

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

Département d'Informatique et des Technologies de l'Information



Mémoire

Master en Informatique

**Domaine :** Mathématique et Informatique

**Filière :** Informatique

**Spécialité :** Administration et Sécurité de Réseau

**Présenté par :** Ala Eddine Boulifa  
Mohammed Habes

**Étude comparative entre deux protocoles de routage géographiques  
sans balises BLR et BOSS dans les réseaux WSNs**

**Soutenu publiquement le : 15/10/2020**

Devant le jury composé de :

- Encadreur : Ahmida Djedjai
- Président : Med Kamel Ben Kadour
- Examineur : Salah Euschi

Année Universitaire : 2019/2020

## Résumé

Le routage géographique avec balise exige que les nœuds transmettent périodiquement un message Hello, afin de permettre aux voisins à un seul saut de connaître leurs positions. Ce mécanisme de balisage consomme beaucoup d'énergie. Pour cela, le routage géographique sans balise a été proposé. Les protocoles de routage géographique sans balise n'utilisent pas les balises (message hello). Par conséquent, les demandes de bande passante, mémoire et d'énergie liée à l'échange d'informations sont diminuées.

Dans ce mémoire nous avons essayé d'implémenter le protocole BLR qui appartient à la famille des protocoles de routage géographique sans balise et après le comparer avec un autre protocole de la même famille ce qui nommé BOSS.

Nous avons utilisé l'outil de simulation Castalia sur OMNeT++, pour analyser les performances du ce protocole en termes de paquet délivré, paquet dupliqué, consommation d'énergie et de délai moyen de bout en bout.

**Mots Clés :** RCSF, protocole de routage géographique, Beacon-less, BLR, Boss, analyse des performances, Delay, Castalia, OMNET++.

## Abstract

Geographic beacon routing requires nodes to periodically transmit a Hello message, in order to allow one-hop neighbors to know their locations. This beaconing mechanism consumes a lot of energy. For this, the geographic routing without beacon has been proposed. Geographic routing protocols without beacons do not use beacons (hello message). As a result, the demands on bandwidth, memory and energy associated with the exchange of information are reduced.

In this memory we tried to implement the BLR protocol which belongs to the family of geo-tagless routing protocols and afterwards to compare it with another protocol of the same family which named BOSS.

We used the Castalia simulation tool on OMNeT ++, to analyze the performance of this protocol in terms of packet delivered, duplicate packet, energy consumption, average end-to-end delay.

**Keywords :** RCSF, protocole de routage géographique, Beacon-less, BLR, Boss, analyse des performances, Delay, Castalia, OMNET++.

## ملخص

يتطلب التوجيه الجغرافي باستخدام رسائل "Hello" من العقد أن ترسل رسالة مرحبًا بشكل دوري ، من أجل السماح للجيران في خطوة واحدة بمعرفة مواقعهم. تستهلك هذه الآلية الكثير من الطاقة. لهذا ، تم اقتراح التوجيه الجغرافي بدون رسائل "Hello". ونتيجة لذلك ، يتم تقليل الطلب على النطاق الترددي والذاكرة والطاقة المرتبطة بتبادل المعلومات.

في هذه المذكرة ، حاولنا تنفيذ بروتوكول BLR الذي ينتمي إلى عائلة بروتوكولات التوجيه بدون رسائل "Hello" ، وبعد ذلك مقارنة بروتوكول آخر من نفس العائلة يسمى BOSS.

استخدمنا أداة محاكاة Castalia على ++ OMNeT ، لتحليل أداء هذا البروتوكول من حيث الحزمة التي تم تسليمها ، والحزمة المكررة ، واستهلاك الطاقة ، ومتوسط التأخير من طرف إلى طرف.

كلمات البحث: بروتوكولات التوجيه الجغرافي ، BLR ، Boss ، شبكة الاستشعار اللاسلكية ، ++ OMNeT ، تحليل الاداء ، Castalia

## **Remerciements**

*Grâce à Dieu vers lequel vont toutes les louanges, ce travail s'est accompli.*

*En particulier, nous exprimons notre gratitude à notre encadreur : DJEDIAI Ahmida, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.*

*Un grand merci à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.*

*Je remercie chaleureusement mes collègues du département informatique, pour leur soutien moral.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce travail.*

## **Dédicaces**

Je remercie en premier lieu le bon Dieu qui m'a fait venir dans ce monde.

Je dédie ce mémoire à tous ceux qui me sont chers et pour tout l'amour qu'ils me portent :  
Ma plus profonde gratitude et tout mon amour je les adresse à mes chers parents, qui ont su  
me faire confiance et me soutenir en toutes circonstances.

Ala Eddine Boulifa & Mohammed Habes

# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **PARTIE I : ETAT DE L'ART**

<b>CHAPITRE 1 : LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL</b> .....	<b>3</b>
--	----------

<b>1.1 Introduction</b> .....	<b>3</b>
-------------------------------	----------

<b>1.2 Présentation des Réseaux de capteurs sans fil</b> .....	<b>3</b>
--	----------

<b>1.3 Classification selon la zone de couverture :</b> .....	<b>4</b>
---	----------

