la plupart des cas des adaptations des méthodes de routage pour les réseaux statiques. Ils supposent que le déplacement de capteur maintient la même distribution dans la zone de déploiement que celle présente dans le cas où le réseau est statique.

Ainsi, tous les procédés décrits dans la littérature pour les réseaux statiques peuvent être adaptés au contexte de la mobilité. L'inconvénient majeur de ces techniques de routage est que les capteurs doivent toujours demander les positions de leurs voisins à un ou deux sauts pour envoyer un message. Concrètement, lorsqu'un capteur a besoin d'envoyer un message à une destination, il envoie un premier message pour demander les positions de ses voisins (l'opération est répétée par chacun des voisins, lorsque la connaissance des positions des voisins à deux sauts est nécessaire). Après la réponse des voisins, le capteur sélectionne le nœud relais suivant et lui fait suivre le message. Cependant il est préférable, compte tenu de la mobilité des capteurs d'éviter de tels échanges de messages.

Néanmoins, pour la catégorie de routage basé région, les capteurs ont besoin de savoir seulement leur propre position et la position de la destination. Lorsqu'un nœud source veut envoyer un message à une destination, il définit une zone géographique contenant sa position et celle de la destination et envoie le message à travers cette région pour atteindre la destination.

Les méthodes proposées dans [151] [152] [153] [154] sont des exemples de cette stratégie. Les zones géographiques peuvent prendre différentes formes: par exemple, dans [152] la région utilisée est un rectangle, alors que dans [154] présente le cas d'une ellipse.

Une fois que la région est défini, la source envoie son message et lorsqu'un capteur le reçoit, il teste en fonction de sa position s'il appartient à la région et, le cas échéant, transmet le message. Pour consommer le moins d'énergie possible, il est pour ces méthodes de définir la plus petite zone possible ou de sélectionner un sous-ensemble de nœuds relais dans la région. Ceci est le travail des auteurs dans [153] [154].

Il convient de noter encore une fois que toutes ces méthodes supposent que les capteurs connaissent leurs positions et, si nécessaire, les positions de leurs voisins avec précision.

### **2.1.1. Travaux tenant compte de la mobilité des nœuds**

Les chemins multi-sauts sont traversés par les paquets en provenance des nœuds capteurs pour atteindre le puits [5]. Les nœuds les plus proches du puits sont accablés par plusieurs paquets à être relayés menant à l'épuisement rapide de leur énergie dans le RCSF statique. Le réglage des paramètres du protocole tels qu'initier de nouvelles routes le long de la topologie existante ne peut pas permettre au réseau de satisfaire le nouveau trafic [155]. La mobilité a été trouvé bénéfique pour reconstituer les ressources énergétiques et aussi pour réaffecter les ressources [156].

Les nœuds mobiles peuvent changer leur emplacement s'ils détectent que l'énergie du nœud voisin est épuisée. Cela permet d'éviter les erreurs de liens et la contention d'overhead durant le routage. Avec l'utilisation de nœuds capteurs mobiles, nous pouvons réaliser la livraison de données par le plus court chemin saut par saut [8]. Cela permet de réduire la probabilité d'erreur qui augmente avec l'augmentation du nombre de sauts qu'un paquet de données doit franchir. Le véritable défi de routage de réseau dans RCSF est due au fait que ce n'est pas facile de connaître toute la topologie du réseau qui ne cesse de changer dynamiquement.



## 2.1.2. Routage avec puits mobile

En raison de la mobilité du puits, l'ensemble de capteurs situés à sa proximité change avec le temps. Cela ne sollicite pas les nœuds capteurs qui sont plus proches du puits, ce qui équilibre la consommation d'énergie et de prolonger la durée de vie du réseau. Quand les puits sont en mouvement, généralement ils surveillent le processus de routage avec les sources. Si les puits sont passés après qu'ils ont demandé des données, ils ne pourront pas résoudre les problèmes de routage eux-mêmes. Dans ces cas, les données doivent être transmises par l'intermédiaire des nœuds capteurs relais ou d'autres nœuds puits voisins [35].

Le puits peut suivre trois types de schémas de mobilité dans les RCMSF [157].

### 2.1.2.1. Mobilité aléatoire

Dans ce cas, le puits suit un chemin aléatoire dans le champ de capture et met en œuvre une stratégie de collecte des données à partir des nœuds capteurs. Les données peuvent être demandées à n'importe quel voisin à un saut ou k saut du puits [157].

Avec le routage élastique '*Elastic routing*', [12] suppose que tous les capteurs sont statique, sauf les puits qui peuvent se déplacer librement dans le réseau. Chaque nœud obtient ses informations de localisation via GPS ou d'autres services de localisation. Le puits mobile envoie des messages pour annoncer son emplacement actuel vers les nœuds capteurs voisins.

Chaque nœud recherche sur sa liste de voisins le puits avant de transmettre le paquet de données. Le paquet est envoyé directement au puits sans autre calcul si le puits est disponible dans la liste de voisinage. Durant le mouvement, le puits vérifie s'il s'est déplacé hors portée du dernier nœud de transmission. Dans ce cas, il informe son emplacement actuel au dernier saut de transmission par unicast. Les autres nœuds surprennent cette transmission et changent l'information de localisation du puits vers son nouvel emplacement.

Andrea et al. [25] ont considéré un scénario pour un réseau de capteurs, où un ensemble de nœuds statiques  $\{S_i\}$  ayant des positions géographiques connues, un puits mobile qui se déplace avec le temps variant la vitesse  $v(t)$  le long d'une trajectoire inconnue  $r(t)$  à travers le champ de capture et une source  $S$  qui se trouve à une position connue sont déployés. L'algorithme '*Mobility Prediction Routing*' est utilisé ici. Le puits mobile transmet un message 'UPDATE ETAT' contenant l'estimation actuelle de sa position sur la base du standard 802.11 avec le mécanisme CSMA établi sur '*Binary Exponential Backoff*' (BEB).

Dans le '*Grid Based Energy Efficient Routing*' [36], les puits mobiles ont une trajectoire aléatoire. Le nœud capteur génère des données en fonction d'un événement et l'envoie au clusterhead. Le clusterhead envoie le paquet d'annonce de données à d'autres clusterhead. Lorsque le puits mobile qui se déplace de manière aléatoire aura besoin des données, il envoie une requête de données vers le clusterhead le plus proche par l'intermédiaire d'inondation locale. Le paquet de requête de données est ensuite transmis au clusterhead de la source qui transmet alors les données vers le puits.

### 2.1.2.2. Mobilité avec chemin prévisible/fixe

La trajectoire de la mobilité du puits est un chemin fixe connue. Le protocole de routage 'CAEE' [157] utilise la mobilité discrète du puits le long d'un trajet fixe dans le réseau de capteurs. Le nœud collecteur de données (DC) recueille les données provenant des capteurs et les stockent dans un mini-puits. Le puits mobile visite périodiquement les mini-puits et collecte les données à partir du nœud DC. La trajectoire de mobilité du puits est le long de la périphérie des nœuds capteurs.

Jun Luo et Jean-Pierre Hubaux [86] ont décrit un système qui est basé sur la mobilité discrète du puits où le temps de pause du puits est plus grand que son temps de mobilité dans le champ de capture. Ils ont montré que la plus longue durée de vie pour le réseau de capteurs peut être atteinte que si la trajectoire mobile du puits est le long de la périphérie du champ de capture.

Branislav Kusy et al. [158] ont utilisé un nœud capteur plus près du puits mobile comme étant un nœud relais. Le nœud relais agit en tant que puits de données pour tout le trafic vers le puits mobile. Les chemins sont configurés en utilisant le gradient de potentiel d'information. Le graphique de la mobilité est extrait à partir de la force du signal des traces d'utilisateurs dans l'environnement. Les futurs nœuds relais sont prédits à l'aide du graphique de mobilité.

### 2.1.2.3. Mobilité contrôlée du puits

Le principal défi de la mobilité contrôlée est de concevoir des protocoles pour les réseaux de capteurs qui peuvent exploiter efficacement les composants mobiles et résoudre les problèmes de navigation pour les éléments mobiles [155].

Stefano Basagni et al. dans [159] ont défini un modèle analytique appelé '*Mixed Integer Programming linéaire*' (PPIM) dont la solution détermine les chemins vers le puits qui maximisent la durée de vie du réseau. L'heuristique '*Greedy Maximum Residual Energy*' (GMRE) est utilisé pour déplacer le puits vers un nouvel emplacement avec la plus grande énergie résiduelle. Le puits sélectionne avidement une zone composée de nœuds qui ont l'énergie restante maximale. Après avoir passé un temps  $T$  minutes sur une zone, le puits détermine s'il pourra se déplacer vers une zone adjacente.

Dans l'algorithme '*Reactive Sink Mobility*' [160], les puits se déplacent de façon opportuniste en fonction d'une forme de feedback depuis le réseau. Le puits est autorisé à se déplacer dans un espace de l'ordre d'une longueur d'onde carrée. Un protocole de routage réactif à base de gradient en même temps qu'un processus de découverte de connectivité est mis en œuvre. La preuve expérimentale démontre que la mobilité limitée du puits augmente la tolérance par défaut d'un réseau de capteur et améliore les propriétés d'équilibrage de charges existantes. Il augmente l'équilibrage de charge en utilisant le feedback de fiabilité.

### 2.1.3. Mobilité totale

La variante du protocole de routage géométrique appelé M-Geocast [13] considère le cas d'un réseau de capteurs entièrement mobile où un nœud peut se déplacer à tout moment. Il désigne l'un des puits comme étant un puits maître qui agit comme un prestataire de services de localisation, collecteur de données et comme serveur de diffusion. Il utilise un simple transfert géographique pour envoyer les messages vers le puits maître. Il est pragmatique, à partir des résultats de simulation que le retard de M-Geocast reste stable même lorsque la vitesse du nœud augmente en raison du fait qu'aucun overhead n'est encouru en raison de la mobilité tant que l'information de localisation de la destination reste valable. M-Geocast délivre plus de 96% de tous les événements pour la plupart des cas. Le trou de routage qui se produit dans la plupart des schémas de routage géométrique est réduit dans ce protocole.

Tai-Jung Chang et al. [41] ont proposé un algorithme de calcul d'itinéraire où l'ensemble des nœuds sont mobiles. Un nœud arrivant à un nouvel emplacement envoie une demande d'information d'ancrage à ses nœuds voisins. Si un nœud voisin possède les valeurs RVB de l'ancre, il transmet l'information vers le nouveau nœud. Le nouveau nœud calcule et sélectionne la plus petite valeur  $D_{ik}$  pour le  $K^{\text{ième}}$  ancre. Puis il met à jour ses valeurs RVB et les transmet au serveur. La position du nœud  $i$

sera alors mise à jour dans la base de données de localisation. Cet algorithme permet d'éviter le problème de trous dans la topologie. Il choisit efficacement un meilleur chemin de routage.

Le protocole de routage '*Robust Cooperative*' [29] présente un scénario où l'ensemble des nœuds sont mobiles. Il fournit une protection robuste contre la mobilité des nœuds. Un nœud aura une idée sur les informations de chemin d'accès partiel en écoutant la transmission en cours. S'il entend la transmission correctement à partir de deux nœuds qui appartiennent au même flux, indiqués par source et destination, il devient le nœud de protection. Grâce au routage coopératif, un nouveau chemin d'accès est mis en place avec un petit overhead où de nombreux nœuds s'éloignent. Ce protocole choisit le meilleur chemin d'accès en utilisant une diversité de chemins pour en avoir un chemin solide.

#### **2.1.4. Mobilité d'un ensemble de nœuds agissant comme des nœuds relais**

Kansal A. et al. [155] ont proposé un protocole où un micro-serveur mobile qui agit comme nœud relais, se déplace à travers le réseau pour acheminer les données à partir des nœuds capteurs statiques vers le puits. Initialement, le micro-serveur transmet les requêtes au nom du puits. Il diffuse les requêtes quand il se déplace. Chaque nœud au sein de sa portée, trouve la distance la plus courte vers le micro-serveur à partir des différentes requêtes qu'il a reçues. Les nœuds répondent à la requête qui est arrivée via le plus court chemin. Cela contribue à assurer la viabilité du réseau en réduisant l'overhead.

Shah R. C. et al. [67] (Figure 4.36) analysent trois niveaux de l'architecture d'un réseau de capteurs comprenant un niveau supérieur de dispositifs connectés WAN, un niveau intermédiaire d'agents mobiles de transport appelé MULES et un niveau inférieur constitué de nœuds capteurs sans fil fixes. Le niveau supérieur est le point d'accès. Le mouvement de la MULE est aléatoire. Les MULES chargent les données à partir des nœuds capteurs et les transportent vers le point d'accès. Ils possèdent de grandes capacités de stockage, une énergie renouvelable et ils ont la possibilité de communiquer avec les capteurs, les autres MULES et les points d'accès. Les nœuds capteurs statiques communiquent par radio à courte portée. Les principaux avantages de l'architecture à base de MULE sont la robustesse et l'évolutivité. Ils augmentent la fiabilité en agissant comme point d'accès redondant et créant ainsi un design à tolérance de panne.

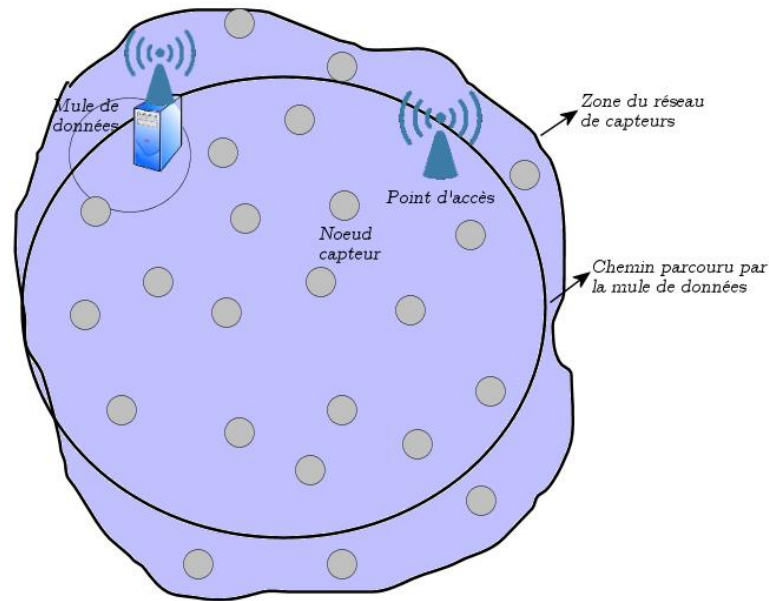


Figure 4.36 : Réseau de capteurs sans fil avec relais mobiles.

### 2.1.5. Immobilité d'un ensemble de nœuds agissant comme plateforme de routage

Luca Borsani et al. [161] ont proposé le protocole mobile HAT où les nœuds sont divisés en deux catégories à savoir fixes et mobiles. Les nœuds fixes forment l'arbre de routage et les nœuds mobiles sont les feuilles de cet arbre. Ce protocole limite l'impact de l'overhead de signalisation nécessaires pour supporter la procédure 'handover' ainsi réduire la consommation d'énergie engendré par la mobilité du réseau. Il permet également de réduire le taux d'erreur.

Zhi-feng Duan et al. [162] utilisent les nœuds S avec stockage limitée et une mobilité aléatoire pour recueillir des données. Les nœuds F sont fixes et ils reçoivent et fusionnent les données à partir des nœuds S et les envoient aux nœuds C qui sont de grandes bases de données pour RCMSF multicouche.

