



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)*

---

---

Présentée et soutenue le *13/11/2013* par :  
**JUAN GABRIEL BARROS GAVILANES**

**Réseaux de capteurs pour applications de suivi médical**

---

---

### JURY

ERIC GRESSIER-SOUDAN  
LILA BOUKHATEM  
MICHEL MAROT  
ANNE WEI  
ANDRÉ-LUC BEYLOT  
RAHIM KACIMI

Professeur d'Université  
Maître de Conférences HDR  
Professeur d'Université  
Professeur d'Université  
Professeur d'Université  
Maître de Conférences

Président du Jury  
Membre du Jury

---

#### École doctorale et spécialité :

*MITT : Domaine STIC : Réseaux, Télécoms, Systèmes et Architecture*

#### Unité de Recherche :

*Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (UMR 5505)*

#### Directeur(s) de Thèse :

*André-Luc BEYLOT et Anne WEI*

#### Rapporteurs :

*Michel MAROT et Lila BOUKHATEM*



À ma famille ...

---

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à témoigner ma gratitude à mes deux encadrants pour leur soutien tout au long de cette thèse. Merci à André-Luc Beylot, pour m'avoir encadré au cours de ces années. Je le remercie pour son aide, autant sur le plan scientifique qu'humain. Merci à Anne Wei, co-encadrante de cette thèse, pour le support moral et académique qu'elle m'a apporté pendant cette période de ma vie étudiante. Elle a toujours été prête à m'aider et à me donner des conseils.

Je souhaiterais ensuite remercier Michel Marot et Lila Boukhatem pour avoir accepté de relire mon travail et pour leurs commentaires constructifs. J'aimerais aussi remercier Riadh Dhaou pour les conversations intéressantes et enrichissantes que nous avons partagé tout au long du chemin.

Je n'oublierai bien évidemment pas tous les personnes qui ont fait mon quotidien pendant tout ce temps. Mes premiers collègues de bureau : Julien et Michael, les copains de thèse Razvan, Fabian, Tony, Mauricio, Baffing, Adnan, les amis du groupe du football et toutes les personnes qui ont partagé de quelque manière que ce soit, les temps merveilleux passés en France.

Finalmente me gustaría agradecer a las personas que son buenos embajadores de su país y que me supieron mostrar y brindar su verdadera amistad. Gracias a Hugo Hours y a su familia en la región PACA. De igual manera, agradezco de todo corazón a mi compañero de aventuras deportivas y guía turístico oficial, Patrice Raveneau.

---

## Résumé

Le maintien des personnes à domicile est une perspective sérieusement envisagée dans le contexte actuel de vieillissement de la population. Selon les statistiques, près d'un habitant sur trois aurait plus de 60 ans en 2050, contre un sur cinq en 2005. Cependant, les solutions actuelles de téléassistance (bouton alarme sur un collier par exemple) ont montré leurs limites.

La thèse consiste à étudier des applications du futur permettant de fournir à une personne maintenue à domicile ou à l'hôpital une meilleure solution alternative fondée sur les réseaux de capteurs, capable de mesurer certains de ses paramètres physiologiques et de transmettre des données importantes aux infirmières ou médecins. Ces applications doivent s'adapter aux besoins médicaux et avoir un coût économique faible.

Nous nous sommes focalisés sur des solutions de type réseaux de capteurs qui ont un coût de développement et de mise en œuvre faibles. Ce type de réseaux de capteurs offre de nouveaux services tels que la surveillance médicale et l'amélioration de la sécurité par la propagation d'alertes d'urgence. Cependant, la forte mobilité et le changement rapide de la topologie du réseau présentent un verrou scientifique et social.

En outre, l'interférence de différents capteurs augmente la difficulté d'implantation de ce genre de réseaux IEEE 802.15.4. Depuis ces dernières années, plusieurs solutions ont été étudiées, comme nous le verrons dans cette thèse.

Nous nous intéressons à la fiabilité de transmission dans cette thèse, car un réseau de capteurs est très limité par la capacité de calcul, de stockage et de transfert. Nous nous interrogeons dans un premier temps sur la meilleure méthode pour la livraison des données. Nous avons sélectionné les protocoles unicast et multicast issus du domaine MANET dans le but de comparer leurs avantages et inconvénients dans le contexte des applications de surveillance médicale. Nous nous sommes intéressés aux mécanismes de mise en place et au renforcement de la route dans chacun des protocoles. Les résultats

de cette première étude montrent que les protocoles multicast s'adaptent mieux aux applications, car ils permettent de réduire le nombre de paquets transmis dans le réseau.

Même si certains protocoles pourraient amener une meilleure performance (en ce qui concerne le débit utile) que d'autres, aucun protocole ne satisfait une application réelle.

Nous travaillons sur l'exploitation d'un réseau hétérogène en distinguant les nœuds forts et les nœuds faibles. Dans ce cadre, nous avons proposé une nouvelle approche, HMR, qui permet de mieux assurer la performance du réseau par rapport aux solutions existantes.

Une dernière problématique à étudier dans cette thèse est l'agrégation de données, car les données à transmettre dans le réseau sont souvent périodiquement générées avec des tailles très restreintes (quelques octets, par exemple). Nos études montrent que l'agrégation de données est une bonne solution.

Cette thèse a donné lieu à deux publications en conférences internationales avec comité de lecture.

# Table des matières

|   |          |
|---|----------|
| Table des matières  | vii      |
| Table des figures   | xi       |
| Nomenclature  | xiv      |
| Acronymes   | xv       |
| Glossary  | xvi      |
| <b>1 Introduction</b>                                     | <b>1</b> |
| 1.1 Motivation . . . . .                                  | 1        |
| 1.1.1 Choix de la technologie : ergonomie . . . . .       | 2        |
| 1.1.2 Application cible . . . . .                         | 3        |
| 1.2 Contributions . . . . .                               | 3        |
| <b>2 Applications de suivi médical</b>                    | <b>5</b> |
| 2.1 Exigences des applications de suivi médical . . . . . | 5        |
| 2.1.1 Les signaux vitaux . . . . .                        | 5        |
| 2.1.2 Paramètres généraux . . . . .                       | 6        |
| 2.1.3 Acquisition des signaux vitaux . . . . .            | 7        |
| 2.2 Les Applications sans fil . . . . .                   | 7        |
| 2.2.1 Architecture fonctionnelle . . . . .                | 8        |
| 2.2.2 Architecture protocolaire et technologies . . . . . | 10       |
| 2.3 Protocoles de routage . . . . .                       | 12       |
| 2.3.1 Unicast . . . . .                                   | 13       |
| 2.3.2 Broadcast . . . . .                                 | 13       |
| 2.3.3 Convergecast . . . . .                              | 13       |

## TABLE DES MATIÈRES

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.3.3.1  | ETX et ROLL . . . . .   | 14        |
| 2.3.3.2  | CTP . . . . .   | 14        |
| 2.3.4    | Multicast . . . . .   | 15        |
| 2.4      | Les modèles de mobilité à l'intérieur . . . . .   | 16        |
| 2.4.1    | Traces réelles . . . . .  | 17        |
| 2.4.2    | Modèles de mobilité . . . . .   | 17        |
| 2.4.2.1  | Random Way Point . . . . .  | 17        |
| 2.4.2.2  | Random Walk . . . . .   | 17        |
| 2.4.2.3  | Random Direction . . . . .  | 18        |
| 2.4.2.4  | Reference Point Group Mobility . . . . .  | 18        |
| 2.4.2.5  | Constraint Mobility . . . . .   | 18        |
| 2.4.2.6  | Les modèles mixtes . . . . .  | 19        |
| 2.4.3    | Comparaison . . . . .   | 19        |
| <b>3</b> | <b>Sélection d'un modèle de communication pour un système de suivi<br/>médical : Unicast vs Multicast ?</b> | <b>21</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .  | 21        |
| 3.2      | Description du système . . . . .  | 23        |
| 3.2.1    | Définition de système cible : Topologie . . . . .   | 23        |
| 3.2.2    | Le suivi de plusieurs personnes à la fois. . . . .  | 24        |
| 3.3      | Comparaison des différents modèles de diffusion (Unicast, Multicast). . . . .                               | 26        |
| 3.3.1    | AODV . . . . .  | 27        |
| 3.3.2    | ODMR . . . . .  | 27        |
| 3.3.3    | ADMR . . . . .  | 28        |
| 3.3.4    | PUMA . . . . .  | 29        |
| 3.3.5    | Spécificités de l'application cible . . . . .   | 29        |
| 3.4      | Évaluation des performances . . . . .   | 30        |
| 3.4.1    | Cadre . . . . .   | 30        |
| 3.4.1.1  | Sélection des paramètres. . . . .   | 31        |
| 3.4.2    | Scénarios de simulation . . . . .   | 33        |
| 3.4.3    | Métriques observées . . . . .   | 34        |
| 3.4.4    | Résultats et analyse de la simulation . . . . .   | 35        |
| 3.4.4.1  | Comparaison par protocole . . . . .   | 39        |
| 3.5      | Conclusion . . . . .  | 40        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>Analyse de l'hétérogénéité dans les réseaux de suivi médical</b> | <b>49</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 49        |
| 4.2      | Heterogeneous Multicast Routing (HMR) . . . . .                     | 50        |
| 4.2.1    | ODMR . . . . .  | 50        |
| 4.2.2    | HRM . . . . .   | 51        |
| 4.3      | Évaluation des performances . . . . .                               | 53        |
| 4.3.1    | Cadre . . . . .   | 53        |
| 4.3.2    | Scénarios de simulation . . . . .                                   | 55        |
| 4.3.3    | Métriques observées . . . . .                                       | 56        |
| 4.3.4    | Résultats et analyse de simulation . . . . .                        | 56        |
| 4.3.4.1  | Premier scénario . . . . .  | 56        |
| 4.3.4.2  | Deuxième scénario . . . . .   | 57        |
| 4.3.4.3  | Troisième scénario . . . . .  | 59        |
| 4.3.5    | Analyse globale des résultats . . . . .                             | 60        |
| 4.4      | Conclusion . . . . .  | 60        |
| <b>5</b> | <b>Agrégation dans un réseau hétérogène.</b>                        | <b>63</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .  | 63        |
| 5.2      | Agrégation . . . . .  | 63        |
| 5.2.1    | Les types de nœuds . . . . .  | 64        |
| 5.3      | Évaluation des performances . . . . .                               | 65        |
| 5.3.1    | Cadre . . . . .   | 65        |
| 5.4      | Plusieurs puissances de transmission . . . . .                      | 67        |
| 5.4.1    | Simulations . . . . .   | 68        |
| 5.4.2    | Résultats . . . . .   | 68        |
| 5.4.3    | Comparaison portée homogène / hétérogène. . . . .                   | 68        |
| 5.4.4    | Influence de la charge . . . . .                                    | 69        |
| 5.4.5    | Puissance homogène / hétérogène . . . . .                           | 70        |
| 5.4.6    | Conclusion . . . . .  | 70        |
| 5.5      | Scénarios de simulation - Agrégation . . . . .                      | 71        |
| 5.5.1    | Différences entre HMR Et Agrégation . . . . .                       | 71        |
| 5.5.2    | Métriques observées . . . . .                                       | 72        |
| 5.5.3    | Environnement de simulation . . . . .                               | 72        |
| 5.5.4    | Résultats de la simulation . . . . .                                | 72        |
| 5.5.5    | Taux de génération de données de 1 s . . . . .                      | 73        |
| 5.5.6    | Conclusion agrégation . . . . .                                     | 74        |

## TABLE DES MATIÈRES

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.6      | Analyse du mécanique d'agrégation . . . . .        | 75        |
| 5.6.1    | Le problème . . . . .                              | 75        |
| 5.6.2    | Changement du temporisateur d'agrégation . . . . . | 76        |
| 5.6.3    | Conclusion Problème avec l'agrégation . . . . .    | 77        |
| 5.6.4    | Agrégation : ODMR ou HMR . . . . .                 | 78        |
| 5.7      | Conclusions . . . . .                              | 79        |
| <b>6</b> | <b>Conclusions et Perspectives</b>                 | <b>81</b> |
| 6.1      | Conclusion . . . . .                               | 81        |
| 6.2      | Perspectives . . . . .                             | 83        |
|          | <b>Bibliographie</b>                               | <b>85</b> |
|          | <b>Bibliographie</b>                               | <b>93</b> |

# Table des figures

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Étapes d'un dispositif médical sans fil, pris de [2]. . . . .  | 9  |
| 2.2  | RWP/RW et RPGM dans une petite région . . . . .  | 16 |
| 2.3  | Skeleton droite pour le plan d'un hôpital . . . . .  | 18 |
| 2.4  | Les nœuds se déplacent en fonction du modèle de Constraint Mobility. . .   | 19 |
| 2.5  | Distance moyenne parcourue en fonction de modèle pour le scénario d'un<br>millier de secondes. . . . .   | 20 |
| 3.1  | Un patient qui a cinq capteurs sur son corps. . . . .  | 23 |
| 3.2  | Bâtiment avec des patients portant des capteurs (jaune) et des médecins<br>(croix rouge). . . . .  | 24 |
| 3.3  | Modèle de distribution : Les données sur les patients (jaune) sont reçues<br>et envoyées de nouveau par les personnes intéressées par ces données. . .   | 26 |
| 3.4  | Taux de réception de paquets en fonction du nombre moyen de partitions,<br>exemple Wi-Fi. . . . .  | 33 |
| 3.5  | PDR avec un paquet envoyé toutes les dix secondes, 6 groupes actifs avec<br>3 récepteurs par groupe et les timers d'origine des protocoles. . . . .      | 36 |
| 3.6  | PDR avec un paquet envoyé toutes les dix secondes, 6 groupes actifs avec<br>3 récepteurs par groupe et les nouvelles temporisations. . . . .             | 36 |
| 3.7  | Overhead, 1 paquet envoyé toutes les 10 secondes, 6 groupes actifs avec<br>trois récepteurs par groupe et les temporisations d'origine. . . . .          | 37 |
| 3.8  | Overhead, 1 paquet envoyé toutes les 10 secondes, 6 groupes actifs avec<br>trois récepteurs par groupe et les nouvelles temporisations. . . . .          | 37 |
| 3.9  | Taux de collision, 1 paquet envoyé toutes les 10 secondes, 6 groupes actifs<br>avec trois récepteurs par groupe et les temporisations d'origine. . . . . | 38 |
| 3.10 | Taux de collision, 1 paquet envoyé toutes les 10 secondes, 6 groupes actifs<br>avec trois récepteurs par groupe et les nouvelles temporisations. . . . . | 38 |

## TABLE DES FIGURES

---

|   |    |
|---|----|
| 3.11 Résultats pour des paquets de données envoyés toutes les 10 s et une temporisation de 30 s. . . . .  | 39 |
| 3.12 Nombre de sauts, résultats pour des paquets de données envoyés toutes les 10 s. . . . .  | 42 |
| 3.13 Résultats pour des paquets de données envoyés toutes les 5 s. Timer 15 s.  | 43 |
| 3.14 Résultats pour des paquets de données envoyés tous les 5 s. Timer 30 s.  | 44 |
| 3.15 Taux de livraison de paquets PDR,résultats pour des paquets de données envoyés tous les 10 s. . . . .  | 45 |
| 3.16 OverHead, résultats pour des paquets de données envoyés tous les 10 s.   | 46 |
| 3.17 Taux de collisions, résultats pour des paquets de données envoyés tous les 10 s. . . . .   | 47 |
|   |    |
| 4.1 Illustration du réseau montrant les positions de 35 nœuds simulés, des cercles superposés représentent un patient portant 5 nœuds capteurs. . . | 55 |
| 4.2 Collisions. Un paquet engendré chaque seconde. . . . .  | 57 |
| 4.3 PDR. Un paquet envoyé chaque seconde. . . . .   | 58 |
| 4.4 Overhead total. Un paquet envoyé chaque seconde. . . . .  | 58 |
| 4.5 Collisions. Un paquet engendré toutes les 2.5 secondes. . . . .   | 59 |
| 4.6 PDR. Un paquet envoyé toutes les 2.5 secondes. . . . .  | 59 |
| 4.7 Overhead total. Un paquet engendré toutes les 2.5 secondes. . . . .   | 60 |
| 4.8 Collisions. En changeant le taux de génération de données. 3 récepteurs / groupe. . . . .   | 61 |
| 4.9 PDR. En changeant le taux de génération de données. 3 récepteurs / groupe. . . . .  | 61 |
| 4.10 Overhead total. En changeant le taux de génération de données. 3 récepteurs / groupe. . . . .  | 62 |
|   |    |
| 5.1 Puissance de transmission différente selon le type de nœud. . . . .   | 65 |
| 5.2 Modèle de canal pour l'IEEE 802.15.4. . . . .   | 67 |
| 5.3 Une portée vs plusieurs portés. . . . .   | 69 |
| 5.4 Comparaison des collisions dans des scénarios avec une et deux portées.   | 69 |
| 5.5 PDR deux portées vs portée unique. . . . .  | 70 |
| 5.6 Nombre moyen de collisions ; deux portées et portée unique . . . . .  | 71 |
| 5.7 PDR pour un taux envoi de 1s. . . . .   | 73 |
| 5.8 Collisions pour un taux envoi de 1s. . . . .  | 74 |
| 5.9 Taux de réception de paquets en fonction de la période d'émission des données. . . . .  | 74 |

## TABLE DES FIGURES

---

|   |    |
|---|----|
| 5.10 Collisions de liens asymétriques et symétriques. . . . .                                       | 75 |
| 5.11 Variations de la charge avec REFRESH INTERVAL différents pour le<br>protocole HMR. . . . .     | 76 |
| 5.12 Différentes valeurs pour le temporisateur d'agrégation avec un ROUTE<br>TIMEOUT de 3s. . . . . | 77 |
| 5.13 PDR avec différentes charges avec 3 récepteurs par groupe et 5 sources<br>par groupe. . . . .  | 78 |

## TABLE DES FIGURES

---

# Acronymes

- A/N** Convertisseur Analogique-Numérique. 7
- ACK** Accusé de réception - ACKnowledgement. 28, 53
- ADMR** Adaptive Demand-driven Multicast Routing protocol. 50
- AODV** Ad hoc On-demand Distance Vector. 27
- BAN** Body Area Network. 10, 11, 22, 23, 50, 52, 60
- CBR** taux d'échantillonnage fixe - Constant Bit Rate. 33, 55
- CLI** Interface de ligne de commande. 2
- CM** Constraint Mobility. 16, 19, 20, 54
- CTP** Collection Tree Protocol. 14, 15
- DSL** Digital Subscriber Line. 11, 24
- DTN** Disruption-Tolerant Networking. 32
- EKG** Électrocardiographie. 7
- ETX** Expected Transmission Count metric. 14
- HTA** hypertension artérielle. 6
- IGMP** Internet Group Management Protocol. 15
- ISM** Industrielle, Scientifique, Médicale. 11
- MAC** Medium Access Control. 11, 12, 53
- MANET** Mobile Ad Hoc Network. 12, 14, 15, 26
- ODMR** On-Demand Multicast Routing Protocol. 50, 51

## Acronymes

---

**PAN** Personal Area Network. [10](#), [11](#), [22](#), [23](#), [50](#), [52](#), [60](#)

**PDR** Taux de réception de paquets, Packet Delivery Ratio. [49](#), [62](#)

**PoC** Point of Care. [8](#)

**PoS** Point de Soins. [8](#)

**PUMA** Protocol for Unified Multicasting through Announcements. [49](#), [50](#)

**RD** Random Direction. [16](#)

**ROM** mémoire morte, Read-Only Memory. [3](#)

**RPGM** Reference Point Group Mobility. [16](#), [19](#), [31](#), [54](#)

**RPL** IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks. [14](#)

**RTS/CTS** Request to Send / Clear to Send. [62](#)

**RW** Random Walk. [16](#), [20](#)

**RWP** Random Way Point. [16](#), [18](#), [30](#)

**USB** Universal Serial Bus. [11](#)

**WAN** Wide Area Network. [11](#), [23](#)

**WLAN** Réseaux locaux sans fil- wireless local area networks. [11](#)

**WMTS** Wireless Medical Telemetry Service. [11](#)

**WSN** Wireless Sensor Network. [3](#), [12–15](#)

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Motivation

Le maintien des personnes à domicile est une perspective sérieusement envisagée dans le contexte actuel de vieillissement de la population. En 2050, près d'un habitant sur trois aurait plus de 60 ans, contre un sur cinq en 2005 [48]. Les solutions actuelles de téléassistance (bouton alarme sur un collier par exemple) ont montré leurs limites.

Une des applications potentielles de cette thèse est de fournir à une personne maintenue à domicile, dans un hôpital ou dans une maison de retraite, une meilleure solution fondée sur les réseaux de capteurs, capable de mesurer certains de ses paramètres physiologiques et d'en faire un compte-rendu à un centre de soins ou de logistique. La solution proposée doit fournir des premiers éléments pour développer un sentiment de coprésence pour le patient. Cette solution doit être apte à développer l'interactivité et avoir un coût économique faible.

Nous nous sommes focalisés sur des solutions de type réseaux de capteurs qui ont un coût de développement et de mise en œuvre faible. Même si dans le contexte évoqué ils ne constituent qu'une partie de l'infrastructure potentielle, nous pensons que le rapatriement des informations au travers de stations filaires (DSL) ou sans fil (GPRS, WiFi) a déjà donné lieu à des solutions suffisamment probantes à partir d'un point de collecte.

Ce type de réseaux de capteurs offre de nouveaux services tels que la surveillance médicale et l'amélioration de la sécurité par la propagation d'alertes d'urgence. Cependant, la forte mobilité et le changement rapide de la topologie du réseau présentent un verrou technologique sociétal. En outre, l'interférence de différents capteurs augmente la difficulté d'implantation de ce genre de réseaux IEEE 802.15. Ces dernières années, plusieurs solutions ont été étudiées, comme nous le verrons dans le prochain chapitre.

## 1. INTRODUCTION

---

Notre idée est donc de concevoir un système capable de surveiller les caractéristiques physiologiques des personnes âgées. Les études prolongées de ces paramètres sont presque inexistantes, bien que l'idée ait toujours été présente, dès les années 70. La technologie peu à peu aide à atteindre ce but grâce à la réduction de la taille des dispositifs tout en gardant un niveau acceptable de service. L'objectif à long terme est celui de récupérer des données de la façon la moins intrusive possible (ubiquitous), en utilisant des capteurs portés et d'autres capteurs enfouis dans l'environnement [41]. L'application-cible est une maison de retraite avec plusieurs patients et des personnels médicaux. Même si plusieurs travaux se sont centrés sur des applications pour une personne seule, des solutions avec plusieurs personnes restent à évaluer.

### 1.1.1 Choix de la technologie : ergonomie

Imaginons un équipement qui mesure des paramètres physiologiques dans un hôpital. Il utilise des capteurs liés par des câbles à une unité de contrôle qui interprète et affiche les données reçues. Imaginons que l'on veuille récupérer les mêmes données, mais cette fois qu'il s'agisse d'une personne âgée qui a la possibilité de bouger beaucoup plus librement que dans un lit d'hôpital. Utiliser des équipements tels que ceux que l'on trouve dans un hôpital n'est pas envisageable, car ils sont trop encombrants pour le mouvement des personnes ; les câbles s'enchevêtrent et même si la personne ne se déplace pas, les câbles gênent les mouvements normaux du patient.

Utiliser la technologie sans fil peut se montrer utile afin de trouver une façon moins encombrante d'acquérir des données. La technologie sans fil peut aider dans les quatre étapes d'un système de surveillance : capter, envoyer, traiter, et présenter. Évidemment il s'agit d'un processus d'ingénierie multidisciplinaire avec l'existence de protocoles liés à chaque étape. Des dispositifs de petite taille et à faible consommation, comme ceux qui utilisent le protocole IEEE 802.15.4, sont les plus souvent retenus dans ce type d'applications de suivi médical.

Un des problèmes qui se posent dans ce type de réseaux sans fil est la configuration automatique du routage. Normalement, les équipements de communication «traditionnels» ont des interfaces bien définies pour la configuration. Les équipements tels que les commutateurs et les routeurs disposent de plusieurs types de ces interfaces ([Interface de ligne de commande \(CLI\)](#), interface Web). Malheureusement, ces interfaces n'existent pas dans la plupart des petits appareils à faible consommation d'énergie. Cela rend difficiles la manipulation et la détection de problèmes sur les réseaux utilisant ces dispositifs. Parfois même, la station de destination doit être spécifiée au moment de

---

l'enregistrement de la [mémoire morte, Read-Only Memory \(ROM\)](#). Il est alors difficile de changer la station de destination une fois que le système a déjà commencé à fonctionner.

Ce sont précisément ces caractéristiques qui sous-tendent ce travail. Comment faire la transmission de données de façon fiable en considérant : le type de mobilité des personnes, des changements dans la topologie du réseau, les interférences entre les stations et les restrictions des différents types de stations. Ces caractéristiques encouragent l'utilisation de protocoles de routage spécialisés. Nous essayons donc d'améliorer les performances des [Wireless Sensor Networks \(WSNs\)](#), sans reposer sur la présence d'autres types de réseaux.

Nous pensons que la notion d'«intérêt» dans le contenu peut être importante pour le routage. L'idée de ce paradigme est que les nœuds ne savent pas a priori à qui ils doivent envoyer leurs messages, ce sont les destinataires qui signalent leur intérêt pour cette collecte. Il faudra donc proposer une configuration qui permette de changer les destinations en fonction de la dynamique de l'«intérêt» dans l'information.

### 1.1.2 Application cible

L'application-objectif est illustrée au travers de l'exemple suivant : Juan et ses dix amis retraités sont dans une maison de retraite. Le docteur de Juan considère prudent de suivre quelques paramètres physiologiques de son patient. Il est nécessaire de contrôler la température, le pouls, la fatigue [60], la pression artérielle, et d'autres paramètres complémentaires. C'est pour cette raison que Juan porte différents capteurs. Ses amis retraités utilisent eux aussi d'autres capteurs donnant des informations sur leur état de santé. Des infirmières et d'autres personnels de santé sont là pour aider les résidents. En fait, plusieurs personnes qui font partie du personnel sont intéressées pour recevoir l'information de Juan et de ses amis.

Même s'il existe plusieurs façons de mettre en œuvre une application de ce type, nous nous intéressons aux modèles de diffusion mono technologie. Nous faisons une analyse et classification préalable d'autres solutions multi technologies proposées dans le prochain chapitre.

## 1.2 Contributions

Notre première contribution a consisté en une comparaison des schémas de distribution Unicast et Multicast dans le contexte que nous venons de décrire. Pour envoyer des données à plusieurs destinations, l'unicast conduit à une augmentation linéaire du

## 1. INTRODUCTION

---

trafic engendré. Un système d'abonnement au contenu et du multicast peut se montrer avantageux dans le contexte de l'application proposée. Cela dépendra en particulier de la position et de la mobilité des appareils ainsi que des différents types d'appareils utilisés. En particulier si elle n'est pas uniforme. Nous avons étudié et comparé des protocoles très classiques de la littérature et avons mis en évidence la délicatesse de leur paramétrage.

La deuxième contribution a porté sur la prise en compte de l'hétérogénéité potentielle des nœuds. Les patients sont équipés de capteurs qui sont forcément très rapprochés géographiquement. Cette proximité nous encourage à former des groupes et à désigner des chefs de groupe. En outre, les exemples de la littérature montrent que l'utilisation de dispositifs plus puissants, un par personne le plus souvent, est plus la règle que l'exception. Notre but a donc consisté à avoir une meilleure communication en profitant de ces dispositifs différents qui permettent une organisation presque naturelle en groupes. Encore une fois, nous ne nous concentrons que sur des solutions avec une seule technologie. Nous montrons alors que dans ce contexte, nous pouvons réduire de façon extrêmement notable l'overhead induit par le protocole et par là même la charge sur le support et le délai.

La troisième contribution se place dans la droite ligne de la précédente, il s'agit alors d'agréger les données dans ce contexte de nœuds hétérogènes. L'idée est que certains nœuds auront une faible capacité de calcul et stockage alors que d'autres seront plus puissants et autonomes. Nous proposons alors d'agréger les données au niveau des chefs de groupe qui se chargeront alors de délivrer les données aux abonnés.

Le plan de manuscrit reflétera ces différentes contributions, nous commençons tout d'abord par un panorama des points-clés abordés dans ce travail.

## Chapitre 2

# Applications de suivi médical

Les applications qui permettent de relever et d'afficher différents paramètres physiologiques sont utilisées depuis plus de cent ans (p. ex. électrocardiogramme). Dans ces applications on utilise des fils pour relier des capteurs vers une unité qui calcule et présente des résultats. L'idée est désormais de pouvoir supprimer ces fils. Les systèmes filaires proposent des transmissions fiables au prix du déploiement d'une structure physique (fils). Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux applications de suivi médical qui utilisent des transmissions sans fil. Nous décrivons tout d'abord leurs exigences, les applications qui ont été proposées et les stratégies de réception et de routage. Un dernier point sera consacré au modèle de mobilité.

### 2.1 Exigences des applications de suivi médical

Commençons par décrire les données que l'on peut obtenir lors d'une visite chez le médecin. Ces informations sont également enregistrées lorsque nous sommes sur un lit d'hôpital. Notons encore que le format d'enregistrement est le plus souvent le papier. Lors d'une visite chez un médecin il est possible d'obtenir les indicateurs suivants :

#### 2.1.1 Les signaux vitaux

Parmi les signaux vitaux les plus fréquemment collectés, selon [46], on peut souligner :

- La pression artérielle, avec une fréquence d'échantillonnage de plusieurs fois par jour. Normalement elle est représentée par un intervalle de valeurs avec des valeurs différentes selon qu'il s'agisse de la pression systolique ou de la pression diastolique.
- Le pouls est représenté par une valeur entre 0 et 220.

## 2. APPLICATIONS DE SUIVI MÉDICAL

---

- La fréquence respiratoire.
- La température est une valeur en degrés Celsius (ou Fahrenheit). Cependant, la valeur de la température peut changer selon l'endroit ou la partie du corps utilisée pour prendre l'échantillon. Notons que la température moyenne a des petites variations selon l'endroit de mesure et l'âge du patient. Une prise de température, a besoin d'un calibrage pour déterminer les valeurs normales.