1.3.1 Le réseau personnel sans fil (WPAN).....	4
--	---

1.3.2 Le réseau local sans fil (WLAN) .....	5
---	---

1.3.3 Le réseau métropolitain sans fil (WMAN).....	5
--	---

1.3.4 Le réseau étendu sans fil (WWAN) .....	5
--	---

<b>1.4 Classification selon l'infrastructure</b> .....	<b>5</b>
--	----------

1.4.1 Réseaux avec infrastructure.....	5
--	---

1.4.2 Réseaux sans infrastructure (Ad hoc) .....	6
--	---

<b>1.5 Les réseaux mobiles Ad Hoc</b> .....	<b>6</b>
---	----------

1.5.1 Définition d'un réseau ad hoc .....	6
---	---

1.5.2 Types des réseaux ad hoc.....	7
-------------------------------------	---

<b>1.6 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)</b> .....	<b>7</b>
--	----------

1.6.1 Architecture d'un noeud capteur.....	8
--	---

1.6.2 Les types d'architectures des RCSF.....	9
---	---

1.6.3 Caractéristiques liées aux RCSF.....	9
--	---

1.6.4 Domaine d'application .....	10
-----------------------------------	----

1.6.5 Modèle de communication dans les RCSF .....	12
---	----

1.6.6 Contraintes des RCSF.....	13
---------------------------------	----

1.6.7 Comparaison réseaux de capteurs et réseaux ad hoc.....	14
--	----

<b>1.7 Conclusion</b> .....	<b>15</b>
-----------------------------	-----------

<b>CHAPITRE 2 : LE ROUTAGE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL</b> .....	<b>16</b>
--	-----------

<b>2.1 Introduction</b> .....	<b>16</b>
-------------------------------	-----------

<b>2.2 Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil</b> .....	<b>16</b>
---	-----------

<b>2.3 Classification des protocoles de routage dans les RCSF</b> .....	<b>16</b>
---	-----------

2.3.1 Classification selon Processus de découverte des routes.....	17
--	----

2.3.2 Classification selon la structure du réseau .....	19
---	----

<b>2.4 Protocole de routage géographique</b> .....	<b>20</b>
--	-----------

<b>2.5 Stratégies de routage géographique.....</b>	<b>21</b>
2.5.1 Routage géographique en mode périmètre (Perimeter Forwarding).....	22
2.5.2 Routage géographique en mode glouton et périmètre.....	23
<b>2.6 Catégorie de routage géographique.....</b>	<b>23</b>
2.6.1 Protocole de routage géographique avec balise.....	23
2.6.2 Protocole de routage géographique sans balise.....	24
<b>2.7 Conclusion.....</b>	<b>25</b>

## **PARTIE II : CONTRIBUTION**

<b>CHAPITRE 3 : PRESENTATION DU PROTOCOLE BLR.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Les zones de transfert.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 Délai de transmission dynamique (DFD).....</b>	<b>27</b>
<b>3.4 Procédures de routage du protocole BLR.....</b>	<b>28</b>
3.4.1 Phase de transfert d'un paquet data.....	28
3.4.2 Phase de réception d'un paquet data.....	28
3.4.3 Phase de retransmission d'un paquet data.....	28
3.4.4 Phase d'envoi d'un acquittement.....	28
<b>3.5 Conclusion.....</b>	<b>29</b>
<b>CHAPITRE 4 : IMPLEMENTATION ET ANALYSE DES PERFORMANCES DU BLR....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 Introduction.....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 Le Simulateur OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++).....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Castalia.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4 Implémentation de BLR.....</b>	<b>31</b>
4.4.1 Aspects algorithmiques.....	33
4.4.2 Environnement de la simulation.....	34
4.4.3 Métriques de la simulation.....	36
<b>4.5 Etude de performances du BLR selon la mobilité du sink.....</b>	<b>36</b>
4.5.1 Les paquets délivrés.....	37
4.5.2 Les paquets dupliqués.....	38
4.5.3 Consommation d'énergie.....	39
4.5.4 Délai moyen de bout en bout.....	40
<b>4.6 Conclusion.....</b>	<b>41</b>
<b>CHAPITRE 5 : COMPARAISON BLR AVEC BOSS.....</b>	<b>42</b>

<b>5.1 Introduction .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Cas sink fixe .....</b>	<b>42</b>
5.2.1 Les paquets délivrés .....	42
5.2.2 Les paquets dupliqués.....	43
5.2.3 Consommation d'énergie .....	44
5.2.4 Délai moyen de bout en bout.....	45
<b>5.3 Cas sink en mouvement aléatoire.....</b>	<b>46</b>
5.3.1 Les paquets délivrés .....	46
5.3.2 Les paquets dupliqués.....	47
5.3.3 Consommation d'énergie .....	48
5.3.4 Délai moyen de bout en bout.....	49
<b>5.4 Cas sink en mouvement régulier .....</b>	<b>50</b>
5.4.1 Les paquets délivrés .....	50
5.4.2 Les paquets dupliqués.....	51
5.4.3 Consommation d'énergie .....	52
5.4.4 Délai moyen de bout en bout.....	53
<b>5.5 Conclusion .....</b>	<b>54</b>
 <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	 <b>55</b>
 <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	 <b>57</b>



## Liste des figures

Figure 1.1 : Les catégories des réseaux sans fil[3].

Figure 1.2 : Réseaux cellulaires[5].

Figure 1.3 : le nœud capteur [13].

Figure 1.4 : les composants d'un nœud capteur[16].

Figure 1.5 : Architecture Plat des RCSF[18].

Figure 1.6 : Architecture hiérarchique des RCSF[18].

Figure 1.7 : Domaine d'application de RCSF[55].

Figure 1.8 : Modèle en couche pour la communication dans les RCSF[19].

Figure 2.1 : Classification des protocoles de routage dans les RCSF[22].

Figure 2.2 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau[23].

Figure 2.3 : Topologie hiérarchique.

Figure 2.4 : Exemple de Greedy Forwarding[46].