### 2.1.6. Constatation

| Projet                   | Nœud mobile    | Mobilité    | Mouvement du puits       | Localisation                              | Vitesse du nœud mobile | Densité du réseau | Routage  |
|--------------------------|----------------|-------------|--------------------------|---|------------------------|-------------------|--|
| F. Yu [12]               | Puits          | Aléatoire   | Chemin aléatoire         | GPS                                       | Variable               | Elevée            | Elastique                                      |
| Andrea Munari [25]       | Puits          | Aléatoire   | Chemin aléatoire         | Algorithme de prédiction de mobilité      | Adaptative             | Moyenne           | Prédiction de la mobilité                      |
| Kisuk Kweon [36]         | Puits          | Aléatoire   | Chemin aléatoire         | -   | Variable               | Faible            | Basé grille                                    |
| Majid I [157]            | Puits          | Prédictible | Chemin sur la périphérie | Mini-puits                                | Constante              | Elevée            | Évitement des collisions et économie d'énergie |
| Branislav Kusi [158]     | Puits          | Prédictible | Chemin prédictible       | Graphe de mobilité                        | Constante              | Moyenne           | Basé sur l'information potentielle             |
| Stefano Basagni [159]    | Puits          | Contrôlée   | Chemin prédictible       | Approche 'Greedy Maximum Residual energy' | Constante              | Moyenne           | Chemin le plus court                           |
| Daniele Puccinelli [160] | Puits          | Contrôlée   | Chemin prédictible       | Processus de découverte de connectivité   | Adaptative             | Faible            | Basé gradient                                  |
| Leila Ben Saad [163]     | Puits          | Contrôlée   | Chemin prédictible       | approche pondérée                         | Variable               | Moyenne           | Routage IPV6                                   |
| Lynn Choi [13]           | Tous les nœuds | Aléatoire   | Chemin aléatoire         | Puits maître                              | Variable               | Faible            | Routage géométrique                            |
| Xiaoxia Huang [29]       | Tous les nœuds | Aléatoire   | Chemin aléatoire         | Fonctionnalité d'écoute                   | Variable               | Faible            | Coopératif                                     |
| Aman Kansal [155]        | Nœud relais    | Aléatoire   | -                        | Interrogation                             | Contrôlée              | Faible            | Chemin le plus court                           |
| R.C. Shah [67]           | Nœud relais    | Aléatoire   | -                        | -   | Variable               | Faible            | MULE   |
| Zhi Feng Duan [162]      | Nœud capteur   | Aléatoire   | Chemin fixe              | Nœud de fusion                            | Variable               | Moyenne           | Chemin le plus court                           |
| Lucca Borsani [161]      | Nœud capteur   | Aléatoire   | -                        | Technique 'Handover'                      | Constante              | Moyenne           | Basé arbre                                     |

Table 4.10 : Comparaison des protocoles de routage basée sur la mobilité

### 2.1.7. Travaux tenant compte des modèles de mobilité

Dans [164], Echoukairi et al. proposent une nouvelle version améliorée du protocole LEACH-C basée sur l'approche de clustering. Leur contribution principale consiste en l'évaluation de la performance d'intégration d'un algorithme non supervisé qui est inspiré de la méthode K-means sous divers modèles de mobilité avec variation de la densité des nœuds mobiles afin de produire un nouveau cluster et de trouver les clusters optimaux. Trois modèles de mobilité (*Random Waypoint Mobility Model*, *Manhattan Mobility Model* et *Gauss Markov Mobility Model*) ont été utilisés pour l'analyse des performances en termes de taux de livraison des paquets, de débit moyen, de charge de routage normalisée, de délai moyen de bout en bout et de consommation énergétique des nœuds. Les résultats de la simulation vérifient que la nouvelle approche appelée LEACH-CKMEANS pour les modèles de mobilité *Random Waypoint* et *Gauss Markov* sous différentes densités donne de meilleurs résultats que le protocole LEACH-C en termes de consommation d'énergie et de paramètres de performance.

Dans [141], Jean-Daniel Madjo et al. présentent une évaluation précise de l'impact des modèles de mobilité sur les performances des protocoles de routage. Cette évaluation nécessite de tester de multiples modèles de mobilité avec différents protocoles de routage. Autrement, les observations faites et les conclusions tirées des études de simulation peuvent être trompeuses.

Pour cette raison, les auteurs envisagent cinq modèles de mobilité aléatoire d'entité distincts: le *Random Waypoint* (RWP), *Random Direction* (RD), *Smooth-Turn* (ST), *Gauss-Markov* (GM) et *Enhanced Gauss-Markov* (EGM). Le RWP est largement utilisé dans les simulations de MANET en raison de sa simplicité et sa disponibilité dans quelques simulateurs réseaux.

Dans cette étude, les auteurs présentent un tableau (Table 4.11) résumant le PDR (Packet Delivery Ratio) des protocoles par rapport aux différents modèles de mobilité.

| Protocol | RWP  | EGM  | ST   | GM   | RD |
|----------|------|------|------|------|----|
| Flooding | 99.2 | 98.2 | 96.8 | 98.2 | 96 |
| RGP      | 92   | 90   | 88   | 86   | 83 |
| AODV     | 78   | 74   | 72   | 75   | 73 |
| OLSR     | 76   | 69   | 65   | 68   | 61 |

**Table 4.11 : Classement des protocoles de routage PDR (%) par rapport aux différents modèles de mobilité [141]**

Dans notre étude, nous allons considérer ces résultats pour faire le choix du protocole de routage ainsi que le modèle de mobilité utilisés conjointement dans notre approche.

Nous pouvons en déduire que, dans le cas d'un environnement mobile, le *Flooding* présente le protocole de routage le plus intéressant dans de tels cas. En outre, et en liaison avec l'inondation, le modèle de mobilité qui semble intéressant est le RWP, d'où notre choix dans notre contribution.

## 2.2. Algorithme de la solution proposée

Nous proposons dans ce travail une nouvelle façon d'acheminer les informations collectées à partir des nœuds capteurs mobiles, sans nécessairement avoir à utiliser ou modifier un protocole de routage robuste pour une telle opération. Le principe de notre méthode est basé sur un modèle de mobilité.

En effet, les nœuds capteurs mobiles doivent suivre un modèle de mobilité pour se déplacer dans l'environnement. Notre méthode est une optimisation du modèle RWP pour générer un nouveau: R-RWP (Routage - WayPoint aléatoire) capable d'acheminer les données collectées dans un environnement mobile.

L'algorithme de notre modèle R-RWP est le suivant:

Les nœuds capteurs se déplacent librement dans l'environnement (selon le modèle RWP).

Pendant son temps de pause, chaque nœud Y qui possède des informations pour les transmettre à la station de base SB (% élevé de données dans la mémoire du nœud), met à jour sa table de voisinage à un saut ( $V_y$ ) et vérifie ce qui suit:

Si  $SB \in V_y$

$TP_y = \infty$  (Le nœud Y est stabilisé pour assurer la communication avec la SB)

Si Mémoire de Y est non-vide

$Y \xrightarrow{DONNEES_y} SB$  (Y envoie ses données à la SB et libère sa mémoire)

Pour chaque  $X_i$  ( $X_i \neq SB$  &  $TP_{X_i} \neq \infty$ ) voisin direct de Y:

$Y \xrightarrow{Hello_{SB}} X_i$  (Y informe ses voisins qu'il possède un lien direct avec la SB)

Si  $X_i$  est intéressé par la SB (La mémoire de  $X_i$  est non-vide):

$X_i \xrightarrow{Hello} Y \parallel TP_{X_i} = \infty$

$Y \xrightarrow{RREQ} X_i$

$X_i \xrightarrow{DONNEES_x} Y \xrightarrow{DONNEES_x} BS$

$TP_{X_i} = 0$

$TP_y = 0$

## 2.3. Métrique d'évaluation

### 2.3.1. Métriques basées modèle de mobilité

Dans [165] [146], les auteurs ont donné une description détaillée des métriques utilisées pour comparer les modèles de mobilité. Nous nous sommes basé sur cette étude pour extraire les paramètres qui nous intéressent dans la comparaison du modèle RWP avec notre R-RWP optimisé.

### 2.3.1.1. Nombre moyen de Voisins

Avec cette métrique, nous pouvons obtenir une idée claire sur le nombre moyen de voisins d'un nœud donné dans un intervalle de temps.

### 2.3.1.2. Coefficient Moyenne de Clustering

A l'origine, c'est une métrique pour la découverte de redondance dans le réseau, si le coefficient est élevé ce qui indique qu'il existe plusieurs liens radio entre les voisins. Par conséquent, le nœud est considéré comme redondant s'il transmet des informations sur des chemins différents.

Ce coefficient est calculé pour chaque nœud, en déterminant le nombre de liaisons existant dans le voisinage d'un nœud, divisé par le nombre total de voisins dans un délai déterminé.

## 2.3.2. Métriques basées protocoles de routage

### 2.3.2.1. Packet Delivery Ratio (PDR)

Le PDR est le rapport entre les paquets reçus avec succès et le nombre total de paquets envoyés.

### 2.3.2.2. Latence

Le temps de latence est le délai moyen sur l'ensemble des paquets de données qui transitent à partir de la source vers la destination.

## 2.4. Simulation et Résultats

L'évaluation des performances sera conduite à travers le simulateur réseau TOSSIM [166] [167] pour simuler notre approche. TOSSIM est un simulateur à événements discrets pour les réseaux de capteurs sans fils sous TinyOS.

TinyOS [167] est un système d'exploitation développé et soutenu principalement par l'université américaine de Berkeley, qui offre le téléchargement sous la licence BSD (Berkeley Software Distribution License). Ainsi, toutes les sources sont disponibles pour de nombreuses machines cibles.

TinyOS est un système d'exploitation open-source conçu pour les réseaux de capteurs sans fil. Il respecte une architecture basée sur une combinaison de composants, ce qui réduit la taille du code requis pour sa mise en œuvre. Ceci est en conformité avec les contraintes observées par les réseaux de capteurs avec mémoire.

L'objectif principal de TOSSIM est de fournir une simulation d'applications TinyOS de haute-fidélité. Pour cette raison, il se concentre sur la simulation du TinyOS et de son exécution, plutôt que de simuler le monde réel. Bien que TOSSIM puisse être utilisé pour comprendre les causes du comportement observé dans le monde réel, il ne saisit pas tous ces comportements, et ne doit pas être utilisé pour les évaluations absolues.

La Figure 4.37 est une impression d'écran de TinyViz. TinyViz est une interface graphique basée sur Java qui nous permet de visualiser et de contrôler la simulation pendant son exécution, inspection des messages de débogage, de la radio, et ainsi de suite. La simulation comporte



plusieurs mécanismes d'interaction avec le réseau; le trafic de paquets peut être surveillé, des paquets peuvent être statiquement ou dynamiquement injectés dans le réseau.

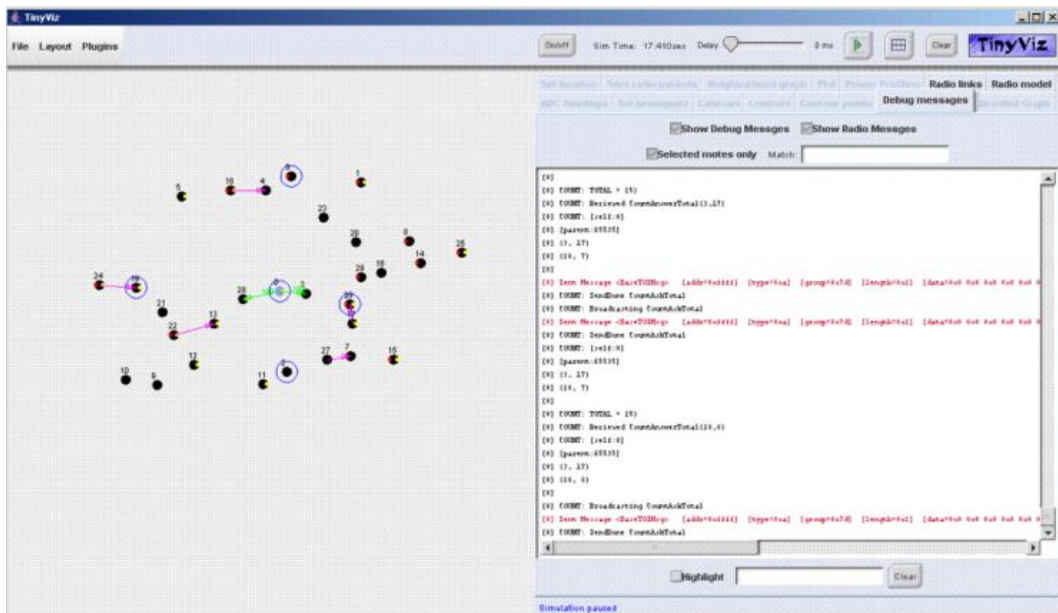


Figure 4.37 : Représentation du TinyViz

Au lieu de compiler une application TinyOS pour un 'MOTE', nous pouvons le compiler avec la plateforme TOSSIM, qui fonctionne sur PC. Cela nous permet de déboguer, tester et analyser des algorithmes dans un environnement contrôlé et reproductible. Comme TOSSIM fonctionne sur un PC, nous pouvons examiner notre code TinyOS utilisant des débogueurs et d'autres outils de développement.

Nous allons comparer les performances de notre approche (R-RWP) avec celui basé sur RWP dans sa version de base. D'après le graphique de la Figure 3.22 du chapitre 3, nous pouvons déduire que la position idéale de la station est le centre de l'environnement.

A propos des paramètres du routage, nous avons basé nos simulations sur deux scénarios: Le premier scénario sera utilisé pour mesurer la performance de notre proposition en termes de messages transmis et une seconde permettra de mesurer la latence pour les données livrées.

En outre, pour les mesures relatives à la mobilité, deux scénarios seront discutés, celui qui calcule le nombre de voisinage (dans un laps de temps) pour un nœud qui a un lien direct avec le SB. Pour le second scénario, nous essayons de trouver le nombre de liens actifs entre la SB et ses voisins.

### 2.4.1. Paramètres utilisés dans les scénarios de simulation

Tout d'abord, nous supposons que l'environnement est sans aucun obstacle pendant toute la durée de la simulation.

Toutes les simulations ont été réalisées avec le simulateur TOSSIM. Au début de chaque simulation; le RCSF simulé se compose de 100 nœuds uniformément déployés dans une zone d'observation de 100x100 mètres carrés (comme le montre la Figure 4.38) et la portée de communication de chaque nœud est de 16 mètres. Les nœuds sont tous équipés de capteurs pour mesurer périodiquement la température (à savoir, à chaque cycle de service) et chacun possède un espace mémoire de 100 octets. La taille de chaque donnée de température captée

est de 10 octets. Une station de base SB est déployée au milieu de cette zone d'observation (pour garantir une vision maximale dans cet environnement), et sera désactivé au cours de la phase de démarrage (les Quinze premières minutes) pour laisser le temps aux capteurs afin de capter les données et les placer dans leurs espaces mémoire.

La probabilité du taux de perte de paquets pour chaque lien est de 5%, le cycle de fonctionnement de chaque nœud est fixé à cinq minutes et la période de sommeil pour chaque nœud est égale à zéro minute. Pour le modèle de mobilité, chaque nœud se déplace en fonction du modèle de mobilité *Random Waypoint (RWP)*, tels que les vitesses minimales et maximales sont respectivement 0,05m/s et 0,3 m/s.

Ces simulations ont été effectuées au cours d'une heure de temps. Il convient de noter que le temps de pause utilisé dans nos divers scénarios est fixé pour une période de cinq secondes. Afin d'optimiser l'énergie du réseau, chaque nœud capteur mobile aura sa radio allumée pendant chaque pause indiquée par ce capteur.

Chaque scénario a été joué 100 fois en tenant compte de la période d'échauffement et de refroidissement du réseau, la collecte des résultats ne commence qu'après 900s (15 minutes) de simulation (le temps requis pour commencer à capturer des informations à partir de l'environnement) et s'arrête 300s avant la fin de la simulation.



Figure 4.38 : Dispersion initiale de nœuds dans l'environnement

La Table 4.12 récapitule les paramètres utilisés durant nos différents scénarios de simulation

| Paramètres | Valeurs |
|------------|---------|
|------------|---------|

|   |            |
|---|------------|
| Zone d'observation                        | 100mx100m  |
| Nombre de nœuds capteurs                  | 100        |
| Position de la SB                         | (50,50)    |
| Portée de communication                   | 16m        |
| Taille max de paquet de données           | 10 Octets  |
| Taille de l'espace mémoire                | 100 Octets |
| Taux de perte de paquets pour chaque lien | 5%         |
| Vitesse Min                               | 0.05m/s    |
| Vitesse Max                               | 0.3m/s     |
| Période de sommeil                        | 0 min      |
| Cycle de fonctionnement                   | 5 min      |
| Temps de Simulation                       | 1 heure    |

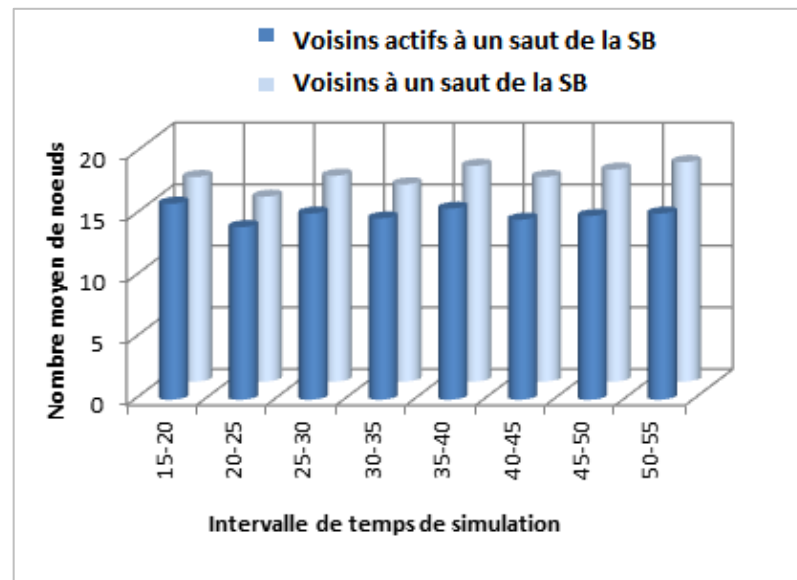
**Table 4.12 : Les valeurs des paramètres utilisés dans les simulations**

## 2.4.2. Résultats de simulation

Toutes les simulations ont été réalisées avec le simulateur TOSSIM [166]. Le modèle de mobilité (RWP) ainsi que notre approche (R-RWP) nous les avons implémentés sous TOSSIM avec le langage de programmation Java. Cependant, nous avons implémenté les nœuds capteurs constituant le réseau avec NesC [168]. Par contre, pour les scénarios de simulation, nous les avons programmés avec Tython [169], qui est écrit avec le langage de programmation Python. Après, nous avons terminé la mise en œuvre de notre approche R-RWP pour comparer et analyser les résultats.