Le pouls, la fréquence respiratoire, et la température peuvent être pris avec des fréquences d'échantillonnage variables en fonction des besoins (mesures toutes les deux, quatre, ou six heures). Il existe d'autres paramètres comme la Saturation pulsée de l'hémoglobine en oxygène ou  $SpO_2$ , mesurée grâce à des appareils comme l'oxymètre de pouls ou saturomètre. Une valeur normale de  $SpO_2$  est autour de 95-100%, et représente le pourcentage d'hémoglobine qui est déjà liée avec l'oxygène. Ces appareils utilisent la lumière pour détecter les ions d'oxygène dans le sang.

**La pression artérielle :** un contrôle régulier de la pression artérielle peut se montrer très avantageux dans la détection des nombreuses pathologies. Des personnes d'âge moyen ne présentent généralement pas de valeurs anormales. Le problème de l'[hypertension artérielle \(HTA\)](#) est l'augmentation de la probabilité d'avoir une lésion tissulaire, c'est-à-dire dans les cellules de la paroi. Par analogie avec ce qui se passe dans un tuyau qui reçoit beaucoup de pression, il finit par s'abîmer. Les cas d'[HTA](#) sont beaucoup plus nombreux quand l'âge avance. Même s'il existe plusieurs types d'[HTA](#), la plus répandue est l'[HTA](#) essentielle ; elle n'a pas de schéma d'apparition bien défini, et peut survenir même si la personne n'a pas de facteurs de risque (prédisposition). Sa détection devient primordiale, car les dommages les plus grands surviennent dans les artéριοles et peuvent être nocifs pour le cerveau ou les reins. S'il y a des dommages dans ces deux organes l'invalidité survient sous forme d'accident vasculaire cérébral ou pour les reins mène à la dialyse. Son augmentation présente un coût énorme pour le système de santé.

### 2.1.2 Paramètres généraux

Lors d'une visite médicale, il existe d'autres informations qui ne sont pas forcément quantifiables par exemple : l'attitude du patient, comment se sent-il ? ; l'apathie, l'excitation, la fatigue[60]. Il est aussi important de savoir l'état de la nutrition : l'obésité, l'anorexie, la cachexie, et si le patient s'hydrate suffisamment. L'acquisition automatique de ce type d'information peut se révéler plus complexe, quelquefois en ayant recours à des algorithmes pour analyser le comportement.

---

### 2.1.3 Acquisition des signaux vitaux

Dans le paragraphe précédent, nous avons présenté les caractéristiques physiologiques normalement contrôlées lors d'une visite médicale. Malgré la définition des caractéristiques à mesurer, la façon ou la méthode pour les obtenir est encore un domaine de recherche ouvert. Nous pouvons distinguer les méthodes d'acquisition des signaux vitaux selon la position du capteur : in situ (portés) et ex-situ (à distance).

**Les capteurs à distance** sont ceux qui ne touchent pas le corps du patient. Ainsi, la vidéo peut être utilisée pour obtenir des paramètres généraux (voir paragraphe 2.1.2). La plupart des travaux utilisent des algorithmes pour déterminer le comportement ([38]) des personnes. Même si l'obtention des signaux vitaux (paragraphe 2.1.1) n'est pas encore très répandue, il existe des travaux intéressants ([7]). Si l'utilisation de la vidéo n'est pas possible, il est toujours possible d'incorporer les capteurs dans la maison. Une solution pour une seule personne est présentée dans [41]. Des problèmes de liaison des données vers son propriétaire existent dès que plusieurs personnes partagent le même espace d'habitation.

**Les capteurs portés** sont au contact direct du patient, même si l'idée est de les faire passer inaperçus. Le fonctionnement ordinaire repose sur des mécanismes mécaniques ou électriques qui à leur tour vont passer par un **Convertisseur Analogique-Numérique (A/N)** pour être intégrés dans le calcul d'un algorithme ou être transmis par radio. La quantité des données engendrées dépend de paramètres tels que : le débit, la bande passante, et la précision, voir table 2.1.

La gamme d'appareils est variée, et la quantité des données produites aussi. Évidemment, des applications qui utilisent des accéléromètres et gyroscopes engendrent une grande quantité de données. Cependant il existe d'autres solutions. Par exemple, une **Électrocardiographie (EKG)** nous donnera d'une façon exacte le pouls, en plus d'autres informations importantes. Mais une ceinture sportive [44] peut nous donner également le pouls en produisant moins de données, qui sont en contrepartie moins précises.

## 2.2 Les Applications sans fil

Il existe plusieurs types de cas d'étude dans le domaine des applications de suivi médical. On peut citer des applications qui envisagent de surveiller des signaux vitaux des personnes en état critique jusqu'à des applications pour des personnes qui sont chez elles avec beaucoup plus de liberté de mouvement. C'est pour cela que le standard IEEE

## 2. APPLICATIONS DE SUIVI MÉDICAL

---

TABLE 2.1 – Quantité de données produites par des capteurs, pris de [36].

| Application                 | Débit       | Bande passante (Hz) | Précision (bits) |
|-----------------------------|-------------|---------------------|------------------|
| EKG (12 dérivations)        | 288 kbps    | 100-1000            | 12               |
| EKG (6 dérivations)         | 71 kbps     | 100-500             | 12               |
| EMG                         | 320 kbps    | 0-10 000            | 16               |
| EEG (12 dérivations)        | 43.2 kbps   | 0-150               | 12               |
| La saturation du sang       | 16 bps      | 0-1                 | 8                |
| Surveillance de la glycémie | 1600 bps    | 0-50                | 16               |
| Température                 | 120 bps     | 0-1                 | 8                |
| Détecteur de mouvement      | 35 kbps     | 0-500               | 12               |
| Implant cochléaire          | 100 kbps    | -                   | -                |
| Rétine artificielle         | 50-700 kbps | -                   | -                |
| Audio                       | 1 Mbps      | -                   | -                |
| Voix                        | 50-100 kbps | -                   | -                |

**Point of Care (PoC)** dédié aux communications des dispositifs médicaux [2] donne des directives pour l'utilisation d'appareils pour des **Point de Soins (PoS)** (PoC en anglais). Ce sont des lignes directrices quant à l'architecture fonctionnelle.

### 2.2.1 Architecture fonctionnelle

Il est possible d'organiser les applications de suivi médical en utilisant des fonctions spécifiques. Notamment, les parties de l'application peuvent être vues comme des étapes ; les quatre étapes d'un système de surveillance sont : capter, envoyer, traiter, et présenter. La figure 2.1 présente quatre étapes selon les fonctions à réaliser ; dispositif médical, transport, collecte, et évaluation respectivement.

**Étape 1** Dispositif médical : cette étape est liée aux capteurs proprement dits. Les travaux portent sur la mesure de tel ou tel paramètre physiologique. Il est possible de faire une classification des dispositifs selon leur position par rapport au corps :

- Dispositifs externes.
- Dispositifs implantables [26].
- Appareils portables [40, 10].

**Étape 2** Transport des données. On utilise potentiellement plusieurs types de technologies sans fil et au moins une connexion filaire vers des serveurs. Selon la sémantique de réception, il est possible de trouver des connexions vers plusieurs types de terminaux, protocoles, et technologies.

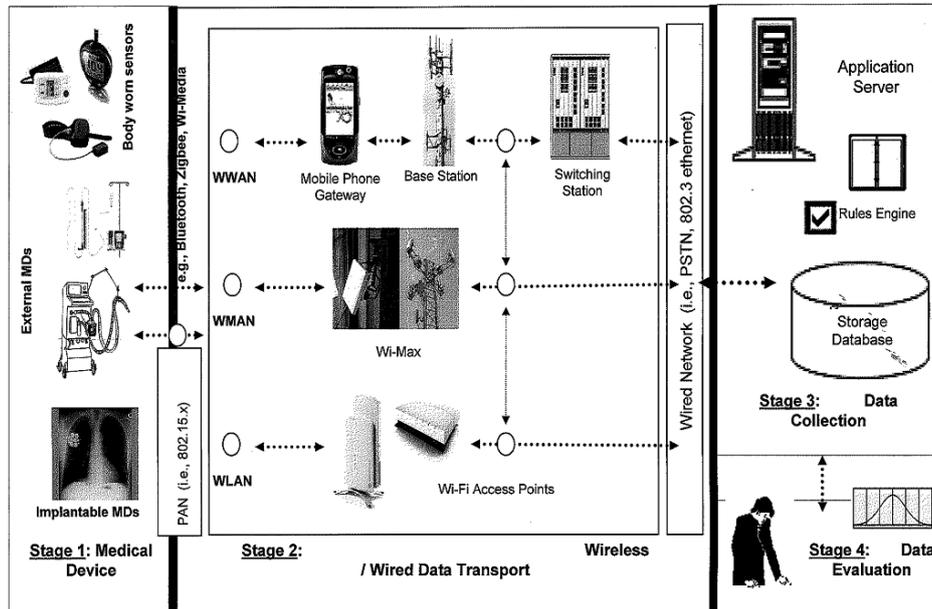


FIGURE 2.1 – Étapes d'un dispositif médical sans fil, pris de [2].

**Étape 3** Collecte des données. Cette étape correspond au stockage des données. Elle peut être mélangée avec l'étape 1, par exemple si le stockage des données se fait de façon distribuée avec plusieurs puits.

**Étape 4** Évaluation des données : cette étape implique le personnel ou les ressources utilisées pour détecter des anomalies dans les données acquises. Cette évaluation n'est pas forcément effectuée dans un serveur distant ; l'intérêt est de pouvoir faire l'évaluation in situ. Malheureusement, les contraintes techniques des appareils utilisés empêchent parfois une évaluation de qualité et forcent l'envoi des données vers une machine plus puissante.

La table 2.2 présente plusieurs projets et leurs différentes caractéristiques. Les projets sont nombreux et différents dans leurs exigences. Il y a des projets qui utilisent des relais pour communiquer avec des puits : Bignurse[5], HM4All [16], CodeBlue [51], MEDiSN [33]. D'autres sont conçus pour travailler avec une topologie avec un seul saut, comme Mercury [39] et [8]. Il est possible de trouver des projets qui utilisent plusieurs technologies pour la partie transport (p. e.x. [35]) ; et donc plusieurs protocoles pour un niveau protocolaire. Il est nécessaire de dire qu'il y a de nombreux travaux sur chacune des étapes.

Pour poursuivre, nous allons proposer une autre classification des travaux selon leur

## 2. APPLICATIONS DE SUIVI MÉDICAL

TABLE 2.2 – Différents projets de suivi médical qui utilisent des transmissions sans fil.

| Project       | Dispositif   | Transport MAC  | Transport Routage | Collecte                   | Évaluation            |
|---------------|--|--|-------------------|----------------------------|-----------------------|
| BigNurse[5]   | SpO2, pouls, pression du sang, ondes cérébrales, muscles | 802.15.4 Capteur + relais                                    | ZigBee            | 1 puits + base des données | GUI                   |
| HM4All[16]    | EKG, HR, temp  | 802.15.4 : Capteur + relay, 802.11 : Client, Ethernet : puit | Zigbee            | 1 puits + BD               | WEB GUI               |
| CodeBlue[51]  | 1 led EKG, SpO2, EMG                                     | 802.15.4 Capteur + relais + Client                           | TinyADMR          | Pub / Sub variable         | WEB GUI               |
| MEDiSN[33]    | EKG, SpO2, pulse gyro,                                   | 802.15.4 Capteur + relais                                    | CTP               | 1 puits + BD               | NA                    |
| Mercury[39]   | acce, EMG, EKG   | 802.15.4 Capteur + Client                                    | NA 1 saut         | 1 puits + BD               | station de base       |
| DexterNet[35] | EKG, gyro, acce, GPS, EIP,                               | 802.15.4 : Capteur; 802.11 : Client                          | NA 1 saut         | Puits / PDA                | station de base + PDA |

architecture protocolaire.

### 2.2.2 Architecture protocolaire et technologies

Dans cette partie nous nous sommes concentrés sur les étapes de transport et de collecte. Plusieurs technologies sont utilisées pour effectuer le transport des données. Pour recenser les protocoles, il faut d'abord séparer les différents types de réseaux présents dans une application de suivi médical. Un récapitulatif des technologies utilisées par les projets est présenté dans [13]. Une autre classification est possible selon les technologies utilisées dans chaque réseau : [Body Area Network \(BAN\)](#), [Personal Area](#)

---

Network (PAN), Wide Area Network (WAN). Selon l'application, il est envisageable d'avoir plusieurs BANs qui se raccordent à un PAN, et à son tour, le PAN se connecte avec un WAN. D'un autre côté, il est aussi possible d'avoir des applications sans réseau PAN. Par exemple, on peut avoir un réseau BAN (en utilisant IEEE 802.15.4) qui envoie directement ses données vers un serveur distant par un réseau WAN (GSM).

Les technologies utilisées dans les BAN sont : filaires (eTextile, câbles), et sans-fil (IEEE 802.15.4, Bluetooth, Zigbee). Pour les PANs : IEEE 802.15.4, Bluetooth, IEEE 802.11 (WiFi), Universal Serial Bus (USB), Wireless Medical Telemetry Service (WMTS), ou plusieurs technologies en même temps. Pour avoir accès aux réseaux WANs les technologies sont les réseaux cellulaires, et une connexion Internet standard (Digital Subscriber Line (DSL), fibre, etc.).

Les façons de faire le transport des données sont assez variées, les protocoles utilisés dépendront des technologies disponibles. L'intérêt d'utiliser un standard, IEEE 802.15 par exemple, va être lié aux caractéristiques de chaque application. Par exigences ou caractéristiques de chaque application, on entend le nombre et le type de capteurs, en plus des exigences en consommation d'énergie et de la taille des dispositifs implantés. Pour ce qui est de la taille, cela peut aller d'appareils extrêmement petits comme la plate-forme SmartDust jusqu'à de grands équipements avec des antennes multiples comme un «point d'accès», en passant par des dispositifs les plus couramment trouvés d'une taille de 7 cm fois 4 cm fois 2 cm. Comme il s'agit d'une application médicale, la bande de fréquences utilisée sera l'Industrielle, Scientifique, Médicale (ISM). La bande de fréquences ISM a des sous-ensembles de fréquences qui peuvent être utilisées localement seulement (des différences sont faites pour l'Europe, le Japon, ou les États-Unis), bien que d'autres bandes soient aussi allouées dans le monde entier, par exemple la bande des 2450 MHz. Cette bande (2450 MHz) est partagée avec les Réseaux locaux sans fil- wireless local area networks (WLAN) qui utilisent le protocole IEEE 802.11, des dispositifs Bluetooth, les téléphones domestiques sans fil, des systèmes de surveillance de bébés entre autres.

### **Distinction des consommations énergétiques des dispositifs.**

Il existe une relation entre le débit et la taille du dispositif. Il est tout à fait envisageable d'utiliser des dispositifs qui utilisent une solution uniforme en termes de protocoles de couche Medium Access Control (MAC) (p. ex. IEEE 802.11) et de routage, mais cela peut se révéler un peu encombrant pour l'utilisateur. La tendance privilégie les dispositifs de petite taille pour être proche du corps humain (BANs).

## 2. APPLICATIONS DE SUIVI MÉDICAL

---

### Différences par rapport à d'autres réseaux de capteurs

Une application typique des réseaux de capteurs est présentée dans [28]. Le but est de pouvoir repérer de façon spatiale des mesures de température et d'autres paramètres climatiques. Il s'agit d'un réseau statique avec un type homogène de capteurs et un seul puits. Au niveau protocolaire, ce réseau ad hoc aura un protocole de routage multisaut développé sur mesure, et une couche MAC IEEE 802.15.4. Les principales différences sont : la durée de vie du réseau, la quantité de nœuds mobiles et de relais. La plupart des applications réclament l'optimisation de la consommation d'énergie. D'autre part, sauf dans le cas des dispositifs implantés, une personne portera les capteurs pendant son activité régulière qui implique des changements de vêtements chaque douze ou dix-huit heures. Ce changement intrinsèque offrira une opportunité pour recharger les batteries.

Les solutions existantes utilisent des approches qui, la plupart du temps, réduisent le problème à un réseau traditionnel WSN. C'est-à-dire, on considère un réseau avec un seul puits, où le type d'information n'est pas classé. Nous pouvons considérer aussi que "l'intérêt" des nœuds relais n'est pas pris en compte. L'incapacité des nœuds à pouvoir exprimer leurs intérêts peut être une limitation. Nous proposons le prochain exemple pour illustrer cette idée ; soit trois nœuds alignés :  $A, B, Puits$ . Le nœud  $A$  est un capteur,  $B$  est un smartphone, et  $Puits$  est le puits de réseau WSN. Les nœuds  $B$  et  $Puits$  ont aussi des interfaces WiFi. Normalement, le nœud  $A$  envoie ses données au  $Puits$  à travers  $B$ . Une fois les données arrivées au  $Puits$  elles vont être transférées vers le nœud  $B$  en utilisant le réseau IEEE 802.11. L'intention de nœud  $B$  d'obtenir les données de nœud  $A$  n'était pas déclarée. Ce type de déclaration peut modifier les chemins de routage dans un réseau. Une autre limitation peut être l'absence de la déclaration de la nature temporaire des intérêts dans des données.

### 2.3 Protocoles de routage

Une explication du changement du paradigme des réseaux Mobile Ad Hoc Networks (MANETs) vers les WSNs est présenté dans [58]. Une explication claire des différences dans le niveau des exigences des applications est d'abord présentée.

Contrairement à la plupart des applications WSN, nous croyons que le fonctionnement des WSN pour des applications de suivi médical n'est pas le même que pour d'autres applications très dispersées et qui utilisent des batteries pour fonctionner.

Ensuite nous classons les travaux selon le modèle de trafic pris en charge par les protocoles de routage.

- 
- Point à point : le trafic entre deux nœuds. (Unicast)
  - Point à multipoint : le trafic d'un nœud vers un ensemble de nœuds. Par exemple, le trafic généré depuis un puits vers les nœuds capteurs. (Broadcast / Multicast)
  - Multipoint à point : c'est le trafic commun dans les WSNs à partir des nœuds capteurs vers un puits. (Convergecast)
  - Multipoint à multipoint : routage dirigé par le Contexte (Multicast). Souscription based routing.

### 2.3.1 Unicast

L'idée de l'utilisation de l'Unicast vient du monde des réseaux d'ordinateurs, où le plus souvent, on établit des communications entre deux entités clairement identifiées. Il suffit de connaître l'adresse pour déclencher les protocoles qui transporteront les données de bout en bout. En raison des caractéristiques réduites des dispositifs envisagés dans des applications de suivi médical, la destination ou adresse de destination est souvent intégrée directement dans le logiciel du système embarqué. C'est pour cela que la plupart des travaux ne parlent pas d'Unicast directement, mais d'autres variantes spécifiques au cas d'utilisation. Un cas spécifique est présenté dans le paragraphe 2.3.3, cela n'empêche pas l'utilisation de certains protocoles dans des travaux expérimentaux, comme dans [12, 29, 62].

### 2.3.2 Broadcast

Les protocoles de diffusion ou Broadcast sont utilisés pour envoyer un message à tous les destinataires. On peut trouver ce comportement dans les applications de suivi médical quand un puits a besoin de changer un paramètre de tous les capteurs dans le réseau. Il existe des algorithmes de base dans les systèmes d'exploitation les plus répandus (voir TinyOS).

Des optimisations sont recherchées pour le problème de la localisation [15].

### 2.3.3 Convergecast

L'algorithme de convergecast est l'inverse du celui du broadcast (diffusion). Au lieu de transférer le message d'une racine vers tous les nœuds, les données sont collectées en utilisant un arbre de recouvrement vers la racine.

## 2. APPLICATIONS DE SUIVI MÉDICAL

---

### 2.3.3.1 ETX et ROLL

À la différence des [MANETs](#), on estime que, le plus souvent, le déploiement des capteurs dans les [WSNs](#) se traduit pour un nombre beaucoup plus important de nœuds. En raison des problèmes potentiels causés par des protocoles d'inondation, tel le broadcast Storming, des protocoles de clustering sont proposés [24, 59]. Le but est de diviser une aire de broadcast en petits ensembles pour améliorer le contrôle. Les travaux explorent la façon de construire des ensembles en partant d'un réseau homogène en termes de capacités des équipements. Ensuite, les travaux se sont concentrés sur des algorithmes de routage géographique. Ici l'hypothèse est que chaque nœud peut connaître sa position à l'aide d'un GPS par exemple. Il existe aussi des travaux qui explorent le routage géographique en intérieur (indoor), notamment fondés sur des graphes de disques. L'inconvénient dans ce cas est la façon de donner la position aux nœuds. Ces configurations de positionnement individuel par nœud peuvent prendre plus de temps et de réglages. Dans ce cas-là, le réseau ne sera pas complètement autoconfigurable. Les protocoles pour les [WSNs](#) cherchent aussi améliorer les techniques de localisation. Les techniques de localisation sont largement étudiées dans le domaine des [WSNs](#) [52, 47]. Si l'obtention des vraies coordonnées n'est pas possible, des techniques de coordonnées virtuelles vers des puits sont aussi possibles.

Le routage fondé sur la plus grande pente (gradient routing) est une sous-classe des systèmes de coordonnées auto-organisant. Ce système a été choisi pour les [WSNs](#) et son protocole officiel est [IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks \(RPL\)](#) et [Collection Tree Protocol \(CTP\)](#)[23].

### 2.3.3.2 CTP

Le protocole [CTP](#) peut être considéré comme le protocole de routage pour les [WSNs](#) de facto. Comme il est implanté dans des systèmes d'exploitation comme TinyOS<sup>1</sup>, il est très populaire. [CTP](#) utilise deux mécanismes de routage : balisage adaptatif (adaptive beaconing) et validation des chemins de données de trajet (datapath validation). La métrique utilisée pour la validation du chemin de données est [Expected Transmission Count metric \(ETX\)](#)[14] ou une autre métrique fondée sur le gradient (gradient based).

Il est nécessaire d'indiquer que cette taxonomie (inondation, regroupement, routage géographique, localisation, coordonnées virtuelles, et gradients) est chronologique, avec la prise de conscience du problème de la longévité de réseau. Elle est plutôt valide pour des applications avec des nœuds homogènes, contraints en énergie, et utilisant souvent

---

1. [www.tinyos.net](http://www.tinyos.net)

---

un seul puits [31].

Dans les projets présentés dans la table 2.2, la majorité ([5, 16, 33]) utilise des protocoles de routage fournis par le système d'exploitation (p. ex. CTP, Zigbee).

### 2.3.4 Multicast

Les premiers capteurs sans fil étaient petits en taille, mais aussi petits dans leurs capacités matérielles. L'incompatibilité dans la façon de programmer a rendu difficile le transfert de logiciel vers des petits dispositifs avec des processeurs 8 bits. C'est là que sont nés des systèmes d'exploitation tels que TinyOS, Contiki, etc. Le matériel progresse, et cela permet de coder des applications dans un langage comme C et d'avoir plus de compatibilité dans le code produit. Les capacités d'autoconfiguration sont essentielles. Il existe des plates-formes qui permettent une sorte de connexion à distance (TelosB), à la manière d'un Shell, pour changer de façon dynamique les paramètres d'une application. Mais pour la plupart des applications de suivi médical, cela n'est pas encore disponible.

#### Autoconfiguration

L'idée vient du domaine des MANETs avec des protocoles présentant de très bonnes performances; voir [34]. Historiquement les protocoles de Multicast partagent ou travaillent à partir des données récoltées par des protocoles Unicast aux niveaux inférieurs [50]. Il y a des travaux qui explorent des améliorations de la couche transport, comme [25]. L'objectif étant d'utiliser moins d'espace, l'attention s'est portée sur des protocoles avec des capacités Unicast et Multicast en même temps [37, 30, 56]. Il existe aussi des protocoles multicast qui possèdent des extensions pour tenir compte de la géométrie ([37, 43]). L'intention d'implanter certains de ces protocoles vers des plates-formes utilisées dans les WSNs a été exprimée [49], et en l'occurrence pour des applications de suivi médical [51].

#### Publier Souscrire

La question du contrôle de l'adhésion / séparation (abonnement / désabonnement) à un groupe Multicast a donné lieu à quelques protocoles dans le domaine des réseaux d'ordinateurs. Le protocole **Internet Group Management Protocol (IGMP)** a été conçu à cet effet. Le problème est l'incompatibilité du matériel des capteurs pour accueillir le protocole IGMP et les ressources nécessaires pour son fonctionnement. Il existe d'autres approches, qui se fondent sur l'abonnement / désabonnement aux données fournies par

## 2. APPLICATIONS DE SUIVI MÉDICAL

---

les capteurs (Publication et abonnement). On parle de protocoles Multicast Soft-state [37, 30, 56]. L'intérêt dans les réseaux de capteurs est aussi présent, voir : [9], [55], et [51].

Ce paradigme (Publish and Subscribe) permet de voir les patients comme des sources d'information, et tous les autres nœuds comme des abonnés potentiels. Il sera alors possible de considérer la destination d'une communication, non comme une adresse, mais comme un groupe de diffusion (Multicast en l'occurrence). Ce paradigme a été utilisé dans [51].

### 2.4 Les modèles de mobilité à l'intérieur

Dans cette section, nous tenons à souligner les différences entre les modèles de mobilité utilisés dans l'évaluation de protocoles réseau. Nous cherchons une représentation adéquate pour une application de suivi médical. En fait, il faut distinguer deux types de modèles de mobilité : l'une pour les groupes de nœuds et un pour les nœuds individuels. Il n'y a pas beaucoup d'études qui utilisent différents modèles de mobilité sur le même scénario. Parmi les modèles habituellement utilisés pour les études de simulation, nous trouvons : *Random Way Point (RWP)*, *Random Direction (RD)*, *Random Walk (RW)*, *Reference Point Group Mobility (RPGM)* [22, 27], *Constraint Mobility (CM)* [11]. En général, les traces générées par ces modèles pourraient ressembler à ce que l'on voit dans la figure 2.2.

Les nœuds se déplacent librement dans le domaine de la simulation, les seules restrictions sont les murs. Cependant, les gens ne se déplacent pas de cette façon dans l'environnement intérieur, en raison en particulier de la présence d'obstacles tels que des cloisons, portes, meubles, etc. Il y a plusieurs efforts qui visent à tenir compte de ces contraintes pour générer des traces de mobilité.

Ces méthodes consistent à générer un graphe de la mobilité permise en utilisant les trajets possibles dans un bâtiment. Parmi les techniques utilisées, nous pouvons inclure : *StraightSkeleton* [3] et les diagrammes de Voronoï et leurs variantes [57].

#### 2.4.1 Traces réelles

Un nombre croissant d'études tentent de récupérer des informations sur la mobilité des personnes. En général, ces études sont liées aux réseaux DTN. Que ce soit entre le domicile et le travail [45] (pendant huit mois), ou un grand espace intérieur [17]. Un exemple lié aux patients et aux médecins dans un hôpital est présenté dans [20]. Après la reconstruction des interactions entre les patients et les médecins, les auteurs présentent

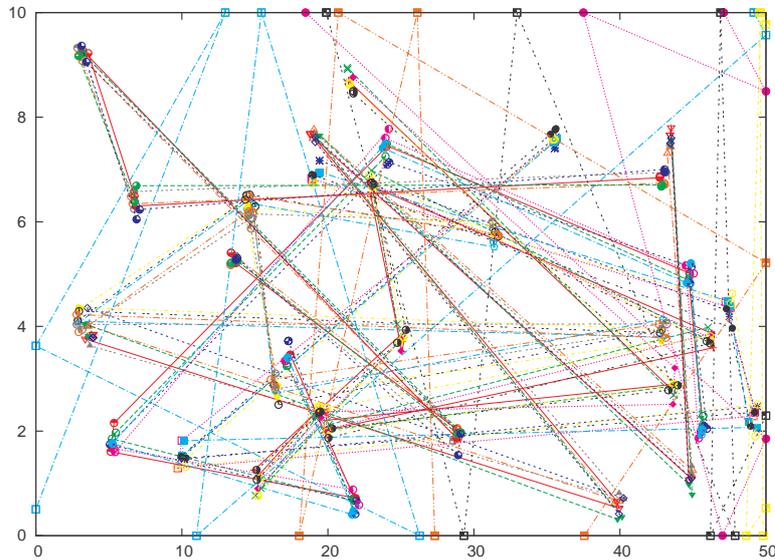


FIGURE 2.2 – RWP/RW et RPGM dans une petite région

des informations sur le temps de contact entre les groupes (patients et médecins). Le temps d'interaction le plus court est de dix secondes, et les plus longs vont de 640 à 3800 secondes.

## 2.4.2 Modèles de mobilité

### 2.4.2.1 Random Way Point

Ces étapes sont effectuées par chaque nœud.

- Le nœud attend un laps de temps entre (0; le temps de pause maximale].
- Le nœud choisit un point de destination et une vitesse comprise entre (vitesse min, vitesse max].
- Le nœud se déplace vers le point choisi.
- Arrivé à cet endroit, le nœud répète à partir de la première étape.

### 2.4.2.2 Random Walk

Ces étapes sont effectuées par chaque nœud.

- Le nœud attend un laps de temps entre (0; le temps de pause maximale].
- Le nœud choisit un point de destination et une vitesse comprise entre (vitesse min, vitesse max].

## 2. APPLICATIONS DE SUIVI MÉDICAL

---

- Le nœud se déplace vers le point choisi : jusqu'à ce qu'une distance  $d$  soit parcourue ou un temps  $T$  écoulé.
- Le nœud répète à partir de la première étape.

### 2.4.2.3 Random Direction

Ces étapes sont effectuées par chaque nœud.

- Le nœud attend un laps de temps entre (le temps de pause minimale ; le temps de pause maximale].
- Le nœud choisit une direction de destination et une vitesse comprise entre (vitesse min., vitesse max.].
- Le nœud se déplace à la limite de la zone de simulation.
- Le nœud répète à partir de la première étape.

### 2.4.2.4 Reference Point Group Mobility

Fonctionne de la même manière que [RWP](#) (2.4.2.1), mais les nœuds sont disposés en groupes. Ensuite, chaque groupe choisit son point de destination.

### 2.4.2.5 Constraint Mobility

D'abord, on crée un graphe des trajets possibles à un étage. La figure 2.3 présente le squelette généré en bleu. Les nœuds dans le graphe bleu avec un degré de 1 sont les points initiaux. Ces étapes sont effectuées par chaque nœud.