Figure 2.5 : La distance entre 2 points.

Figure 2.6 : Présence d'un trou[46].

Figure 2.7: mode périmètre [46].

Figure 2.8 : Mode glouton et périmètre[22].

Figure 2.9 : Régions du point de vue de la destination[52].

Figure 2.10 : La zone de progression [45].

Figure 3.1 : Zones de transfert différentes[47].

Figure 3.2 : Stratégies de transfert[47].

Figure 3.3 : Les fonctions de délai[47].

Figure 3.4 : Schéma de gestion des paquets dans le protocole BLR.

Figure 4.1 : Les connexions des modules sous Castalia[10].

Figure 4.2 : Les principaux composants d'un nœud[10].

Figure 4.3 : Protocole BLR-Emission/Réception (Nœud Source).

Figure 4.4 : Protocole BLR-Emission/Réception (Nœud voisin ou SINK).

Figure 4.5 : Déploiement aléatoire des nœuds.

Figure 4.6 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité

Figure 4.7 : Paquet délivré-Durée de simulation

Figure 4.8 : Paquet délivré-Longueur de champ

Figure 4.9 : Paquet délivré-Nombre de régions

Figure 4.10 : Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité

Figure 4.11 : Paquet délivré-Durée de simulation

Figure 4.12 : Paquet délivré-Longueur de champ  
Figure 4.13 : Paquet délivré-Nombre de régions  
Figure 4.14 : Energie-Vitesse de mobilité  
Figure 4.15 : Energie-Durée de simulation  
Figure 4.16 : Energie-Longueur de champ  
Figure 4.17 : Energie-Nombre de régions  
Figure 4.18 : Délai moyen-Vitesse de mobilité  
Figure 4.19 : Délai moyen-Durée de simulation  
Figure 4.20 : Délai moyen-Longueur de champ  
Figure 4.21 : Délai moyen-Nombre de régions  
Figure 5.1 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité-sink fix  
Figure 5.2 : Paquet délivré-Durée de simulation-sink fix  
Figure 5.3 : Paquet délivré-Longueur de champ-sink fix  
Figure 5.4 : Paquet délivré-Nombre de régions-sink fix  
Figure 5.5 : Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité-sink fix  
Figure 5.6 : Paquet dupliqué-Durée de simulation-sink fix  
Figure 5.7 : Paquet dupliqué-Longueur de champ-sink fix  
Figure 5.8 : Paquet dupliqué-Nombre de régions-sink fix  
Figure 5.9 : Energie-Vitesse de mobilité-sink fix  
Figure 5.10 : Energie-Durée de simulation-sink fix  
Figure 5.11 : Energie-Longueur de champ-sink fix  
Figure 5.12 : Energie-Nombre de régions-sink fix  
Figure 5.13 : Délai moyen-Vitesse de mobilité-sink fix  
Figure 5.14 : Délai moyen-Durée de simulation-sink fix  
Figure 5.15 : Délai moyen-Longueur de champ-sink fix  
Figure 5.16 : Délai moyen-Nombre de régions-sink fix  
Figure 5.17 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.18 : Paquet délivré-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.19 : Paquet délivré-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.20 : Paquet délivré-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.21 : Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.22 : Paquet dupliqué-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.23 : Paquet dupliqué-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.24 : Paquet dupliqué-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink

Figure 5.25 : Energie-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.26 : Energie-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.27 : Energie-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.28 : Energie-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.29 : Délai moyen-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.30 : Délai moyen-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.31 : Délai moyen-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.32 : Délai moyen-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink  
Figure 5.33 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink  
Figure 5.34 : Paquet délivré-Durée de simulation-Mouv. régulier sink  
Figure 5.35 : Paquet délivré-Longueur de champ-Mouv. régulier sink  
Figure 5.36 : Paquet délivré-Nombre de régions-Mouv. régulier sink  
Figure 5.37 : Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink  
Figure 5.38 : Paquet dupliqué-Durée de simulation-Mouv. régulier sink  
Figure 5.39 : Paquet dupliqué-Longueur de champ-Mouv. régulier sink  
Figure 5.40 : Paquet dupliqué-Nombre de régions-Mouv. régulier sink  
Figure 5.41 : Energie-Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink  
Figure 5.42 : Energie-Durée de simulation-Mouv. régulier sink  
Figure 5.43 : Energie-Longueur de champ-Mouv. régulier sink  
Figure 5.44 : Energie-Nombre de régions-Mouv. régulier sink  
Figure 5.45 : Délai moyen-Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink  
Figure 5.46 : Délai moyen-Durée de simulation-Mouv. régulier sink  
Figure 5.47 : Délai moyen-Longueur de champ-Mouv. régulier sink  
Figure 5.48 : Délai moyen-Nombre de régions-Mouv. régulier sink

## Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Caractéristique du PC de la simulation.

Tableau 4.2 : Les paramètres de la simulation.