### 2.4.2.1. Analyse des métriques de mobilité

La Figure 4.39 représente la somme de voisinage à un saut de la SB. Ces résultats sont regroupés pour mieux effectuer les comparaisons nécessaires.



**Figure 4.39 : Nombre de voisinage de la SB (à un saut)**

Il apparaît sur la base de la métrique relative au nombre de voisinage à un saut de la station de base, nous remarquons, en général, un grand nombre de nœuds qui est l'effet de l'utilisation de RWP.

Nous pouvons remarquer que le nombre de nœuds actifs est presque identique au nombre de voisins à un saut, surtout au début de la simulation. Cela se produit parce que chaque nœud doit transmettre ses données à la station de base pendant un cycle spécifique, et ceci peut être remarqué au début de la simulation où un temps de démarrage de 15 minutes est laissé avant de transmettre les données captées vers la SB. Cette période de démarrage permet la collecte d'une quantité importante de données dans la mémoire tampon des nœuds capteurs (3 messages dans le cache de chaque nœud).

La simple différence que nous pouvons remarquer entre les deux histogrammes est en raison du taux de perte de paquets (la probabilité qu'un nœud puisse perdre des paquets) que nous avons spécifié dans les paramètres de simulation. La fin de la simulation montre qu'il y a une petite augmentation de la différence des histogrammes qui est un résultat logique, car le réseau devient progressivement plus léger en termes de la taille des mémoires tampons des nœuds capteurs.

En outre, pour révéler les résultats obtenus pour le voisinage à deux sauts. La Figure 4.40 montre les résultats obtenus.

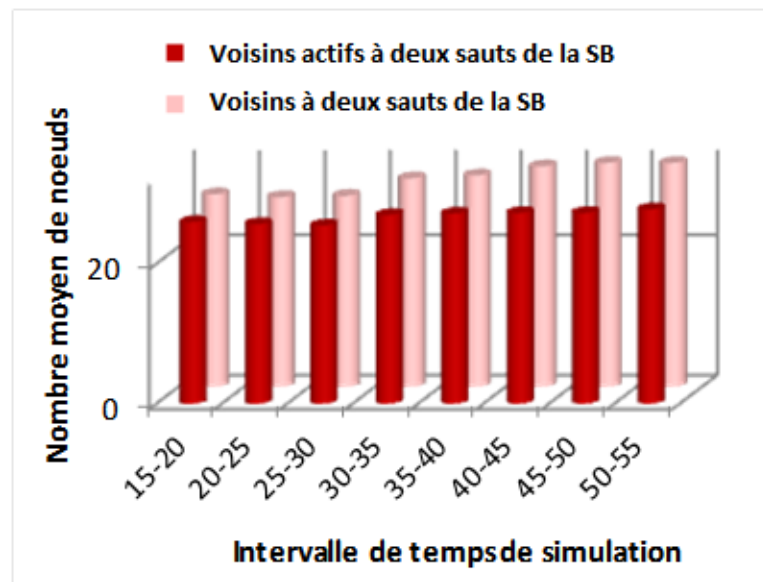


Figure 4.40 : Nombre de voisinage de la SB (à deux sauts)

Le voisinage à deux sauts semble être plus important par rapport à celui d'un saut. Ceci peut être expliqué par le fait qu'un nœud voisin à deux sauts peut lui-même être voisin de plusieurs autres nœuds à un saut pendant toute la durée d'un cycle déterminé (fixé à 5 minutes dans nos simulations).

A propos de la différence entre voisins actifs et non-actifs, l'interprétation est la même que pour la figure précédente concernant le voisinage à un saut.

En effet, le nombre de voisins à deux sauts semble important, d'où la nécessité d'exploiter la situation pour le passage (dès que possible) des données capturées par les nœuds capteurs mobiles.

La Figure 4.41 présente clairement la relation entre les différents voisinages vus auparavant.

Formellement, nous sommes intéressés à trouver la probabilité qu'un nœud capteur mobile sera voisin (direct ou à deux sauts) avec la station de base pendant un intervalle de temps.

La Figure 4.41 montre le nombre de voisins avec la SB (un et deux sauts).

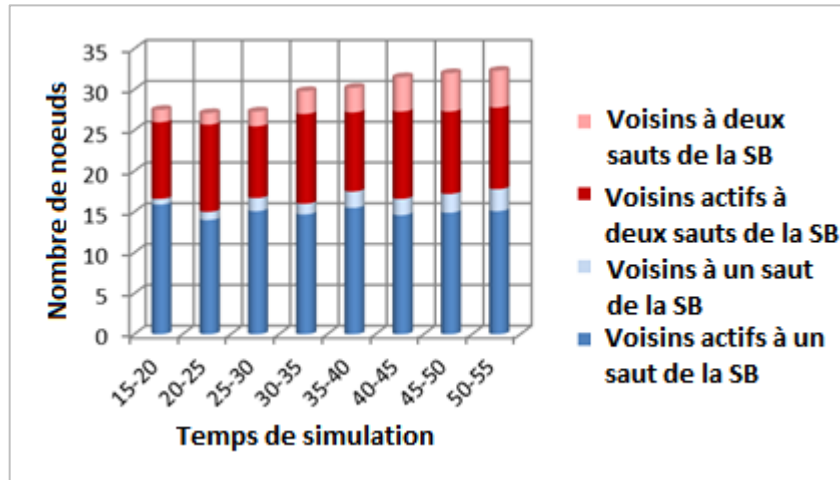


Figure 4.41 : Nombre de voisinage de la SB (à un et deux sauts)

Cependant, comme il apparaît dans la Figure 4.42, nous pouvons en déduire que la probabilité qu'un nœud sera en mesure d'être en contact avec la SB augmente avec notre solution R-RWP, puisque notre solution étend la zone de couverture de la SB en exploitant les voisins à deux-sauts.

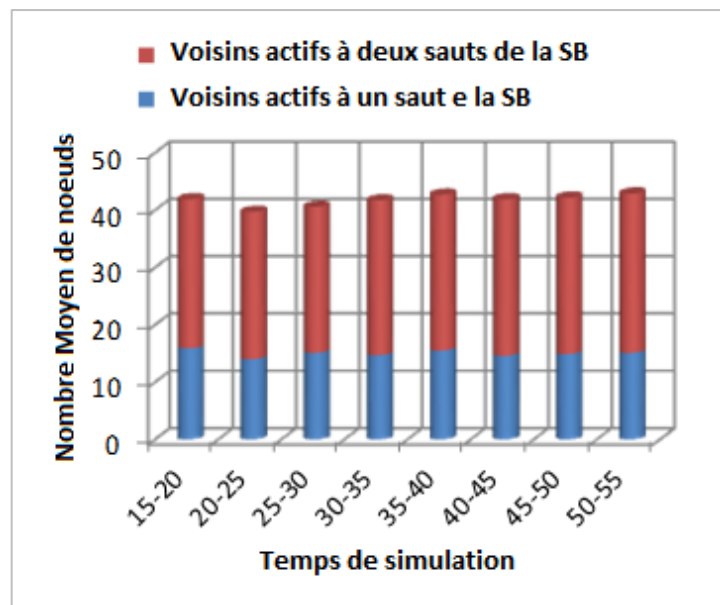


Figure 4.42 : Voisinage de la SB avec R-RWP

Après tous ces résultats, nous pouvons en déduire un grand nombre intéressant de voisinage à deux sauts de la SB, Nous allons exploiter ce groupe de voisinage pour assurer un routage avec un délai plus au moins réalistes.

Par la suite, nous étudions les métriques liées au routage pour tester la fiabilité du routage par notre approche.

### 2.4.2.2. Analyse des métriques de routage

Par la suite, nous allons nous concentrer sur le voisinage de la SB. A travers les figures suivantes (Figure 4.43, Figure 4.44, Figure 4.45) nous constatons que notre approche élargit le rayon de communication entre les nœuds capteurs mobiles et la SB.

La Figure 4.43 est une représentation d'un exemple de voisinage de la SB.

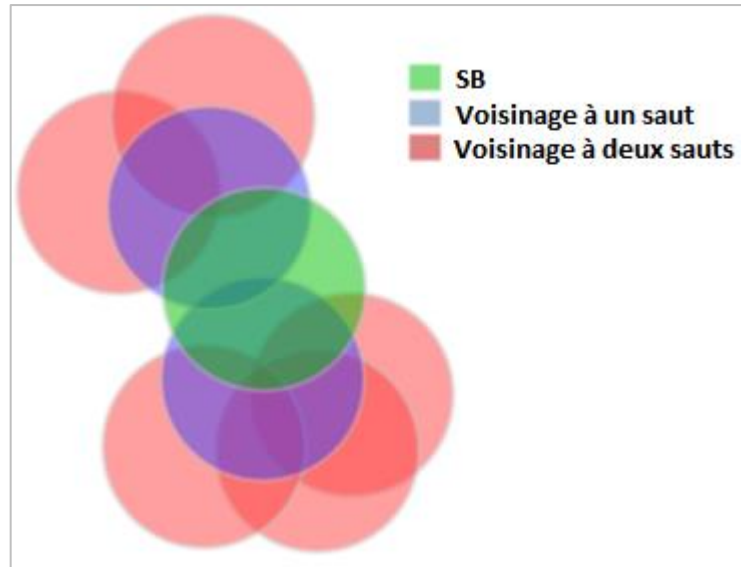


Figure 4.43 : Exemple de voisinage de la SB

La Figure 4.44 montre le champ de vision de la SB avec RWP

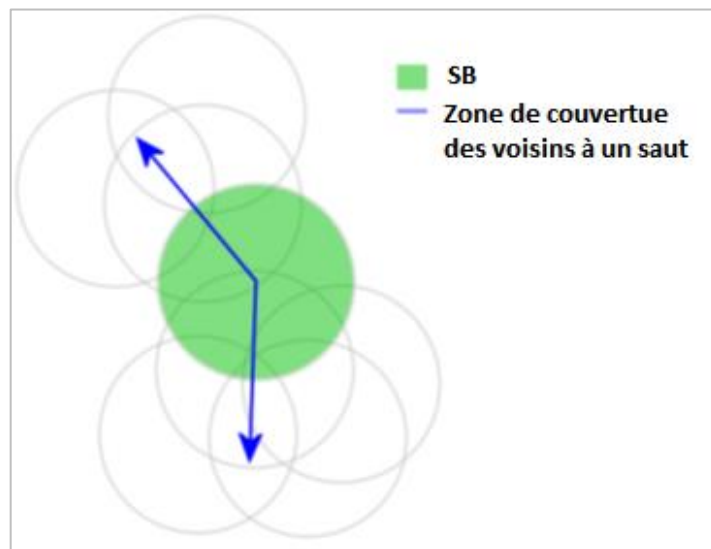


Figure 4.44 : Zone de couverture avec RWP

Cependant, dans la Figure 4.45, nous pouvons voir clairement que le champ de vision de la SB est intéressant dans le cas du R-RWP.

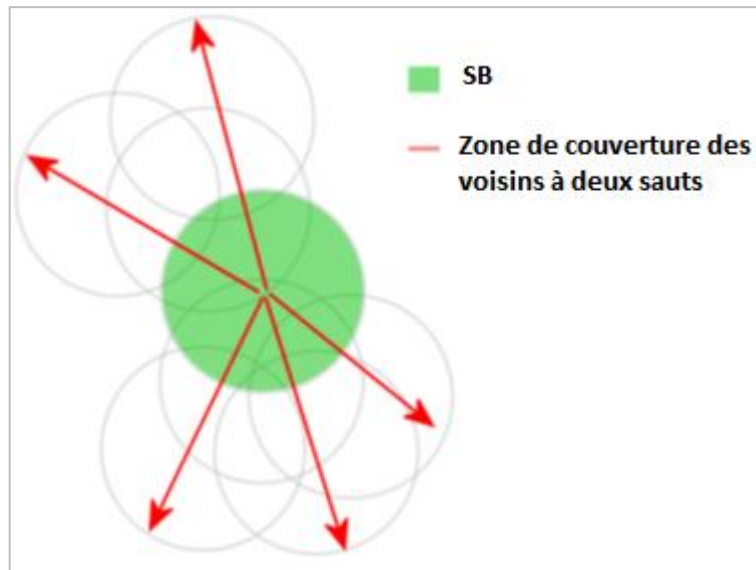


Figure 4.45 : Zone de couverture avec R-RWP

Grâce à nos simulations, nous pouvons remarquer dans la Figure 4.46 que le voisinage d'un saut est entouré par le cercle bleu, tandis que ceux à deux sauts sont entourés par le rouge. Chose attrayante dans le cercle rouge, nous remarquons l'apparition des nœuds qui ne sont pas étiquetés comme 2-sauts (comme les nœuds 12, 88, 4, 91 et 27). Cela est dû au fait que ces nœuds n'ont aucun lien avec les nœuds de cercle bleu pour être en mesure d'atteindre la SB.

En outre, dans le but essentiel de tout processus de routage est de livrer des données, et sur la base des résultats de simulation dont nous avons obtenus, nous avons fait une extraction des résultats liés au nombre de messages reçus par la SB.

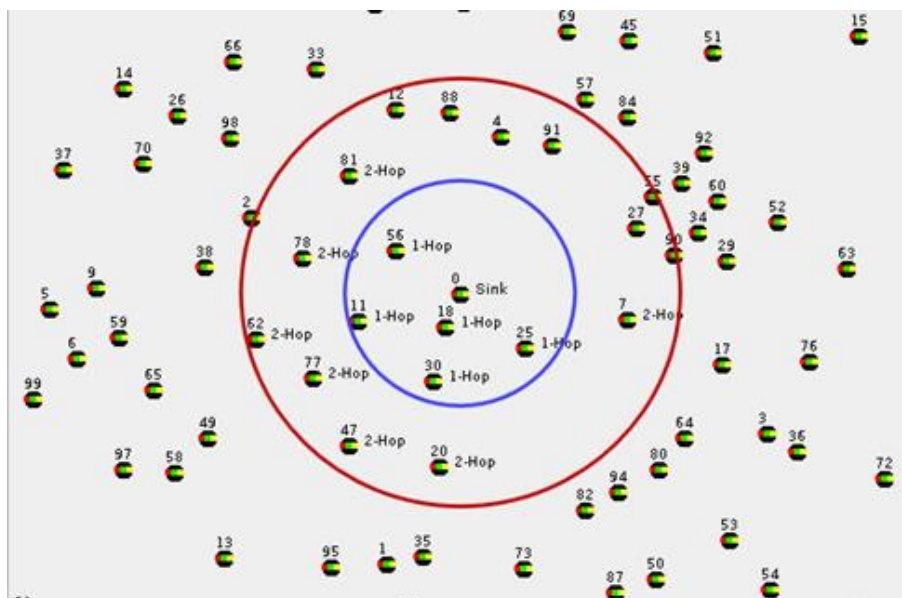


Figure 4.46 : Présentation du voisinage à un et deux sauts avec TinyViz

Les Figure 4.47, Figure 4.48, et Figure 4.49 sont une représentation des résultats obtenus après un temps de simulation.