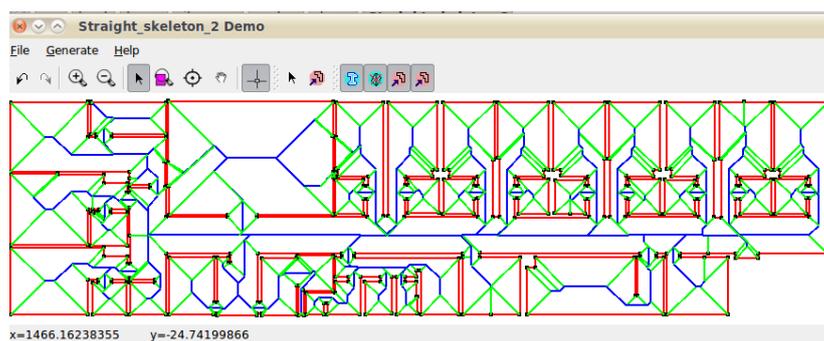
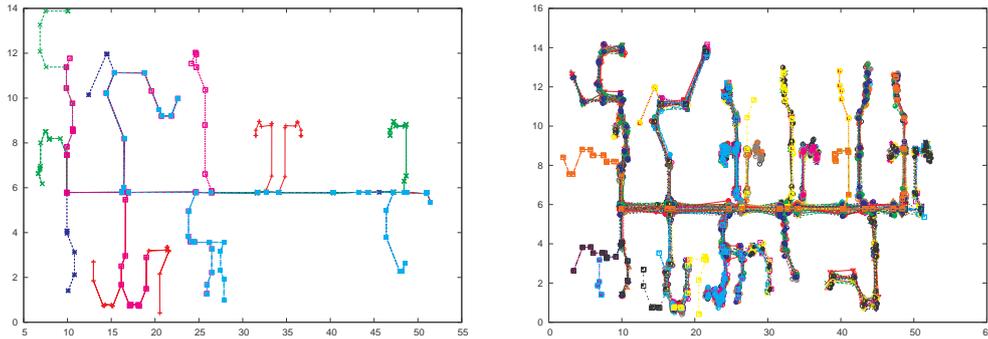


FIGURE 2.3 – Skeleton droite pour le plan d'un hôpital

- Le nœud choisit un point de départ aléatoire.
- Le nœud choisit un point final aléatoire et une vitesse comprise entre (vitesse min, vitesse max].

- Le nœud se déplace vers le point choisi à l’aide du graphe.
  - Le nœud attend un laps de temps entre  $(0 ; \text{le temps de pause maximale}]$ . Le nœud a déjà un point de départ, puis revient choisir un point de destination (étape 2).
- Un résultat typique de **CM** est présentée dans la figure 2.4(a).



(a) Nœuds individuels se déplaçant selon le modèle de CM. (b) Nœuds en cluster et nœuds individuels dans un environnement intérieur.

FIGURE 2.4 – Les nœuds se déplacent en fonction du modèle de Constraint Mobility.

### 2.4.2.6 Les modèles mixtes

Pour représenter un patient avec de multiples nœuds dans son corps, et en se déplaçant à l’intérieur d’un bâtiment, nous avons décidé de combiner le **CM** et **RPGM**. Ainsi, les nœuds respectent les divisions internes d’un bâtiment **CM**, mais aussi ils seront déplacés en groupe pour le cas d’un patient **RPGM**. La figure 2.4(b) présente le résultat de l’union de ces deux modèles.

### 2.4.3 Comparaison

**Logiciel de création de scénarios de mobilité.** Lors de l’examen des modèles de mobilité, le logiciel apparaît nécessaire pour générer des scénarios. Il serait en effet trop long de décrire manuellement les mouvements de chacun des nœuds. Sur Internet, il est possible de trouver plusieurs implantations du même modèle de mobilité. Au lieu d’utiliser l’une de ces versions disponibles “en ligne”, nous avons cherché un outil qui contiendrait déjà plusieurs modèles. Nous observons que l’un des problèmes avec la mise en œuvre de modèles de mobilité est lié au calcul et à la comparaison des statistiques, car chaque application calcule et affiche les statistiques sans aucun niveau d’homogénéité. Autrement dit, le logiciel présente une valeur statistique qui n’est pas

## 2. APPLICATIONS DE SUIVI MÉDICAL

---

rapportée par les autres logiciels ce qui rend difficile la comparaison entre les différents modèles.

Nous avons choisi le logiciel BonnMotion[42] pour les raisons suivantes :

- Nombre de modèles mis en œuvre.
- Cadre de référence pour les statistiques.
- Langage de programmation Java et licences OpenSource.
- Communauté d'utilisateurs suffisamment active (liste de diffusion).

Une fois mis en œuvre le nouveau modèle de mobilité, nous avons décidé de le comparer avec les autres modèles. La figure 2.5 indique la distance moyenne parcourue par chaque nœud lors d'un scénario d'un millier de secondes. Comme la distance est calculée pour chaque nœud, la distance du *modèle combiné* équivaut à la distance obtenue par le modèle CM. Nous pensons que les valeurs du modèle RW sont très élevées en raison d'une erreur dans l'outil BonnMotion [42]. En traitant avec différentes configurations des paramètres du modèle, les valeurs sont restées très élevées.

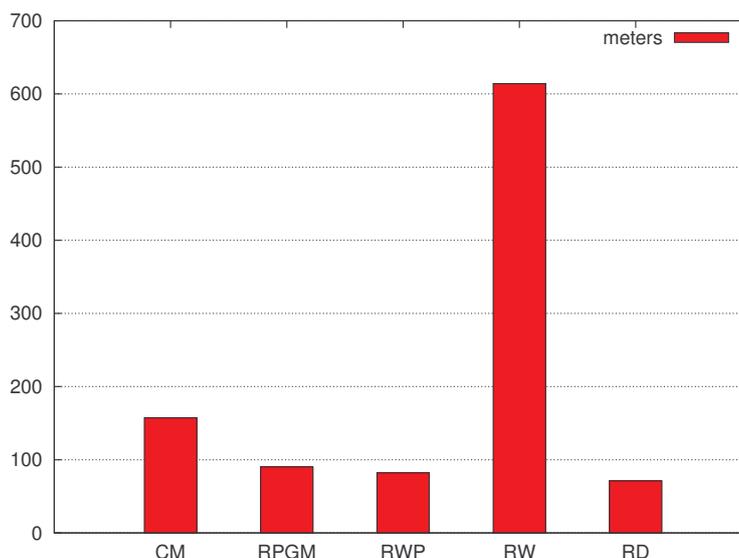


FIGURE 2.5 – Distance moyenne parcourue en fonction de modèle pour le scénario d'un millier de secondes.

## Chapitre 3

# Sélection d'un modèle de communication pour un système de suivi médical : Unicast vs Multicast ?

### 3.1 Introduction

Contrairement à la médecine préventive, la médecine traditionnelle a pour but de soigner les malades quand les maladies sont avérées. Autrement dit, c'est lorsque nous sommes malades que nous nous tournons vers le médecin pour nous faire soigner. Cependant, avec le vieillissement de la population de nos jours, le nombre de personnes ayant besoin de services de santé augmente très rapidement. La médecine préventive pourrait donc constituer une solution complémentaire afin de mieux soigner les malades. Bien qu'il soit difficile de prodiguer des soins révolutionnaires pour les maladies aiguës (survenant brusquement), les maladies chroniques (évoluant lentement au fil du temps) pourront bénéficier d'une réduction allant jusqu'à soixante-dix pour cent du taux de morbidité [19].

La médecine préventive consiste en un premier temps à recueillir des informations sur l'état de santé de la population d'une manière proactive. À Cuba par exemple, le système de santé envoie littéralement les médecins parcourir le pays pour obtenir des informations sur l'état de santé de la population. L'idée est d'obtenir des indicateurs de cet état de santé et d'ensuite exploiter ces informations avant que les maladies ap-

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

---

paraissent. La principale raison est tout d'abord économique, puisque la prévention permet de sensibiliser la population et éviter ainsi un système de santé trop coûteux. De plus, les informations collectées peuvent être étudiées dans les différentes disciplines médicales. Autrement dit, au lieu d'avoir une seule mesure (information) à chaque fois que le malade consulte son médecin, il serait possible de trouver d'autres facteurs liés à la maladie sur un grand nombre d'échantillons. Actuellement, la collecte régulière d'informations relatives aux signaux vitaux des personnes âgées n'est pas très répandue. Elle pourrait néanmoins bien évoluer pour aider la prévention médicale dans les années à venir. La mise en œuvre de cette solution de médecine préventive pourrait être facilitée par l'évolution électronique et informatique et en particulier, la généralisation des réseaux sans fil. De nos jours, les systèmes de collecte y compris les applications utilisées dans les hôpitaux sont très hétérogènes. Souvent, les applications de surveillance médicale dépendent de solutions commerciales et privées. Dans la mesure où elles ne sont pas le plus souvent vitales, les performances et la fiabilité sont faibles.

Parmi les travaux existants, nous pouvons citer les systèmes fondés sur les technologies sans-fil pour les soins aux personnes âgées [18, 21]. Ces systèmes mettent en œuvre la détection de chutes (au travers de la détermination de l'activité) considérant que celle-ci est le premier risque [60]. Conçus pour des résidences médicalisées et implantés grâce à des boutons d'alarme, ils utilisent des capteurs portables pour effectuer des détections des signaux vitaux et de chute. Le but est de préconiser aux personnes âgées de faire du sport.

Notons que la mobilité des personnes âgées est souvent gérée par un système communiquant à l'aide d'équipements réseau tels que des routeurs par exemple.

Les facteurs d'acceptation de ces systèmes sont le coût et le contrôle. Plus le contrôle et le monitoring sont indispensables, plus leur utilisation pourrait être rejetée en particulier si la vie privée des patients est violée au travers de solutions de vidéo surveillance par exemple.

Le chapitre précédent de cette thèse présente quelques applications sans fil qui surveillent des signaux vitaux de personnes âgées. Dans ce cadre, nous avons sélectionné les applications utilisant l'IEEE 802.15.4 pour les réseaux BAN et PAN, notamment dans la mesure où peu de travaux de nos jours étudient simultanément ces deux réseaux (BAN & PAN) qui peuvent former une structure de réseaux.

Si d'autres réseaux peuvent également assurer la redondance et la fiabilisation des transmissions de données, ces cas ne sont pas abordés dans cette thèse. Le problème de la localisation à l'intérieur (indoor) n'est pas étudié non plus. Nous nous concentrons sur la performance et la fiabilité de transmission sans-fils en commençant par la description

---

du système (section 3.2) et des protocoles concernés (section 3.3). L'évaluation des performances se trouve en section 3.4. Nos conclusions sont présentées dans la section 3.5.

## 3.2 Description du système

### 3.2.1 Définition de système cible : Topologie

Comme il est précisé dans le chapitre 2, les applications de surveillance médicale peuvent utiliser différentes technologies dans chaque réseau (BAN, PAN, WAN). Les capteurs peuvent être intégrés dans les vêtements du patient et reliés par des fils à une interface radio IEEE 802.15.4 dans un PAN [13]. On peut aussi utiliser des radios IEEE 802.15.4 pour chaque capteur, en formant un BAN. En fonction de la technologie disponible, les stations radio dans les PAN peuvent utiliser IEEE 802.15.4 ou IEEE 802.11. En suivant ce schéma, l'application cible sur chaque réseau serait :

- Réseau BAN : Les capteurs sont sur le corps et chacun a une batterie et une radio. Dans la figure 3.1, les lignes pointillées représentent des liaisons sans fil. Les capteurs peuvent être de différents types, comme indiqué dans la table 2.1. Par conséquent, le taux de génération de données peut varier sensiblement.

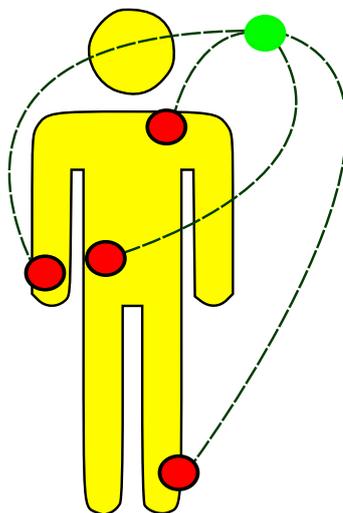


FIGURE 3.1 – Un patient qui a cinq capteurs sur son corps.

- Réseau PAN : Les patients ont également plusieurs capteurs sur leur corps. Le personnel médical dispose d'une interface radio compatible avec la norme IEEE

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

---

802.15.4. Dans la figure 3.2, les croix rouges représentent des personnels aidant les patients. Une croix rouge peut également signifier le serveur ou un nœud puits. Bien que ce réseau puisse être amélioré en utilisant la technologie IEEE 802.11, cette analyse est en dehors de la portée de ce travail.

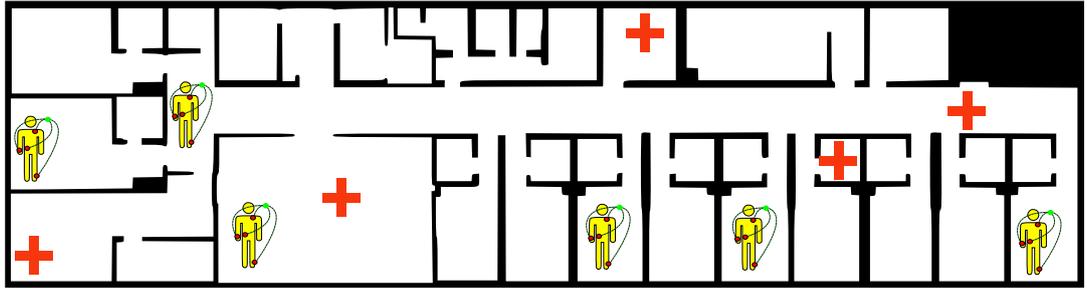


FIGURE 3.2 – Bâtiment avec des patients portant des capteurs (jaune) et des médecins (croix rouge).

- Réseau WAN : Normalement, ce réseau est utilisé pour transmettre des données à un serveur distant. Dans les applications décrites, les destinataires des données recueillies ne sont pas à distance. Ces types de réseaux ne sont pas inclus dans nos études, même si nous n'excluons pas à terme l'utilisation d'un lien DSL pour communiquer avec les stations distantes.

Nous avons défini les stations ou nœuds possibles impliqués dans l'application. Ci-dessous nous détaillons les particularités de l'application cible.

#### 3.2.2 Le suivi de plusieurs personnes à la fois.

Ce système peut être considéré dans certains cas pour la diffusion de nouvelles. Dans ce système, les données sont engendrées par des capteurs et distribuées aux médecins et aux infirmières. Parmi tous les aspects du système, nous nous concentrons sur les protocoles de routage.

Dans ce contexte, le premier point technique à relever consiste à fournir des données à tous les destinataires, car ce n'est le plus souvent pas le cas comme expliqué dans le chapitre précédent, beaucoup d'applications de surveillance médicale utilisant un seul puits. La configuration du puits est souvent statique.

Nous allons maintenant décrire une application traditionnelle des réseaux de capteurs.

---

**La manière traditionnelle** Les nœuds utilisent des radios de type IEEE 802.15.4. Nous n'avons le plus souvent qu'une seule station "puits". Le modèle de distribution est du type Convergecast et fonctionne comme suit :

1. Un capteur mesure, convertit et transmet un paramètre physiologique.
2. Les nœuds calculent le meilleur acheminement vers la station "puits" en utilisant des protocoles fondés sur le principe du gradient.
3. Au fur et à mesure, les données arrivent à la station "puits". Elles peuvent être ensuite transférées à un autre réseau (filaire ou sans-fil) si nécessaire.
4. Les données arrivent au serveur attaché à la station "puits" pour être stockées et traitées.
5. Les infirmières ou médecins auront accès aux données des patients via une interface web.

La méthode du gradient est utilisée lorsque la position des nœuds ne varie pas beaucoup dans le temps. Des messages sont nécessaires pour établir et maintenir le routage dynamique dans notre contexte, en raison de la mobilité des nœuds. Contrairement à d'autres applications dans les réseaux de capteurs dans lesquelles les nœuds sont uniformément répartis, la mobilité des nœuds utilisée par les patients sera caractérisée par de la mobilité d'un groupe (les capteurs sur un seul patient forment un groupe). Nous pouvons déduire qu'il y a trois types de nœuds : source, relais et destination (puits). Les scénarios pourraient être complexes, car un nœud pourrait à la fois être un nœud relais et un nœud puits. Il pourrait exister des nœuds qui souhaitent recevoir des données provenant d'un patient ciblé, les nœuds portés par des infirmières, par exemple. Donc, on se demande ce qui se passerait si le modèle de diffusion devait distinguer des nœuds origine, relais et/ou destination.

La figure 3.3 illustre le fait que les nœuds destination pourraient activement être impliqués dans le routage pour acheminer les données.

**Autre solution** Dans ce cas, les nœuds peuvent exprimer leur intérêt dans les données transmises. Par conséquent, il s'agit d'un schéma multidestination.

1. Un capteur mesure, convertit et transmet un paramètre physiologique.
2. Les nœuds propagent des métadonnées en indiquant l'identifiant du patient et en utilisant un protocole multicast.
3. Un algorithme de routage choisit et maintient la route vers les stations concernées.
4. Les données sont envoyées par groupe aux nœuds, grâce à un des nœuds destination, le serveur fait le stockage.

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

---

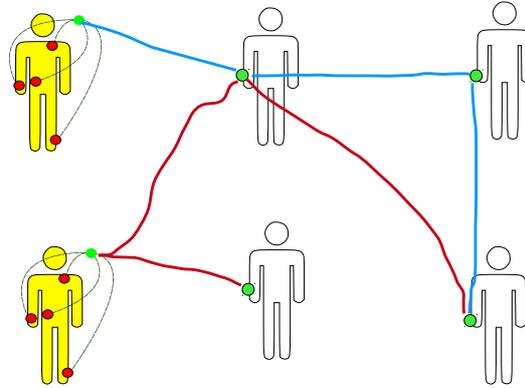


FIGURE 3.3 – Modèle de distribution : Les données sur les patients (jaune) sont reçues et envoyées de nouveau par les personnes intéressées par ces données.

5. L'information est présentée quand les données sont arrivées aux nœuds du groupe de renvoi. Les informations sont finalement présentées sur l'écran des infirmières.

Dans ce système, les nouvelles (données) sont créées par des capteurs et distribuées aux médecins et aux infirmières. La couche réseau devrait permettre donc la transmission en multicast. Il s'agit d'un système fondé sur le contenu. Le système cible s'appuie sur le principe de «publication et abonnement». Ce principe est également utilisé dans les réseaux [MANET](#). Il est donc important de comparer les protocoles de routage Unicast et Multicast dans cette application.

**Défis posés par les applications WSN** Rappelons que les réseaux de capteurs sans fil ont plusieurs limites : leur énergie est limitée, leur portée de transmission courte, la bande passante est faible, et la mémoire limitée. Par conséquent, ces réseaux ne peuvent pas écouler une charge aussi forte qu'un réseau IEEE 802.11. En raison de leur faible débit, la charge du système peut être un problème majeur. Pour cette raison, nous allons remplacer les arbres de Convergecast par des arbres ou des maillages multicast, afin d'acheminer les données du système vers de multiples destinations.

### 3.3 Comparaison des différents modèles de diffusion (Unicast, Multicast).

Les protocoles de multicast conçus pour les réseaux [MANET](#) ont généralement une bonne performance en cas de mobilité faible. Nous allons tester des systèmes à faible bande passante. Pour comparer les différents modèles de diffusion dans le domaine

---

médical, notre scénario cible utilise le modèle mélangeant deux schémas de mobilité appliqués aux piétons. On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMR)[37], Adaptive Demand-driven Multicast Routing protocol [30], et Protocol for Unified Multicasting through Announcements (PUMA)[56] sont les protocoles de routage ne s'appuyant pas sur un autre protocole unicast pour fonctionner. Autrement dit, ces protocoles mettent en œuvre les deux fonctionnements (Unicast, multicast) à l'aide d'un seul code. Cela permet de réduire la taille du code généré.

La raison principale de choisir des protocoles multicast dans le domaine médical est que la charge de réseau pourrait être réduite si moins de paquets sont envoyés vers plusieurs récepteurs (puits).

Rappelons que les réseaux de capteurs permettent de fonctionner selon les deux types de routage suivants : arbre et mailles. La structure d'arbre permet de parcourir tous les chemins à l'aide d'une répartition hiérarchisée des adresses des nœuds. En revanche, le maillage utilisé par le protocole [Ad hoc On-demand Distance Vector \(AODV\)](#) est un type de routage Unicast qui crée et maintient des routes de manière décentralisée. C'est pourquoi nous comparons plusieurs protocoles multicast avec [AODV](#). Ci-dessous nous proposons une brève description des protocoles étudiés :

### 3.3.1 AODV

Le protocole établit les routes à la demande en utilisant deux types de paquets de surveillance (Route-Request et Route-Response) pour créer un arbre de distribution. En tant que protocole unicast, il stocke les routes pour l'adresse de destination. Les messages HELLO sont utilisés pour recueillir des informations sur la topologie. S'il n'y a pas de paquets de données à envoyer, les paquets de contrôle ne sont pas envoyés non plus.

### 3.3.2 ODMR

ODMR[37] est similaire au protocole AODV. Lorsqu'une source a des données à envoyer, le processus de création de routes commence. Le nœud envoie un paquet de type "Join-Query" et l'envoie à tous les abonnés du groupe. Lors de la réception d'un paquet de type "Join-Query", un nœud relais met à jour sa table de routage et vérifie s'il y a une meilleure route vers le nœud source.

Enfin, s'il trouve une meilleure route, il envoie un paquet "Join-Query" vers les autres nœuds.

Le contrat d'abonnement se fait à l'aide d'un paquet "Join-Response". Un récepteur

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

---

s'abonne à un groupe en envoyant ce type de paquet pour définir la route. Ce paquet doit enregistrer l'adresse de nœud choisi pour transmettre un "Join-réponse" à la source. Ce paquet est recalculé par chaque nœud. De cette façon, un ensemble de nœuds forme une route pour chaque groupe de multicast.

Comme il peut y avoir de multiples sources et de multiples récepteurs dans chaque groupe multicast, les messages de type HELLO n'existent pas. Mais par défaut, les paquets "Join-Request" et "Join-Réponse" sont utilisés. Un paquet "Join-Réponse" peut transporter les informations de la route pour plusieurs abonnements à la fois.

Ce protocole maintient et utilise plusieurs chemins redondants, car les autres nœuds stockent des informations sur les sources et les groupes formant un **maillage**. Seuls les nœuds sources peuvent créer des paquets "Join-Query", quand ils ont des données à transférer. Sinon le nœud arrête d'envoyer ce type de paquets et la route peut expirer.

#### 3.3.3 ADMR

ADMR[30] a été conçu pour les réseaux mobiles qui échangent des petits paquets. Le protocole peut s'adapter aux changements de la topologie avec une faible surcharge.

Il maintient des **arbres** fondés sur les sources. C'est-à-dire qu'un arbre multicast est créé pour chaque source d'un groupe multicast. L'information de contrôle est ajoutée à des paquets sous forme d'options. Autrement dit, la taille d'un paquet de contrôle dépend du nombre d'options de transport.

Quand un récepteur ou un abonné veut recueillir des données provenant d'un groupe, il envoie un paquet "MulticastSolicitation" à tous ses voisins.

Lorsqu'une source commence à créer des informations, elle transmet un paquet de type "SourceInformation". Une fois qu'un récepteur obtient un paquet de type "Source-Information", il répond avec un paquet "ReceiverJoin" au nœud source. Les paquets de type "ReceiverJoin" sont destinés à des nœuds spécifiques (unicast). Si le nœud relais fait partie de la route, il modifie son état et participe activement à la transmission de paquets. De cette façon, l'arbre est établi.

S'il n'y a pas de données à envoyer, le nœud source diffuse des paquets "Keepalive" et "SourceInformation" un certain nombre de fois avant d'arrêter silencieusement l'envoi de ces messages. Ces paquets permettent de conserver des informations actualisées sur les voisins. Les paquets "SourceInformation" sont utilisés comme **Accusé de réception - ACKnowledgement (ACK)** au niveau du routage. L'état de transfert(Forwarding state) est spécifique à chaque **source** plutôt que d'être partagé par l'ensemble du **groupe**. Cela signifie que la granularité de l'information est plus grande, mais le protocole né-

---

cessite plus de mémoire pour fonctionner.

S’agissant du protocole ODMR les principales différences sont : ADMR utilise des arbres et ODMR des maillages pour la distribution. Cela signifie que ADMR peut utiliser des mécanismes de type Unicast présents dans d’autres couches pour assurer la livraison du paquet (par exemple ACK). ODMR utilise toujours la Diffusion (Broadcast) car de cette façon, la maille de distribution est maintenue. Une autre différence réside dans les types de paquets. ODMR a peu de types de paquets (Join-Request, Join-Response), tandis que ADMR est basé sur les options. Les paquets de contrôle ADMR agissent comme des conteneurs d’options. En outre, dans le protocole ADMR, il existe des paquets explicites de “KeepAlive” tandis que dans le protocole ODMR ces messages sont implicites lors de la réception des paquets de contrôle (Join-Request, Join-Response). S’il n’y a pas de réponse à ces paquets “Keepalive” après plusieurs tentatives, la route est considérée comme non valide. Un temporisateur détermine le temps d’attente entre chaque paquet non-confirmé. ADMR permet de souscrire à une source unique au sein d’un groupe, alors que ODMR permet seulement de souscrire à toutes les sources d’un groupe multicast.

### 3.3.4 PUMA

PUMA[56] adopte une approche initiée par le **récepteur**. Au contraire, ADMR et ODMR suivent une approche initiée par l’expéditeur ou la **source**.

Il détermine et utilise un nœud noyau pour lancer la structure **maillée**.

Il établit et maintient un maillage partagé pour chaque groupe multicast. L’utilisation du nœud noyau permet de réduire la surcharge de routage (overhead), car seul le nœud noyau peut inonder le réseau. Ce protocole utilise des paquets de signalisation très légers appelés «Annonces Multicast» (MA) pour effectuer toutes les tâches de routage.

PUMA peut atteindre un taux de réception de données élevé avec une surcharge de contrôle très limitée. Un paquet de contrôle peut avoir plusieurs MA en même temps. Les récepteurs continuent d’envoyer des MA jusqu’à ce qu’ils trouvent une source pour ce groupe. Quand un nœud doit envoyer des données, il diffuse des “Annonces Multicast” (MA) périodiquement.

### 3.3.5 Spécificités de l’application cible

La conception de protocoles réseau suppose une certaine connaissance des paramètres du scénario d’utilisation. Les informations relatives à la topologie et leurs variations

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

---

(mobilité) sont utiles pour sélectionner un protocole.

Les protocoles susmentionnés ont été conçus pour des scénarios très différents de ceux utilisés dans cette application. Mais ils s'intéressent à des problèmes communs. La question est de savoir si les caractéristiques des scénarios peuvent être comparées.

Les protocoles cités gèrent une large plage de vitesses pour les nœuds. Les vitesses vont de 0 à 20  $m/s$  ( 70  $km/h$ ). Les vitesses de déplacement à l'intérieur sont nettement inférieures à cette limite.

Alors, nous pensons qu'en réglant un paramètre, la durée de validité de la route, nous pouvons obtenir de meilleurs résultats dans notre application.

## 3.4 Évaluation des performances

### 3.4.1 Cadre

L'idée principale que nous avons eue a été de tester des protocoles unicast et le routage multicast sous les contraintes évoquées. Le scénario doit tenir compte des particularités du mouvement à l'intérieur, en considérant en outre que les puits sont mobiles. Mais comment représenter le mouvement des nœuds portés par les patients et le personnel médical? En faisant un tour d'horizon d'autres études, on peut identifier les modèles utilisés. Ces modèles de mobilité sont créés à l'aide d'un logiciel spécialisé. On peut toujours faire un programme qui permette de rendre compte de nos besoins. Nous avons décidé d'utiliser le programme appelé BonnMotion [42] déjà cité dans le chapitre précédent. En effet, BonnMotion peut engendrer aléatoirement divers scénarios à l'aide de différents modèles de mobilité. Un point en faveur de l'utilisation de BonnMotion est qu'il permet la création de rapports sur les caractéristiques des scénarios. Ainsi, nous pouvons comparer les scénarios engendrés en utilisant n'importe quel modèle, comme «Random Way Point», mais avec différentes valeurs de paramètres. Un autre point en faveur de ce logiciel est qu'il s'agit d'un projet universitaire open source.

Un des inconvénients est la difficulté de ce logiciel pour créer des compositions de modèles. Dans notre scénario, nous avons deux types de modèles de mobilité, un modèle pour le personnel médical et un autre pour les patients. Fondamentalement, nous modélisons le comportement des gens. Les gens se déplacent et font des pauses.

Les infirmières et les patients doivent respecter les limites de l'immeuble. Pour modéliser le comportement des infirmières, nous utilisons [RWP](#). Les infirmières se déplacent librement et font une pause avant de recommencer à marcher, encore une fois, à une vitesse relativement faible.

---

Dans le cas des patients, ils se déplacent comme les infirmières. Mais comme ils ont différents capteurs dans leur corps, le modèle ressemble plus à un groupe de nœuds qui se déplacent dans la même direction et prennent le même temps de faire une pause.

Pour cette raison, nous utilisons le modèle [RPGM](#) [22, 27]. Malheureusement, il n'y a pas de générateur de scénarios qui considère des environnements en intérieur, et encore moins qui permettent à un groupe de nœuds de se déplacer en respectant les cloisons d'un bâtiment.

BonnMotion fournit des informations statistiques pour chaque scénario. Ces statistiques peuvent être d'ordre général ou spécifique à un moment donné. Autrement dit, si elles sont générales, nous pouvons obtenir une moyenne sur l'ensemble du scénario. Si elles sont spécifiques, nous pouvons consulter les statistiques à un moment précis. Elles peuvent être calculées pour différentes valeurs de la portée de transmission. Voici quelques-unes des statistiques produites.

Degré moyen : Les nœuds forment un graphe et s'ils sont à une distance inférieure au rayon de transmission alors il existe un lien entre eux. Cette valeur indique le nombre moyen de liens d'un nœud dans le scénario.

Nombre de partitions moyen : La valeur 1 indique que le réseau est connecté à tout moment. Une valeur supérieure à 1 indique que ce n'est pas le cas.

Nombre total de liens : Est le nombre total de liens engendrés au cours du scénario.

Liens cassés : Est le nombre total de liaisons qui ont été brisées au cours du scénario. Il est possible d'interpréter les liens brisés comme une opportunité pour les protocoles de routage de trouver un nouveau chemin. Une topologie très fluctuante modifie les capacités d'adaptation du protocole.

Durée moyenne de liaisons : C'est la durée moyenne de tous les liens du scénario.