## Liste des abréviations

WSN	Wireless Sensor Networks
RCSF	Réseaux de capteurs sans fil
GPS	Global Position System
GSM	Global System for Mobile Communication
GPRS	General Packet Radio Service
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WLAN	Wireless Local Area Networks
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks)
WWAN	Wireless Wide Area Networks
WMN	Wireless Mesh Networks
WSN	Wireless Sensor Networks
VANET	Vehicular Ad Hoc Networks
ADC	Analog to Digital Converter
AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector
OLSR	Ad-hoc On Demand Distance Vector
ZRP	Zone Routinier Protocol EAR Energy Aware Routing
BLR	beacon-less routing algorithm
GeRaF	Geographic Random Forwarding routing protocol
BOSS	Beacon-less On Demand Strategy
IGF	A State-Free Robust Communication Protocol
DFD	the Dynamic Forwarding Delay
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++

## Introduction générale

Les progrès réalisés lors de ces dernières décennies dans les domaines de la microélectronique, de la micromécanique et des technologies de communication sans fil, ont permis de produire avec un coût raisonnable des composants de quelques millimètres cubes de volume. Ces derniers, appelés micro-capteurs se composent d'une unité de captage chargée de capter des grandeurs physiques telle (chaleur, humidité, vibrations...) traiter et de les transformer en grandeurs numériques à un tiers sur le cloud, une unité de traitement et de stockage de données, un module de transmission sans fil, et une ressource énergétique (généralement une batterie) pour alimenter tous ses composants.

Ces nœuds capteurs déployés, d'une manière aléatoire ou déterministe, dans une zone d'intérêt pour collecter de l'information sur le phénomène à observer. Ces derniers constituent un nouveau réseau dans notre vie et ne cesse pas d'envahir tous les domaines autour de nous, même dans notre corps, il nous impressionne par les résultats obtenus surtout dans un environnement hostile pour l'humain. Un réseau sans fil sans infrastructure qui utilise de petits appareils autonomes et interconnectés pour collecter de l'information et de la transférer jusqu'à l'utilisateur final ; c'est ce qu'on appelle le réseau de capteurs sans fil (RCSF) (wireless sensors networks WSNs en anglais).

Les capteurs s'échangent les données entre eux à travers un protocole de routage qui permet de choisir l'acheminement optimal de l'information par le réseau sans fil en prenant les capteurs comme relais jusqu'à arriver au sink et prendre en compte que les ressources du capteur sont limitées surtout l'énergie de la batterie.

Dans les RCSFs avec une macro mobilité le routage classique basé sur la mise à jour permanente et périodique de toutes les tables de routage stocker au niveau des différents nœuds de réseaux, résulte une consommation major et grave d'énergie, influer négativement sur la durée de vie pour ce type de réseau gourmande au énergie. Pour pallier ce défis les chercheurs proposent une autre approche de routage basé sur les coordonnées géographiques du nœuds comminiquants, appelé routage géographique.

Le routage géographique consiste à utiliser la position du nœud pour prendre des décisions de routage, ce dernier ayant deux classes, la première est le routage géographique avec balise qu'exige que les nœuds transmettent périodiquement un message Hello, afin de permettre aux voisins à un seul saut de connaître leurs positions. Ce mécanisme de balisage consomme beaucoup d'énergie. Pour cela, une deuxième classe a été proposé, c'est le routage géographique sans balise, qui consiste à faire la découverte du voisinage uniquement à la demande à travers un mécanisme de sélection du prochain relais.

Une liste des protocoles sont proposés dans la littérature pour le routage géographique sans balise, nous citons par exemple et non exhaustive, IGF (A State-Free Robust Communication Protocol), GeRaF (Geographic Random Forwarding routing protocol), BOSS (Beacon-less On Demand Strategy) et BLR (beacon-less routing algorithm) dont il fait l'objet de notre travail.

L'objectif de notre travail de fin d'étude consiste à faire :

- L'implémentation du protocole BLR.
- L'analyse de ses performances selon la mobilité de sink.
- La comparaison du protocole BLR avec le protocole BOSS à travers les résultats obtenus.

Le rest de ce document est organisé comme suit :

- Partie 1 : représente l'état de l'art, qui contient deux chapitres organisés comme suivant :
  - Chapitre 1 : représente un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil
  - Chapitre 2 : représente un état de l'art sur les protocoles de routage utilisés dans les réseaux de capteurs sans fil.
- Partie 2 : contient notre contribution, organisée en trois chapitres :
  - Chapitre 3 : présentation détaillée du protocole BLR.
  - Chapitre 4 : implémentation du protocole BLR sous Castalia et l'analyse de ses performances dans plusieurs scénarios de mobilité du Sink.
  - Chapitre 5 : faire une comparaison entre les deux protocoles BLR et BOSS à travers les résultats obtenus.

Et à la fin, une conclusion générale sur ce travail sera présentée.

# **PARTIE I : Etat de l'art**

## Chapitre 1 : Les réseaux de capteurs sans fil

### 1.1 Introduction

Un réseau de capteurs peut être vu comme un réseau de microsystemes dispersés dans un espace donné et communicant entre eux via une liaison sans fil. L'espace où agissent les capteurs s'appelle un champ de captage. Ce qui est intéressant dans les réseaux de capteurs, c'est que les nœuds sont souvent composés d'un grand nombre de micro-capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome.

Par conséquent, on peut définir un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou "Wireless Sensor Network" (WSN) comme un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil.

### 1.2 Présentation des Réseaux de capteurs sans fil

Au cours de son évolution, le paradigme sans fil a vu naître diverses architectures dérivées, telles que :

- les réseaux cellulaires,
- les réseaux locaux sans fil,
- etc ..

Durant cette dernière décennie, une nouvelle architecture est apparue :

- les réseaux de capteurs sans fil(RCSF).

Ces derniers ont été utilisés dans de nombreuses applications telles que la surveillance des forêts, la gestion des catastrophes, l'automatisation industrielle, l'installation des serrures, la protection des frontières, et la surveillance des champs de bataille[1][2].