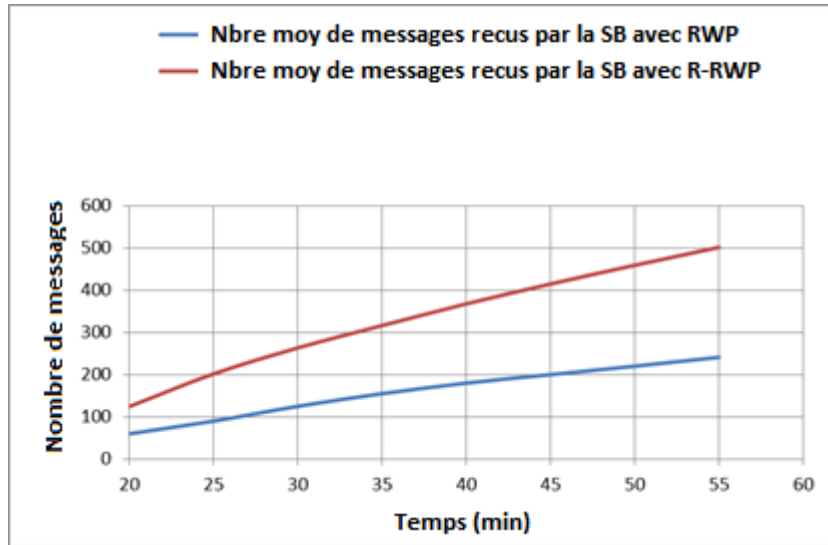


Figure 4.47 : Nombre de messages reçus par la SB avec RWP et R-RWP

Avec le modèle RWP, le taux de livraison est moins important qu’avec le R-RWP pour la simple raison qu’avec le R-RWP la SB communique avec des voisins à un et deux sauts. Mais avec RWP, la SB communique uniquement avec les voisins à un saut. Tandis que, avec R-RWP le nombre de messages reçus par la SB augmentera rapidement, ce qui va certainement avoir un effet sur le taux d’occupation des mémoires caches des nœuds capteurs mobiles.

Par la suite, nous avons eu l'idée de représenter les courbes de tendance pour la courbe rouge de la Figure 4.47, le résultat est représenté dans la Figure 4.48.

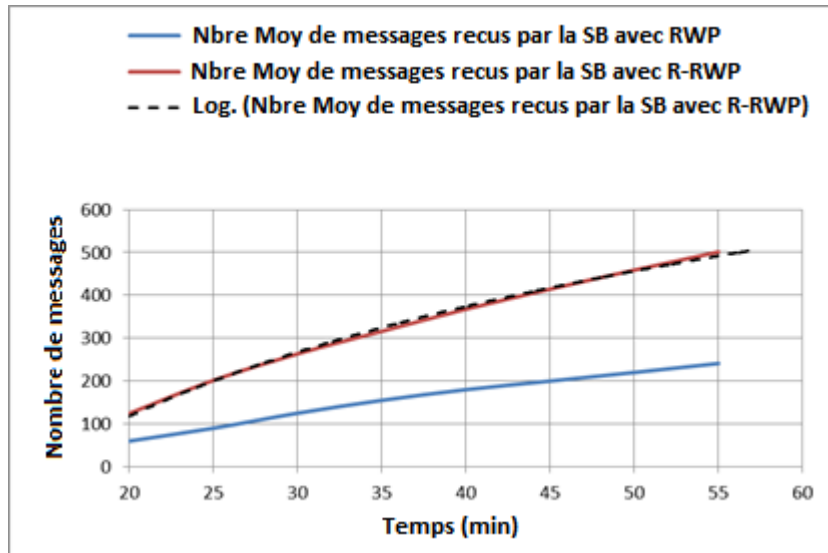


Figure 4.48 : Courbe de tendance

Nous pouvons déduire de la courbe de tendance superposée sur le graphique de la R-RWP, que le type de cette courbe est logarithmique avec la fonction suivante:

$$N_t = 369,72 \ln(t) - 990 \quad \dots\dots\dots (4. 21)$$

Tel que  $N_t$  est le nombre de messages reçus par la station de base jusqu'au temps  $t$ .



Cette fonction présente une étroite relation entre le nombre de messages reçus par la station de base et le temps d'exécution. En effet, nous pouvons déduire que le nombre de messages reçus par la SB est nettement progressif avec R-RWP.

Maintenant, nous allons examiner le délai de bout en bout que devra attendre un paquet pour atteindre le SB.

La Figure 4.49 illustre les résultats de simulation.

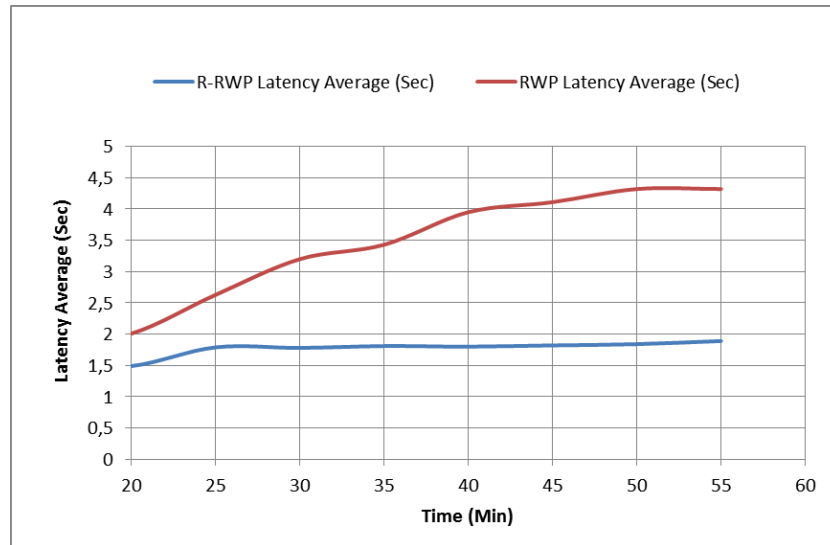


Figure 4.49 : Latence moyenne avec RWP et R-RWP

Comme nous pouvons le constater, les paquets avec RWP prennent beaucoup de temps pour pouvoir communiquer avec la SB. En effet, ceci est la conséquence que pour commencer l'échange avec la SB, un nœud mobile ne transmet ses données agrégées à aucun autre nœud, et gardera ses données jusqu'à ce qu'il détecte personnellement la SB dans sa zone de couverture, temps à partir duquel l'échange commencera.

Cependant, avec R-RWP la découverte de la SB se fera au niveau de la zone de couverture du nœud en question, et aussi au niveau de la zone de couverture des nœuds voisins du nœud en question. Cette stratégie nous apporte un gain considérable au niveau de la latence de livraison, ceci est suite à une collaboration entre les nœuds mobile.

### 2.4.3. Discussion

En ce qui concerne la consommation d'énergie, il est certainement clair qu'il y a une relation proportionnelle entre l'exploitation des nœuds intermédiaires (pour les informations de routage) et la consommation d'énergie. La dissipation d'énergie est relativement liée à la bonne gestion des réserves d'énergie. La plupart des protocoles de communication dédiés aux RCSF, doivent offrir une bonne gestion d'énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau.

Dans un routage collaboratif, plus le nombre de nœuds intermédiaires dans le réseau est important, plus la dissipation de l'énergie sera importante. Dans notre approche, nous n'avons exploité qu'environ 10% des nœuds comparé au modèle RWP, ce qui donne un bon rapport (dissipation d'énergie/nœuds exploités).

Cependant, nous avons comblé cette dissipation par une stratégie d'activation des antennes radio. Toutefois, dans le cas de mobilité, et pour éviter d'interrompre les

communications, nous avons choisi d'éteindre la radio des nœuds capteurs jusqu'à ce qu'ils atteignent leur temps de pause. Pendant ce temps de pause, la radio sera rallumée et le capteur mobile recherche la SB afin de transmettre les données concernées.

En termes de sécurité, nous pouvons dire que notre approche présente un niveau de sécurité acceptable et qui reste intéressant comparé à d'autres mécanismes de routage. En effet, le message passera par un maximum de 2 sauts pour atteindre la SB, ce nombre de sauts est parfois exagéré dans d'autres protocoles de routage avec un risque de rupture de la confidentialité et formation d'une vulnérabilité sérieuse pour d'autres facteurs de sécurité.

### **3. Une nouvelle approche basée cercle virtuel mobile pour prolonger la durée de vie des RCSF**

Plusieurs stratégies de déploiement sont proposées pour les réseaux de capteurs sans fil, l'objectif principal de ces capteurs est notamment la collecte de données. Néanmoins, puisque les capteurs sont pour la plupart immobiles, l'opération de transfert des données qu'ils ont capturées vers la station de base est une tâche critique puisque l'environnement d'échange est instable, et la probabilité de fragmentation du réseau (voir même détériorer la durée de vie du réseau) et flagrante.

Notre approche consiste à injecter des nœuds relais mobiles dont la mission est principalement de maximiser la durée de vie du réseau, de fournir également une connectivité entre tout capteur et la station de base, et de minimiser la latence de réception des données envoyées à la station de base. La mobilité intelligente est la clé de notre approche pour assurer la fiabilité en formant un cercle mobile virtuel en utilisant des nœuds relais.

#### **3.1. Objectif de la mobilité dans les RCSF**

Les architectures des RCSF traditionnels reposent sur l'hypothèse que le réseau est dense, de sorte que deux nœuds peuvent communiquer entre eux par le biais d'une communication à plusieurs sauts. Par conséquent, dans la plupart des cas, les capteurs sont considérés comme statiques et la mobilité n'est pas considérée comme une option. Plus récemment, à l'instar de la tendance de la recherche dans les réseaux mobiles ad hoc (MANET) [170] et les réseaux tolérants aux délais (DTN) [63], la mobilité a également été introduite dans les RCSF [67], [171]. En fait, la mobilité dans les RCSF est utile pour plusieurs raisons [172], comme décrit ci-dessous :

##### **3.1.1. Connectivité**

Les nœuds étant mobiles, l'exigence d'une architecture RCSF dense n'est pas requise. En effet, les éléments mobiles peuvent relier les régions isolées, de sorte que la contrainte de connectivité du réseau est relâchée. Ainsi, une architecture RCSF dispersée devient une option réaliste.

##### **3.1.2. Coût**

En déployant moins de nœuds dans un RCSF avec des éléments mobiles, le coût du réseau sera réduit, cependant l'ajout de fonctionnalités de mobilité aux nœuds peut être coûteux, dans de nombreux cas, il est possible d'exploiter des éléments mobiles déjà présents dans la zone (ex. trains, bus, navettes ou voitures).

### 3.1.3. Fiabilité

Comme les RCSF statiques traditionnels sont denses et que le paradigme de la communication est souvent multi-saut, la fiabilité est compromise par les interférences et les collisions. De plus, la perte de messages augmente avec un nombre élevé de sauts. Les éléments mobiles visitent les nœuds du réseau et récupèrent les données directement via des transmissions à un saut. Cela réduit non seulement les conflits et les collisions, mais aussi la perte de messages.

### 3.1.4. Efficacité énergétique

Le modèle de trafic inhérent dans les RCSF est le « *ConvergeCast* » qui signifie que les messages sont générés à partir des nœuds capteurs et sont collectés par le récepteur. En conséquence, les nœuds les plus proches de la SB sont surchargés par rapport aux autres, et donc épuisent leur énergie prématurément. Ce problème est connu sous le nom d'effet d'entonnoir (*Funneling Effect*) parce que les voisins de la SB représentent le goulot d'étranglement du trafic. Les éléments mobiles, appelés nœuds relais mobiles, peuvent aider à réduire les phénomènes d'effet d'entonnoir car ils peuvent visiter différentes régions du réseau et propager la consommation d'énergie de manière plus égale, même dans le cas d'un réseau RCSF à architecture dense.

## 3.2. Dissipation d'énergie dans un capteur

Compte tenu de la diversité des capteurs, il n'y a pas de valeurs typiques de l'énergie consommée. D'autre part, les capteurs passifs (température, sismique ...) consomment souvent moins d'énergie que les autres nœuds capteurs. Notez que les capteurs actifs tels que les sonars et les capteurs d'image peuvent consommer beaucoup plus d'énergie. En outre, il existe d'autres formes de dissipation d'énergie telles que les lectures/écritures mémoire.

Il est difficile de fournir ici une étude quantitative et comparative précise de la consommation de chaque nœud capteur en raison du grand nombre de plates-formes commerciales existantes. Cependant, des expériences ont montré que la transmission de données est la plus consommatrice d'énergie. Le coût de transmission d'un bit d'information est approximativement le même que le coût requis pour calculer 1 000 transactions [173]. La consommation du module de détection dépend du type spécifique du nœud capteur.

## 3.3. Travaux antérieurs

Malgré les nombreuses applications des RCSF, ces réseaux ont plusieurs contraintes en termes d'énergie, de calcul et de bande passante. L'objectif principal de tels réseaux est de fournir des communications et une collecte de données entre les capteurs sans fil et la SB, tout en essayant d'augmenter la durée de vie du réseau et d'éviter les problèmes de goulots d'étranglement. Il existe plusieurs raisons pour lesquelles les nœuds mobiles doivent être utilisés par rapport aux nœuds statiques, tels que l'amélioration des performances du réseau.

Nous considérons un réseau de capteurs sans fil, où chaque capteur recueille des données de l'environnement (par exemple la température). Les données collectées doivent être acheminées vers la station de base (SB) pour traitement central, comme indiqué sur la Figure 4.50.



Figure 4.50 : Présentation d'un réseau de capteurs sans fil

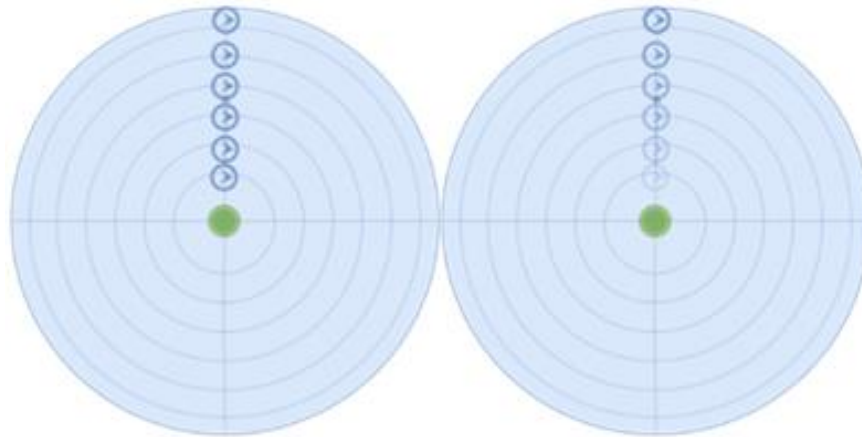
Le problème avec ce type de scénario est la détérioration de la durée de vie du réseau puisque les capteurs proches de la SB serviront de relais pour acheminer les données capturées par différents capteurs vers cette SB. Au fil du temps, leur énergie diminuera plus vite que celle des autres capteurs et ainsi, ils seront isolés.

Pour résoudre ce problème, notre contribution vise à assurer un échange et un acheminement fiables des données capturées grâce à une gestion intelligente de la mobilité des capteurs. Dans la littérature, il y a beaucoup de travaux qui visent à mobiliser la SB pour collecter les données captées par les capteurs [174], une des meilleures propositions est de mobiliser la SB sur le périphérique de l'environnement [86]. Les auteurs prouvent que la durée de vie du réseau est 500 fois meilleure que dans un réseau statique.

Mobiliser la SB est une solution intelligente, cependant cette solution introduit le problème de la centralisation. L'entité centrale (SB) doit être protégée dans un endroit sûr en évitant les mouvements susceptibles d'affecter le contenu des données collectées. De plus, le délai de bout en bout sera considérable puisque les données ne seront échangées que lorsque la SB croisera le capteur statique.

Notre contribution propose d'utiliser des nœuds relais mobiles dont le rôle est de collecter les données captées par les capteurs et de les acheminer vers la SB.

Si nous suivons la stratégie présentée dans [6] pour le déploiement de ces nœuds relais, nous obtiendrons l'organisation présentée à la Figure 4.51, ce qui nous conduira au problème initial: les nœuds relais proches de la SB vont rapidement mourir car ils vont agir comme relais pour acheminer les données vers la SB. De plus, le mouvement des nœuds relais varie d'un nœud à l'autre: ceux proches de la BS ont une vitesse plus lente par rapport aux nœuds éloignés.



**Figure 4.51: Placement de nœuds de relais proposé dans [6]**

C'est pour ces raisons que la mobilité dans les RCSF est un sujet d'actualité d'une grande importance et un centre d'intérêt de nombreux chercheurs. Les méthodes proposées jusqu'à présent, selon la nature et le nombre de nœuds mobiles utilisés [175], [176], peuvent être classées en deux catégories principales: les méthodes basées sur la mobilité des puits et les méthodes de mobilité des nœuds relais.