La disponibilité d'un parcours moyen : C'est la probabilité qu'en prenant deux nœuds aléatoirement, il y ait un chemin entre eux. Ces valeurs sont indépendantes des protocoles de réseau et d'autres paramètres. Ce calcul est théorique et résulte de valeurs obtenues en supposant un rayon de transmission parfait.

### 3.4.1.1 Sélection des paramètres.

Nous arrivons à la question de la comparabilité. Les scénarios peuvent-ils être comparés avec ceux des études originales ([37, 30, 56, 50, 34])? Plus encore, comment pouvons-nous choisir parmi la vaste gamme de scénarios possibles?

Nous allons tout d'abord faire une première simulation en Wi-Fi. Pour choisir les paramètres appropriés à notre scénario, nous regardons le travail effectué sur les études

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

---

originales ; elles utilisent essentiellement du Wi-Fi. Les quatre protocoles décrits ci-dessus ont été testés avec une petite variation par rapport aux scénarios originaux. La variation provient des modèles de mobilité inclus. L'idée est de faire une simulation similaire à celle trouvée dans les papiers originaux, mais avec un scénario incluant de la mobilité des groupes et des nœuds indépendants.

Le tableau 3.1 présente les paramètres utilisés dans les simulations avec Wi-Fi.

TABLE 3.1 – Les paramètres utilisés dans la simulation Wi-Fi.

| Paramètre              | Valeur        |
|------------------------|---------------|
| Durée [s]              | 900           |
| Espace [ $m^2$ ]       | 1500x300      |
| Nœuds                  | 50            |
| Récepteurs             | 10            |
| Nœuds par groupe       | 5             |
| Vitesse max [ $km/h$ ] | 1-2-3-4       |
| Temps de pause [s]     | 0-300-600-900 |

Les résultats de ces simulations sont contrastés. Il est impossible d'établir une relation entre les faibles vitesses et/ou les temps de pause et les paquets de données délivrés. Malgré cela, nous pouvons voir quelque chose d'évident dans la figure 3.4. Ces protocoles ont été conçus pour des scénarios sans partitionnement. Autrement dit, le nombre moyen de partitions doit être de 1. En incluant une vitesse faible et un temps de pause relativement élevé, le nombre moyen de partitions varie. Lorsque le nombre moyen de partitions est élevé, le nombre de paquets délivrés diminue. Avec un nombre moyen de partitions de deux, il n'y a pas moyen d'obtenir un paquet à partir d'un segment isolé de l'autre.

Sur la base de ces résultats, nous avons décidé de prendre des scénarios avec des valeurs proches de 1 comme nombre moyen de partitions. Les protocoles qui s'attaquent aux problèmes des réseaux disjoints sont ceux relatifs aux [Disruption-Tolerant Networking \(DTN\)](#), nous ne les avons pas pris en compte dans ce travail.

Le tableau 3.2 indique les valeurs choisies pour nos simulations en intérieur. La distance de transmission est de 15 mètres. Cette région est la taille d'un étage d'un bâtiment. Le rapport entre la longueur et la largeur du domaine de la simulation est le même (5,1). Les scénarios comportent six groupes de cinq nœuds, cela revient à considérer six patients. En outre, il y a cinq nœuds qui agissent comme des récepteurs. Les récepteurs sont les infirmières et les médecins, ainsi qu'un serveur de données. Dans les résultats de la simulation Wi-Fi, les scénarios utilisent un temps de pause maximum de 300 secondes, et de faibles vitesses.

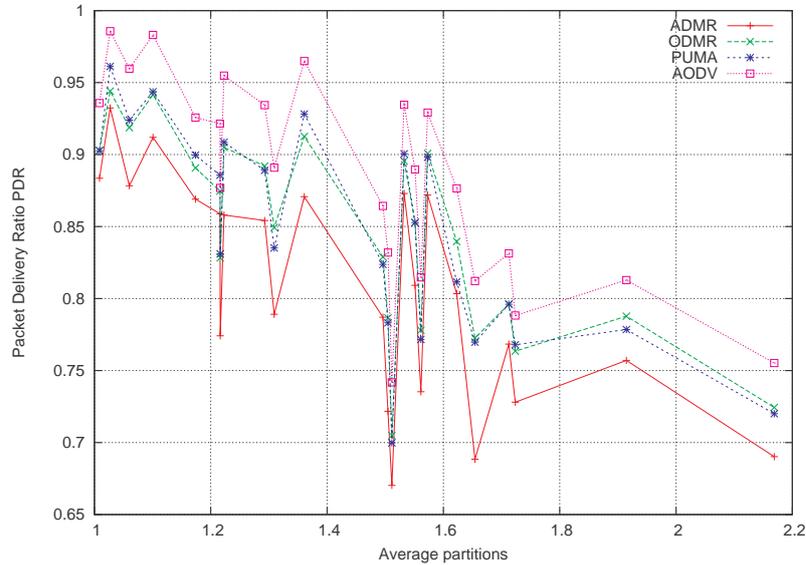


FIGURE 3.4 – Taux de réception de paquets en fonction du nombre moyen de partitions, exemple Wi-Fi.

En ce qui concerne les statistiques du scénario, le nombre de partitions est proche d'un. Néanmoins, il y a un certain nombre de liens qui se brisent au fil du temps.

TABLE 3.2 – Les paramètres utilisés dans la simulation.

| Paramètre                  | WSN          | Statistiques obtenues             | WSN     |
|----------------------------|--------------|-----------------------------------|---------|
| Durée                      | 2 000 s      | Portée                            | 15 m    |
| Aire                       | 50x10 $m^2$  | Degré moyen du nœud               | 19.6    |
| Nœuds                      | 35           | Nombre moyen de partitions        | 1.07    |
| Récepteurs                 | 5            | Nombre de liens rompus            | 3517    |
| Nœuds par groupe           | 5            | Durée moyenne du lien             | 170.3 s |
| Vitesse minimale, maximale | (0.2, 1] m/s | Nombre total de liens             | 4032    |
| Temps de pause             | (0, 300] s   | Disponibilité moyenne des chemins | 98.4 %  |

### 3.4.2 Scénarios de simulation

**Génération de données** Dans notre scénario, les nœuds mobiles représentent les groupes de capteurs. Les capteurs sont portés par le patient et les données sont envoyées en continu. Du point de vue des protocoles de routage, les capteurs sont des sources au sein des groupes multicast. Normalement, le logiciel fonctionnant sur le capteur utilise une horloge pour échantillonner et transmettre les données recueillies. On considère un **taux d'échantillonnage fixe - Constant Bit Rate (CBR)**. Un paquet de données

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

---

(24 octets) est envoyé avec une périodicité de 5 secondes (1<sup>ère</sup> expérience) puis de 10 secondes (2<sup>ème</sup> expérience).

**Adaptation** Comme expliqué dans la section 3.3.5, les capteurs envoient de l'information différemment des applications présentes dans des réseaux à plus grande capacité. Avec de tels taux d'envoi de données, les routes maintenues par les protocoles de routage expirent avant l'envoi du paquet de données suivant. Pour cette raison, nous devons modifier les paramètres d'expiration des routes.

PUMA : Une annonce multicast (MA) est envoyée toutes les 3 secondes. Les nouvelles valeurs sont de 60 secondes.

ODMR : La fréquence d'envoi des paquets de type "Join-Query" varie par rapport à sa valeur d'origine et hausse de 2 à 60 secondes.

ADMR : Le protocole calcule une valeur appelée "Temps interpaquet". Cette valeur est utilisée pour ajuster la fréquence des paquets de type "Information sur la source". Les valeurs sont modifiées de 200 ms à 30 secondes. Avec cette modification un paquet "Information sur la source" est envoyé toutes les 60 secondes.

AODV : Les routes créées par AODV sont valables pendant 10 secondes. La validité d'une route pour notre cas est de 60 secondes. Les routes de ce protocole sont définies pour démarrer et sont supposées valides jusqu'à ce qu'une erreur se produise. Les erreurs peuvent provenir de l'absence de message "HELLO".

**Unicast et Multicast** Pour comparer des protocoles de routage unicast et multicast, les nœuds de destination dans les scénarios unicast doivent recevoir le même nombre de paquets de données en cas de multicast. Par exemple, s'il y a une source et deux récepteurs dans les flux multicast, on aura deux flux "Unicast" indépendants. Ce changement engendre plus de paquets de données CBR car il y aura deux flux dans le simulateur.

**Le simulateur** Le simulateur utilisé est NS-2 version 2.34[1]. Les protocoles de multicast ont été adaptés à partir de la version originale (ns-2.1b8) pour la version courante. La version 2.34 dispose d'un module qui plante la couche MAC IEEE 802.15.4.

#### 3.4.3 Métriques observées

Les métriques utilisées dans l'évaluation sont les suivantes :

---

Packet Delivery Ratio (PDR) : C'est le rapport entre le nombre de paquets reçus au niveau de la destination et le nombre de paquets envoyés par la couche d'application. En multicast, nous considérons le temps de souscription de chaque puits afin de mesurer correctement cette mesure. En effet, tous les puits commencent à recevoir des paquets de données à un moment aléatoire.

Overhead de signalisation : C'est le nombre total des paquets de données et de contrôle transmis par l'ensemble des nœuds du réseau divisé par le nombre total de paquets de données délivrés.

Taux de collision : donne une idée de la charge sur le réseau.

### 3.4.4 Résultats et analyse de la simulation

#### **Influence de nombre de sources :**

Dans cette première partie, on modifie le nombre de sources de chaque groupe. Il y a trois récepteurs pour chaque source. Les figures 3.5 et 3.6 présentent les résultats du PDR en fonction de nombre de sources. Le PDR va diminuer à mesure que le nombre de sources augmente. Cela provient de l'augmentation de la charge du réseau.

Le PDR d'AODV se dégrade plus rapidement que les protocoles de multicast. Cela est dû au nombre de communications nécessaires pour desservir tous les abonnés. AODV induit un overhead plus grand que les protocoles multicast, voir figure 3.7.

Il y avait quelques problèmes avec le modèle utilisé par le protocole AODV. Comme le modèle CBR se traduit par plusieurs flux en même temps, cela peut causer un problème dans la machine d'état AODV. L'erreur se produit si une demande de route arrive à la pile de protocole pendant que l'itinéraire est marqué comme "en réparation". Ce problème est lié à la mise en œuvre du protocole dans le simulateur. Comme il s'agit d'un modèle d'essai, toutes les options et tous les états possibles ne sont pas considérés.

Dans le cadre des protocoles multicast, ODMR crée plus d'overhead qu'ADMR et PUMA. Avec PUMA, l'overhead de signalisation continue à diminuer quand le nombre de sources augmente. ODMR et ADMR restent constants en termes d'overhead normalisé.

PUMA envoie plusieurs "Annonces multicast" de différents groupes dans un seul paquet, alors que les autres protocoles envoient des paquets de contrôle par groupe ou par source. Ainsi, il y a moins de paquets de contrôle du réseau avec PUMA.

Les figures 3.10 et 3.9 montrent le rapport entre les collisions et les paquets reçus sur tous les nœuds. Avec un temps d'expiration de route élevé, les collisions augmentent

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

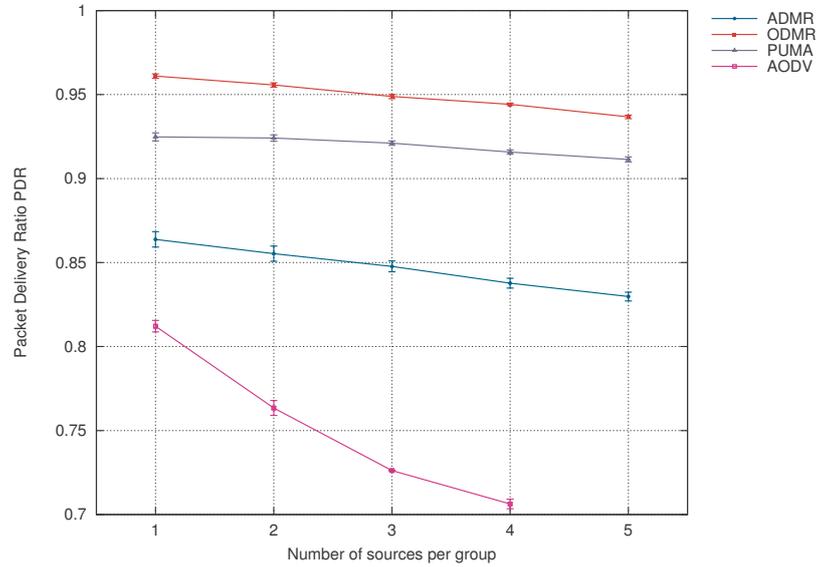


FIGURE 3.5 – PDR avec un paquet envoyé toutes les dix secondes, 6 groupes actifs avec 3 récepteurs par groupe et les timers d’origine des protocoles.

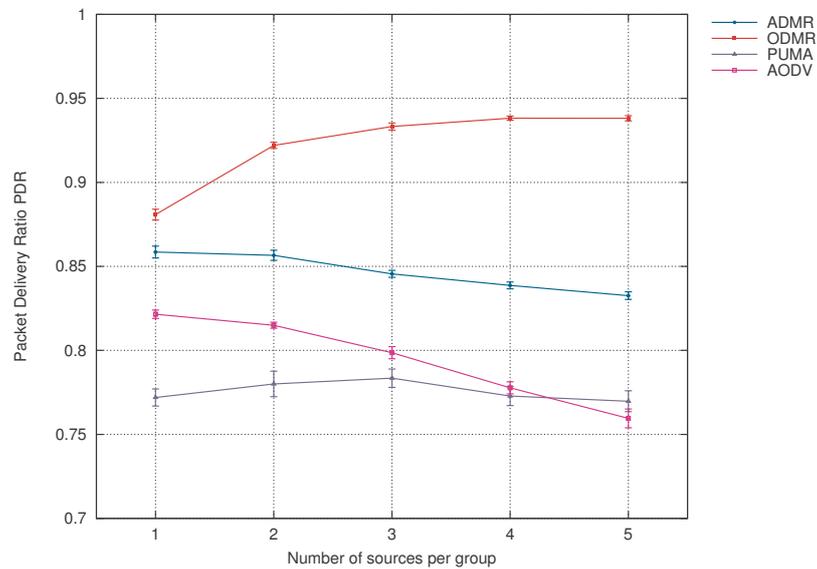


FIGURE 3.6 – PDR avec un paquet envoyé toutes les dix secondes, 6 groupes actifs avec 3 récepteurs par groupe et les nouvelles temporisations.

avec le nombre de sources. Avec les valeurs d’origine, les collisions ne sont plus élevées que lorsque l’on utilise des temps d’expiration de routes plus grands.

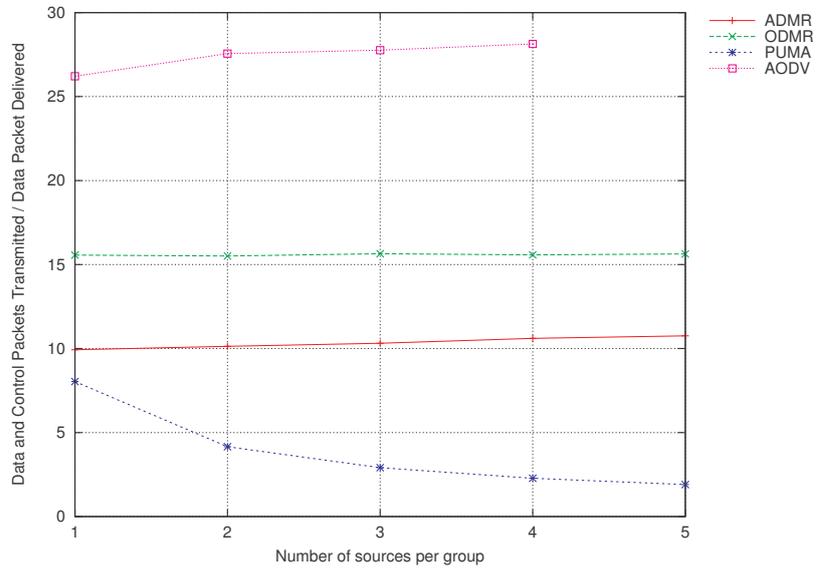


FIGURE 3.7 – Overhead, 1 paquet envoyé toutes les 10 secondes, 6 groupes actifs avec trois récepteurs par groupe et les temporisations d’origine.

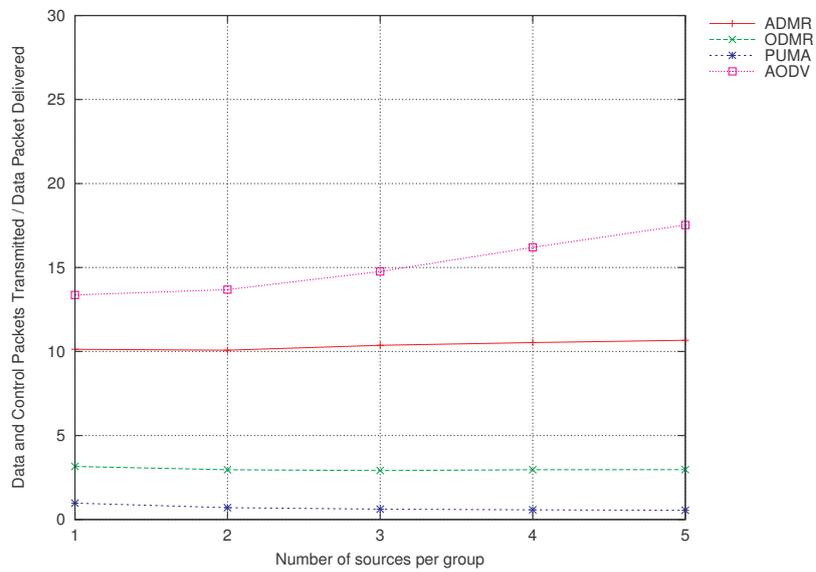


FIGURE 3.8 – Overhead, 1 paquet envoyé toutes les 10 secondes, 6 groupes actifs avec trois récepteurs par groupe et les nouvelles temporisations.

**Nombre de sauts** Les figures 3.12(a), 3.12(b) et 3.12(c), montrent la répartition du nombre de sauts effectués par les paquets avant qu’ils n’atteignent leur destination. La plupart des paquets sont livrés en un seul bond. Le deuxième groupe le plus important

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

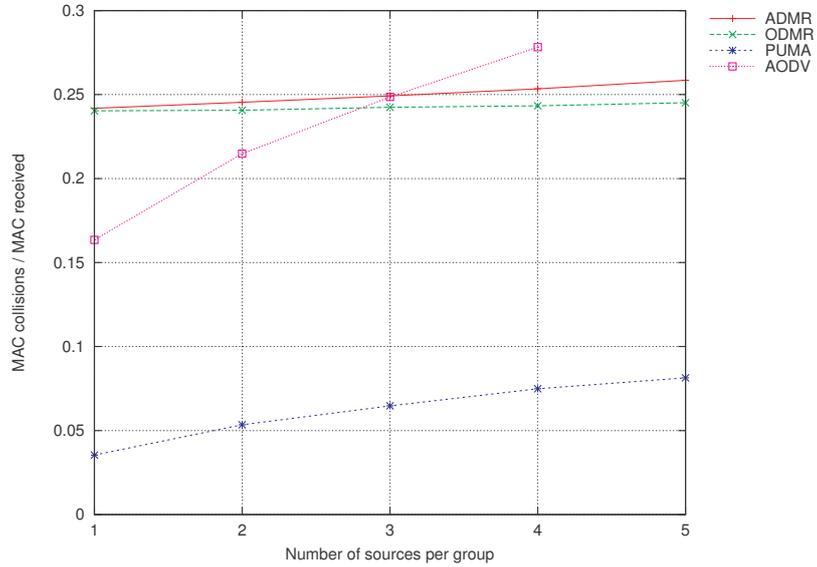


FIGURE 3.9 – Taux de collision, 1 paquet envoyé toutes les 10 secondes, 6 groupes actifs avec trois récepteurs par groupe et les temporisations d'origine.

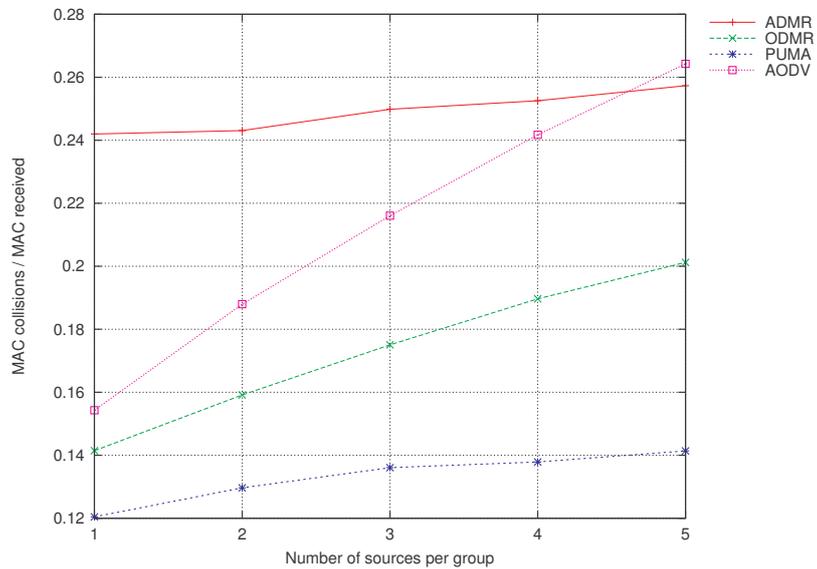


FIGURE 3.10 – Taux de collision, 1 paquet envoyé toutes les 10 secondes, 6 groupes actifs avec trois récepteurs par groupe et les nouvelles temporisations.

est celui avec deux sauts. Cette information indique le type de réseau que l'on a.

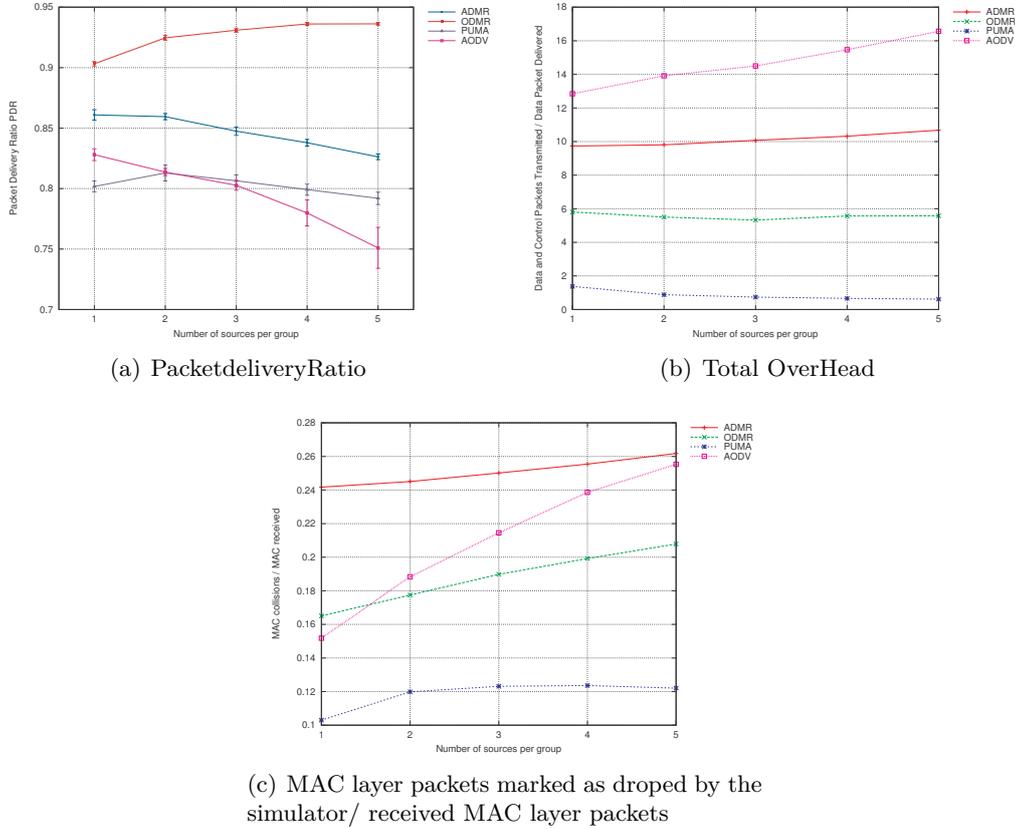


FIGURE 3.11 – Résultats pour des paquets de données envoyés toutes les 10 s et une temporisation de 30 s.

Dans la deuxième partie des expériences, nous augmentons la charge du réseau et les nœuds vont envoyer un paquet toutes les cinq secondes. Les figures 3.13 et 3.14 montrent les résultats de simulations. Des simulations ont été effectuées avec deux valeurs de temporisation : 15 et 30 secondes. Les résultats vont dans le même sens que ceux obtenus avec un temps interpaquet de 10 secondes. ODMR est le meilleur, suivi par ADMR, puis PUMA. En outre, la performance d'AODV se dégrade beaucoup plus vite. Cela est dû au nombre élevé de paquets envoyés.

### 3.4.4.1 Comparaison par protocole

La figure 3.15 présent comment le PDR varie en fonction de la valeur de la temporisation d'expiration de route. Dans la même logique, les figures 3.16 et 3.17 montrent l'overhead et le taux de collisions respectivement.

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

---

Dans la figure 3.15(a), on voit que le PDR n'évolue pas avec ADMR. Le fonctionnement du protocole fait que la route est rafraîchie en fonction du temps entre les paquets. La modification de la durée de vie de la route n'a pas d'impact majeur sur la performance. Par conséquent, les valeurs globales générales sont les mêmes tout le temps (Fig. 3.16(a)). En outre, les collisions sont de 25% tout le temps, voir Figure 3.17(a).

Dans le cas d'AODV, la pente est plus grande qu'avec les autres protocoles. Avec le changement de la durée de vie de la route, le PDR est amélioré, voir Figure 3.15(b). Les modifications permettent de réduire l'overhead (figure 3.16(b)) et les collisions sont faibles (figure 3.17(b)). Quand le nombre de sources augmente, les collisions aussi. Habituellement, les protocoles multicast entraînent des taux de collisions constants, ou linéaires, en fonction du nombre de sources. Cependant, le taux de croissance de collisions est supérieur avec AODV.

Avec ODMR, les écarts diminuent en augmentant le nombre de sources. Les valeurs importantes de temporisation sont préjudiciables quand on a une seule source. Quand le nombre de sources augmente, les résultats sont similaires (Figure 3.15(c)), mais le fait demeure que la surcharge est beaucoup plus faible avec les nouveaux timers (figure 3.16(c)). Les collisions passent de 25% à 10%, pour une seule source par groupe, et de 25% à 20% quand il y a cinq sources par groupe (figure 3.17(c)).

Comme ADMR, PUMA n'est pas aidé par le changement de la durée de vie de la route. En fait, la performance PUMA s'aggrave avec de nouvelles temporisations. La perte est de 10% et 12%, voir Figure 3.15(d). Le protocole utilise une procédure d'association hiérarchique pour réduire l'overhead. La figure 3.16(d) montre que l'overhead de PUMA est moindre par rapport aux autres protocoles. Il est encore plus faible lorsque nous appliquons les modifications. Mais, cela est contre-productif parce que la route est plus longue à s'établir et le nombre de collisions augmente (Figure 3.17(d)).

## 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons comparé les protocoles de routage ADMR, ODMR, PUMA et AODV pour une application de suivi médical. Selon nos résultats, les protocoles de multicast ont de bonnes performances dans les réseaux IEEE 802.15.4. Pour un réseau IEEE 802.11, les résultats sont similaires. Donc, les protocoles de type unicast ne sont probablement pas la meilleure solution dans notre application.

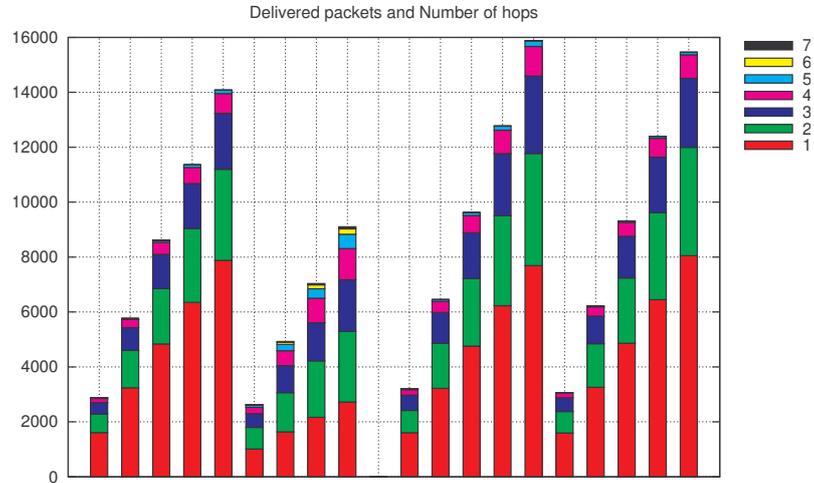
Nous observons que les mécanismes utilisés pour établir le routage par ces protocoles pourront amener des résultats très variables. Par exemple, PUMA offre une surcharge

---

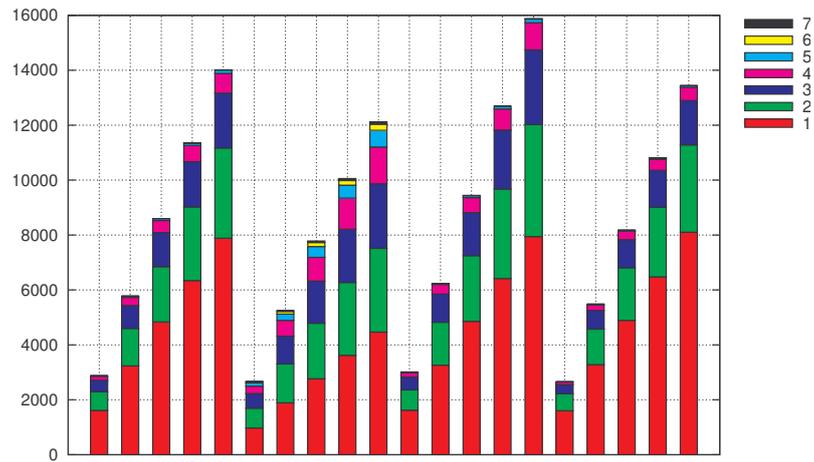
de contrôle faible et moins de pertes de paquets. En revanche, en raison d'une structure hiérarchique qui contrôle des inondations pour régénérer dynamiquement le routage, PUMA n'amène pas forcément la meilleure performance. ODMR, quant à lui, crée plus de paquets de contrôle, mais conduit à un PDR supérieur à celui des autres protocoles étudiés.