Dans ces applications, les nœuds de capteurs miniaturisés sont déployés à fonctionner de façon autonome dans des environnements sans surveillance. En plus de la capacité d'explorer son environnement, chaque capteur possède une radio à bord utilisée pour l'envoi des données recueillies à une station de base, soit directement, soit à travers un chemin multi-saut. Ces capteurs ont 3 fonctions :

1. Capter des données (de type son, vibration, lumière,...),
2. Calculer des informations à l'aide de ces valeurs collectées,
3. Les communiquer à travers un réseau de capteurs.

Ce dispersion aléatoire des capteurs nécessite un protocole basé sur des algorithmes d'auto-organisation. Afin de résister aux déploiements, ces capteurs doivent être très solides et de plus, ils doivent aussi pouvoir survivre dans les conditions les plus extrêmes dictées par leur environnement



d'utilisation (feu ou eau par exemple). En plus des contraintes environnementales, une contrainte très importante est l'économie de batterie. En effet, un réseau de capteurs ne peut survivre si la perte de nœuds est trop importante car ceci engendre des pertes de communication dues à une grande distance entre les capteurs. Donc il est très important que les batteries durent le plus longtemps possible étant donné que dans la plupart des applications les capteurs sont placés aléatoirement.

### 1.3 Classification selon la zone de couverture :

La classification selon la zone de couverture donne quatre classes des réseaux différents : WPAN, WLAN, WMAN et WWAN.

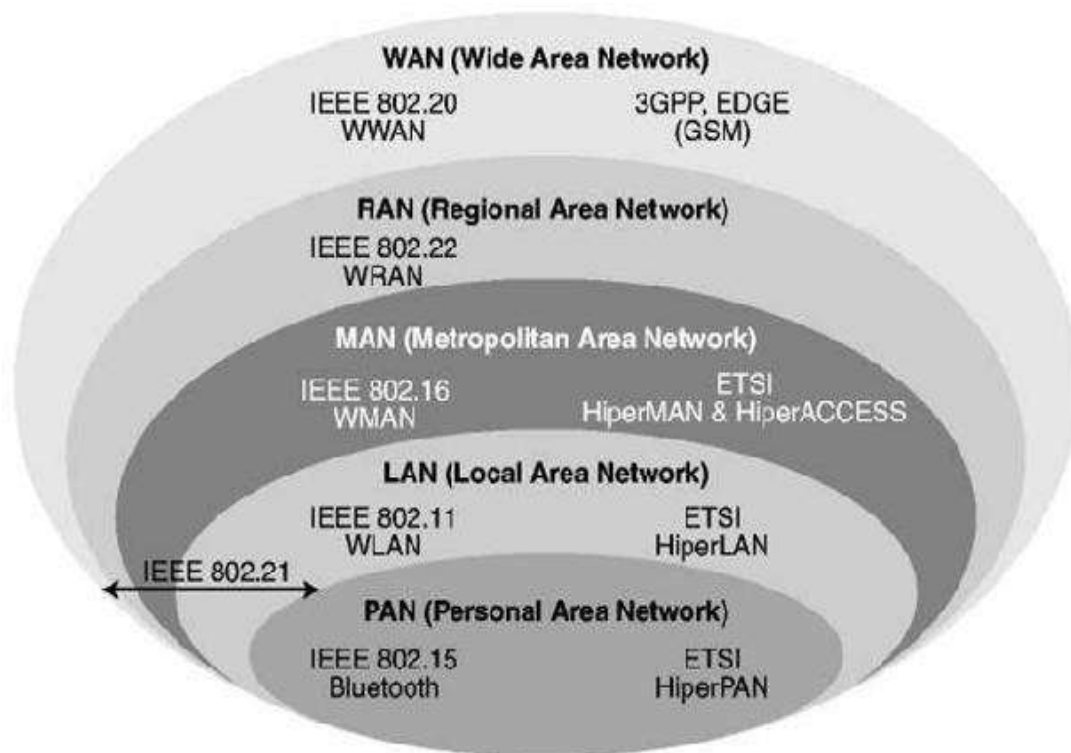


Figure 1.1 : Les catégories des réseaux sans fil[3].

#### 1.3.1 Le réseau personnel sans fil (WPAN)

Il concerne les réseaux sans fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, PDA...). Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN tel que :

- La technologie Bluetooth.
- La technologie ZigBee.
- Les liaisons infrarouges.

### 1.3.2 Le réseau local sans fil (WLAN)

C'est un réseau permettant de couvrir une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier les terminaux entre-eux présents dans la zone de couverture. Il existe deux technologies concurrentes :

1. **Les réseaux Wi-Fi (Wireless-Fidelity):** Proviennent de la norme IEEE 802.11, qui définit une architecture cellulaire. On y trouve principalement deux types de réseaux sans fil : Ceux qui travaillent à la vitesse de 11 Mbits/s à 2.4 GHz (IEEE 802.11b) et ceux qui montent à 54 Mbits/s à 5 GHz (IEEE 802.11 a/g).
2. **Les réseaux Hyper LAN 2 (High Performance LAN 2.0):** Découlent de la norme européenne élaborée par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). HiperLAN 2 permet d'obtenir un débit théorique de 54 Mbps sur une zone d'une centaine de mètres dans la gamme de fréquence comprise entre 5 150 et 5 300 MHz [26]. Ce type de réseau n'a pas reçu autant de succès que la technologie Wi-Fi.