Pour les méthodes basées sur la mobilité des puits [174], les auteurs de [177] s'intéressent aux réseaux de capteurs fonctionnant à différents débits d'échantillonnage et proposent une solution pour planifier le mouvement du puits afin que chaque nœud soit visité - éventuellement plusieurs fois - avant d'expérimenter la perte de données due au débordement du tampon. Les auteurs de [22] proposent une approche basée sur la SB. Cette dernière diffuse un message d'intérêt aux nœuds capteurs voisins en se déplaçant sur une ligne droite. Les nœuds capteurs reçoivent le message d'intérêt et le transmettent à leurs propres voisins. Chaque nœud capteur commence à transmettre les données au récepteur mobile lorsqu'un événement se produit. La SB mobile est hors de portée lors de la transmission de l'événement et les paquets seront donc perdus. La solution utilise des accusés de réception pour s'assurer que le récepteur a reçu le paquet avec succès, et un nœud capteur transmet d'autres paquets seulement après avoir reçu un accusé de réception du récepteur. Les auteurs de [178] considèrent un réseau de capteurs statiques avec plusieurs récepteurs mobiles, où chaque nœud doit prendre la décision de transmettre ou non les données collectées lorsqu'une SB se trouve à proximité, en fonction de son occupation tampon ou de sa distance euclidienne vers la SB.

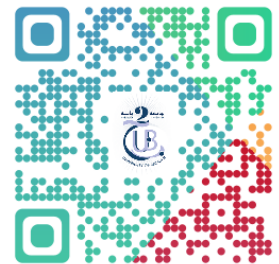
Alors que pour les méthodes basées sur la mobilité des nœuds relais, une stratégie différente utilisant des nœuds mobiles intermédiaires est proposée pour la première fois pour les RCSF dans [67]. Ils ont proposé d'utiliser un "Data Mules" aléatoire pour la collecte de données. Les Mules de données dans le champ des capteurs sont utilisées comme transmetteurs. L'idée est d'économiser de l'énergie en utilisant un routage à un saut (du capteur vers le "Mule" directement) au lieu d'un routage multi-saut plus coûteux (du capteur vers la SB). Les auteurs de [6] ont examiné les performances d'un réseau dense avec un nœud relais mobile et ont montré que la durée de vie des nœuds dans le réseau augmentait. La communication impliquant des nœuds relais dans toutes les approches considère deux scénarios: d'un seul capteur à un relais et d'un relais à une SB.

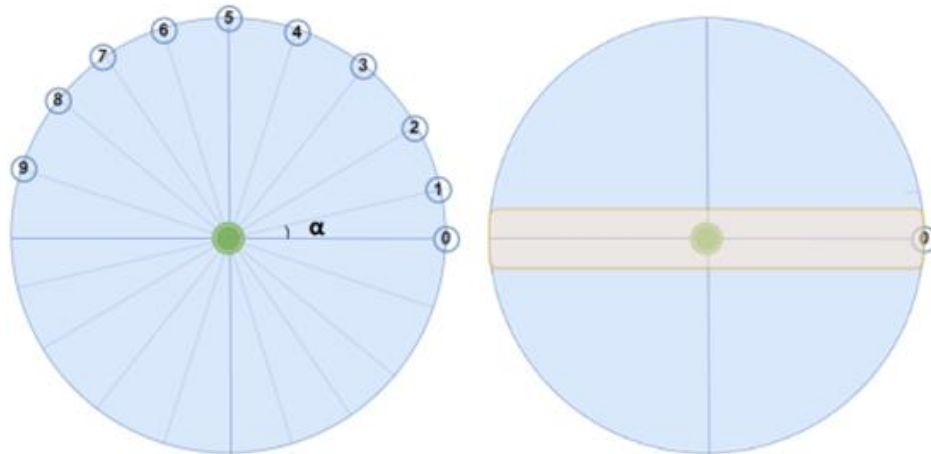
Les auteurs dans [179] considèrent le problème de la maximisation de la durée de vie d'une connexion sans fil entre un émetteur et un récepteur utilisant des relais mobiles. Initialement, tous les relais sont positionnés arbitrairement sur la ligne entre l'émetteur et le récepteur et ont

des capacités de batterie arbitraires. L'énergie est consommée proportionnellement à la distance parcourue et proportionnellement à une fonction exponentielle de la distance sur laquelle l'information est envoyée pour la communication. Les relais peuvent se déplacer vers des endroits différents tant qu'ils ont l'énergie pour faire cette tâche. L'objectif est de trouver des positions (qui définissent des plages de transmission) pour les nœuds qui maximisent la durée de vie du réseau. Les auteurs ont étudiés deux modèles. Le premier est plus restrictif et correspond au cas où les relais peuvent être déployés une fois à l'instant zéro (déploiement unique), tandis que le second modèle correspond au cas où les relais peuvent être ajustés plusieurs fois (déploiements multiples). Ils ont montrés comment calculer une solution optimale pour le cas d'absence de coût de mouvement pour les deux modèles. Ils considèrent une version discrète du modèle de déploiement unique, dans lequel les relais doivent être déployés sur les points de la grille. Ils montrent ensuite que si les positions initiales de tous les relais sont à chaque extrémité de l'intervalle de transmission, alors il existe un ordre dominant pour les relais. Les auteurs ont développés un certain nombre d'heuristiques pour le modèle des déploiements multiples. Ils ont évalués en utilisant des simulations et comparés avec la limite inférieure des relais statique et la limite supérieure du mouvement. Les simulations démontrent l'avantage de se déplacer sur les emplacements initiaux, même pour un déploiement unique.

### 3.4. Contribution - mouvement synchronisé entre relais mobiles

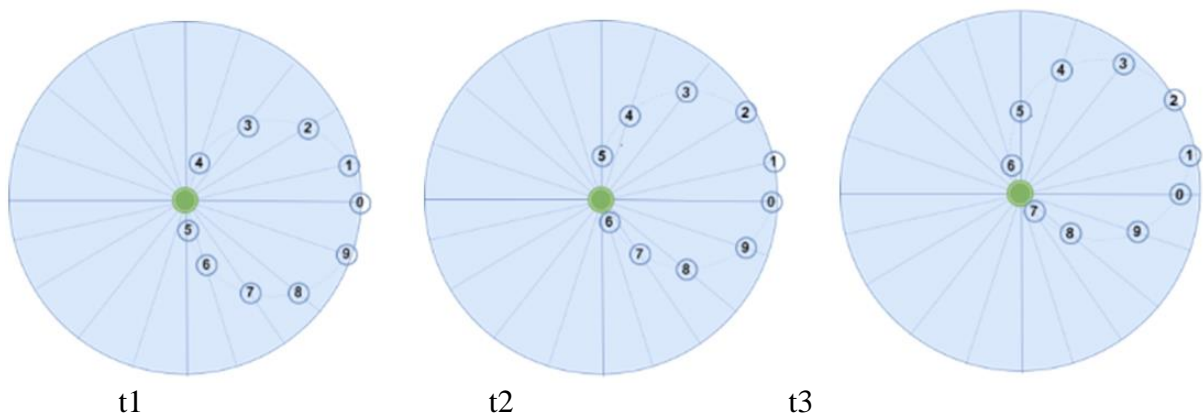
Pour les raisons citées ci-dessus, nous proposons une organisation spécifique de ces nœuds relais pour les mobiliser sans affecter l'énergie d'un capteur statique au détriment d'un autre. Nous proposons l'organisation présentée à la Figure 4.52 (a). Chaque nœud relais mobile a un champ de couverture comme indiqué sur la Figure 4.52 (b).





**Figure 4.52: (a) Disposition initiale des nœuds relais dans notre approche (b) Couverture de nœud relais mobile**

Le mouvement synchronisé des nœuds relais se fera indépendamment, chacun se déplace dans sa trajectoire linéaire. Ainsi, formant un cercle virtuel mobile comme le montre la Figure 4.53.



**Figure 4.53: Les nœuds relais synchronisent le mouvement, chacun dans sa trajectoire linéaire formant ainsi un cercle virtuel mobile (t1,t2,t3,...)**

Avec cette solution, nous garantissons que l'énergie consommée par les nœuds relais sera équitable. Cela étend considérablement la durée de vie du réseau, fournissant un environnement fiable pour le transfert de données de l'environnement à la station de base.

Nous validerons formellement par la suite notre approche.

### 3.4.1. Préliminaires

#### a) Rayon de la zone d'analyse (R)

Dans un premier temps, nous avons défini une variable R qui représente le rayon de couverture de la zone d'observation, afin de pouvoir utiliser cette variable dans les séquences d'équations suivantes.

#### b) Zone de couverture du relais mobile (Ca)

Chaque relais mobile a une zone de couverture qui est calculée par

$$C_a = 2(\rho + \sqrt{\rho^2 - H^2}) \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

Où:

$\rho$ : La portée d'un capteur statique;

H: La distance verticale (hauteur entre le relais et le capteur - Figure 4.54).

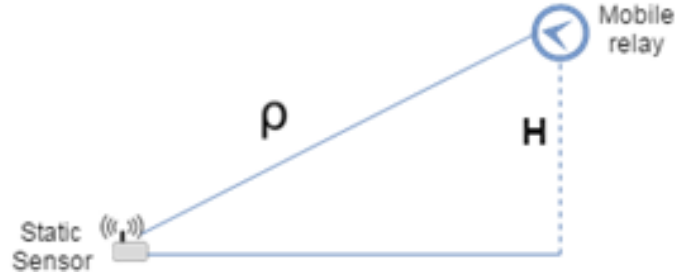


Figure 4.54: La distance «H» entre le noeud relais et le capteur statique

c) Portée minimale du relais mobile ( $\rho_r$ )

La portée minimale du relais mobile est présentée par la formule suivante :

$$\rho_r = \frac{R \times \pi}{N_r} \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

Où:

$N_r$ : est le nombre suffisant de relais permettant de former notre cercle virtuel mobile (Nous définissons ce paramètre dans (7)).

### 3.4.2. Formules du cercle virtuel mobile

a) Mouvement du relais

La mobilité de chaque nœud relais dans une trajectoire linéaire est un oscillateur harmonique simple (c'est-à-dire, un mouvement harmonique simple), selon (3) qui représente une équation différentielle du second degré.

$$\ddot{x} + w^2 x = 0 \quad \dots\dots\dots (4.24)$$

Avec:  $w$ , est la pulsation;

En résolvant cette équation différentielle (4. 24), nous trouvons que le mouvement est décrit par la fonction :

$$x(t) = R * \cos\left(\frac{2\pi}{T} * t + \phi\right) \quad \dots\dots\dots (4.25)$$

Avec:

T: est la période d'oscillation;

R: représente l'amplitude maximale de l'oscillation (rayon de la zone d'analyse);



$\emptyset$ : représente le décalage de phase. Nous supposons à l'instant  $t_0$  que le relais est positionné au centre de la zone d'observation (avec la SB), pour cela  $\emptyset = 0$ .

Dans l'espace, (4) devient :

$$\begin{cases} x(t) = R * \cos(\beta) * \cos(\frac{2\pi}{T} * t) \\ y(t) = R * \sin(\beta) * \cos(\frac{2\pi}{T} * t) \\ z(t) = C \end{cases} \dots\dots\dots (4. 26)$$

Avec  $C = R * \pi$

Où:

C: Périmètre du cercle avec  $C \leq H$

t: Le temps

$\beta$ : est l'angle entre la trajectoire du relais et l'axe des x

b) Vitesse du relais

Pour calculer la vitesse des relais, nous utilisons la formule suivante:

$$V(t) = -R * \frac{2\pi}{T} * \sin(\frac{2\pi}{T} * t) \dots\dots\dots (4. 27)$$

c) Temps de détection 'Relais - SB' et 'Relais - Capteur'

Le temps maximum pour qu'un relais mobile détecte la SB est  $\approx T/2$  et le temps maximum pour qu'un capteur statique détecte le même relais mobile est  $\approx T$

A noté que le temps maximum est lié aux capteurs statiques situés au bord de la zone. Cependant, pour ceux qui sont proches de la SB, cette durée diminue progressivement.

d) Mécanisme de construction du cercle virtuel par relais

Afin de créer un cercle virtuel par des relais mobiles en fonction de leurs mouvements linéaires; il faut d'abord calculer le nombre suffisant de relais pour couvrir toute la zone d'observation, après quoi ces relais doivent avoir un déploiement prédéfini et être synchronisés entre eux.

- 1) Nombre de relais: Afin de collecter les données des capteurs statiques dans la zone d'analyse, il est nécessaire d'avoir un nombre suffisant de relais effectuant cette fonction. Par conséquent, le nombre de relais est calculé par :

$$N_r = \frac{\pi R}{2(\rho + \sqrt{\rho^2 - H^2})} \dots\dots\dots (4. 28)$$

- 2) Déploiement de relais: pour tous les nœuds relais mobiles, il faut définir la trajectoire linéaire de chaque relais. Les trajectoires des différents relais sont définies selon un angle  $\alpha$  qui sépare deux trajectoires successives, comme suit:

$$\alpha = \frac{\pi}{N_r} \dots\dots\dots (4.29)$$

Chaque relais "l" se déplace selon (5).

Avec l'angle  $\beta = \alpha * l$  (l: L'indice du relais)

Cependant, la synchronisation entre les mouvements est importante.

- 3) Synchronisation des relais: Dans notre proposition, le facteur temps de synchronisation entre les relais est très important et est calculé par :

$$Sy_t = \frac{T}{2 * N_r} \dots\dots\dots (4.30)$$

e) Routage de données via des relais

Le mécanisme de routage proposé est défini comme suit:

Si un nœud capteur statique détecte la SB dans sa zone de couverture, il envoie ses données directement sans passer par le relais mobile.

Sinon, le capteur statique conservera ses données collectées dans sa mémoire, et les enverra au premier relais mobile qu'il détecte (pour éviter la redondance des données sur la SB).

Une fois que les données atteignent le relais mobile, ce dernier transmet directement ces données à la SB si elle figure dans la liste de ses voisins à un saut, sinon par une collaboration multi-sauts avec ses voisins relais mobiles.

Chaque relais pourra acheminer les données vers la station de base via deux chemins, soit par les voisins de gauche, soit par ceux de droite. Pour sélectionner l'itinéraire le plus court vers la BS, le relais change alternativement le sens d'envoi chaque fois qu'il détecte la SB (Figure 4.55).

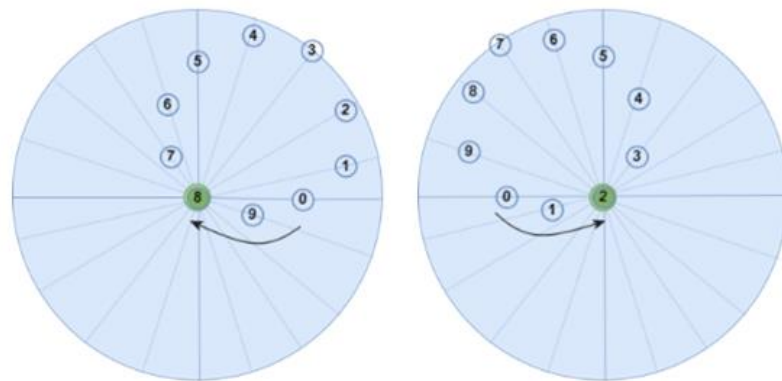


Figure 4.55: La direction d'envoi vers la SB

### 3.5. Performance du cercle virtuel

Nous avons projeté les différentes formules mathématiques de notre approche sous le simulateur CupCarbon [180], en fonction des paramètres présentés dans le Table 4.13.

| Paramètre                   | Valeur |
|-----------------------------|--------|
| Nombre de capteurs statique | 100    |
| R                           | 100 m  |
| $\rho$                      | 10 m   |
| $\rho_r$                    | 35 m   |
| H                           | 8 m    |

Table 4.13: Paramètres de Simulation

Nous supposons que l'environnement est sans obstacles pendant toute la durée de la simulation.

Au début de chaque simulation le RCSF simulé comprend 100 capteurs statiques, déployés dans une zone d'observation d'un rayon de 100 mètres et la portée de communication de chaque capteur statique est de 10 mètres. Pour les relais mobiles, la portée du relais mobile est de 35 mètres, et nous définissons la distance verticale entre le relais et le capteur à 8 mètres.

Ces paramètres représentent tout ce qui est nécessaire pour avoir les résultats suivants.

### 3.5.1. Redondance de relais

Pour éviter d'envoyer des données redondantes par des capteurs statiques, il est nécessaire de configurer un index pour chaque relais  $I \in [0, N_r - 1]$ . Dans le cas où un capteur détecte deux relais en même temps dans son champ de capture, il envoie ses données au relais qui a l'index minimum.