Dans tous les cas, la performance du réseau n'est pas totalement satisfaisante vis-à-vis de l'application de suivi médical. Cette étude met en évidence la difficulté de paramétrage des protocoles dans le contexte considéré. Ceci nous amène à réfléchir et à proposer une nouvelle approche décrite dans le chapitre suivant.

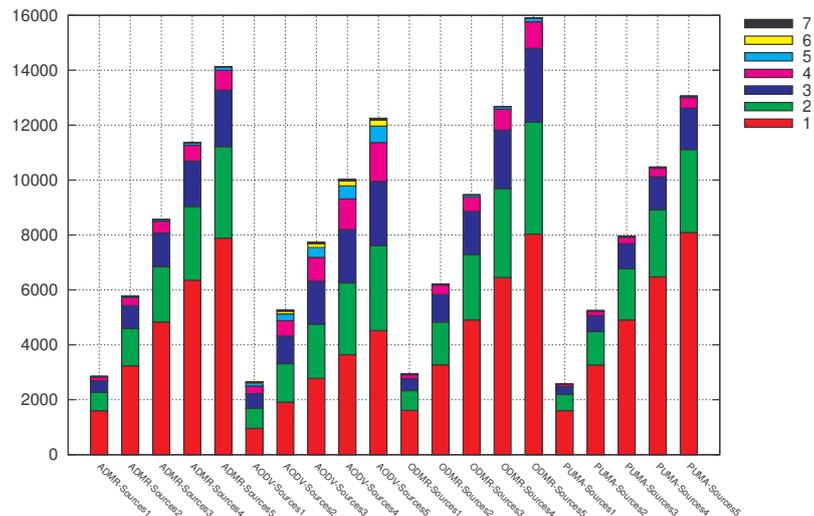
### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?



(a) Temporisations d'origine.



(b) Temps d'expiration de la route 30 secondes



(c) Temps d'expiration de la route 60 secondes

FIGURE 3.12 – Nombre de sauts, résultats pour des paquets de données envoyés toutes les 10 s.

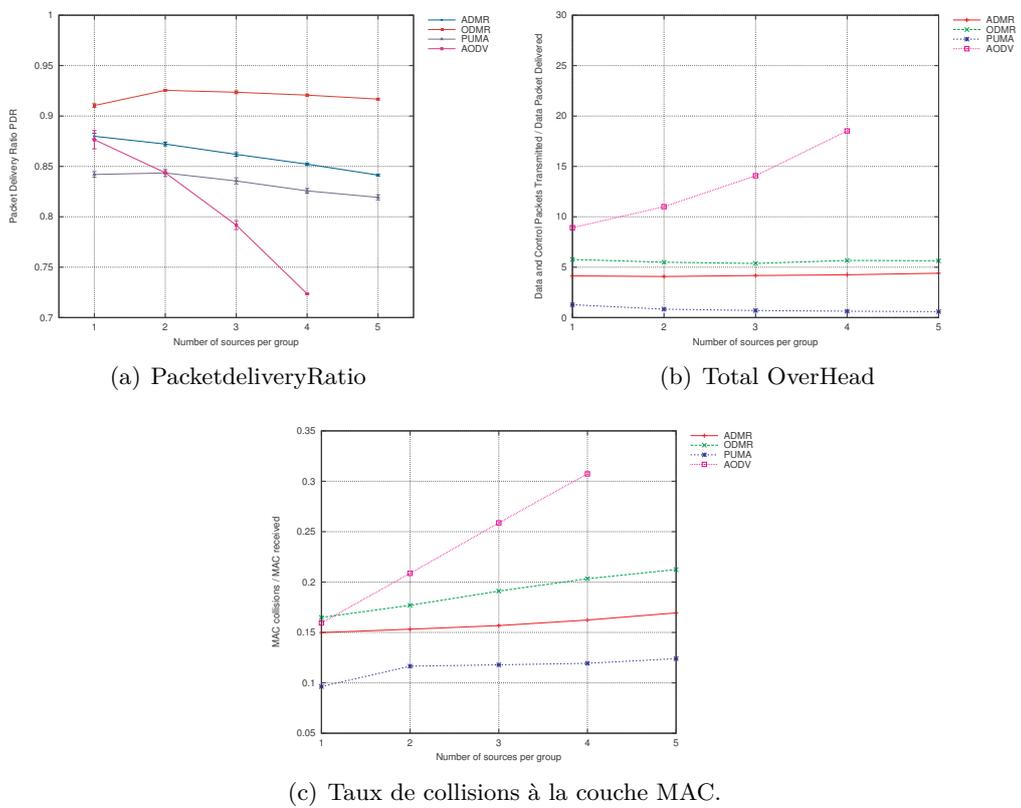


FIGURE 3.13 – Résultats pour des paquets de données envoyés toutes les 5 s. Timer 15 s.

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

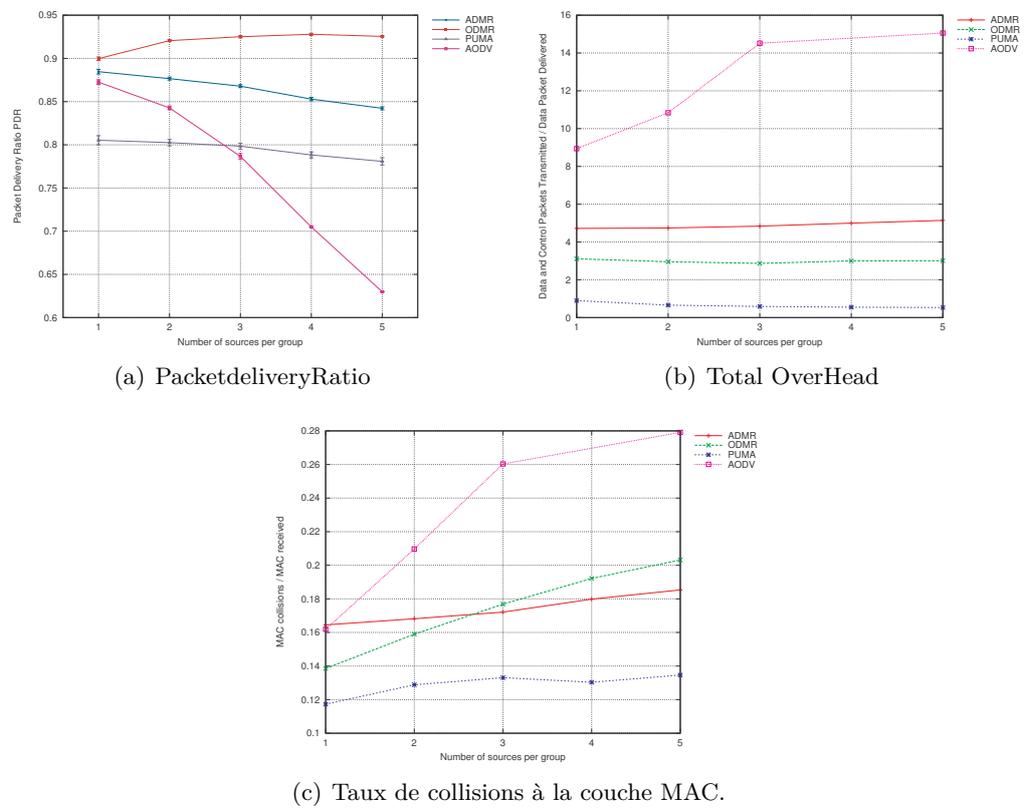
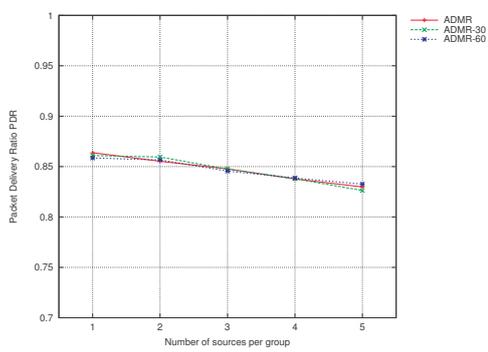
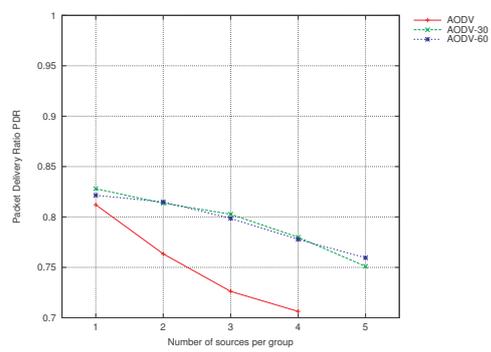


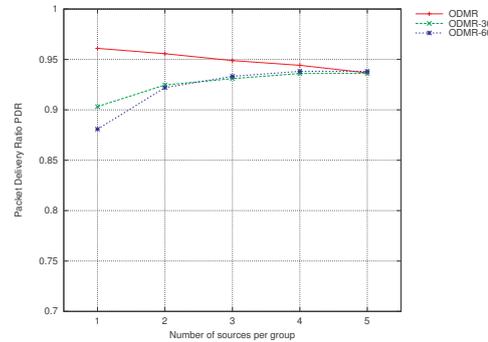
FIGURE 3.14 – Résultats pour des paquets de données envoyés tous les 5 s. Timer 30 s.



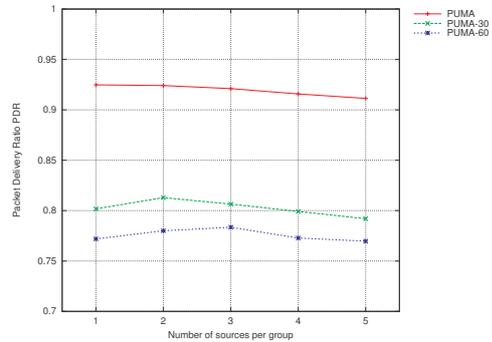
(a) ADMR



(b) AODV



(c) ODMR



(d) PUMA

FIGURE 3.15 – Taux de livraison de paquets PDR, résultats pour des paquets de données envoyés tous les 10 s.

### 3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?

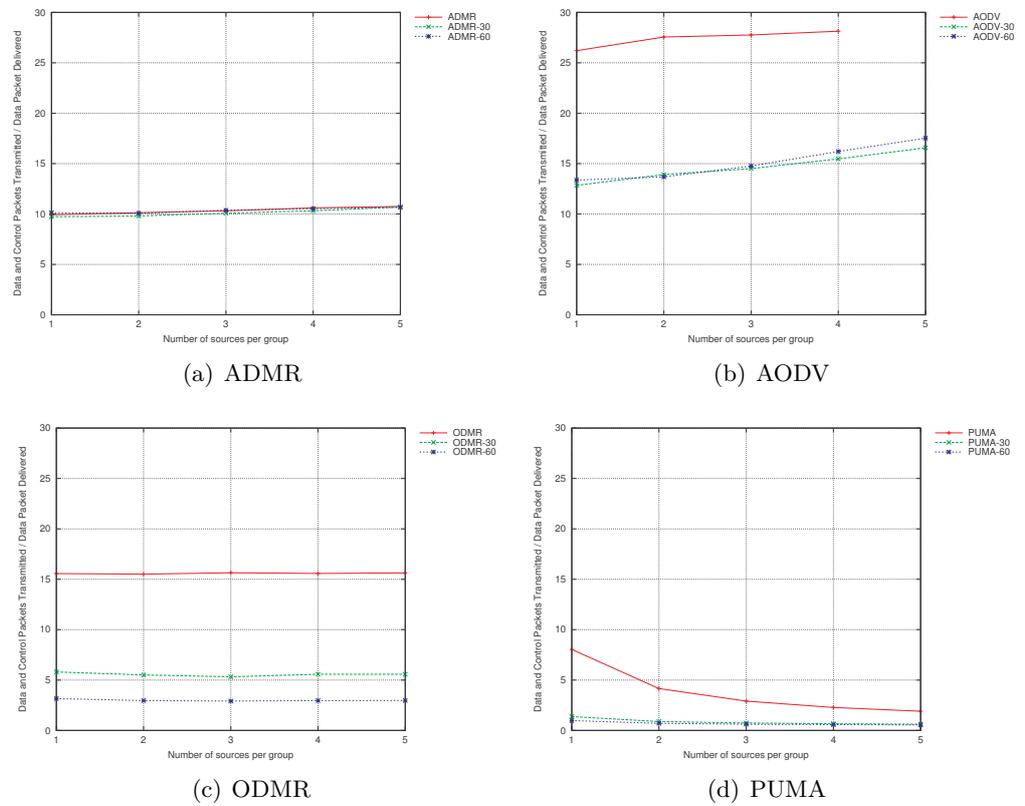
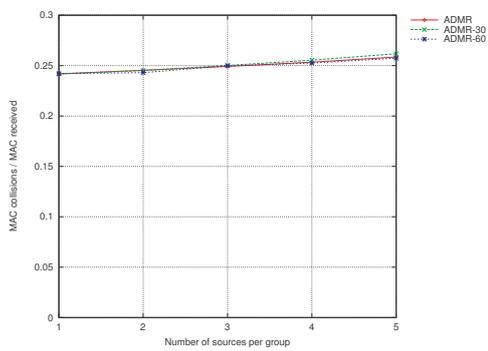
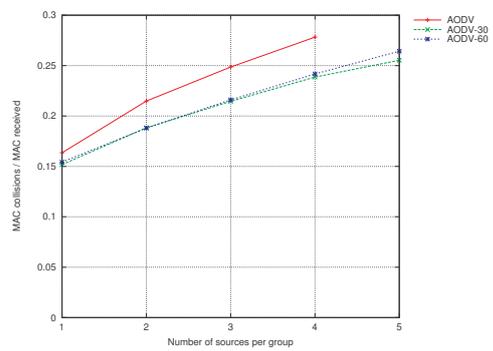


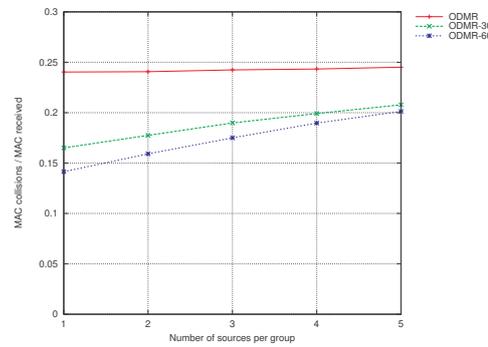
FIGURE 3.16 – OverHead, résultats pour des paquets de données envoyés tous les 10 s.



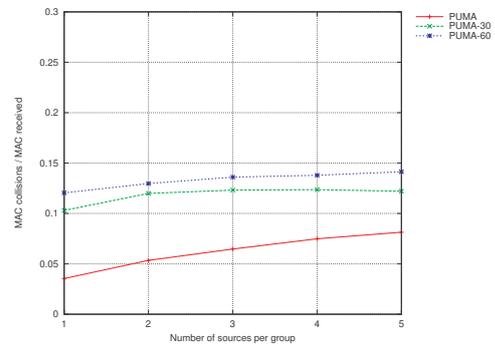
(a) ADMR



(b) AODV



(c) ODMR



(d) PUMA

FIGURE 3.17 – Taux de collisions, résultats pour des paquets de données envoyés tous les 10 s.

### **3. SÉLECTION D'UN MODÈLE DE COMMUNICATION POUR UN SYSTÈME DE SUIVI MÉDICAL : UNICAST VS MULTICAST ?**

---

## Chapitre 4

# Analyse de l'hétérogénéité dans les réseaux de suivi médical

### 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons comparé plusieurs protocoles qui conduisent à des performances contrastées pour notre application de surveillance médicale. Les protocoles fondés sur une structure hiérarchique, comme PUMA, permettent de réduire l'overhead et le taux de collisions. Mais [Protocol for Unified Multicasting through Announcements \(PUMA\)](#) n'offre pas la meilleure performance en termes de taux de réception. Le protocole ODMR fondé sur une structure maillée, fournit de bons résultats et en particulier le meilleur [Taux de réception de paquets, Packet Delivery Ratio \(PDR\)](#). En effet, il engendre globalement moins de paquets de contrôle. Cependant, aucun de ces protocoles n'est complètement satisfaisant pour les applications de suivi médical, car la perte de paquets causée par la faible capacité du réseau et par la mobilité des personnes est trop élevée.

Dans nos précédents travaux, nous sommes partis de l'hypothèse que tous les nœuds sont homogènes. Autrement dit, nous considérons que tous les nœuds ont la même capacité (stockage, calcul, etc.) dans le réseau de capteurs. Prenons un exemple, dans une application "médicale", un capteur de température peut envoyer ses paquets (contrôle et données) à tous les capteurs à sa portée quel que soit le type de capteur. Tous les nœuds contribuent à l'établissement des routes comme dans un réseau ad hoc. Avec cinq ou six capteurs par patient et cinq patients à surveiller par infirmière ou par médecin, la charge du réseau dépasse facilement la capacité de transmission d'un réseau IEEE 802.15.4.

## 4. ANALYSE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES RÉSEAUX DE SUIVI MÉDICAL

---

Dans le contexte des applications de suivi médical, les nœuds pourront avoir des capacités hétérogènes. Dans les applications que nous avons étudiées, nous avons constaté que presque toutes considèrent la présence de nœuds spécifiques (de type smartphones ou plus anciennement de PDA). Parmi les capteurs positionnés sur le corps d'un patient, on pourrait considérer qu'un nœud particulier et plus puissant pourrait jouer le rôle de coordinateur de groupe qui pourrait alors gérer ce groupe de capteurs.

Nous nous demandons donc s'il est possible d'améliorer la fiabilité de transmission par des protocoles de Multicast, en utilisant l'hétérogénéité du réseau sous-jacente. Cette approche exploitera les nœuds ayant des capacités plus élevées (dits nœuds puissants) pour mieux router et stocker les paquets en transit. Le premier objectif de cette étude est de réduire la perte de paquets.

Dans ce contexte, seuls les nœuds puissants participent au routage Multicast. Sur la base de l'actuel routage Multicast ODMR (On-Demand Multicast Routing Protocol) [37] nous présentons un nouveau routage Multicast avec des nœuds hétérogènes nommé **H**étérogène **M**ulticast **R**outing (HMR). Les résultats des simulations montrent que cette approche peut être une solution intéressante pour les réseaux **BAN** et les réseaux **PAN**.

### 4.2 Heterogeneous Multicast Routing (HMR)

Le routage Multicast est un bon candidat pour réduire les collisions à la couche MAC, car il permet de réduire la charge du réseau. Il existe de nombreux protocoles de routage Multicast conçus pour les réseaux IEEE 802.11 tels que : **On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMR)** [37], **Adaptive Demand-driven Multicast Routing protocol (ADMUR)** [30], et **PUMA** [56] ; comme nous l'avons vu précédemment. Pour les applications de surveillance de la santé, nous avons étudié ces protocoles de routage Multicast. **ODMR** s'est révélé le plus performant.

#### 4.2.1 ODMR

Rappelons qu'**ODMR**[37] est un protocole multicast qui utilise un maillage pour établir un routage dynamique. Il autorise la mobilité des nœuds, et il est aussi de type soft-state, car il utilise des mécanismes "publication et abonnement" pour gérer la route entre une source et une destination (abonné). Dans ce cadre, les capteurs (nœuds) sur le patient sont les sources ; les nœuds sur une infirmière ou un médecin sont les destinations. Une source doit "publier" des informations de routage vers les nœuds à sa portée ; une destination peut "souscrire" à une requête venant de la source

---

en question. Le protocole [ODMR](#) pourrait inonder périodiquement le réseau par ses paquets de contrôle “Join-Query” (la publication); et s’il y a des nœuds intéressés envoyer un paquet “Join-Response” (la souscription).

Un nœud source (un capteur) envoie des paquets de contrôle lorsqu’il a des données à émettre. Ce nœud peut envoyer ces paquets à tous les voisins à portée. Le nœud source n’a pas besoin de connaître l’adresse de ses voisins, car le paquet de contrôle dispose d’une adresse multicast. Dans notre cas, l’adresse multicast peut être l’identifiant du patient. Ensuite, tous ces voisins se mobilisent pour établir un routage.

Le problème, nous le croyons, est lié à la façon d’établir une route entre les nœuds qui sont sur le patient. Nous cherchons donc une méthode pour établir le routage sans la participation de tous les nœuds afin de réduire l’inondation de paquets de contrôle (publication) dans le réseau BAN. Rappelons que, dans ce type de réseaux, le peu de capacité du matériel est le principal obstacle.

Malgré l’existence de plusieurs méthodes de regroupement, la discrimination matérielle semble plus adéquate.

L’idée est donc de sélectionner un nœud coordinateur pour chaque groupe de capteurs sur le patient. De toute évidence, un nœud ayant une capacité supérieure (stockage et calcul) doit être coordinateur. Ce sera un smartphone, par exemple. Nous considérons que les nœuds capteurs n’ont pas beaucoup d’espace disponible pour stocker les données et pour calculer une route. Ces nœuds seront dits “faibles” et n’exerceront pas le rôle de coordinateur.

#### 4.2.2 HRM

L’approche HMR repose sur les hypothèses suivantes :

Un nœud faible dans un groupe ne peut envoyer ses paquets qu’à son coordinateur (un seul nœud puissant par groupe). Les nœuds puissants (coordinateur) participent à l’établissement du routage si le lien entre la source et la destination peut être établi par les nœuds puissants. Si ce n’est pas le cas (les portées entre les nœuds puissants ne couvrent pas la distance entre la source et la destination), le routage est établi par les nœuds puissants et les nœuds faibles concernés. En outre, la maintenance du routage dynamique est prise en charge par des paquets de contrôle quand un patient ou un médecin (infirmière) se joint au réseau.

## 4. ANALYSE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES RÉSEAUX DE SUIVI MÉDICAL

---

### Fonctionnement

Dans cette partie, nous présentons le fonctionnement de notre protocole “Heterogeneous Multicast Routing” fondé sur ODMR.

Une fois que le protocole commence, il suit les étapes suivantes :

**Le nœud détermine son rôle :** Pour déterminer s’il est puissant, le nœud mesure l’espace disponible de son «buffer» de données. Si la valeur obtenue est supérieure à un seuil, alors le nœud est considéré comme puissant, dans le cas contraire le nœud agit comme un nœud faible. Cette valeur de seuil est unique pour tous les nœuds du réseau. On peut même envisager que cette valeur soit préprogrammée.

Les nœuds faibles ne peuvent pas envoyer de paquet de type publication à un nœud faible de son groupe ni à un nœud faible d’un autre groupe. Les nœuds faibles ne peuvent communiquer qu’avec leur chef de groupe (un nœud puissant).

Seuls les nœuds puissants peuvent participer à l’acheminement des paquets. Il faut rappeler qu’il y a un nœud puissant par groupe. On va donc considérer un groupe de nœuds par personne.

**Justification :** Les nœuds étant proches géographiquement, nous pouvons les regrouper, en espérant réduire le nombre de paquets de contrôle. Nous pensons donc que cette particularité peut être exploitée.

Une autre option consiste à utiliser deux protocoles de routage, l’une pour le réseau **BAN** et une autre pour le réseau **PAN**. Mais cela implique d’autres considérations au niveau des exigences de matériel sur le dispositif puissant (tête de groupe). Pour l’instant, il suffit de considérer le Smartphone comme un appareil avec un minimum de fonctionnalités. Autrement dit, le protocole de routage utilise un minimum de ressources des nœuds puissants. Sinon, on pourrait aussi considérer que l’appareil peut envoyer des paquets par les autres interfaces radio.

**Propagation des paquets de publication (publish).** Le fonctionnement traditionnel du protocole indique que chaque nœud stocke ses propres paquets de données en attente d’un abonné. Pendant ce temps, les paquets de type “Join-Query” continuent à se propager entre les nœuds qui reçoivent le message.

Si un nœud normal n’a pas un grand espace pour le stockage de paquets de données, et si l’abonné n’est pas enregistré rapidement après le début de la génération des données, il existe un risque de perte de paquets au niveau du nœud source en raison du manque d’espace. Encore une fois, l’utilisation des nœuds puissants est utile. Il n’y a

---

pas besoin de recourir à un algorithme pour trouver un nœud tête du groupe. Le choix du coordinateur est appliqué en fonction du matériel. Nous avons modifié le protocole pour le nœud puissant, il s'abonne aux données de leurs nœuds faibles, même s'il n'y a pas de nœud puissant (médecin ou infirmière) intéressé.

En outre, les paquets tels que “Join-Query” sont propagés par des nœuds puissants seulement. Cette mesure est utilisée dans l'espoir de réduire les collisions de paquets causées par la publication d'informations. En d'autres termes, on suppose que la communication au sein du réseau BAN est réalisée en un seul saut.

La métrique utilisée par le protocole pour la sélection d'une route est le nombre de sauts. En utilisant différents types de nœuds, la métrique a également été modifiée. Maintenant, les paquets de contrôle comprennent le nombre de stations puissantes qui sont traversées. La route idéale est celle qui parcourt le nombre minimal de nœuds et en cas d'égalité celle qui aura le nombre maximum de nœuds puissants.

**Renforcer le processus d'abonnement.** Le protocole de base n'utilise pas de messages unicast à la couche **MAC**. Cela signifie que tous les paquets de la couche **MAC** sont reçus par diffusion puis traités à la couche réseau. Cette décision est justifiée parce que le protocole tente d'obtenir beaucoup d'informations sur les voisins, et la bande passante de la couche **MAC** n'est pas un problème dans l'étude originale (en utilisant la norme IEEE 802.11).

Un des problèmes survient quand un paquet de type “subscribe” est perdu à cause de collisions. Nous croyons que l'utilisation de l'unicast à la couche **MAC** pour des paquets de type “Join-Response” pourrait donner une plus grande fiabilité au processus de souscription. Pour cela, nous allons utiliser le mécanisme des accusés de réception. Ainsi, la couche **MAC** envoie un paquet et attend un paquet **ACK**. Si le paquet **ACK** n'est pas reçu, le paquet est envoyé de nouveau un nombre limité de fois.

## 4.3 Évaluation des performances

### 4.3.1 Cadre

L'objectif est de réduire la production de paquets de routage dans les nœuds d'un cluster, comme expliqué dans le paragraphe 4.2.2, pour permettre à des nœuds avec des capacités supérieures de gérer le routage “longue distance”. Le routage longue distance se réfère aux routes qui nécessitent plus d'un saut pour atteindre leurs destinations.

Nous prenons les hypothèses suivantes :

## 4. ANALYSE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES RÉSEAUX DE SUIVI MÉDICAL

---

Atténuation fondée sur la distance : Nous continuons à considérer une atténuation fondée sur la distance, le seuil de la distance choisie est de quinze mètres.

Les nœuds se déplacent à la vitesse de piétons : Le modèle de mobilité est conçu pour simuler les personnes dans un environnement intérieur. Des modifications ont été nécessaires pour mélanger CM avec RPGM. Le modèle de mobilité par contraintes est implanté dans Bonnmotion 2.0 [42]. De cette façon, les patients et le personnel médical respectent les cloisons des bâtiments.

Solution à canal unique : Tous les nœuds utilisent le même canal de IEEE 802.15.4. Il est possible de sélectionner le canal avec le moins d'interférences avec d'autres standards (IEEE 802.11), par exemple le canal 26. Les autres canaux sont plus sujets aux interférences provenant d'autres technologies, comme un "point d'accès" Wi-Fi. Le canal 16 recoupe plusieurs canaux 802.11b (2-6), tandis que le canal 26 est presque entièrement en dehors de la bande 802.11b [23, 16, 54, 33, 53, 61].

Dispositifs hétérogènes : Dans le domaine des réseaux de capteurs, il existe plusieurs études dans lesquelles un nœud décide de sa participation dans la transmission des messages de données en fonction de certains paramètres et les limites(seuil) de ces paramètres (voir [4]). Dans notre cas, les nœuds HMR peuvent être identifiés s'ils sont des nœuds puissants ou faibles, en regardant la capacité de leur buffer.

Le tableau 4.1 affiche les paramètres de simulation. Dans nos simulations, les trente-cinq nœuds sont distribués sur les patients en six groupes (six patients, chaque patient a cinq capteurs). Chaque nœud (capteur) agit comme un nœud source. Le nombre de nœuds sur le personnel médical est de cinq. Autrement dit, il y a cinq destinations qui vont souscrire aux sources.

L'espace est de 57 par 17 mètres. Le plan géographique a été pris à partir d'un plan réel d'hôpital. Par rapport à l'étude du chapitre précédent, où l'espace ne dépend pas d'un plan réel d'un hôpital, les simulations de ce chapitre utilisent ce vrai plan. La figure 4.1 présente un aperçu de la topologie utilisée dans la simulation.

Comme dans les chapitres précédents, nous avons sélectionné quelques caractéristiques à surveiller dans les scénarios de mobilité. Alors, le degré de partitionnement des scénarios est inférieur à 1,2. Cette valeur et la façon dont il est calculé sont détaillées dans la section 3.4.1. Nous pouvons remarquer que les restrictions sur les valeurs de ce paramètre viennent du fait que les protocoles de routage ne sont pas conçus pour les réseaux partitionnés. La plupart des statistiques de mobilité reposent sur le papier [6].



FIGURE 4.1 – Illustration du réseau montrant les positions de 35 nœuds simulés, des cercles superposés représentent un patient portant 5 nœuds capteurs.

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation.

| Paramètre              | WSN      | statistiques                | WSN        |
|------------------------|----------|-----------------------------|------------|
| Durée [s]              | 1 000    | Portée d'émission [m]       | 15         |
| Région [ $m^2$ ]       | 57x15    | Distance dans le corps [m]  | 0.5        |
| Nœuds                  | 35       | Partitions                  | 1.16       |
| Récepteurs             | 5        | Mob. Récepteurs             | CM         |
| Nœuds par groupe       | 5        | Mob. émetteurs              | Grouped CM |
| Vitesse Min, Max [m/s] | (0.2, 1] | Total des liens             | 2362       |
| Temps de pause [s]     | (0, 300] | Disponibilité moy de trajet | 96.05%     |

**Le simulateur** Nous utilisons le simulateur NS-2 [1] version 2.34 et la mise en œuvre d'ODMR effectué par Jetcheva [30].