### 1.3.3 Le réseau métropolitain sans fil (WMAN)

Connu aussi sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR). Il convient de rappeler que la BLR permet, en plaçant une antenne parabolique sur le toit d'un bâtiment, de transmettre par voie hertziennne de la voix et des données à haut débit pour l'accès à l'internet et la téléphonie. Il existe plusieurs types de réseaux WMAN dont le plus connu est :

- **Le réseau Wimax (Worldwide interoperability for Microwave Access) :** Ils émanent de la norme IEEE 802.16 et ont pour but de développer des liaisons hertziennes concurrentes aux techniques xDSL terrestres et offrent un débit utile de 1 à 10 Mbit/s dans la bande 10-66 GHz pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunication.

### 1.3.4 Le réseau étendu sans fil (WWAN)

Il est connu sous le nom de réseau cellulaire mobile et il est le plus répandu puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes : GSM (Global System for Mobile Communication), GPRS (General Packet Radio Service), UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).

## 1.4 Classification selon l'infrastructure

Les réseaux mobiles ce sont des réseaux sans fil qui permettent d'accéder à l'information indépendamment de leur position géographique. Ces réseaux peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure.

### 1.4.1 Réseaux avec infrastructure

Ce type de réseaux se compose des éléments suivants [4] :

1. Les "sites fixes" sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire.
2. Les "sites mobiles" (réseaux sans fils) sont composés de plusieurs cellules, chaque cellule contient une station de base à partir de laquelle des unités mobiles (UM) peuvent émettre et recevoir des messages. Les différentes stations de base sont reliés entre eux et/ou au réseau internet. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire.

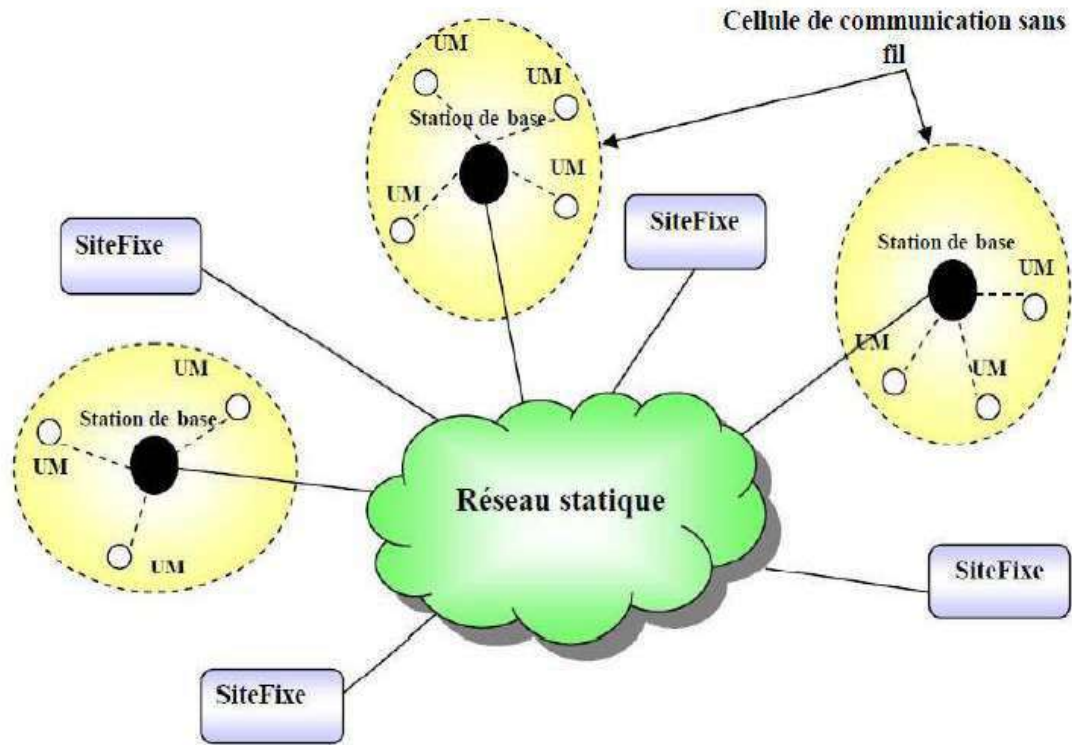


Figure 1.2 : Réseaux cellulaires[5]

### 1.4.2 Réseaux sans infrastructure (Ad hoc)

Un réseau ad hoc, ou MANET (Mobile Ad hoc NETWORK), est un réseau formé dynamiquement par un ensemble arbitraire de nœuds indépendants. Aucune préinstallation relative au rôle que devrait jouer chaque nœud n'est requise.

Dans un réseau ad hoc, les nœuds sont supposés se comporter comme des routeurs et des clients à la fois, aussi, chaque nœud est libre de se déplacer et de s'organiser aléatoirement. Ainsi, la topologie du réseau peut changer rapidement et de manière imprévisible [6].

## 1.5 Les réseaux mobiles Ad Hoc

### 1.5.1 Définition d'un réseau ad hoc

Un réseau ad hoc appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc Network, du nom du groupe de travail qui a créé ce protocole), ce réseau est constitué d'un ensemble de nœuds mobile

qui se déplacent d'une façon libre, le seul moyen de communication est les ondes radio. Chaque nœud peut communiquer directement (mode point-à-point) avec n'importe quel nœud adjacent situé dans sa zone de transmission, tandis que la communication avec un nœud situé en dehors de sa zone de transmission s'effectue via plusieurs nœuds intermédiaires (mode multi-sauts) ; dans ce cas-là les nœuds se comportent comme un routeur afin de permettre la communication entre les nœuds éloignés[7].

Le terme latin "ad hoc", qui peut être littérairement traduit en "pour ceci " ou "pour cet objectif seulement" [8].