### 3.5.2. Nombre de nœuds vivants

Si nous ne prenons en compte que l'énergie consommée par les capteurs statiques, nous maintenons que la durée de vie d'un capteur est très importante puisque, avec notre approche, nous avons évité le mutli-sauts ce qui implique qu'une consommation minimale est requise par un capteur. Autrement dit, l'énergie consommée est équitable sur tous les capteurs statiques constituant le réseau. Pour toutes ces raisons, la moyenne des nœuds vivants est prolongée de manière significative.

### 3.5.3. Latence de réception

La Figure 4.56 montre que la latence est affectée par le temps nécessaire d'une traversée par un relais mobile. En effet, un capteur statique doit attendre le relais mobile pour lui envoyer ses données capturées. Ce temps d'attente sera important en fonction de la vitesse du relais mobile pour traverser une phase de mouvement.

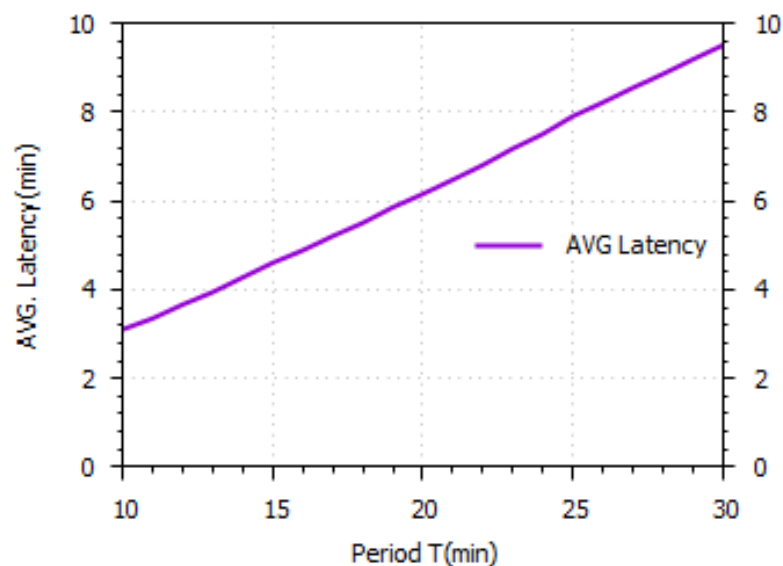


Figure 4.56: Latence moyenne

### 3.5.4. Taux des paquets envoyés avec succès

On suppose que pendant 5 minutes chaque nœud détecte un événement et nous calculons le pourcentage du nombre de paquets arrivant à la SB par rapport au nombre de paquets qui se produisent, pendant le temps de simulation (30 minutes) sous la configuration suivante ( $T = 10$  15 20 25 30). Les résultats de la simulation sont illustrés sur la Figure 4.57.

Aussi, nous avons basé notre étude sur l'effet de la file d'attente sur le taux de réussite des paquets reçus. La Figure 4.57 montre la relation étroite entre ce taux de réussite et la taille de la file d'attente.

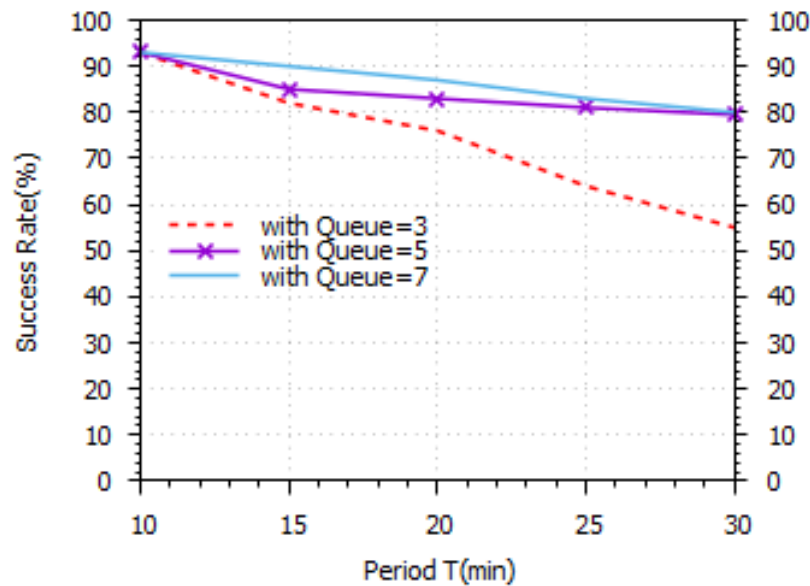


Figure 4.57: Taux des paquets envoyés avec succès

De la Figure 4.56 et de la Figure 4.57, le choix de la période affecte principalement les résultats, de sorte que si le réseau possède un état très actif (beaucoup d'événements sont déclenchés) et la période est grande, dans ce cas un risque de perte de données est attendu. Et vice versa, si le réseau présente un état stationnaire et que la période est petite, dans ce cas les relais consomment leurs énergies sans intérêt. Nous aurons donc besoin d'un mécanisme qui ajuste la période en fonction de l'état de l'environnement.

## 3.6. Discussion

Lors de l'établissement de l'état de l'art, nous avons distingué le scénario où le réseau est statique, où le problème d'énergie est critique et conduit à une durée de vie minimale du réseau. D'un autre côté, lorsque la mobilité est intégrée, notamment dans le scénario où la SB se mobilise et collecte les données des capteurs statique, l'économie d'énergie est partiellement améliorée par rapport à l'approche statique, mais deux problèmes fondamentaux subsistent: la perte d'énergie et la sécurité ce qui sera difficile à assurer en raison de la mobilité SB. Dans notre approche, nous avons prouvé que la durée de vie est optimale; parce que seuls les relais sont en mouvement, cela signifie que la consommation d'énergie dans notre réseau est partagée équitablement et judicieusement entre tous les membres du réseau.

Notre approche garantit la connectivité réseau, car nous avons un lien entre les capteurs statiques et la SB à travers les nœuds relais. Le cercle mobile virtuel assure l'optimisation de la

latence d'envoi. En effet, une donnée captée par un capteur sera transférée à travers ce cercle, et d'un relais à l'autre, les données seront transférées jusqu'à atteindre la SB.

Notre solution est très efficace si elle est utilisée dans la surveillance agricole (particulièrement en Algérie), en effet la surveillance des palmiers est une tâche délicate en raison des conditions météorologiques de la région. La tolérance aux pannes des relais mobiles est notre problème actuel; nous essayons de trouver le bon compromis entre le nombre de nœuds requis lors du déploiement pour garantir un bon niveau de tolérance aux pannes.

## 4. Conclusion

Dans ce chapitre, dans le premier volet et après une étude de l'existant qui expose les mécanismes de routage dans les environnements mobiles, nous avons conçu par la suite un nouveau mécanisme de routage qui se base sur un modèle de mobilité, puis nous avons réalisé une étude qui vise à analyser et tester les performances de notre approche dans un environnement de capteurs mobiles. En effet, les résultats de simulation prouvent que notre approche permet d'exploiter la mobilité pour assurer un routage optimal dans un tel environnement mobile.

Au niveau du 2<sup>ème</sup> volet, notre contribution s'est portée sur la proposition d'un nouveau mécanisme qui permet d'avoir un gain considérable concernant l'énergie du réseau. Les résultats de simulation ont montrés que notre approche favorise cette optimisation.

Nous avons atteint notre objectif qui est principalement d'exploiter la mobilité des nœuds pour alléger le routage dans ces réseaux, notamment en raison des grandes problématiques qui peuvent être soulevées lors de la conception de protocoles de routage adaptés à cet environnement. Aussi comme objectif additif, nous avons réussi à optimiser la durée de vie de RCSF qui prouvent dès leurs apparitions des exigences fatales pour garantir la continuité de services offerts par ce type de réseaux.

Notre contribution du 1<sup>er</sup> volet à fait l'objet d'une publication internationale au sein du journal :

"International Journal of Information and Communication Technology"

Notre papier est intitulé comme suit :

"A variant of *Random WayPoint* mobility model to improve routing in Wireless Sensor Networks"

Il apparait parmi la liste des papiers acceptés et prochainement publiés, à l'adresse suivante:

<http://www.inderscience.com/info/ingeneral/forthcoming.php?jcode=ijict>

Notre contribution du 2<sup>ème</sup> volet est acceptée au sein de la conférence internationale : International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE 2018)

Et nous avons reçu l'acceptation le mois de février 2018. Notre papier est intitulé comme suit :

"Nodes Collaboration to Extend Wireless Sensor Networks Lifetime".

# **Conclusion Générale et Perspectives**

---

---

La nature stationnaire des réseaux de capteurs sans fil a causé la génération de nouveaux problèmes liés essentiellement à la topologie et au fonctionnement du réseau. Ces problèmes conduisent à la dégradation sévère des performances du réseau et les rendent dans plusieurs cas quasi-inexploitables. Les développements récents dans le domaine de la mobilité ont permis l'émergence d'une nouvelle classe d'application de RCSF mobile.

L'utilisation des RCSF mobiles présentent plusieurs avantages par rapport à l'utilisation de nœuds statiques notamment au niveau de l'amélioration des performances du réseau. Parmi ceux-ci nous citons :

- Améliorer le débit ainsi que la sécurité et la fiabilité des données.
- Assurer une bonne couverture des zones à surveiller.
- Augmenter la durée de vie des nœuds capteurs en réduisant les communications multi-sauts.
- Eviter la perte d'information et gain de temps considérable.
- Faciliter le routage des données et assurer une connexité du réseau.
- Minimiser la consommation d'énergie des nœuds capteurs qui constitue l'élément primordial de toutes les solutions et protocoles proposés dans les RCSF.

Cette nouvelle classe de RCSF Mobiles représente un axe de recherche scientifique prometteur. Le nombre de travaux de recherche, relativement limité, que nous avons rencontrés dans notre étude bibliographique et pour lesquels il y a absence de résultats consensuels, nous a permis de se poser d'abord certaines questions de recherche relativement pour lesquelles il n'y a pas de réponse scientifique convaincantes avant de s'attaquer aux véritables challenges.

Dans cette thèse, nous avons proposé d'exploiter la mobilité à travers différentes contributions. Tout d'abord, et après un état de l'art riche en matière de mécanismes de routage dans les réseaux sans fils mobile, nous avons proposé un certain niveau de connexité au niveau des réseaux tolérant au délai (DTN). Ainsi, notre proposition assure à la fois routage et connexité, pour cela nous nous sommes basé sur la collaboration entre les éléments constituant le réseau (statiques et mobiles).

Notre deuxième contribution consiste en une intégration du modèle *Random Waypoint* dans le simulateur TOSSIM. Nous avons jugé que cette intégration est primordiale dont le but est de former une plateforme d'exécution pour notre prochaine collaboration. Cette intégration pourrait être exploitée par la communauté des chercheurs ayant pour but de simuler leurs résultats de travaux qui se sont basés sur la mobilité. Cette exploitation est assurée soit par invite de commande ou même par une interface conviviale permettant de sélectionner les paramètres de mobilité pour un scénario donné.

Au niveau du dernier chapitre nous avons détaillé tout d'abord notre troisième contribution qui consiste à assurer le routage sur la base du modèle de mobilité *Random Waypoint*. En effet, le modèle *Random Waypoint* dans son état natif ne permet pas d'assurer un routage optimal (en matière de délai de bout en bout et du taux de paquets reçus), pour cela nous avons opté à appliquer quelques mises à jour sur ce modèle à travers des fonctions et des méthodes qui sont incarnées dans le modèle *Random Waypoint* de base. Nous avons prouvé par simulation que notre proposition permet d'optimiser le routage comparé à une utilisation simple du modèle *Random Waypoint*.



Par la suite, nous avons présenté notre contribution qui nous a permis de bien assimiler les secrets relatifs à la consommation énergétique au niveau d'un nœud capteur comme au niveau du réseau complet. Notre contribution présente une solution concurrente à d'autres existantes dans la littérature, permettant ainsi de faire fonctionner le réseau avec une consommation énergétique raisonnable qui permet de prolonger sa durée de vie.

Les bons résultats de simulation ne signifient pas que nos différentes contributions sont d'un degré d'optimalité extrême ! En effet, il existe plusieurs points à améliorer. Nous proposons en perspectives de ce travail de thèse les travaux de recherches futures suivants :

- Exploiter la mobilité pour recharger les batteries des nœuds capteurs. L'opération de rechargement sans fils peut être étudiée par un problème d'optimisation de chemin emprunté par les chargeurs mobiles suivant l'un des modèles de mobilité.
- La collecte de données avec plusieurs SB mobiles qui suivent bien entendu notre approche de mobilité R-RWP, pour cela il faudra diviser le réseau en plusieurs parties distinctes où chaque SB opère dans une partie bien définie du réseau.
- L'amélioration de notre deuxième contribution, en adoptant une intégration de plusieurs modèles de mobilité dans le simulateur TOSSIM.
- Nous pouvons augmenter la complexité d'implémenter la mobilité où nous pouvons utiliser un modèle de mobilité de groupe (tel que le RPGM) pour gérer les déplacements des nœuds capteurs, une étude comparative avec notre approche R-RWP est souhaitable.
- Un autre aspect lié à la sécurité des communications et à l'authentification des éléments mobiles pourra faire l'objet de plusieurs études complémentaires à ce sujet.
- L'implémentation de notre approche R-RWP sur des capteurs réels (tels que : Tmote Sky, MICA, Imote ou BTnode) représente une autre perspective de notre travail, qui permettra d'évaluer les performances de nos contributions dans le monde réel.

Pour être plus complète encore, la présente recherche pourrait être renforcée par des scénarios réels, permettant ainsi de pouvoir connaître précisément l'efficacité de nos contributions.

La proposition de nouveaux protocoles de routage dédiés aux réseaux mobiles n'est pas une tâche facile en l'absence d'outils dédiés. Ce qui se fait actuellement est d'adopter les résultats de simulation afin de modéliser au mieux les protocoles proposés, même si certains efforts se font mais l'utilisation des traces réelles et étudier la faisabilité de la modélisation du protocole reste toujours une alternative de choix et une perspective assez intéressante.

## Bibliographie

- [1] Ben Liang and Zygmunt J. Haas, "Predictive distance-based mobility management for multidimensional PCS networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 3, pp. 718-732, October 2003.
- [2] Josh Broch, David A. Maltz, David B. Johnson, Yih-Chun Hu, and Jorjeta Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," *MobiCom '98 Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 85-97, 1998.
- [3] Xiaoyan Hong, Mario Gerla, Guangyu Pei, and Ching-Chuan Chiang, "A Group Mobility Model for Ad-Hoc Wireless Networks," *MSWiM '99 Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 53-60, 1999.
- [4] Saad Ahmed Munir et al., "Mobile wireless sensor network: architecture and enabling technologies for ubiquitous computing," *Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, AINAW '07. 21st International Conference on*, vol. 2, pp. 113-120, May 2007.
- [5] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, and Andrea Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: a survey," *Ad Hoc Networks journal*, vol. 7, no. 3, pp. 537 - 568, May 2009.
- [6] Wei Wang, Vikram Srinivasan, and Kee-Chaing Chua, "Extending the lifetime of wireless sensor networks through mobile relays," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 16, no. 5, pp. 1108-1120, October 2008.
- [7] M. Yarvis et al., "Exploiting heterogeneity in sensor networks," *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, August 2005.
- [8] Yinying Yang, Mirela I. Fonoage, and Mihaela Cardei, "Improving network lifetime with mobile wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 33, no. 4, pp. 409–419, March 2010.
- [9] K. Dantu et al., "Robomote: enabling mobility in sensor networks," *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium on*, June 2005.
- [10] U. Lee et al., "Efficient data harvesting in mobile sensor platforms," *Pervasive Computing and Communications Workshops, 2006. PerCom Workshops 2006. Fourth Annual IEEE International Conference on*, March 2006.
- [11] S. Olariu and I. Stojmenovic, "Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting," *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, April 2006.
- [12] F. Yu, S. Park, E. Lee, and S. -H. Kim, "Elastic routing: a novel geographic routing for mobile sinks in wireless sensor networks," *IET Communications*, vol. 4, no. 6, pp. 716 - 727, April 2010.
- [13] Lynn Choi, Jae Kyun Jung, Byong-Ha Cho, and Hyohyun Choi, "M-Geocast: Robust and Energy-Efficient Geometric Routing for Mobile Sensor Networks," in *Software Technologies for Embedded and Ubiquitous Systems*. Korea: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 304 - 316.