**Trafic de données** Les paquets de données sont envoyés sous forme d'un flux Constant Bit Rate (CBR) de type UDP.

### 4.3.2 Scénarios de simulation

Nous organisons les simulations en fonction des 3 scénarios suivants :

- Premier scénario : les nœuds-source engendrent 1 paquet par seconde, et nous faisons varier le nombre de récepteurs de chaque groupe de un à cinq.
- Deuxième scénario : les nœuds-source envoient 1 paquet toutes les 2,5 secondes, et nous font varier le nombre de récepteurs de chaque groupe de un à cinq.

## 4. ANALYSE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES RÉSEAUX DE SUIVI MÉDICAL

---

- Troisième scénario : les nœuds-source engendrent entre un paquet par seconde et un paquet toutes les dix secondes, avec trois récepteurs dans chaque groupe.

### 4.3.3 Métriques observées

Comme dans l'étude précédente, nous avons mis l'accent sur les trois mesures qui suivent.

Packet Delivery Ratio (PDR). Le PDR est le rapport entre le nombre de paquets émis par la couche d'application et le nombre de paquets reçus au niveau de la destination. En multicast, nous considérons le temps de souscription de chaque puits afin d'évaluer correctement cette mesure. En effet, tous les puits commencent à recevoir des paquets de données à un moment aléatoire.

Overhead de signalisation : est le nombre total des paquets de données et de contrôle transmis par l'ensemble des nœuds du réseau (source ou relais) divisé par le nombre total de paquets de données délivrés.

Taux de collision : donne une idée de la charge sur le réseau.

Auparavant, nous avons essayé de voir l'impact de la variation du nombre de sources au sein de chaque groupe de multicast. À cette occasion, nous voulons voir l'impact de la variation du nombre de récepteurs. Le système est configuré de telle sorte que tous les capteurs d'un patient envoient des données régulièrement. Enfin, nous voulons voir l'impact du changement de la période d'envoi des paquets. À cet effet, nous utilisons trois récepteurs et nous avons testé des taux d'émission élevés.

### 4.3.4 Résultats et analyse de simulation

#### 4.3.4.1 Premier scénario

Contrairement au routage multicast existant dans les réseaux ad hoc où tous les nœuds transmettent tous les paquets de routage, HMR permet seulement aux coordinateurs de participer à l'établissement du routage multicast. Comme indiqué par la figure 4.2, avec HMR le nombre de collisions diminue rapidement dans tous les cas, quel que soit le nombre de récepteurs.

Si le nombre de collisions par nœud et par seconde est d'environ 23% quand il n'y a qu'un seul récepteur (par groupe) dans le réseau, avec HMR le nombre de collisions descend à 11%. La réduction des collisions est entre 52 % et 29 % par rapport à ODMR. Par conséquent, le PDR atteint un taux maximum de 80 %, tandis que ODMR atteint péniblement les 70 % (voir figure 4.3). Cependant, on observe que l'amélioration du

PDR est limitée lorsque la charge du réseau est élevée. Cela signifie que, lorsque 4 ou 5 récepteurs rejoignent le réseau de capteurs sans fil, le PDR ne semble plus pouvoir être amélioré. Lorsque le nombre de récepteurs augmente, il y a plus de liens à maintenir. Donc, on observe que des connexions sont perdues. Par ailleurs, il est à noter que l'overhead est également diminué de près de 50% pour le scénario complet (voir figure 4.4). C'est ce critère qui nous semble décisif en faveur de HMR.

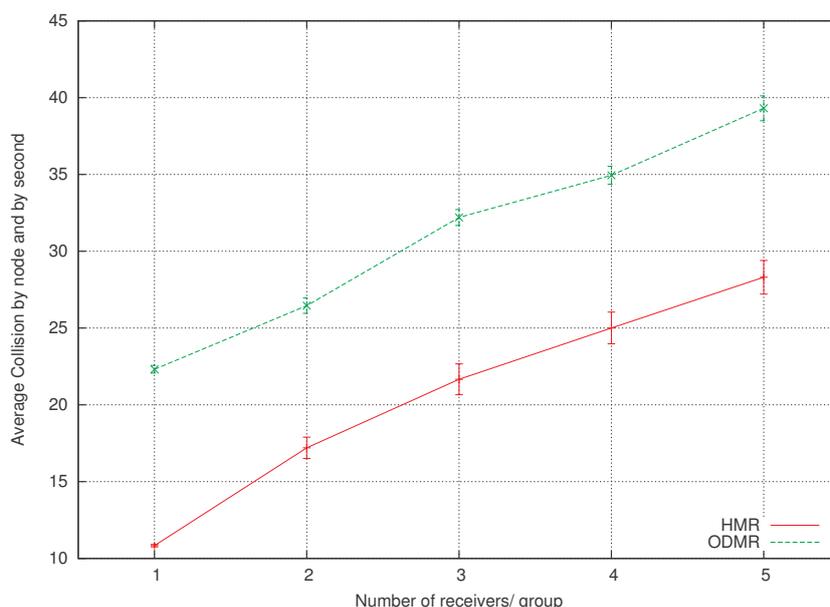


FIGURE 4.2 – Collisions. Un paquet engendré chaque seconde.

#### 4.3.4.2 Deuxième scénario

Dans le deuxième scénario, nous pouvons observer que le PDR global (figure 4.6) est plus élevé que dans le premier scénario.

La figure 4.6 montre que le PDR atteint un maximum de 82 %. Ainsi les paquets provoquent moins de collisions (voir figure 4.5). Cette réduction du taux d'émission se reflète également dans les paquets de contrôle. Dans ce cas, le taux de collision diminue de 61 % à 40 % par rapport à ODMR. Quant à l'overhead du réseau, il y a une diminution importante lorsque le nombre de récepteurs par groupe est faible. L'écart entre l'overhead d'ODMR et celle de HMR diminue quand le nombre de récepteurs augmente (voir Figure 4.7).

#### 4. ANALYSE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES RÉSEaux DE SUIVI MÉDICAL

---

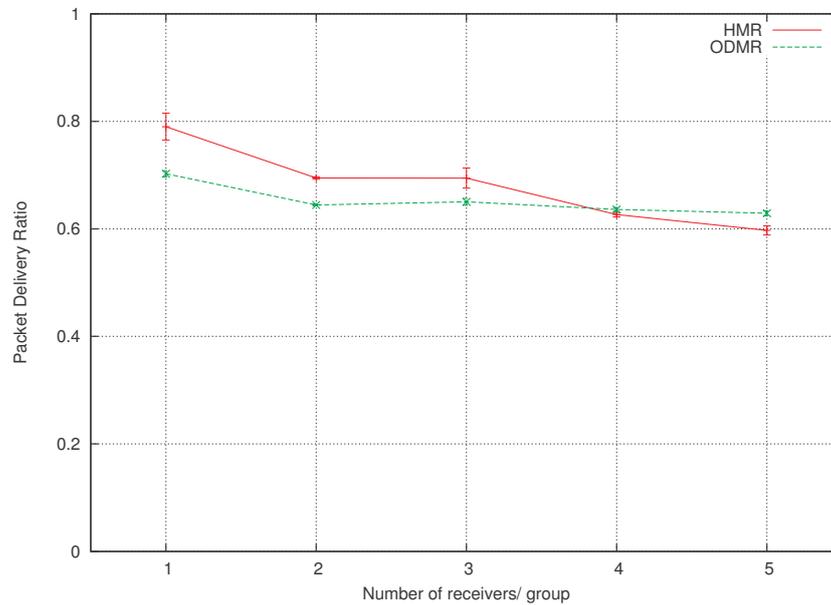


FIGURE 4.3 – PDR. Un paquet envoyé chaque seconde.

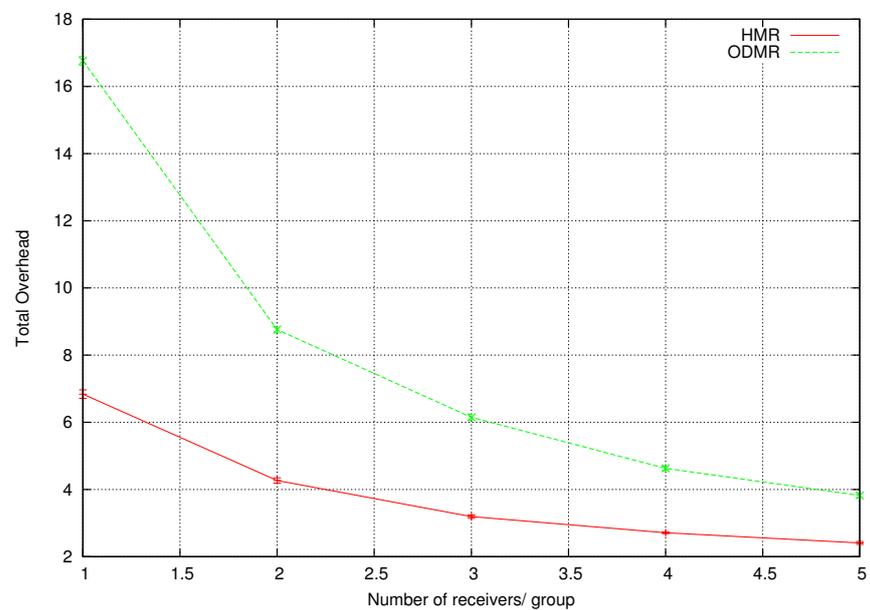


FIGURE 4.4 – Overhead total. Un paquet envoyé chaque seconde.

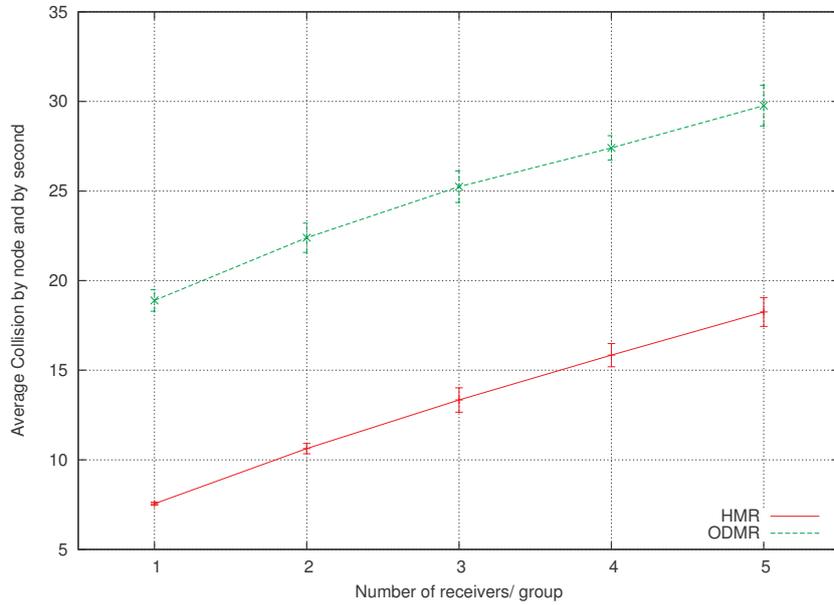


FIGURE 4.5 – Collisions. Un paquet engendré toutes les 2.5 secondes.

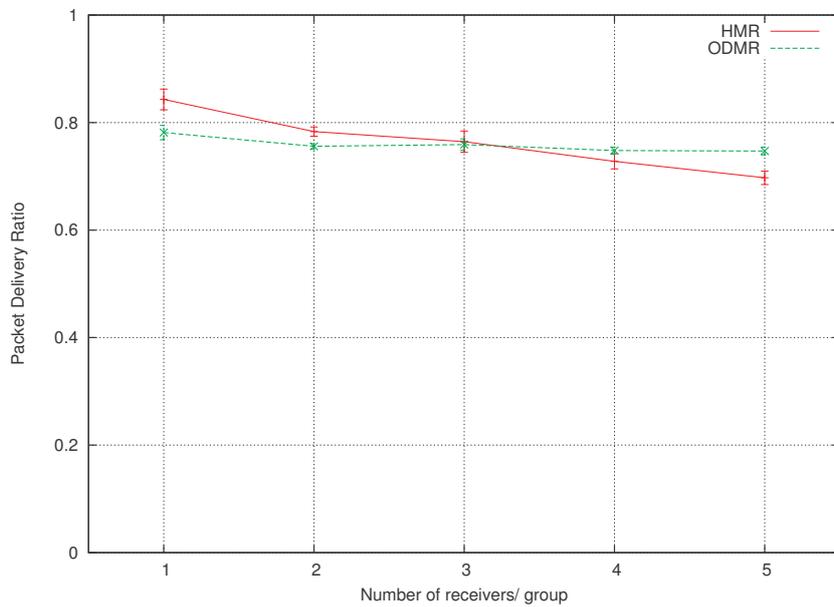


FIGURE 4.6 – PDR. Un paquet envoyé toutes les 2.5 secondes.

#### 4.3.4.3 Troisième scénario

Dans le troisième scénario, le nombre de paquets envoyés varie d'un paquet par seconde à un paquet toutes les dix secondes. La figure 4.8 présente la réduction des

## 4. ANALYSE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES RÉSEAUX DE SUIVI MÉDICAL

---

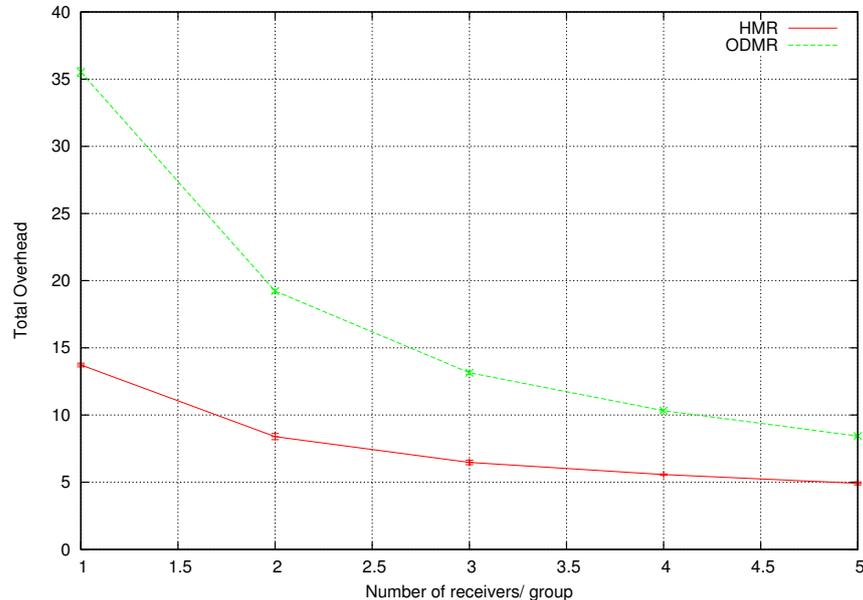


FIGURE 4.7 – Overhead total. Un paquet engendré toutes les 2.5 secondes.

collisions. La diminution des collisions est plus importante quand il y a plus de paquets engendrés. En outre, HMR réduit considérablement les collisions dans tous les cas, tout en conservant un PDR presque similaire (voir figure 4.9).

Dans ce scénario, la réduction de l'overhead est de 50 %, comme le montre la figure 4.10.

### 4.3.5 Analyse globale des résultats

En résumé, nous pouvons voir que le protocole HMR réduit les collisions dans tous les scénarios. Il réduit aussi considérablement l'overhead du réseau. Par conséquent, ce protocole permet d'augmenter le PDR. En outre, nous avons toujours constaté que le «débit» dans les réseaux IEEE 802.15.4 est très limité, car dès que le nombre de récepteurs augmente, le réseau n'arrive plus à écouler la charge. C'est normal puisque le standard a été conçu pour des réseaux qui transportent très peu de données.

## 4.4 Conclusion

Dans des réseaux sans fil combinant BAN et PAN, le taux de collisions dans les transmissions est souvent élevé en raison du faible débit et de la faible capacité mémoire

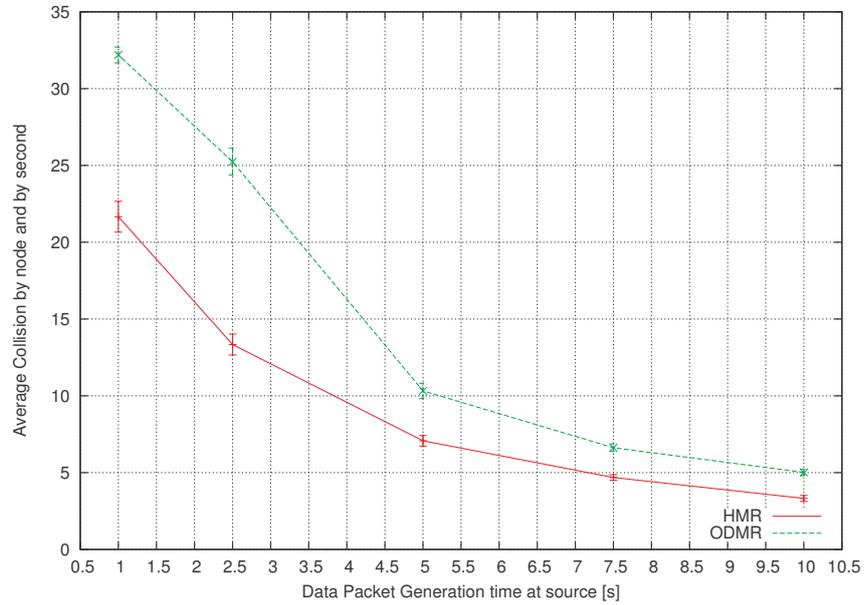


FIGURE 4.8 – Collisions. En changeant le taux de génération de données. 3 récepteurs / groupe.

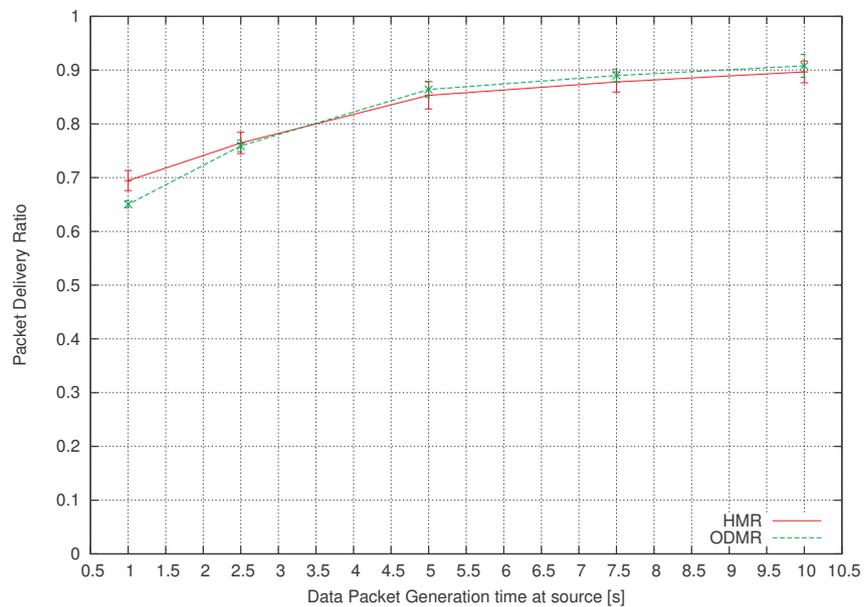


FIGURE 4.9 – PDR. En changeant le taux de génération de données. 3 récepteurs / groupe.

## 4. ANALYSE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ DANS LES RÉSEAUX DE SUIVI MÉDICAL

---

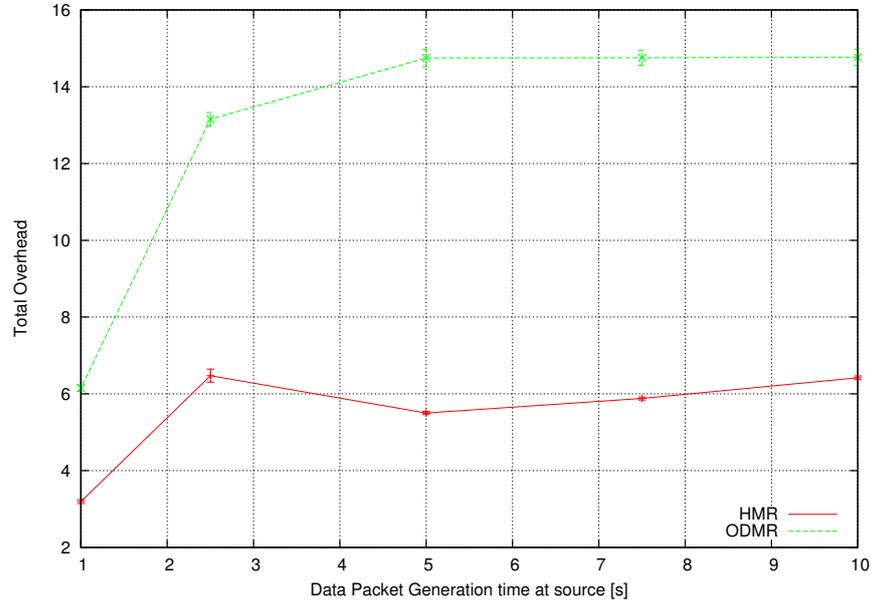


FIGURE 4.10 – Overhead total. En changeant le taux de génération de données. 3 récepteurs / groupe.

des nœuds. Il faut rappeler que ce type de réseau ne possède pas de mécanisme de type [Request to Send / Clear to Send \(RTS/CTS\)](#).

Nous avons présenté dans ce chapitre le protocole de routage HMR, une amélioration d'ODMR, qui exploite l'hétérogénéité des nœuds pour améliorer la fiabilité des transmissions pour des applications de santé. En allégeant la signalisation, HMR permet d'atteindre un [PDR](#) supérieur aux protocoles de routage multicast. Cependant, le système ne peut pas atteindre un PDR plus élevé en raison de contraintes telles que le partitionnement du réseau et les stations cachées.

En outre, deux modèles de mobilité (un pour les patients, un autre pour les médecins) ont également été étudiés pour les applications de surveillance de la santé. Ainsi, l'exploitation de l'hétérogénéité est de notre point de vue une approche intéressante.

Des extensions de HMR pourraient désormais être envisagées telles que des variations adaptatives en fonction de la densité du réseau et d'autres façons d'utiliser le regroupement naturel des nœuds pour réduire les interférences (contrôle de puissance [\[32\]](#)), qui peuvent aussi être utiles pour ce type d'applications.

## Chapitre 5

# Agrégation dans un réseau hétérogène.

### 5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés aux différences de capacité des nœuds dans une application de surveillance médicale. Ces différences nous ont amenés à explorer les idées de regroupement (clustering). Nous avons également indiqué que ce re-groupement n'a pas besoin d'être dynamique comment dans d'autres configurations, et qu'il peut avoir un lien fort avec le matériel utilisé. Les différences dans la quantité d'énergie et de capacité de stockage permettent d'établir des nœuds puissants.

L'étape suivante nous amène maintenant à explorer l'agrégation de données pour essayer d'améliorer la fiabilité de ces réseaux pour cette application.

### 5.2 Agrégation

Nous allons illustrer l'agrégation par un exemple.

#### Exemple d'agrégation et de compression

Dans [60] la mise en œuvre d'une agrégation est proposée. L'application pour mesurer la fatigue utilise trois nœuds : deux Imote2 (un pour chaque pied) avec deux capteurs de pression chacun, et un nœud intégrateur ou agrégateur (appelé NUTS dans cette architecture) qui a des capacités pour communiquer avec des smartphones via des interfaces Bluetooth et 802.11. Normalement, sans l'utilisation de l'agrégation, les

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

---

Imotes2 ont un taux d'échantillonnage de 50 Hz. Les deux nœuds envoient cinquante paquets par seconde, et le nœud NUTS calcule la fatigue estimée. Le protocole de routage utilisé est Zigbee et les auteurs confirment un taux de perte de paquets d'environ 10%.

**Réduction du contrôle :** si l'algorithme de détection de fatigue est mis en œuvre dans les nœuds Imote2, moins de paquets vont être transmis. Les Imote2 ne vont envoyer que des paquets de résumé avec le résultat de la détection de la fatigue à la place des données brutes. La fréquence de génération de paquets dans chaque Imote2 peut alors être d'un Hertz. Avec cette modification, le taux de perte de paquets devient presque 1%.

### Application de suivi médical

Pour spécifier comment l'agrégation fonctionne dans notre système, nous devons d'abord voir ce qui se passe dans le nœud puissant qui remplit les fonctions de chef de groupe chaque fois qu'il reçoit un paquet de données.

Le nœud puissant reçoit un paquet de données. Pour cela, il a déjà reçu un paquet de type "Join-Query" et il a souscrit avec un paquet de type "Join-Response". En outre, le nœud puissant peut savoir s'il est dans le chemin d'un autre nœud qui a souscrit à l'information du patient. Jusqu'à présent, le comportement du nœud est de ré-envoyer chaque paquet de données dans leur ordre d'arrivée. En envoyant chaque paquet de données, le nœud rentre en concurrence pour le support de transmission et peut prendre plusieurs cycles de backoff.

L'agrégation sans compression consiste à attendre un certain temps (agrégation de temps) et de fusionner les paquets de données en un seul. Bien qu'il y ait une réduction du nombre de paquets transmis, la taille des paquets augmente. Si la taille du paquet est très grande, le nœud utilise plus longtemps le support de transmission pour un envoi. Cela peut aussi engendrer des collisions.

#### 5.2.1 Les types de nœuds

Jusqu'ici, nous avons testé HMR et ODMR lorsque les nœuds n'utilisaient qu'un seul niveau de puissance de transmission. Généralement, un protocole de maillage comme ODMR peut obtenir plusieurs chemins pour connecter un capteur à ses destinations. Ici, nous avons jugé important d'introduire un certain degré d'hétérogénéité, car les nœuds capteurs ne transmettent pas à la puissance maximale. Tous les nœuds n'utilisent pas la même puissance d'émission. Nous suggérons que les nœuds normaux utilisent

---

une puissance d'émission plus faible que les nœuds cluster-head (CH). La figure 5.1 représente les nœuds Source **S**, les têtes de clusters **S-R** et les destinations **D**.

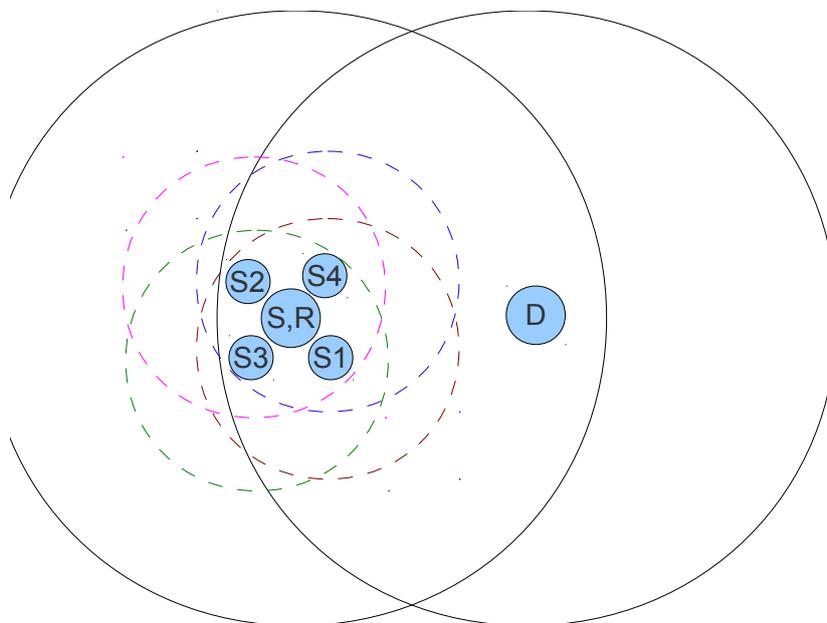


FIGURE 5.1 – Puissance de transmission différente selon le type de nœud.

Dans ce chapitre, nous comparons les scénarios utilisant **différentes** puissances d'émission. Nos travaux antérieurs n'utilisaient qu'**un seul** niveau de transmission. Nous avons essayé une autre configuration, le nœud "S" envoie des paquets de données à la tête du groupe en utilisant de l'unicast. Ensuite, les paquets de données sont regroupés ou **ajoutés** puis envoyés vers la destination en utilisant un protocole de publication / abonnement.

## 5.3 Évaluation des performances

### 5.3.1 Cadre

On compare HMR et ODMR avec deux portées en utilisant une version modifiée du Mannasim pour NS2. Mannasim a trois types de nœuds : capteur, cluster-head et Access point. L'agrégation se fait au niveau de Cluster-Head. Chaque patient aura un dispositif qui servira de Cluster head. La périodicité de génération des données agrégées est la même que la périodicité de génération des données. Les protocoles de routage utilisés sont HMR et ODMR.

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

---

### Modifications

Pour utiliser des niveaux différents de transmission, nous utilisons l'exemple de code source fourni pour le protocole CLUSTERPOW[32] de la couche MAC IEEE 802.11.

Ces modifications conduisent à des changements dans le modèle de propagation utilisé. Auparavant, nous avons utilisé le modèle de propagation TwoRay-Ground, avec des valeurs spécifiques calculées pour les fréquences de la norme IEEE 802.15.4. Toutefois, la croissance de la distance de coupure des modèles (Cross-over distance) rend les valeurs calculées pour la propagation trop grandes et conduit à de grandes différences avec le modèle de canal proposé par la norme. C'est pourquoi nous avons mis en place un nouveau modèle de canal. L'agrégation a également été testée dans notre étude; pour cela, nous avons adapté notre configuration du code Mannasim.

**La puissance de transmission** Nous configurons le simulateur pour utiliser des puissance de transmission exprimée dans la table figurant dans le standard "IEEE 802.15.14".

Autrement dit, il y a 32 niveaux de puissance allant de zéro à -25 dBm. Le tableau 5.1 présente ces nouvelles valeurs pour la puissance d'émission.

TABLE 5.1 – La puissance de transmission.

| Niveau | Puissance<br>dBm | W            | Consommation<br>mA |
|--------|------------------|--------------|--------------------|
| 31     | 0                | 0,001        | 17,4               |
| 27     | -1               | 794 $\mu$    | 16,5               |
| 23     | -3               | 501 $\mu$    | 15,2               |
| 19     | -5               | 316 $\mu$    | 13,9               |
| 15     | -7               | 200 $\mu$    | 12,5               |
| 11     | -10              | 100 $\mu$    | 11,2               |
| 7      | -15              | 31.623 $\mu$ | 9,9                |
| 3      | -25              | 3.2 $\mu$    | 8,5                |

**Modèle du Canal / Modèle de propagation** Nous avons également modifié le modèle de canal. Le modèle de canal pour la norme IEEE 802.15.4 est :  $d = \begin{cases} 10^{(Pt-Pr-40.2)/20} & d < 8m \\ 8 \times 10^{(Pt-Pr-58.5)/33} & d > 8m \end{cases}$  La figure 5.2 illustre la distance en mètres sur l'axe des abscisses et la puissance reçue (dBm) sur l'axe des ordonnées. Les valeurs montrent la puissance minimale et maximale d'émission.