### 1.5.2 Types des réseaux ad hoc

Nous citons les quatre types de réseau ad hoc à savoir :

**a) Les MANET (Mobile Ad hoc Networks) :** réseau mobile ad hoc est une collection d'unités mobiles interconnectées entre eux par une liaison sans fil, formant un réseau temporaire sans recourir à une administration centralisée ou une infrastructure fixe, dans le but de l'accès à l'information n'importe où et n'importe quand. Chaque nœud du réseau à un instant donné peut jouer le rôle d'un hôte (émetteur/récepteur) ou un routeur qui participe au routage des paquets de données[9].

**b) Les WMN (Wireless Mesh Networks) :** réseaux maillés sans fil repose sur plusieurs points d'accès wifi équipés d'une fonctionnalité de routage et interconnectés par des liens radios, qui agissent comme un seul réseau wifi. Plus vous avez de point d'accès wifi réparties sur le champ à couvrir, plus la connexion est performante[10].

**c) Les VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) :** réseaux véhiculaires ad hoc sont utilisés pour la communication entre véhicules et équipements routiers.

**d) Les WSN (Wireless Sensor Networks) ou RCSF :** réseau de capture sans fil constitué d'un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, chaque nœud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un point de collecte appelé sink, à l'aide d'une connexion sans fil[11].

### 1.6 Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)

Les réseaux de capteurs sont considérés comme un type spécial des réseaux Ad hoc. En conséquence, ils héritent des caractéristiques de ces réseaux, y compris l'architecture sans infrastructure établie et la communication sans fil. Les RCSF forment une nouvelle génération de réseaux aux propriétés spécifiques, Ils présentent un champ d'application très vaste et couvrent plusieurs domaines à caractère scientifique, logistique, militaire ou de santé.

Un RCSF est composé de plusieurs centaines et parfois des milliers de nœuds capteurs, chaque

noeud est capable de surveiller son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte, à l'aide d'une connexion sans fil[12].

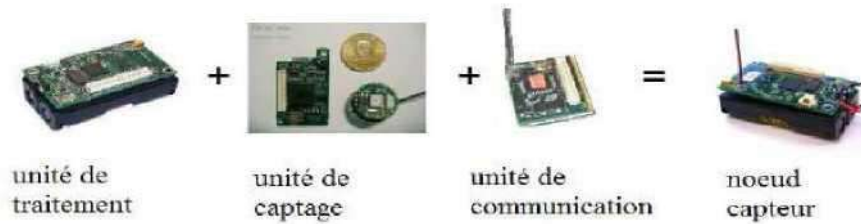


Figure 1.3 : le noeud capteur [13].

### 1.6.1 Architecture d'un noeud capteur

Un noeud capteur est composé de quatre unités principales, qui sont présentées dans la figure ci-dessous[14][15].

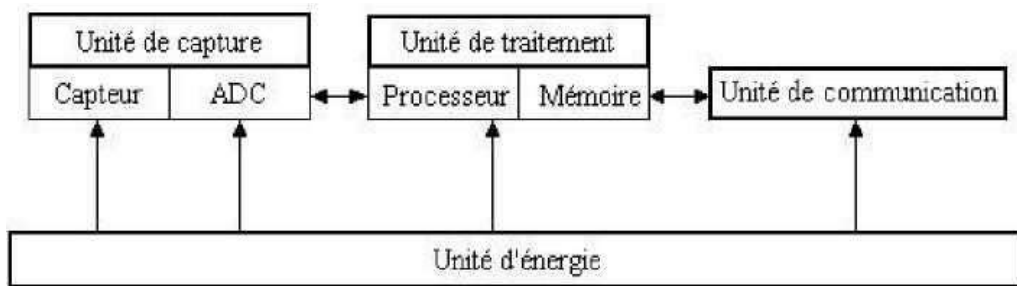


Figure 1.4 : les composants d'un noeud capteur[16].

- a) **Unité de capture (Sensing unit)** : Elle est composée de deux sous unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/ numérique appelé ADC (Analog to Digital Converters).
- b) **Unité de traitement (Processing unit)** : Les données captées sont communiquées au processeur où elles sont stockées dans la mémoire.
- c) **Unité de communication (Transceiver unit)** : Elle est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) permettant la communication entre les différents noeuds du réseau.
- d) **Unité d'énergie (Power unit)** : C'est la batterie qui, n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de la conception de protocoles pour les réseaux de capteurs. Les unités d'énergie peuvent être supportées par des photopiles qui permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique.

## 1.6.2 Les types d'architectures des RCSF

### 1.6.2.1 Les réseaux de capteur sans fil plat :

Un réseau de capteur sans fil plat est un réseau homogène, où tous les nœuds disposent des mêmes capacités dans la communication, captage d'informations... Et un sink différent puisque il joue le rôle de passerelle chargée à transmettre les informations collectées à l'utilisateur.

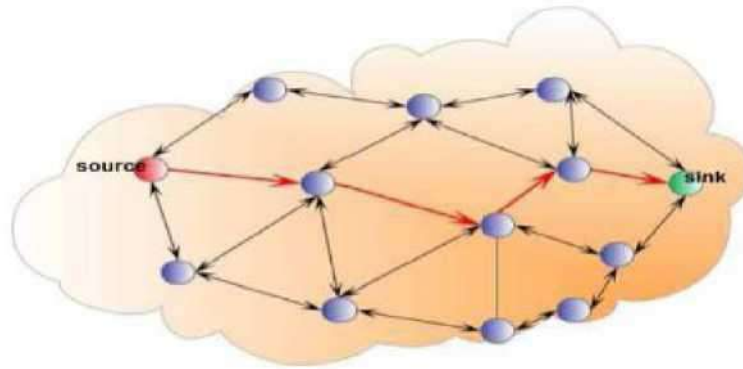


Figure 1.5 : Architecture Plat des RCSF[18].