- [14] GETSY S SARA, NEELAVATHY PARI S., and SRIDHARAN D., "Energy efficient ad hoc on demand multipath distance vector routing protocol," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 10 – 12, November 2009.
- [15] Leila Chelouah, Fouzi Semchedine, and Louiza Bouallouche-Medjkoune, "Localization protocols for mobile wireless sensor networks: A survey," *Computers & Electrical Engineering (2017)*., 2017.
- [16] Quazi Mamun, "A qualitative comparison of different logical topologies for wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 12, no. 11, pp. 14887-14913, 2012.
- [17] Sharmi Sankar, H. Ranganathan, and S. Venkatasubramanian, "Venkatasubramanian S. A study on next generations heterogeneous sensor networks," in *5th IEEE GCC Conference & Exhibition*, Kuwait, 2009, pp. 1-4.
- [18] Amit Rathee, Randeep Singh, and Abhishilpa Nandini, "Wireless sensor network— challenges and possibilities," *International Journal of Computer Applications*, vol. 140, no. 2, 2016.
- [19] Nabil Sabor, Shigenobu Sasaki, Mohammed Abo-Zahhad, and Sabah M. Ahmed, "A comprehensive survey on hierarchical-based routing protocols for mobile wireless sensor networks: Review, taxonomy, and future directions," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 23, 2017.
- [20] Velmani Ramasamy, "Mobile Wireless Sensor Networks: An Overview," in *Wireless Sensor Networks - Insights and Innovations*, CC BY 3.0 license, Ed., 2017, ch. 1.
- [21] Wendi Rabiner Heinzelman, Joanna Kulik, and Hari Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks," *MobiCom '99 Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 174-185 , August 1999.
- [22] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, "Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks," *obiCom '00 Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 56-67 , 2000.
- [23] Guangcheng Huo and Xiaodong Wang, "An opportunistic routing for mobile wireless sensor networks based on RSSI," *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008. WiCOM '08. 4th International Conference on*, pp. 1–4, October 2008.
- [24] Lian Li, Limin Sun, Jian Ma, and Canfeng Chen, "A receiver-based opportunistic forwarding protocol for mobile sensor networks," *Distributed Computing Systems Workshops, 2008. ICDCS '08. 28th International Conference on*, pp. 198–203, June 2008.
- [25] Andrea Munari, Wolfgang Schott, and Sukanya Krishnan, "Energy efficient routing in mobile wireless sensor networks using mobility prediction," *Local Computer Networks, 2009. LCN 2009. IEEE 34th Conference on*, pp. 514–521, October 2009.
- [26] Le Zou, Mi Lu, and Zixiang Xiong, "PAGER-m: a novel location based routing protocol for mobile sensor networks," *Proceedings of first international workshop on broadband wireless services and applications*, 2004.
- [27] Kihyun Kim, Jeongbae Yun, Jangkyu Yun, Byeongjik Lee, and Kijun Han, "A location based routing protocol in mobile sensor networks," *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conference on*, pp. 1342–1345, February 2009.
- [28] A. Sivagami, K. Pavai, D. Sridharan, and M. S. A. V. Satya, "Design issues on tree based aggregation algorithms in wireless sensor networks," *International Journal of IT and Knowledge Management*, vol. 1, no. 2, pp. 449–462, 2008.

- [29] Xiaoxia Huang, Hongqiang Zhai, and Yuguang Fang, "Robust cooperative routing protocol in mobile wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 5278 - 5285, December 2008.
- [30] K. Muthukumar, K. Chitra, and C. Selvakumar, "An energy efficient clustering scheme using multilevel routing for wireless sensor network," *Computers & Electrical Engineering*, October 2017.
- [31] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*, January 2000.
- [32] Santar Pal Singh and S.C. Sharma, "A survey on Cluster Based Routing Protocols in Wireless Sensor Networks," *International Conference on Advanced Computing Technologies and Applications (ICACTA)*, vol. 45, pp. 687 – 695, 2015.
- [33] Liliana M. Arboleda C and N. Nasser, "Cluster based routing protocol for mobile sensor networks," *Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks, ACM*, p. 24, August 2006.
- [34] S. S. Getsy, S. R. Kalaiarasi, P. Neelavathi, and D. Sridharan, "Energy efficient mobile wireless sensor network routing protocol," *Lecture notes of computer science*, pp. 642-650, 2010.
- [35] Jae-Min Choi, Younb-Bok Cho, Sang-Su Choi, and Sang-Ho Lee, "A Cluster Header-based Energy-efficient Mobile Sink supporting Routing Protocol in wireless sensor networks," *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2009. ECTI-CON 2009. 6th International Conference on*, vol. 2, pp. 648 - 651, May 2009.
- [36] Kisuk Kweon, Hojin Ghim, Jaeyoung Hong, and Hyunsoo Yoon, "Grid-Based Energy-Efficient Routing from Multiple Sources to Multiple Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks," *Wireless Pervasive Computing, 2009. ISWPC 2009. 4th International Symposium on*, pp. 1 - 5, February 2009.
- [37] Sanu Thomas and Mathew Thomaskutty, "Lossless address data compression using quadtree clustering of the sensors in a grid based WSN," *Ad Hoc Networks*, vol. 56, pp. 84-95, Mars 2017.
- [38] R. Ramanathan and R. Rosales-Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment," *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings*, vol. 2, pp. 404-413, 2000.
- [39] N. Ababneh and S. Selvadurai, "Topology control algorithms for wireless sensor networks: an overview," *International Journal on Wireless & Optical Communications*, vol. 03, no. 01, pp. 49-68, 2006.
- [40] Gaurav Srivastava, Paul Boustead, and Joe F. Chicharo, "A Comparison of Topology Control Algorithms for Ad-Hoc Networks," *Proceedings of the 2003 Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference*, December 2003.
- [41] Tai-Jung Chang, Kuochen Wang, and Yi-Ling Hsieh, "A color theory based energy efficient routing algorithm for mobile wireless sensor networks," *Computer Networks*, vol. 52, no. 3, pp. 531 – 541, February 2008.
- [42] Charles E. Perkins,., 2008, pp. 225–226.
- [43] K. Sharif, T. A. Dahlberg, and L. Cao, "Anycast based lightweight routing protocol for mobile sink discovery in sensor networks," *7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp. 1-2, January 2010.

- [44] F. Zhao and L. J. Guibas, "Wireless sensor networks—an information processing approach," *Morgan Kaufmann - Amsterdam: Elsevier*, 2004.
- [45] L. T. Nguyen, X. Defago, R. Beuran, and Y. Shinoda, "Energy efficient routing scheme for mobile wireless sensor networks," *IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems*, pp. 568-572, October 2008.
- [46] W. W. Huang, Y. L. Peng, J. Wen, and M. Yu, "Energy efficient multihop hierarchical routing protocol for wireless sensor networks," *Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009. NSWCTC'09. IEEE International Conference on*, vol. 2, pp. 469-472, April 2009.
- [47] J. N. Al-Karaki and I. T. Al-Malkawi, "On energy efficient routing for wireless sensor networks," *Innovations in Information Technology, 2008. IIT 2008. International Conference on*, pp. 465-469, December 2008.
- [48] K. Yuen, B. Liang, and B. Li, "A distributed framework for correlated data gathering in sensor network," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 578-593, 2008.
- [49] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz, "MAC protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 4, pp. 115-121, 2006.
- [50] M. Nabi, M. Blagojevic, M. Geilen, T. Basten, and T. Hendriks, "MCMAC: an optimized medium access control protocol for mobile clusters in wireless sensor networks," *7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 1-9, June 2010.
- [51] D. Gavidia and M. Van Steen, "A probabilistic replication and storage scheme for large wireless networks of small devices," *5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, pp. 469-476, September 2008.
- [52] Feng Li, Lei Ju, and Zhiping Jia, "Data aggregation framework for energy-efficient WirelessHART networks," *Journal of Systems Architecture*, vol. 63, pp. 70-79, 2016.
- [53] T. He, J. A. Stankovic, C. Lu, and T. Abdelzaher, "SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks," *IEEE - Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*, pp. 46-55, May 2003.
- [54] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," *IEEE personal communications*, vol. 7, no. 5, pp. 16-27, 2000.
- [55] O. Chipara et al., "Real-time Power-Aware Routing in Sensor Networks," *14th IEEE International Workshop on Quality of Service*, pp. 83-92, June 2006.
- [56] O. Deepa and J. Suguna, "An optimized QoS-based clustering with multipath routing protocol for wireless sensor networks," *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, December 2017.
- [57] J. Deng, R. Han, and S. Mishra, "INSENS : Intrusion-Tolerant Routing in Wireless Sensor Networks," University of Colorado, Colorado, Technical Report CU-CS-939-02, 2003.
- [58] Suk-Bok Lee and Yoon-Hwa Choi, "A secure alternate path routing in sensor networks," *ELSEVIER Computer Communications*, pp. 153-165, August 2006.
- [59] jian yin and sanjay madria, "SecRout : A Secure routing protocol for sensor networks," *20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, vol. 1, p. 6, April 2006.
- [60] Suraj Sharma and Sanjay Kumar, "A Survey on Secure Hierarchical routing protocols in Wireless Sensor Networks," *ACM Proceedings of the 2011 International Conference on Communication, Computing & Security*, pp. 146-151, February 2011.

- [61] Anthony D. Wood and Tian He Lei Fang, "SIGF : A Family of configurable, secure routing protocols for wireless sensor networks," *ACM Proceedings of the fourth ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks*, pp. 35-48, October 2006.
- [62] S. Burleigh, A. Hooke, and L. Torgerson et al, "Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary internet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 6, pp. 128-136, 2003.
- [63] K Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," *ACM Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp. 27-34, August 2003.
- [64] M. Grossglauser and D. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings*, vol. 3, no. 4, pp. 1360-1369, 2001.
- [65] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, "Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks," *ACM Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking*, pp. 252-259, August 2005.
- [66] T. Small and Z. J. Haas, "The shared wireless infostation model: a new ad hoc networking paradigm," *ACM Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp. 233-244, June 2003.
- [67] R. C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data MULEs: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*, pp. 30 - 41, May 2003.
- [68] L. J. Chen, C. H. Yu, T. Sun, Y. C. Chen, and H. H. & Chu, "A hybrid routing approach for opportunistic networks," *ACM Proceedings of the 2006 SIGCOMM workshop on Challenged networks*, pp. 213-220, September 2006.
- [69] Y. Liao, K. Tan, Z. Zhang, and L. Gao, "Combining erasurecoding and relay node evaluation in delay tolerant network routing," *Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2006.
- [70] Y. Liao, K. Tan, Z. Zhang, and L. Gao, "Estimation based erasure-coding routing in delay tolerant networks," *ACM Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*, pp. 557-562, July 2006.
- [71] S. Jain, K. Fall, and R. Patra, "Routing in a delay tolerant network," *Proceedings of the Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM '04)*, vol. 34, no. 4, pp. 145-158, October 2004.
- [72] P. Juang et al., "Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet," *Proceedings of the 10th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, vol. 37, pp. 96-107, October 2002.
- [73] J. Leguay, T. Friedman, and V Conan, "Evaluating MobySpace Based Routing Strategies in Delay Tolerant Networks," *Wireless communications and mobile computing*, vol. 7, no. 10, pp. 1171-1182, 2007.
- [74] B. Karp and H. T. Kung, "greedy perimeter stateless routing for wireless networks," *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 243-254, August 2000.
- [75] P. Hui and J. Crowcroft, "How small labels create big improvements," *Pervasive Computing and Communications Workshops, 2007. PerCom Workshops' 07. Fifth Annual IEEE International Conference on*, pp. 65-70, March 2007.

- [76] F. Li and J. Wu, "LocalCom: a community-based epidemic forwarding scheme in disruption-tolerant networks," *6th annual IEEE communications society conference on sensor, mesh and ad hoc communications and networks*, pp. 1-9, June 2009.
- [77] J. Liu, M. Liu, H. Gong, and J. Zeng, "Expected shortest path routing for social-oriented intermittently connected mobile network," *Journal of Convergence Information Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 94–101, 2012.
- [78] H. Gong, X. Wang, L. Yu, L. Wu, and C. Song, "Hot area based routing protocol for delay tolerant mobile sensor network," *Advances in Information Sciences & Service Sciences*, vol. 4, no. 15, 2012.
- [79] H. Luo, F. Ye, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, "TTDD: two-tier data dissemination in large-scale wireless sensor networks," *Wireless networks*, vol. 11, pp. 161-175, 2005.
- [80] J. Luo, J. Panchard, M. Piórkowski, M. Grossglauser, and J. P. Hubaux, "MobiRoute: Routing towards a mobile sink for improving lifetime in sensor networks," *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS 2006) - Springer Berlin Heidelberg*, pp. 480-497, June 2006.
- [81] E. Kuiper and S. Nadjm-Tehrani, "Geographical routing with location services in intermittently connected MANETs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 592-604, 2011.
- [82] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Çayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, 2002.
- [83] Yuanli Wang, Xianghui Liu, and Jianping Yin, "Requirements of Quality of Service in Wireless Sensor Network," *International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies (ICNICONSMCL'06)*, p. 116, April 2006.
- [84] M.K. Jeya Kumar and R.S. Rajesh, "A Survey of MANET Routing Protocols in Mobility Models," *International Journal of Soft Computing*, vol. 4, no. 3, pp. 136-141, 2009.
- [85] Subhankar Dhar, "MANET: Applications, Issues, and Challenges for the Future," *International Journal of Business Data Communications and etworking*, vol. 1, no. 2, pp. 66-92, 2005.
- [86] Jun Luo and Jean-Pierre Hubaux, "Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks," *INFOCOM 2005, 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 3, pp. 1735 - 1746, March 2005.
- [87] S. R. Gandham, M. Dawande, R. Prakash, and S. Venkatesan, "Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile BSs," *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, vol. 1, pp. 377 - 381, December 2003.
- [88] Z. M. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis, and C. Petrioli, "Exploiting Sink Mobility for Maximizing Sensor Networks Lifetime," *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, p. 287a, January 2005.
- [89] Arnab Chakrabarti, Ashutosh Sabharwal, and Behnaam Aazhang, "Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks," *IPSN'03 Proceedings of the 2nd international conference on Information processing in sensor networks*, pp. 129-145, 2003.
- [90] Torsha Banerjee, Bin Xie, Jung Hyun Jun, and Dharma P. Agrawal, "LIMOC: Enhancing the Lifetime of a Sensor Network with Mobile Clusterhead," *IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, pp. 133 - 137, October 2007.
- [91] Jim Butler, "Robotics and Microelectronics: Mobile Robots as Gateways into Wireless Sensor," *Technology@Intel Magazine*, 2003.

- [92] G. T. Sibley, M. H. Rahimi, and G. S. Sukhatme, "Robomote: a tiny mobile robot platform for large-scale ad-hoc sensor networks," *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference*, vol. 2, pp. 1143 - 1148, 2002.
- [93] Diane Cook and Sajal Kumar Das, "Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications," *New York: John Wiley*, pp. 13-15, 2004.
- [94] Paolo Santi, "Topology control in wireless ad hoc and sensor networks," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 37, no. 2, pp. 164-194, June 2005.
- [95] Paolo Costa, Matteo Cesana, Stefano Brambilla, Luca Casartelli, and Luca Pizziniaco, "A cooperative approach for topology control in Wireless Sensor Networks," *Journal - Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, no. 5, pp. 526-541, October 2009.
- [96] Xiaoyu Chu and Harish Sethu, "Cooperative topology control with adaptation for improved lifetime in wireless ad hoc networks," *INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE*, pp. 262 - 270, March 2012.
- [97] Masoumeh Haghpanahi, Mehdi Kalantari, and Mark Shayman, "Topology control in large-scale wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 975-990, May 2013.
- [98] Fei Dai and Jie Wu, "On Constructing k-Connected k-Dominating Set in Wireless Networks," *19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, p. 81a, April 2005.
- [99] Jie Wu, M. Cardei, Fei Dai, and Shuhui Yang, "Extended Dominating Set and Its Applications in Ad Hoc Networks Using Cooperative Communication," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 17, no. 8, pp. 851 - 864, August 2006.
- [100] Pedro M. Wightman and Miguel A. Labrador, "A3: A Topology Construction Algorithm for Wireless Sensor Networks," *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1 - 6, December 2008.
- [101] Sajjad Rizvi, Hassaan Khaliq Qureshi, Syed Ali Khayam, Veselin Rakocevic, and Muttukrishnan Rajarajan, "A1: An energy efficient topology control algorithm for connected area coverage in wireless sensor networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 35, no. 2, pp. 597-605, March 2012.
- [102] S. Roslin and C. Gomathy, "A Novel Topology Control Algorithm for Energy Efficient Wireless Sensor Network," *International Conference on Network and Electronics Engineering IPCSIT*, vol. 11, pp. 76-81, 2011.
- [103] Haidar Safa, Wassim El-Hajj, and Hanan Zoubian, "A robust topology control solution for the sink placement problem in WSNs," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 39, pp. 70-82, March 2014.
- [104] Ruozi Sun, Jian Yuan, Ilsun You, Xiuming Shan, and Yong Ren, "Energy-aware weighted graph based dynamic topology control algorithm," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 19, pp. 773-1781, 2011.
- [105] Xiaoyu Chu and Harish Sethu, "An Energy Balanced Dynamic Topology Control Algorithm for Improved Network Lifetime," *Computer Science Networking and Internet Architecture*, September 2013.
- [106] Muhammad Asghar Khan, Asfandyar Khan, Said Khalid Shah, and Azween Abdullah, "An Energy Efficient Color Based Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks," *Wireless Sensor Network*, vol. 5, no. 1, pp. 1-7, January 2013.