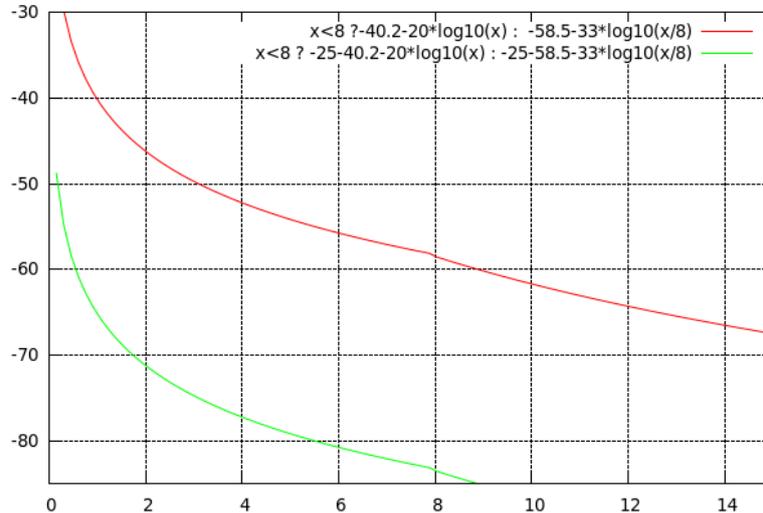


FIGURE 5.2 – Modèle de canal pour l’IEEE 802.15.4.

**Le Cadre d’agrégation - Mannasim** Nous avons modifié le code Mannasim pour travailler avec la couche MAC de la norme 802.15.4 (à l’origine il ne fonctionnent qu’avec la couche MAC de la norme IEEE 802.11). D’autres modifications ont été apportées pour utiliser la taille réelle des paquets agrégés (à l’origine elle était fixée à 64 octets). Dans Mannasim il y a trois types d’applications : capteurs, Cluster-Head, Point d’accès (AP). Dans notre configuration, les AP sont les destinations.

## 5.4 Plusieurs puissances de transmission

Avant de poursuivre l’analyse de l’agrégation, nous allons essayer de mesurer l’impact de l’utilisation de plusieurs puissances de transmission dans les protocoles étudiés.

Le but est comparer les performances de deux protocoles multicast, ODMR et HMR, dans des scénarios avec plusieurs sources et plusieurs destinations.

Dans les travaux précédents, nous avons déjà comparé ces deux protocoles en utilisant des portées de transmission égales. Cette fois, les nœuds vont utiliser une puissance de transmission plus faible s’ils se sont considérés comme simple capteurs. Dans d’autres cas, les nœuds vont utiliser une puissance de transmission plus forte.

On rappelle que les nœuds déterminent leur rôle (faible – fort) selon la capacité de leur file d’attente.

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

---

### 5.4.1 Simulations

Nous avons fait des simulations avec 10 scénarios en respectant un seuil de partitionnement moyen de la topologie entre 1 et 1.20. Dix scénarios pour HMR et trois pour ODMR ont été considérés. Dans les simulations, on augmente le nombre de récepteurs de 1 jusqu'à 5.

### 5.4.2 Résultats

La figure 5.3 présente le taux de réception de paquets pour une périodicité de génération de données de 2.5 s. Pour ce cas, quand le nombre de récepteurs augmente le PDR diminue. ODMR est toujours moins bon que HMR.

La figure 5.4 présente le nombre moyen de collisions par nœud et par seconde. HMR induit moins de collisions et son PDR est plus élevé.

En utilisant deux portées différentes, on force l'utilisation des nœuds spécifiques (forts) pour participer plus dans le routage. Sans organisation, tous les nœuds peuvent utiliser le même protocole (ODMR) et trouver un chemin. Mais en raison de la proximité entre certains, les collisions deviennent un problème (absence du mécanisme RTS/CTS). D'un autre côté, avec l'utilisation du concept de nœuds forts (HMR), il est possible de diminuer les collisions pour permettre un routage plus fluide.

Une question encore ouverte est la diminution du taux de réception quand le nombre de récepteurs augmente. En fait, il devrait y avoir plus de chemins. Les mécanismes soft-state ont été renforcés par l'utilisation des ACK pour les messages de souscription.

### 5.4.3 Comparaison portée homogène / hétérogène.

La figure 5.3 présente les résultats obtenus avec les protocoles ODMR et HMR avec des conditions de portée différentes. Le comportement de ODMR avec une seule portée n'évolue pas quand le nombre de récepteurs par groupe multicast augmente. En revanche, quand il y a plusieurs niveaux de puissance de transmission, le PDR se dégrade plus rapidement. Le même comportement existe pour HMR avec un ou plusieurs niveaux de transmission. Une des raisons peut être le nombre inférieur de connexions disponibles pour trouver une route quand il y a plusieurs puissances. HMR avec deux portées a un taux de réception inférieur à HMR avec une seule portée.

La figure 5.4 présente les collisions correspondant aux résultats de la figure 5.3. ODMR toujours engendre plus de collisions que HMR. Avec une unique portée, les collisions sont toujours plus nombreuses.

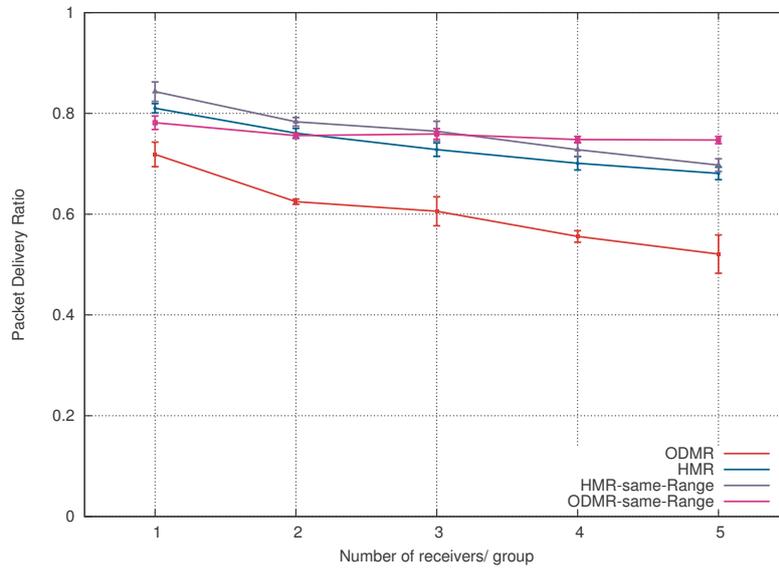


FIGURE 5.3 – Une portée vs plusieurs portés.

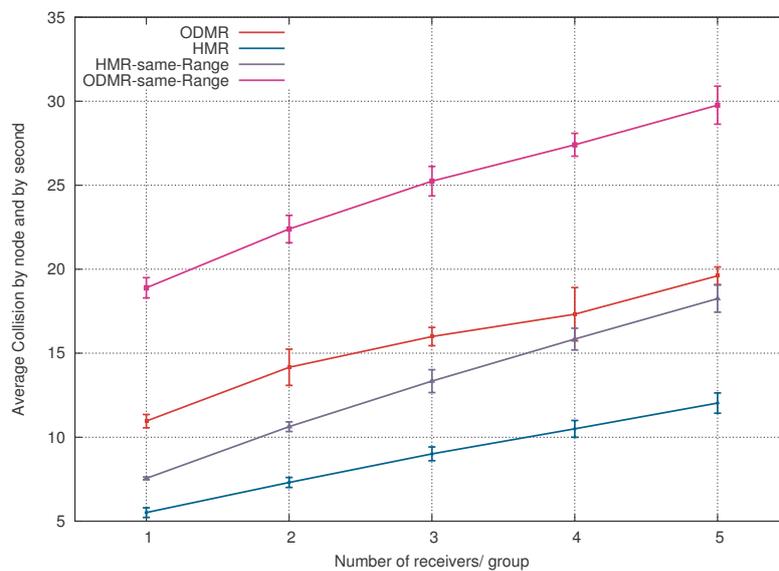


FIGURE 5.4 – Comparaison des collisions dans des scénarios avec une et deux portées.

#### 5.4.4 Influence de la charge

Les figures 5.5 et 5.6 montrent le taux de réception et les collisions pour différentes périodes de génération des paquets.

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

### 5.4.5 Puissance homogène / hétérogène

La figure 5.5 montre qu'avec un seul niveau de transmission, le taux de réception est supérieur qu'avec deux niveaux de transmission. On peut penser que le graphe de connectivité change quand il y a deux niveaux de transmission.

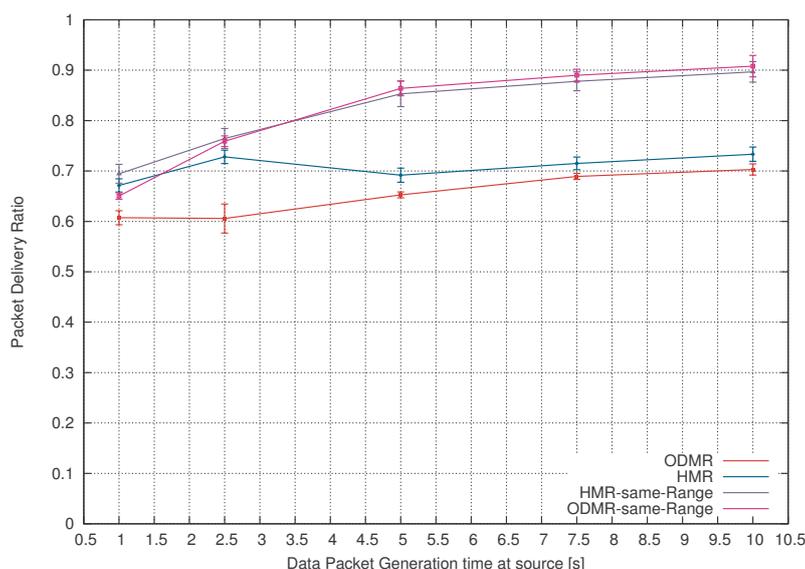


FIGURE 5.5 – PDR deux portées vs portée unique.

Pour ce qui est des collisions, moins de paquets envoyés provoque moins de collisions, voir figure 5.6. ODMR tend à avoir le même comportement à partir d'une période de génération de cinq secondes. Du côté de HMR, il y a moins de collisions avec deux niveaux mais le taux de réception est inférieur aussi. Toutefois, lorsqu'on utilise ODMR directement sur les nœuds à portée de transmission hétérogène (source vs. (Cluster-Head ou destination)), le PDR diminue de 20 pour cent. Cependant, la tendance (fig. 5.9) est la même, le PDR diminue avec la charge. Le protocole ODMR donne des résultats presque identiques que les portées soient homogènes ou non quand la charge est faible. HMR implique moins de collisions quand les portées sont hétérogènes, mais avec une détérioration de son PDR (5.6).

### 5.4.6 Conclusion

En conclusion, l'existence de capteurs hétérogènes en termes de portée de transmission induit une détérioration des performances

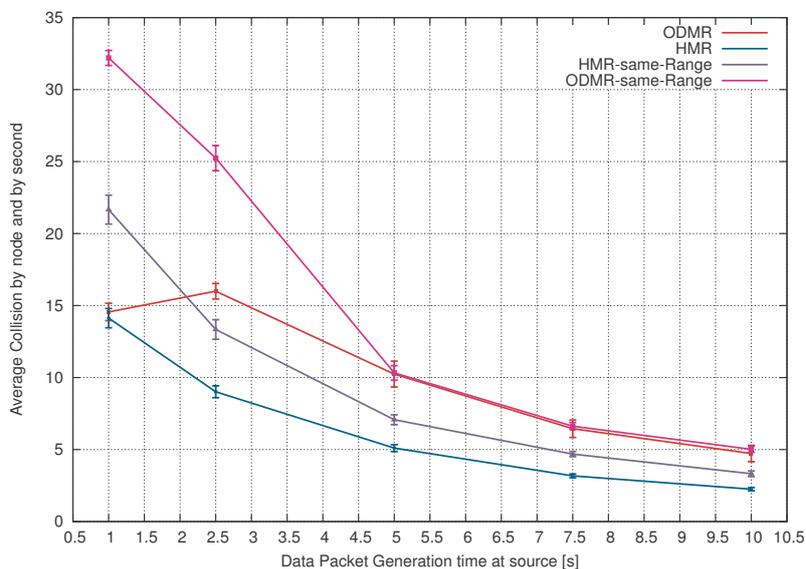


FIGURE 5.6 – Nombre moyen de collisions ; deux portées et portée unique

## 5.5 Scénarios de simulation - Agrégation

Dans cette nouvelle série de simulation, nous nous sommes concentrés sur le seul mécanisme d'agrégation. Nous avons retenu 2 scénarios. Dans le premier scénario, nous faisons varier le nombre de récepteurs par groupe. La période d'agrégation est de 2,5 secondes et le temporisateur d'expiration de la route est de 3 secondes.

Dans le deuxième scénario, nous faisons varier la période d'envoi des paquets de données en utilisant une période d'agrégation proche de la temporisation d'expiration de route (2,8 s).

### 5.5.1 Différences entre HMR Et Agrégation

Avec HMR, il y a trois types de nœuds :

- Capteur : il ne participe pas à l'acheminement et envoie des paquets de données périodiquement.
- Cluster-head : Nœud avec une grande capacité de stockage et autorisés à participer à l'acheminement.
- Destination : Nœud avec une plus grande mémoire, il est autorisé à participer au routage et pourra recevoir des données.

Lorsque nous effectuons de l'agrégation : les capteurs connaissent l'adresse de leur tête de groupe ; ils lui envoient les paquets en Unicast. Les nœuds capteurs ont une distance

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

---

de propagation plus faible que les routes couramment utilisées par le clusterheads. Quand un clusterhead reçoit des paquets de capteurs situés sur le même patient qu'eux, il stocke les paquets pour les agréger (il n'enverra qu'un seul paquet, les données seront accolées dans la charge utile). Il les enverra avec ODMR.

### 5.5.2 Métriques observées

Nous retenons encore :

- Le PDR
- Le nombre moyen de collisions par nœud et par seconde

### 5.5.3 Environnement de simulation

Les environnements de simulation sont les mêmes que ceux que nous avons utilisés dans le chapitre précédent pour comparer ODMR et HMR. En particulier, nous avons utilisé les modèles de mobilité en intérieur, les nœuds sont physiquement regroupés sur les patients. Les nœuds isolés correspondent aux médecins ou aux infirmières. Nous avons testé l'utilisation d'ODMR avec deux puissances de transmission ; cela induit des liens asymétriques. Les capteurs et les nœuds de destination peuvent avoir des temps de démarrage aléatoires liés à leur mise en service.

### Scénarios d'agrégation

- Des simulations ont été effectuées pour un taux d'envoi de données de 1 et 2,5 s et un nombre de récepteurs compris entre 1 et 5.
- Le taux d'envoi des données sera de 1, 2,5, 5, 7,5, et 10 secondes. Nous aurons trois abonnés par groupe.

C'est donc presque la même configuration que celle utilisée pour HMR.

### 5.5.4 Résultats de la simulation

Dans les figures suivantes nous avons retenu les cas suivants :

- HMR et ODMR-same-Range : portée de transmission homogène.
- ODMR-asymmetric-range : portée hétérogène.
- Agrégation : les clusterheads effectuant l'agrégation.

### 5.5.5 Taux de génération de données de 1 s

La figure 5.7 présente le PDR pour un taux d'envoi de données d'un paquet par seconde. Cette fois-ci, c'est le nombre de récepteurs par groupe que l'on a fait évoluer. Nous avons comparé l'agrégation avec HMR et ODMR. La figure présente l'impact de l'agrégation mise en œuvre dans les nœuds cluster-head dans le PDR.

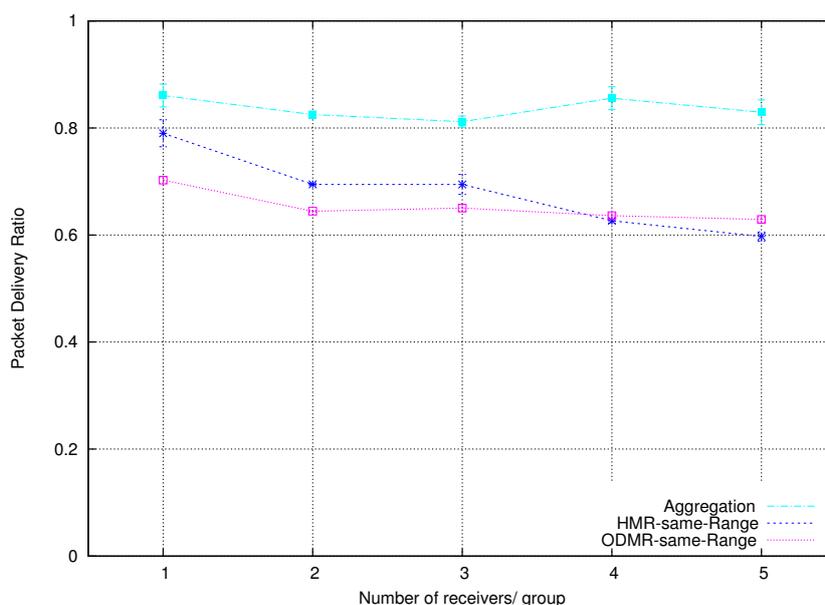


FIGURE 5.7 – PDR pour un taux envoi de 1s.

La figure 5.8 présente les collisions dans les mêmes conditions de trafic. Nous pouvons voir que c'est ODMR qui donne les plus mauvais résultats. Les performances de HMR se dégradent avec le nombre de récepteurs. Les techniques d'agrégation sont presque insensibles à ce paramètre.

L'agrégation de données implique un délai de bout en bout important. Les capteurs envoient des données chaque seconde, mais le cluster-head n'agrège les paquets que toutes les 10 secondes. Ces résultats (5.9) utilisent la même valeur pour la période de génération de données et la période de diffusion de données dans le clusterhead.

ODMR et HMR avec de portées homogènes sont présentés à titre comparatif.

La figure 5.9 présente le PDR lors l'on fait varier le taux d'envoi des données. Avec l'agrégation, le PDR diminue quand il y a moins de paquets envoyés, contrairement à ce qui se passe dans la section 5.4.5.

La figure 5.10 présente les collisions en fonction de la charge. L'agrégation réduit encore les collisions. Les autres protocoles (ODMR et HMR) induisent plus de collisions.

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

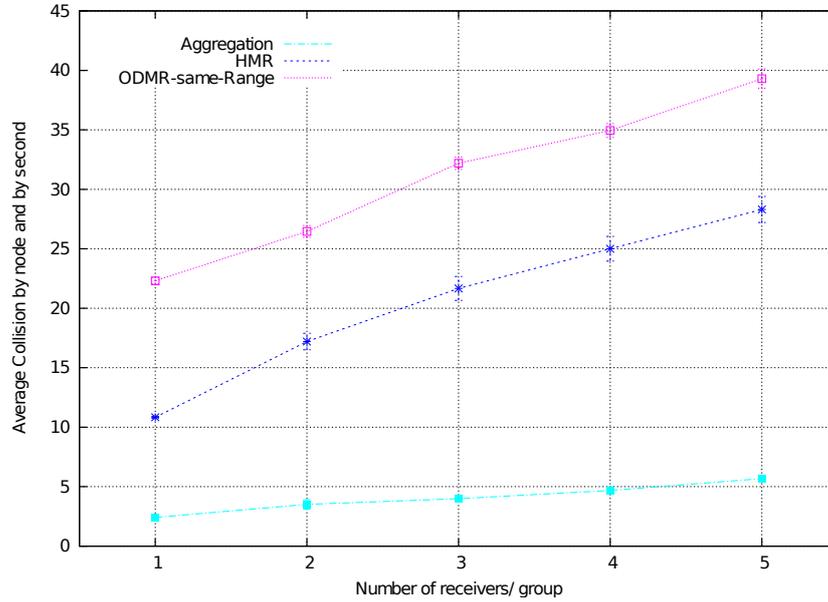


FIGURE 5.8 – Collisions pour un taux envoi de 1s.

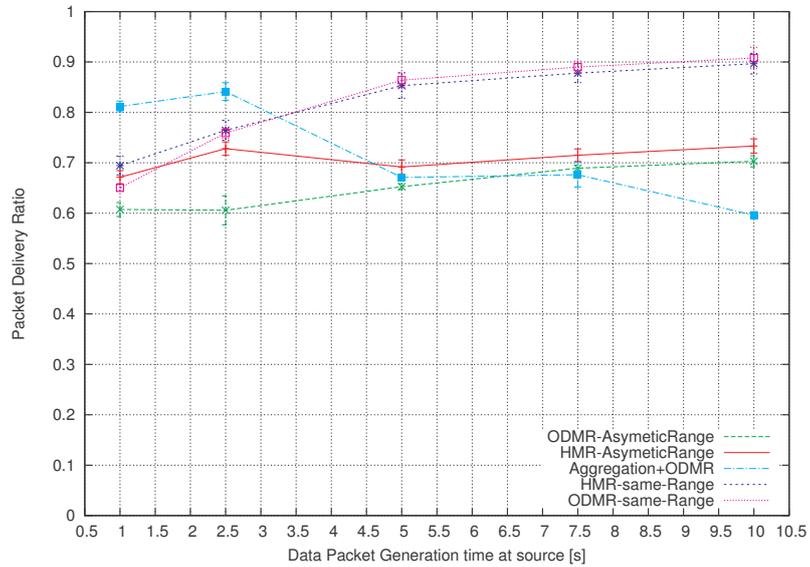


FIGURE 5.9 – Taux de réception de paquets en fonction de la période d'émission des données.

### 5.5.6 Conclusion agrégation

L'utilisation du protocole ODMR avec deux portées de transmission engendre une mauvaise performance en termes de PDR. Une raison pourrait être qu'il a encore beau-

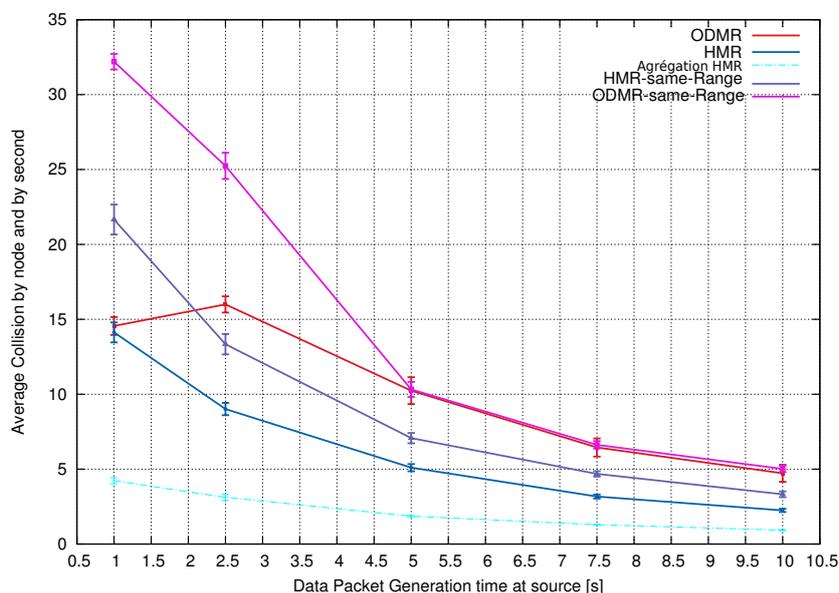


FIGURE 5.10 – Collisions de liens asymétriques et symétriques.

coup de collisions. Les techniques d’agrégation ont montré leur intérêt.

## 5.6 Analyse du mécanisme d’agrégation

La question que l’on se pose au vu de la figure 5.9 est de savoir pourquoi les résultats de l’agrégation se dégradent quand on envoie moins de paquets? Quand on n’utilise pas l’agrégation la tendance est plutôt à avoir un taux de réception meilleur quand la charge est plus faible.

Tout d’abord, rappelons que les protocoles utilisent un «REFRESH INTERVAL» de 3 secondes. D’un autre côté, une route est considérée comme usée ou «STALE» si le nœud ne reçoit pas de paquet «Subscribe/Join-Response» sur une période de 3 REFRESH INTERVAL.

### 5.6.1 Le problème

Dans les configurations sans agrégation les routes sont en fait renforcées plus souvent. Avec agrégation, le trafic est réduit d’un facteur 4, les routes ne sont donc pas assez renforcées. Le résultat est une diminution du taux de réception. Les simulations suivantes utilisent **HMR** comme protocole de routage.

Pour étayer cette hypothèse, nous avons utilisé un scénario sans partitionnement et

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

statique pour tester différentes valeurs du REFRESH INTERVAL. On fait alors varier la charge.

La figure 5.11 présente la diminution du taux de réception quand la période de génération est supérieure au REFRESH INTERVAL. Elle montre aussi la diminution de PDR quand la période de rafraîchissement diminue. L'explication précédente n'était donc pas la bonne. Par ailleurs, les protocoles que nous avons retenus sont de type réactifs. Par conséquent, l'hypothèse que nous pourrions faire est la suivante : les problèmes que nous rencontrons sont liés aux démarches protocolaires menées pour la recherche de routes. Quand les périodes du protocole et de l'agrégation de données sont mal calibrées, les routes tombent souvent et l'on est obligé de rechercher de nouveau des routes. Ce n'est donc pas la qualité des routes qui se serait dégradée mais simplement une surcharge de signalisation.

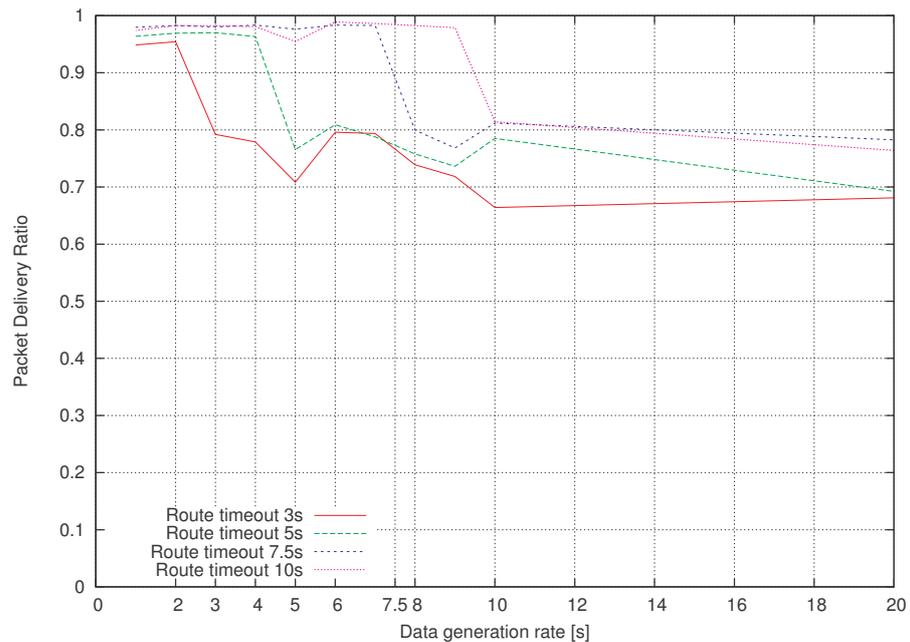


FIGURE 5.11 – Variations de la charge avec REFRESH INTERVAL différents pour le protocole HMR.

### 5.6.2 Changement du temporisateur d'agrégation

Il faut trouver un moyen pour estimer la période d'agrégation pour l'application. Pour l'instant on utilise la même période pour la génération et l'agrégation des paquets. On a testé des périodicités différentes pour le temporisateur d'agrégation avec la

contrainte  $Temps_{Data-gen} > Temps_{Agregation}$  pour éviter d’implanter la fragmentation de paquets dans le simulateur. Nous avons choisi des valeurs pour le temporisateur d’agrégation proches de «route timeout» pour éviter ce problème de fragmentation.

La figure 5.12 présente le taux de réception pour le même scénario statique avec des changements dans la périodicité de génération des paquets. Cette fois-ci, le temporisateur d’agrégation est différent du temporisateur d’envoi des données. On peut observer que le PDR est meilleur si la période d’agrégation est inférieure au temporisateur d’expiration des routes «ROUTE TIMEOUT» (voir ligne Agg Timer 2.8).

Avec des temporisateurs égaux ou supérieurs à «ROUTE TIMEOUT», le PDR est stable mais inférieur (voir lignes Agg timer 3.0 et 3.2).

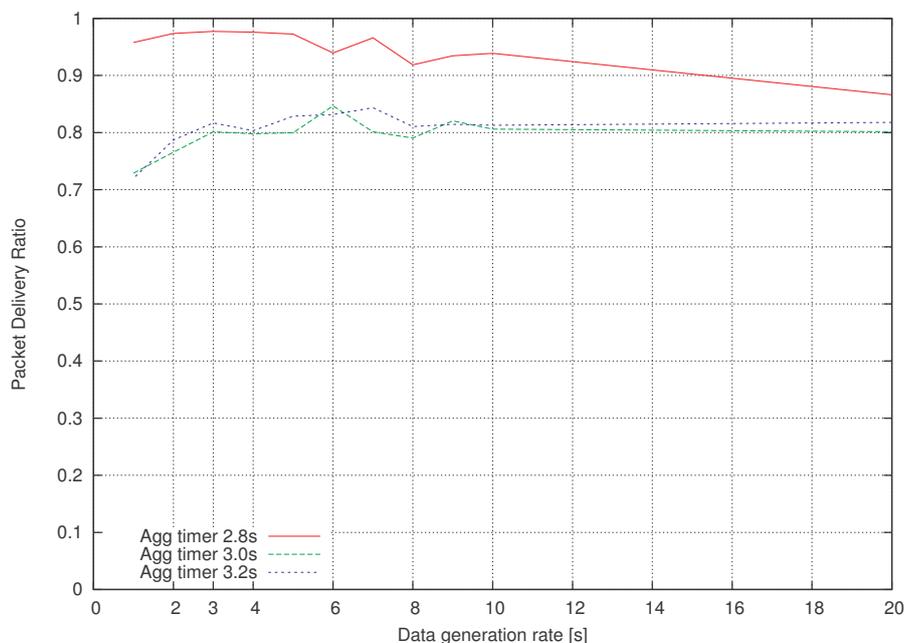


FIGURE 5.12 – Différentes valeurs pour le temporisateur d’agrégation avec un ROUTE TIMEOUT de 3s.

### 5.6.3 Conclusion Problème avec l’agrégation

On a utilisé une topologie statique pour trouver et déterminer les origines possibles de la réduction du PDR quand la charge diminue. Nous penchons pour la surcharge de trafic quand les temporisations sont mal calibrées.

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

---

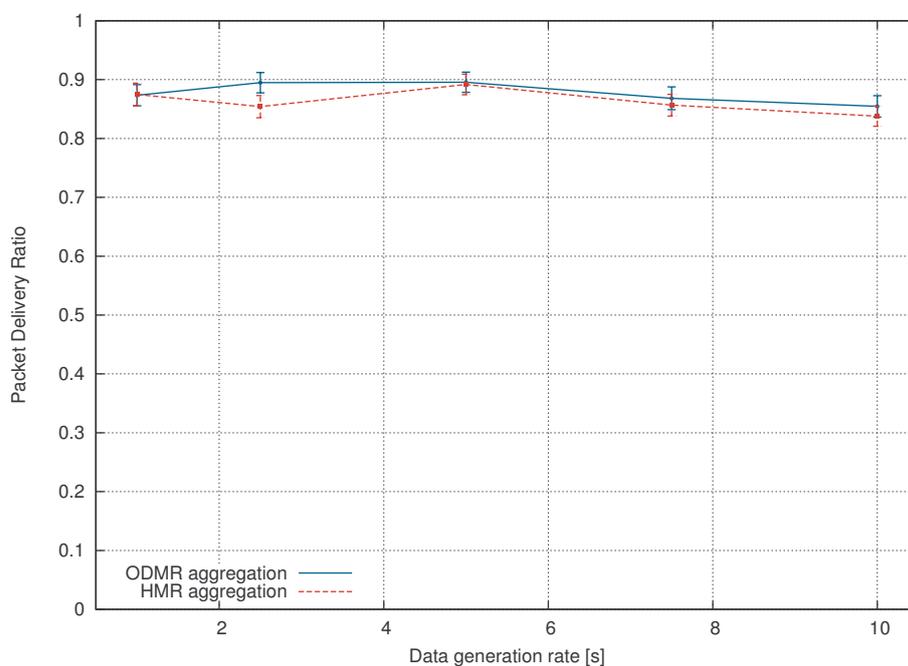


FIGURE 5.13 – PDR avec différentes charges avec 3 récepteurs par groupe et 5 sources par groupe.

### 5.6.4 Agrégation : ODMR ou HMR

Lorsque l'agrégation est utilisée, un protocole de routage est utilisé. Pour savoir lequel des deux protocoles (ODMR ou HMR) fonctionnent le mieux, on a fait quelques expériences. Dans le paragraphe précédent, nous avons montré l'influence du temporisateur d'agrégation dans la performance des protocoles Multicast comme ODMR et HMR. Cette fois-ci, le temporisateur d'agrégation est 2.8 s. Dans le paragraphe précédent la période d'agrégation était 2.5 s. Notons que le temporisateur d'expiration de route est supérieur au temporisateur d'agrégation. La figure 5.13 présente les résultats du PDR pour des périodes de génération de paquets différentes. On constate que le comportement des protocoles reste assez stable (sans variations). Le protocole HMR a une performance légèrement inférieure à ODMR malgré l'utilisation de moins de collisions. On rappelle toutefois que l'intérêt principal de HMR est la réduction très nette de l'overhead. En utilisant l'agrégation, les performances sont supérieures en particulier en termes de collisions.

---

## 5.7 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons renforcé les résultats du chapitre précédent lié à l'utilisation de notre protocole HMR. L'essentiel de ce chapitre a été consacré aux techniques d'agrégation. Notre point de vue est que l'on peut profiter de l'hétérogénéité des nœuds, et réduire la charge du réseau en faisant de l'agrégation de données au niveau des clusterheads.

Dans ce chapitre, nous avons redéfini notre modèle de simulation en particulier sur la partie propagation. Nous avons montré que si les nœuds sont hétérogènes en termes de puissance d'émission, les performances vont se détériorer. La deuxième constatation a été qu'une agrégation simple de données au niveau des clusterheads permet d'améliorer très nettement les performances de HMR. La combinaison de l'agrégation et de notre nouveau protocole HMR permet d'améliorer très fortement les performances par rapport à ODMR.

La troisième remarque provient de la difficulté de paramétrage de la technique d'agrégation vis-à-vis de la période d'envoi des données et du protocole du routage. Nous avons lancé quelques pistes d'amélioration mais des optimisations pourraient être encore largement envisagées.

## 5. AGRÉGATION DANS UN RÉSEAU HÉTÉROGÈNE.

---

## Chapitre 6

# Conclusions et Perspectives

### 6.1 Conclusion

Le vieillissement de la population constitue un enjeu sociétal majeur du XXI<sup>e</sup> siècle. Il se traduit par le besoin de définir des politiques volontaristes vis-à-vis de la dépendance, mais aussi d'une nécessité absolue de rationaliser et d'améliorer le rapport coût-efficacité du système de santé. La généralisation des technologies de l'information et des communications va jouer un rôle fondamental dans le maintien et la surveillance des personnes âgées à domicile, mais aussi dans le cadre du système hospitalier ou des maisons de retraite. La communauté scientifique se doit donc de proposer des solutions techniques innovantes, souples, légères, simples à utiliser et non intrusives de façon à ce qu'elles puissent se déployer rapidement et à faible coût.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés plus spécifiquement aux capteurs pouvant être portés par des patients et à des réseaux de communication pouvant ainsi être mis en œuvre. Nous avons tout d'abord recensé des applications pouvant être mises en place grâce à ce type de technologies ainsi que les projets d'envergure qui ont été menés. Nous nous sommes donc centrés sur un contexte hospitalier dans lequel des patients sont équipés de capteurs. Les informations ainsi recueillies doivent être délivrées à plusieurs personnels de santé régulièrement. Les solutions que nous avons trouvées dans la littérature se focalisaient le plus souvent sur un seul patient à son domicile ou sur la collecte d'information et à leur diffusion vers un seul destinataire ou un centre de stockage au travers d'un réseau par exemple à longue distance.

Si les réseaux de capteurs ont connu un grand intérêt de la part de la communauté de recherche en réseau, celle-ci s'est surtout focalisée sur des paradigmes de communication convergcast où toutes les données doivent être remontées vers un puits ou bien encore

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

sur de la diffusion depuis le puits vers tous les nœuds, broadcast, ou bien enfin à des solutions unicast où le puits interrogera spécifiquement un nœud donné. Les applications que nous avons exhibées sont plutôt liées au multicast et, dans le domaine des réseaux sans fil, cette thématique a été surtout abordée dans un contexte de réseaux WiFi. Les réseaux de capteurs possèdent des caractéristiques propres en termes de capacité de traitement, de stockage ou de débit qui ne rend pas toujours les solutions envisagées dans le cadre des réseaux WiFi optimales.

Par ailleurs, et contrairement à de nombreuses études sur les réseaux de capteurs, les nôtres auront des spécificités de type mobilité faible, mais réelle et plus encore nœuds proches les uns des autres et se déplaçant en groupe!

Le premier point qui nous est apparu fondamental a été de s'intéresser au routage dans de tels réseaux. Nous avons donc recensé des protocoles proposés dans la littérature : protocoles unicast ou multicast qui nous semblaient proches des préoccupations que nous avons définies. Nous les avons alors testés et comparés en termes de taux de réception de paquets et d'overhead. Sans surprise, les protocoles multicast se comportent mieux que les protocoles unicast. En revanche, pour chacun d'entre eux, nous avons dû proposer des adaptations liées au contexte défini. Ces optimisations nous ont permis d'en améliorer sensiblement les performances.

La deuxième réflexion que nous avons menée a consisté à mieux tirer profit de la structure particulière de notre réseau. En particulier, l'organisation des réseaux de capteurs est un point largement traité dans la littérature qui peut largement se simplifier dans notre contexte. En effet, tous les capteurs installés sur un patient seront nécessairement proches en permanence ce qui facilite le regroupement géographique. En outre, dans toutes les applications que nous avons recensées dans la littérature, les patients sont systématiquement équipés d'un capteur relié à un équipement plus performant de type smartphone par exemple. Par conséquent, le clustering qui est une façon astucieuse d'organiser les réseaux pour réduire les transmissions de données et les interférences s'adapte très naturellement dans notre contexte. Nous avons donc proposé un nouveau protocole HMR ayant pour objet de faire du routage hiérarchique. Ce protocole est donc simplifié en terme de protocole de clusterisation dans la mesure où les nœuds vont connaître quasi -statiquement et définitivement le cluster auquel ils appartiennent et le clusterhead qui s'y trouve. Cet allègement protocolaire va induire des améliorations de performances essentiellement en termes d'overhead, mais encore de taux de collision des messages et par là même de délai de réception de messages. En revanche, nous avons observé que l'amélioration du taux de réception de messages n'était pas toujours sensible. Une analyse plus fine des résultats nous a montré que les

---

non-réceptions de messages étaient essentiellement dues à des problèmes de partitionnement du réseau et de stations cachées.

La dernière partie de notre travail a porté sur l'agrégation des données. Cette thématique a donné lieu à une littérature et à des travaux extrêmement abondants. Généralement, l'idée de base des techniques d'agrégation est que les messages envoyés dans les réseaux de capteurs sont de petite taille et donc que la surcharge protocolaire est très significative. L'agrégation de données est parfois couplée avec la fusion de données dans laquelle on va s'intéresser à la sémantique des données et potentiellement à leur compression. Cette combinaison nous est apparue comme moins porteuse dans la mesure où les capteurs que nous avons envisagés sont plutôt dédiés à la mesure de phénomènes physiologiques séparés. Pour ce qui est de l'agrégation en revanche, étant donné que la plupart des messages sont envoyés vers la ou les mêmes destinations, une technique simple peut être envisagée afin de réduire nettement la charge du réseau en regroupant les messages en un seul. Cela est d'autant plus facile à faire si l'on a des flux périodiques. Étant donnée la topologie que nous avons retenue, nous avons donc appliqué des techniques simples d'agrégation qui se sont révélées extrêmement efficaces vis-à-vis des critères de performances envisagés avec une réduction très importante de la charge.

## 6.2 Perspectives

Les travaux que nous avons menés offrent de notre point de vue de nombreuses perspectives intéressantes. En premier lieu, nous avons mis en évidence l'importance potentielle du partitionnement des réseaux et la présence de stations cachées. Parmi les solutions potentielles, on peut tout à fait se tourner vers celles des DTN (Delay-Tolerant Networks). En effet, dans un tel contexte, on peut envisager de stocker en mémoire des messages jusqu'à ce que l'on rencontre des nœuds permettant d'atteindre les destinataires. On pense plus particulièrement à un stockage dans les clusterheads. Ces techniques ne sont pas raisonnables dans les cas de figure dans lesquels le délai d'acheminement des messages est crucial. La conséquence logique est que, dans ce contexte, si l'on souhaite surveiller des paramètres vitaux avec une réactivité instantanée, la technique des réseaux sans fil multisauts est trop friable.

La deuxième thématique que nous avons commencé à aborder dans cette thèse est celle des réseaux de capteurs hétérogènes. Nous avons essentiellement distingué des nœuds plus puissants et moins contraints énergétiquement. Dans le contexte de capteurs implantés dans le corps des patients, la formation de BAN et la coexistence entre les

## 6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

BAN, les PAN et les WLAN peut constituer un sujet de réflexion intéressant en termes fonctionnels, mais aussi en termes de protocoles et de mécanismes à mettre en œuvre.

Les réseaux de capteurs ont un débit limité. Les applications que nous avons recensées suggèrent l'utilisation de réseaux hybrides. Les personnes utilisent de plus en plus de terminaux multi-antennes avec des technologies telles que : WiFi, bluetooth, LTE, IR, Zigbee. Les solutions du futur doivent s'adapter à des schémas hybrides.

Notons encore que les applications que nous avons décrites avec des implantations des capteurs à l'intérieur du corps avaient des besoins particuliers en termes de durée de vie. Les interventions pour changer les batteries sont coûteuses. Le but est de maximiser la durée de vie. Il est tout à fait envisageable de considérer une personne qui se lève et commence à porter des capteurs dès qu'elle s'habille. Les capteurs pourraient se recharger pendant la nuit. On pourrait donc avoir des solutions encore plus hétérogènes en termes de capacité des capteurs. Les protocoles devraient donc en tirer profit.

Par ailleurs, les travaux importants menés autour de l'Internet des Objets et de la standardisation IETF n'ont que peu influencé notre réflexion, car nous nous sommes surtout focalisés sur des distances courtes et pas à des raccordements vers d'autres types de réseau. Il est toutefois évident, et en particulier pour des patients situés à leur domicile, que l'interopérabilité avec les autres réseaux est fondamentale. Même si cette thématique de l'Internet des Objets n'est pas encore complètement décantée ni à un stade maturité élevée, la coexistence avec le reste de l'Internet sera un défi à relever pour l'ensemble de ces capteurs et de ces applications.

# Bibliographie

- [1] The network simulator – ns-2. <http://isi.edu/nsnam/ns/>. 34, 55
- [2] Health informatics - poc medical device communication - part 00101 : Guide–guidelines for the use of rf wireless technology. *IEEE Std 11073-00101-2008*, pages 1 –99, 26 2008. xi, 8, 9
- [3] OSWIN AICHHOLZER AND FRANZ AURENHAMMER. Straight skeletons for general polygonal figures in the plane. pages 117–126. Springer-Verlag, 1996. 17
- [4] I.F. AKYILDIZ, M.C. VURAN, AND O.B. AKAN. A cross-layer protocol for wireless sensor networks. In *Information Sciences and Systems, 2006 40th Annual Conference on*, pages 1102 –1107, march 2006. 54
- [5] ROLAND BADER, MICHELE PINTO, FELIX SPENRATH, PHILIPP WOLLMANN, AND FRANK KARGL. Bignurse : A wireless ad hoc network for patient monitoring. In *Pervasive Health Conference and Workshops, 2006*, pages 1 –4, 29 2006-dec. 1 2006. 9, 10, 15
- [6] F. BAI, NARAYANAN SADAGOPAN, AND A. HELMY. Important : a framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for adhoc networks. In *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, 2, pages 825 – 835 vol.2, march-3 april 2003. 54
- [7] GUHA BALAKRISHNAN, FREDO DURAND, AND JOHN GUTTAG. Detecting pulse from head motions in video. *26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Jun 2013. 7
- [8] H. BALDUS, K. KLABUNDE, AND G. MÜSCH. Reliable set-up of medical body-sensor networks. In HOLGER KARL, ADAM WOLISZ, AND ANDREAS WILLIG, editors, *Wireless Sensor Networks*, 2920 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 353–363. Springer Berlin Heidelberg, 2004. 9

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [9] D. BATTAGLINO, L. BRACCIALE, A. DETTI, F.L. PICCOLO, A. BRAGAGNINI, M. TUROLLA, AND N.B. MELAZZI. A topic-based, publish-subscribe architecture for intermittently connected 802.15.4 networks. In *Future Network Mobile Summit (FutureNetw)*, 2011, pages 1–8, 2011. [16](#)
- [10] ANDREAS BULLING, DANIEL ROGGEN, AND GERHARD TRÖSTER. It’s in your eyes : towards context-awareness and mobile hci using wearable eog goggles. In *UbiComp ’08 : Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing*, pages 84–93, New York, NY, USA, 2008. ACM. [8](#)
- [11] A.L. CAVILLA, G. BARON, T.E. HART, L. LITTY, AND E. DE LARA. Simplified simulation models for indoor manet evaluation are not robust. In *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*, pages 610 – 620, oct. 2004. [16](#)
- [12] CANFENG CHEN AND JIAN MA. Simulation study of aodv performance over ieee 802.15.4 mac in wsn with mobile sinks. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, AINAW ’07. 21st International Conference on*, **2**, pages 159 –164, may 2007. [13](#)
- [13] VÍCTOR CUSTODIO, FRANCISCO J. HERRERA, GREGORIO LÓPEZ, AND JOSÉ IGNACIO MORENO. A review on architectures and communications technologies for wearable health-monitoring systems. *Sensors*, **12**[10] :13907–13946, 2012. [10](#), [23](#)
- [14] DOUGLAS S. J. DE COUTO, DANIEL AGUAYO, JOHN BICKET, AND ROBERT MORRIS. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom ’03, pages 134–146, New York, NY, USA, 2003. ACM. [14](#)
- [15] CHEN-HSIANG FENG AND W.B. HEINZELMAN. Rbmulticast : Receiver based multicast for wireless sensor networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1–6, Budapest, Hungary, 5-8 Apr 2009. [13](#)
- [16] HELENA FERNÁNDEZ-LÓPEZ. *Remote vital signs monitoring based on wireless sensor networks*. PhD thesis, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, December 2011. [9](#), [10](#), [15](#), [54](#)
- [17] M. FIORE, F. MININNI, C. CASETTI, AND C.-F. CHIASSERINI. To cache or not to cache? In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 235 –243, april 2009. [17](#)
- [18] J.A. FRAILE, J. BAJO, J.M. CORCHADO, AND A. ABRAHAM. Applying wearable solutions in dependent environments. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, **14**[6] :1459–1467, 2010. [22](#)

- 
- [19] JAMES F. FRIES, C. EVERETT KOOP, CARSON E. BEADLE, PAUL P. COOPER, MARY JANE ENGLAND, ROGER F. GREAVES, JACQUE J. SOKOLOV, AND DANIEL WRIGHT. Reducing health care costs by reducing the need and demand for medical services. *New England Journal of Medicine*, **329**[5] :321–325, 1993. PMID : 8321260. [21](#)
- [20] ADRIEN FRIGGERI, GUILLAUME CHELIUS, ERIC FLEURY, ANTOINE FRABOULET, FRANCE MENTRÉ, AND JEAN-CHRISTOPHE LUCET. Reconstructing Social Interactions Using an unreliable Wireless Sensor Network. *Computer Communications*, **34**[5] :609–618, April 2011. This work was supported by a public grant from the French National Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (ANSES/AFSSET, EST 2007-50). [17](#)
- [21] H. GAMBOA, F. SILVA, AND H. SILVA. Patient tracking system. In *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2010 4th International Conference on-NO PERMISSIONS*, pages 1–2, 2010. [22](#)
- [22] MARIO GERLA, KAIXIN XU, AND XIAOYAN HONG. Exploiting mobility in large scale ad hoc wireless networks. In *IEEE 18th Annual Workshop on Computer Communications*, pages 34–39, Laguna Niguel, CA, USA, 20-21 oct 2003. IEEE. [16](#), [31](#)
- [23] OMPRAKASH GNAWALI, RODRIGO FONSECA, KYLE JAMIESON, DAVID MOSS, AND PHILIP LEVIS. Collection tree protocol. In *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '09*, pages 1–14, New York, NY, USA, 2009. ACM. [14](#), [54](#)
- [24] LI HAN. An energy efficient routing algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. In *Computer Application and System Modeling (ICCASM), 2010 International Conference on*, **3**, pages V3–612 –V3–616, oct. 2010. [14](#)
- [25] H. HASSANEIN AND L. HUANG. Reliable multicast in wireless ad hoc and sensor networks. pages 459 – 464, april 2005. [15](#)
- [26] HENRY HIGGINS. *Body Sensor Networks*, chapter 4, pages 136–142. springer, 2006. [8](#)
- [27] XIAOYAN HONG, MARIO GERLA, GUANGYU PEI, AND C.C. CHIANG. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 53–60, Seattle, WA, USA, 20-20 Aug 1999. ACM. [16](#), [31](#)
- [28] FRANÇOIS INGELREST, GUILLERMO BARRENETXEA, GUNNAR SCHAEFER, MARTIN VETTERLI, OLIVIER COUACH, AND MARC PARLANGE. Sensorscope :

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Application-specific sensor network for environmental monitoring. *ACM Trans. Sen. Netw.*, **6**[2] :1–32, 2010. [12](#)
- [29] M.N. JAMBLI, K. ZEN, H. LENANDO, AND A. TULLY. Performance evaluation of aodv routing protocol for mobile wireless sensor network. In *Information Technology in Asia (CITA 11), 2011 7th International Conference on*, pages 1–6, july 2011. [13](#)
- [30] JORJETA G. JETCHEVA AND DAVID B. JOHNSON. Adaptive demand-driven multicast routing in multi-hop wireless ad hoc networks. In *Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, MobiHoc*, pages 33–44, Long Beach, CA, USA, 4-5 Oct 2001. ACM. [15](#), [16](#), [27](#), [28](#), [31](#), [50](#), [55](#)
- [31] RAHIM KACIMI. *Techniques de conservation d'énergie pour les reseaux de capteurs sans fils*. PhD thesis, Mathématiques Informatique et Télécommunications, 2009. [15](#)
- [32] VIKAS KAWADIA AND P.R. KUMAR. Power control and clustering in ad hoc networks. In *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, **1**, pages 459 – 469 vol.1, march-3 april 2003. [62](#), [66](#)
- [33] JEONGGIL KO, JONG HYUN LIM, YIN CHEN, RVĂZVAN MUSVALOIU-E, ANDREAS TERZIS, GERALD M. MASSON, TIA GAO, WALT DESTLER, LEO SELAVO, AND RICHARD P. DUTTON. Medisn : Medical emergency detection in sensor networks. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, **10**[1] :11 :1–11 :29, August 2010. [9](#), [10](#), [15](#), [54](#)
- [34] THOMAS KUNZ. Multicasting in mobile ad-hoc networks : achieving high packet delivery ratios. In *Proceedings of the 2003 conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative research*, pages 156–170. IBM Press, 2003. [15](#), [31](#)
- [35] P. KURYLOSKI, A. GIANI, R. GIANNANTONIO, K. GILANI, R. GRAVINA, V.-P. SEPPA, E. SETO, V. SHIA, C. WANG, POSU YAN, A.Y. YANG, J. HYTTINEN, S. SASTRY, S. WICKER, AND R. BAJCSY. Dexternet : An open platform for heterogeneous body sensor networks and its applications. In *Wearable and Implantable Body Sensor Networks, 2009. BSN 2009. Sixth International Workshop on*, pages 92–97, 2009. [9](#), [10](#)
- [36] BENOÎT LATRÉ, BART BRAEM, INGRID MOERMAN, CHRIS BLONDIA, AND PIET DEMEESTER. A survey on wireless body area networks. *Wirel. Netw.*, **17**[1] :1–18, January 2011. [8](#)

- 
- [37] SUNG-JU LEE, M. GERLA, AND CHING-CHUAN CHIANG. On-demand multicast routing protocol. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, **3**, pages 1298–1302, New Orleans, LA, USA, 21-24 Sep 1999. [15](#), [16](#), [27](#), [31](#), [50](#)
- [38] BETH LOGAN, JENNIFER HEALEY, MATTHAI PHILIPOSE, EMMANUEL MUNGUIA TAPIA, AND STEPHEN INTILLE. A long-term evaluation of sensing modalities for activity recognition. In *Proceedings of the 9th international conference on Ubiquitous computing*, UbiComp '07, pages 483–500, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag. [7](#)
- [39] KONRAD LORINCZ, BOR-RONG CHEN, GEOFFREY WERNER CHALLEN, ATANU ROY CHOWDHURY, SHYAMAL PATEL, PAOLO BONATO, AND MATT WELSH. Mercury : a wearable sensor network platform for high-fidelity motion analysis. In *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys, pages 183–196, New York, NY, USA, 2009. ACM. [9](#), [10](#)
- [40] D.B. McCOMBIE, A.T. REISNER, AND H.H. ASADA. Laguerre-model blind system identification : cardiovascular dynamics estimated from multiple peripheral circulatory signals. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, **52**[11] :1889–1901, nov. 2005. [8](#)
- [41] KOSUKE MOTOI, MITSUHIRO OGAWA, HIROSHI UENO, YUTAKA KUWAE, AKIRA IKARASHI, TADAHIKO YUJI, YUJI HIGASHI, SHINOBU TANAKA, TOSHIRO FUJIMOTO, HIDETSUGU ASANOI, AND KEN ICHI YAMAKOSHI. A fully automated health-care monitoring at home without attachment of any biological sensors and its clinical evaluation. *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference*, **2009** :4323–6, January 2009. [2](#), [7](#)
- [42] UNIVERSITY OF BONN. Bonnmotion, a mobility scenario generation and analysis tool. <http://net.cs.uni-bonn.de/wg/cs/applications/bonnmotion/>. [20](#), [30](#), [54](#)
- [43] M. ORPILLA, J. PALUMBO, S. THOMAS, I. EBY, AND W. FRANKLIN. A geographically-aware, reliable multicast protocol for tactical sensor networks. In *Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE*, pages 590–595 Vol. 1, 17-20 2005. [15](#)
- [44] CHRIS A. OTTO, EMIL JOVANOV, AND ALEKSANDAR MILENKOVIC. A WBAN-based System for Health Monitoring at Home. *2006 3rd IEEE/EMBS International Summer School on Medical Devices and Biosensors*, pages 20–23, September 2006. [7](#)

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [45] UNKYU PARK AND JOHN HEIDEMANN. Data muling with mobile phones for sensor networks. In *Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '11*, pages 162–175, New York, NY, USA, 2011. ACM. 17
- [46] ANNE GRIFFIN PERRY AND PATRICIA A. POTTER. *Clinical Nursing Skills and Techniques*. Elsevier, St Louis, Missouri, 7th edition, 2010. 5
- [47] D. PETROVIC AND R. KANAN. Extremely low power indoor localisation system. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2011 IEEE 8th International Conference on*, pages 801–806, 2011. 14
- [48] ISABELLE ROBERT-BOBÉE. Projections de population 2005-2050 : vieillissement de la population en France métropolitaine. *Economie et statistique*, 408[1]:95–112, 2007. 1
- [49] BOR RONG CHEN, KIRAN KUMAR MUNISWAMY-REDDY, AND MATT WELSH. Lessons learned from implementing ad-hoc multicast routing in sensor networks. Technical report, 2005. 15
- [50] S. SETHI AND S.K. UDGATA. IMAODV : A reliable and multicast AODV protocol for MANET. In *Wireless Communication and Sensor Networks (WCSN), 2009 Fifth IEEE Conference on*, pages 1 –6, 15-19 2009. 15, 31
- [51] VICTOR SHNAYDER, BOR RONG CHEN, KONRAD LORINCZ, THADDEUS R. F. FULFORD-JONES, AND MATT WELSH. Sensor networks for medical care. Technical Report TR-08-05, Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, 2005. 9, 10, 15, 16
- [52] EDMIR STEFANOVIĆ, DEJAN VUKOBRATOVIĆ, VLADIMIR STANKOVIĆ, AND ROMANO FANTACCI. Packet-centric approach to distributed sparse-graph coding in wireless ad hoc networks. *Ad Hoc Netw.*, 11[1]:167–181, January 2013. 14
- [53] A. STETSKO, M. STEHLIK, AND V. MATYAS. Calibrating and comparing simulators for wireless sensor networks. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2011 IEEE 8th International Conference on*, pages 733 –738, oct. 2011. 54
- [54] LEI TANG, KUANG-CHING WANG, YONG HUANG, AND FANGMING GU. Channel characterization and link quality assessment of ieee 802.15.4-compliant radio for factory environments. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 3[2]:99–110, 2007. 54
- [55] XIAOYU TONG AND E.C.-H. NGAI. A ubiquitous publish/subscribe platform for wireless sensor networks with mobile mules. In *Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2012 IEEE 8th International Conference on*, pages 99 –108, may 2012. 16

- 
- [56] R. VAISHAMPAYAN AND J.J. GARCIA-LUNA-ACEVES. Efficient and robust multicast routing in mobile ad hoc networks. In *IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*, pages 304 – 313, Fort Lauderdale, FL, USA, 25 - 27 oct. 2004. [15](#), [16](#), [27](#), [29](#), [31](#), [50](#)
- [57] JANOLIVER WALLGRÜN. Autonomous construction of hierarchical voronoi-based route graph representations. In CHRISTIAN FREKSA, MARKUS KNAUFF, BERND KRIEG-BRÜCKNER, BERNHARD NEBEL, AND THOMAS BARKOWSKY, editors, *Spatial Cognition IV. Reasoning, Action, Interaction*, **3343** of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 413–433. Springer Berlin Heidelberg, 2005. [17](#)
- [58] T. WATTEYNE, A. MOLINARO, M.G. RICHICHI, AND M. DOHLER. From MANET To IETF ROLL Standardization : A Paradigm Shift in WSN Routing Protocols. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, **13**[4] :688–707, Quarter. [12](#)
- [59] AN YIN, BINWEN WANG, XIAOYA HU, AND ZHICHENG DAI. MHop-CL :A Clustering Protocol for Bridge Structure Health Monitoring System. In *Computer Network and Multimedia Technology, 2009. CNMT 2009. International Symposium on*, pages 1 –4, 18-20 2009. [14](#)
- [60] K. YONEKAWA, T. YONEZAWA, J. NAKAZAWA, AND H. TOKUDA. Fash : Detecting tiredness of walking people using pressure sensors. In *Mobile and Ubiquitous Systems : Networking Services, MobiQuitous, 2009. MobiQuitous '09. 6th Annual International*, pages 1–6, 2009. [3](#), [6](#), [22](#), [63](#)
- [61] GUANBO ZHENG, DONG HAN, RONG ZHENG, C. SCHMITZ, AND XIAOJING YUAN. A link quality inference model for iee 802.15.4 low-rate wpans. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*, pages 1–6, 2011. [54](#)
- [62] JIANLIANG ZHENG AND MYUNG J. LEE. *A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4*, chapter 4, pages 218–237. Wiley-IEEE Press, may 2006. ISBN : 0-471-71976-5. [13](#)

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

# Bibliographie

- [1] J.G. BARROS, A. WEI, AND A.-L. BEYLOT. Is multicast useful in health care monitoring systems? In *Wireless Advanced (WiAd), 2012*, pages 95–99, 2012.
- [2] J.G. BARROS, A. WEI, AND A.-L. BEYLOT. Reliable routing using heterogeneity in wireless sensor networks. In *Vehicular Technology Conference (VTC fall), 2013*, pages xx–xx, 2013.