- [107] Chao-Yang Lee, Liang-Cheng Shiu, Fu-Tian Lin, and Chu-Sing Yang, "Distributed topology control algorithm on broadcasting in wireless sensor network," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 4, pp. 1186–1195, July 2013.
- [108] Stavros Athanassopoulos, Christos Kaklamanis, Gerasimos Kalfountzos, Panagiota Katsikouli, and Evi Papaioannou, "Simulation of Topology Control Algorithms in Wireless Sensor Networks Using Cellular Automata," *International Journal of Communications, Network & System Sciences*, vol. 6, no. 7, pp. 333-345, July 2013.
- [109] Dawei Gong, Miao Zhao, and Yuanyuan Yang, "Topology control and channel assignment in lossy wireless sensor networks," *Teletraffic Congress (ITC), 2011 23rd International*, pp. 222 - 229, September 2011.
- [110] Junghun Ryu, Jaewook Yu, Eric Noel, and K. Wendy Tang, "Borel Cayley Graph based Topology Control for Consensus Protocol in Wireless Sensor Networks," *ISRN Sensor Networks*, vol. 2013, 2013.
- [111] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and Y. -M. Wang, "Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks," *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings.*, vol. 3, pp. 1388 - 1397, April 2001.
- [112] Zhuochuan Huang, Chien-Chung Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo, "Topology control for ad hoc networks with directional antennas," *Computer Communications and Networks, 2002. Proceedings. Eleventh International Conference on*, pp. 16 - 21, October 2002.
- [113] Jianping Pan, Y. Thomas Hou, Lin Cai, Yi Shi, and Sherman X. Shen, "Topology control for wireless sensor networks," *MobiCom '03 Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 286-299, 2003.
- [114] Wenzhong Guo, Bin Zhang, Guolong Chen, Xiaofeng Wang, and Naixue Xiong, "A PSO-Optimized Minimum Spanning Tree-Based Topology Control Scheme for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, pp. 1- 14, April 2013.
- [115] Nan Xi Luo and Jie Bao, "A Topology Control Algorithm Based on Pass Loss for Wireless Sensor Network," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 347 – 350, pp. 677-681, 2013.
- [116] Rajmohan Rajaraman, "Topology Control and Routing in Ad hoc Networks: A Survey," *ACM SIGACT News*, vol. 33, no. 2, pp. 60-73, June 2002.
- [117] Tapiwa M. Chiwewe and Gerhard P. Hancke, "A distributed topology control technique for low interference and energy efficiency in wireless sensor networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 1, pp. 11 - 19, February 2012.
- [118] Jennifer Yick, Biswanath Mukheljee, and Dipak Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330, August 2008.
- [119] Mihaela Cardei and Jie Wu, "Coverage in wireless sensor networks," *Handbook of Sensor Networks*, 2004.
- [120] Jung Hyun Jun, Bin Xie, and Dharma P. Agrawal, "Wireless Mobile Sensor Networks: Protocols and Mobility Strategies," in *Guide to Wireless Sensor Networks*. London: Springer London, 2009, pp. 607-634.
- [121] Christian Bettstetter, "On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop," *MobiHoc '02 Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pp. 80 - 91, June 2002.

- [122] S. Zhou, M. -Y. Wu, and W. Shu, "Finding optimal placements for mobile sensors: wireless," *Emerging Technologies: Frontiers of Mobile and Wireless Communication, 2004. Proceedings of the IEEE 6th Circuits and Systems Symposium on*, vol. 2, pp. 529 - 532, June 2004.
- [123] Benyuan Liu, Peter Brass, Olivier Dousse, Philippe Nain, and Don Towsley, "Mobility improves coverage of sensor networks," *MobiHoc '05 Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 300-308, 2005.
- [124] Andrew Howard, Maja J. Mataric, and Gaurav S. Sukhatme, "Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem," in *Distributed Autonomous Robotic Systems 5*. Japan: Springer Japan, 2002, ch. 8, pp. 299-308.
- [125] Guiling Wang, Guohong Cao, and T. La Porta, "Movement-assisted sensor deployment," *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 4, pp. 2469 - 2479, March 2004.
- [126] R.M. Aarts and E.W. Weisstein. Wolfram MathWorld. [Online]. <http://mathworld.wolfram.com/FubiniTheorem.html>
- [127] J.-H. Chang and L. Tassiulas, "Routing for maximum system lifetime in wireless ad hoc networks," *Proceedings of 37-TH ANNUAL ALLERTON CONFERENCE ON COMMUNICATION, CONTROL, AND COMPUTING*, 1999.
- [128] Manish Bhardwaj, Timothy Garnett, and Anantha P. Chandrakasan, "Upper bounds on the lifetime of sensor," *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, vol. 3, pp. 785 - 790, 2001.
- [129] Douglas M. Blough and Paolo Santi, "Investigating upper bounds on network lifetime extension for cellbased energy conservation techniques in stationary ad hoc networks," *MobiCom '02 Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 183-192, 2002.
- [130] Chien-Fu Cheng, Sheng-Ling Lin, Chen-Chuan Wang, and Heng Li., "Trail-based routing algorithms for WSNs with uncontrolled sink mobility," *Computer Communications*, vol. 106, pp. 57-74, July 2017.
- [131] Christian Bettstetter, "Smooth is better than sharp: A random mobility model for simulation of wireless networks," *4th ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 19-27, 2001.
- [132] Dirk Helbing, "Traffic and related self-driven many-particle systems," *Reviews of Modern Physics*, vol. 73, no. 4, pp. 1067-1141, 2001.
- [133] D. Lam, D.C. Cox, and J. Widom, "Teletraffic modeling for personal communication services," *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 2, pp. 79 - 87, February 1997.
- [134] McDonald, A. Bruce, and Taieb F. Znati, "A mobility-based framework for adaptive clustering in wireless ad hoc networks," vol. 17, pp. 1466-1487, August 1999.
- [135] L. Breslau et al., "Advances in Network Simulation," *IEEE Computer*, vol. 33, no. 5, pp. 59 - 67, May 2000.
- [136] Tracy Camp, Jeff Boleng, and Vanessa Davies, "A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research," *Wireless Communications for Mobile Computing (WCMC) : Special issue on Mobile Ad Hoc Networking : Research, Trends and Applications.*, vol. 2, no. 5, pp. 483-502, 2002.

- [137] E.M. Royer, P.M. Melliar-Smith, and L.E. Moser, "An Analysis of the Optimum Node Density for Ad hoc Mobile Networks," *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, August 2002.
- [138] V.S. Frost and B. Melamed, "Traffic modeling for telecommunications networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 32, no. 3, pp. 70 – 81, March 1994.
- [139] Amit Jardosh, Elizabeth M. Belding-Royer, Kevin C. Almeroth, and Subhash Suri, "Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks," *MobiCom - Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, vol. 03, pp. 217 - 229, 2003.
- [140] Christian Bettstetter, Hannes Hartenstein, and Xavier Pérez-Costa, "Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model," vol. 10, no. 5, pp. 555-567, 2004.
- [141] Jean-Daniel Madjo, Thomas Kunz, Yifeng Zhou, Marc St-Hilaire, and Me Biomo, "Unmanned Aerial ad Hoc Networks: Simulation-Based Evaluation of Entity Mobility Models' Impact on Routing Performance," *Special Issue Unmanned Aerial Systems*, pp. 392-422, 2015.
- [142] Xavier Pérez-Costa, Christian Bettstetter, and Hannes Hartenstein, "Toward a mobility metric for comparable & reproducible results in ad hoc networks research," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, pp. 58-60, 2003.
- [143] Pasi Lassila, Esa Hyytiä, and Henri Koskinen, "Connectivity Properties of Random Waypoint Mobility Model for Ad Hoc Networks," in *Challenges in Ad Hoc Networking*, Springer US, Ed. Finland, 2005, vol. 197, pp. 159-168.
- [144] Michele Garetto and Emilio Leonardi, "Analysis of Random Mobility Models with Partial Differential Equations," vol. 6, no. 11, pp. 1204-1217, 2007.
- [145] Radhika Ranjan Roy, *Handbook of Mobile Ad Hoc Networks for Mobility Model*. United States: Springer Science+Business Media, 2011.
- [146] Fan Bai, Narayanan Sadagopan, and Ahmed Helmy, "IMPORTANT: a framework to systematically analyze the Impact of Mobility on Performance of Routing Protocols for Adhoc Networks," *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, vol. 2, pp. 825-835, 2003.
- [147] Jungkeun Yoon, Mingyan Liu, and Brian Noble, "Random Waypoint Considered Harmful," *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, vol. 2, pp. 1312-1321, 2003.
- [148] Jean-Yves Le Boudec and Milan Vojnovic, "Perfect Simulation and Stationary of a Class of Mobility," *24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*, vol. 4, pp. 2743-2754, 2005.
- [149] Wei-jen Hsu, Kashyap Merchant, Haw-wei Shu, Chih-hsin Hsu, and Ahmed Helmy, "Weighted Waypoint Mobility Model and its Impact on Ad," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 9, no. 1, pp. 59-63, January 2005.
- [150] Xiaole Bai, Kumar Santosh, Dong Xuan, Ziqiu Yun, and Ten H. Lai, "Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity," *MobiHoc '06 Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 131-142, 2006.
- [151] David B. Johnson and David A Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless," in *Mobile Computing*, Springer US, Ed. USA: Kluwer Academic Publishers, 1996, vol. 353, ch. 5, pp. 153-181.
- [152] Young-Bae Ko and Nitin H. Vaidya, "Location-aided routing (lar) in mobile ad hoc networks.," *Wireless Networks*, vol. 6, no. 4, 2000.

- [153] Zygmunt J. Haas, Joseph Y. Halpern, and Li Li, "Gossip-based ad hoc routing," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 14, no. 3, pp. 479-491, 2006.
- [154] Xiang-Yang Li, Kousha Moaveninejad, and Ophir Frieder, "Regional gossip routing for wireless," *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, no. 1-2, pp. 61-77, 2005.
- [155] A. Kansal et al., "Controlled mobility for sustainable wireless sensor networks," *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*, pp. 1 - 6, October 2004.
- [156] S. Ganeriwal, A. Kansal, and M. B. Srivastava, "Self aware actuation for fault repair in sensor networks," *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, vol. 5, pp. 5244 - 5249, April 2004.
- [157] M. I. Khan, Wilfried Gansterer, and Günter Haring, "Congestion avoidance and energy efficient routing protocol for wireless sensor networks with mobile sink," *Journal of Networks*, vol. 2, no. 6, pp. 42 - 49, December 2007.
- [158] Branislav Kusy, HyungJune Lee, Martin Wicke, Nikola Milosavljevic, and Leonidas Guibas, "Predictive QOS routing to mobile sinks in wireless sensor networks," *Information Processing in Sensor Networks, 2009. IPSN 2009. International Conference on*, pp. 109 - 120, April 2009.
- [159] Stefano Basagni, Alessio Carosi, Emanuel Melachrinoudis, Chiara Petrioli, and Z. Maria Wang, "Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime," *Journal of Wireless Networks*, vol. 14, no. 6, pp. 831- 858, December 2008.
- [160] Daniele Puccinelli, Matthew Brennan, and Martin Haenggi, "Reactive sink mobility in wireless sensor networks," *MobiOpp '07 Proceedings of the 1st international MobiSys workshop on Mobile opportunistic networking*, pp. 25 - 32, 2007.
- [161] Luca Borsani, Sergio Guglielmi, Alessandro Redondi, and Matteo Cesana, "Tree-based routing protocol for mobile Wireless Sensor Networks," *Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS), 2011 Eighth International Conference on*, pp. 164 - 170, January 2011.
- [162] Zhi-feng Duan, Fan Guo, Ming-xing Deng, and Min Yu, "Shortest Path Routing Protocol for Multi-layer Mobile Wireless Sensor Networks," *Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009. NSWCTC '09. International Conference on*, pp. 106 - 110, April 2009.
- [163] Leila Ben Saad and Bernard Tourancheau, "Sinks Mobility Strategy in IPv6-Based WSNs for Network Lifetime Improvement," *New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2011 4th IFIP International Conference on*, pp. 1 - 5, February 2011.
- [164] Hassan Echoukairi, Amine Kada, Khalid Bouragba, and Mohammed Ouzzif, "Effect of Mobility Models on Performance of Novel Centralized Clustering Approach based on K-means for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 10, pp. 2575-2580, 2017.
- [165] Yan Wan, Kamesh Namuduri, Yi Zhou, and Shengli Fu, "A smooth-turn mobility model for airborne networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 7, pp. 3359 - 3370, 2013.
- [166] Philip Levis, Nelson Lee, Matt Welsh, and David Culler, "TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications," *SenSys '03 Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 126-137, 2003.
- [167] Jiakai Li and Gursel Serpen, "Simulating Heterogeneous and Larger-Scale Wireless Sensor Networks with TOSSIM TinyOS Emulator," *Conference Organized by Missouri University of Science and Technology - Washington D.C.*, vol. 12, pp. 374-379, 2012.

- [168] David Gay et al., "The nesC Language: A Holistic Approach to Network Embedded Systems," *ACM SIGPLAN Notices - Supplemental issue*, vol. 49, no. 4, pp. 41-51, 2014.
- [169] Michael Demmer, Philip Levis, August Joki, Eric Brewer, and David Culler, "Tython: a Dynamic Simulation Environment for Sensor Networks," *Technical Report UCB/CSD-05-1372, EECS Department, University of California*, 2005.
- [170] Wenrui Zhao and Ammar Mostafa H, "Message ferrying: Proactive routing in highly-partitioned wireless ad hoc networks.," *Distributed Computing Systems, 2003. FTDCS 2003. Proceedings. The Ninth IEEE Workshop on Future Trends of. IEEE*, pp. 308-314, May 2003.
- [171] Ricardo Silva, Jorge Sá Silva, and Fernando Boavida, "Mobility in wireless sensor networks—Survey and proposal," *Computer Communications*, vol. 52, pp. 1-20, October 2014.
- [172] Guiling Wang, Tom La Porta Guohong Cao, and Wensheng Zhang, "Sensor relocation in mobile sensor networks," *24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 4, pp. 2302-2312, Mars 2005.
- [173] Gregory J. Pottie and William J. Kaiser, "Wireless integrated network sensors," *Communications of the ACM*, vol. 43, no. 5, pp. 51-58, May 2008.
- [174] Fuji Ren, Yusheng Ji, Jie Li Yu Gu, "The Evolution of Sink Mobility Management in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 507-524, 2016.
- [175] Giuseppe Anastasi, Andrea Passarella Marco Conti, and Luciana Pelusi, "Mobile-relay forwarding in opportunistic networks," *Adaptation and Cross Layer Design in Wireless Networks*, vol. 21, p. 389, 2008.
- [176] Mario Di Francesco, Sajal K. Das, and Giuseppe Anastasi, "Data collection in wireless sensor networks with mobile elements," *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 8, no. 1, p. 7, 2011.
- [177] Yaoyao Gu, Eylem Ekici Doruk Bozdag, Fusun Ozguner, and Chang-Gun Lee, "Partitioning based mobile element scheduling in wireless sensor networks," *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, IEEE*, pp. 386-395, 2005.
- [178] Damla Turgut and Ladislau Bölöni, "Heuristic approaches for transmission scheduling in sensor networks with multiple mobile sinks," *The Computer Journal*, vol. 54, no. 3, pp. 332-344, Mars 2011.
- [179] Peter Terlecky, Brian Phelan, Amotz Bar-Noy, Theodore Brown, and Dror Rawitz, "Should I stay or should I go? Maximizing lifetime with relays," *Computer Networks*, vol. 70, pp. 210-224, 2014.
- [180] Ahcène Bounceur, "CupCarbon: a new platform for designing and simulating smart-city and IoT wireless sensor networks (SCI-WSN)," *the International Conference on Internet of things and Cloud Computing, ACM*, p. 1, Mars 2016.