### 1.6.2.2 Les réseaux de capteurs sans fil hiérarchique :

C'est un réseau hétérogène où les nœuds peuvent disposés d'une source énergétique, d'une portée de communication ou d'une puissance de calcul différente les uns des autres.

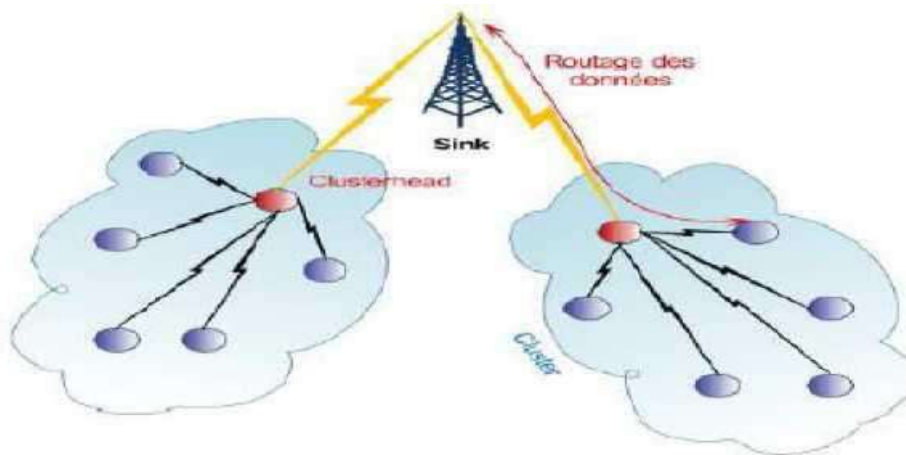


Figure 1.6 : Architecture hiérarchique des RCSF[18].

## 1.6.3 Caractéristiques liées aux RCSF

Un ensemble de caractéristique sont importantes pour l'accomplissement des tâches assignées aux applications. Les plus importantes sont :

### 1.6.3.1 L'auto configuration des noeuds de capteur

Dans un RCSF, les noeuds sont déployés soit d'une manière aléatoire (missile, avion...), soit placés noeud par noeud par un humain ou un robot. Ainsi, un noeud capteur doit avoir des

capacités d'une part pour s'auto-configurer dans le réseau, et d'autre part pour collaborer avec les autres noeuds dans le but de reconfigurer dynamiquement le réseau en cas de changement de topologie du réseau.

### 1.6.3.2 La qualité de service (QoS)

La QoS pour les RCSF est que la quantité et la qualité d'informations extraites à partir des puits devient appropriée. Le niveau de QoS est défini par un ensemble d'attributs comme le temps d'attente, la largeur de bande, et la perte de paquets qu'on relie directement avec le type de service du réseau.

### 1.6.3.3 Les types de communications

Il existe différents types de communication utilisée dans les RCSFs :

- **Unicast** : ce type de communication utilisé pour échanger des informations entre deux noeuds sur le réseau.
- **Broadcast** : la station de base transmet des informations vers tous les noeuds du réseau. Ces informations peuvent être des requêtes de données bien précises, des mises à jour de programmes ou des paquets de contrôle.
- **Local Gossip** : ce type de communication est utilisé par des noeuds situés dans une région bien déterminée qui collaborent ensemble afin d'avoir une meilleure estimation de l'évènement observé et d'éviter l'émission du même message vers le noeud sink ce qui contribue à consommer moins d'énergie.
- **Convergecast** : il est utilisé dans les communications entre un groupe de noeuds et un noeud bien spécifique, l'avantage de ce type de communication est la diminution de contrôle d'entête des paquets, ce qui économise l'énergie au niveau du noeud récepteur.
- **Multicast** : il permet une communication entre un noeud et un groupe de noeuds, ce type est utilisé dans les protocoles qui incluent le « clustering » dans les quels, le « clusterhead » s'intéresse à communiquer avec un groupe de noeuds.

### 1.6.3.4 Le passage à l'échelle (Scalabilité)

Contrairement aux réseaux sans fil traditionnels (personnel, local ou étendu), un RCSF peut contenir un très grand nombre de noeuds capteurs (des centaines, des milliers...). Un réseau de capteur est scalable parce qu'il a la faculté d'accepter un très grand nombre de noeuds qui collaborent ensemble afin d'atteindre un objectif commun.

## 1.6.4 Domaine d'application

Les réseaux de capteurs sans fil ont un champ d'application vaste et diversifié. Ceci est rendu possible par leur cout faible, leur taille réduite, le support de communication sans fil utilisé et la large gamme des types de capteurs disponibles. Un autre avantage est la possibilité de s'auto-

organiser et d'établir des communications entre eux sans aucune intervention humaine, notamment dans des zones inaccessibles ou hostiles, ce qui accroît davantage le nombre de domaines ciblés par leur application (environnement, catastrophes naturelles, bâtiments intelligents, la santé, l'agriculture, l'industrie...etc.). Nous présentons dans ce qui suit les domaines les plus ciblés par les RCSFs[54]:

#### **1.6.4.1 Domaine militaire**

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine.

Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis), ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations). Des tests concluants auraient déjà été réalisés par l'armée américaine dans le désert de Californie.

#### **1.6.4.2 Domaine civil**

Apparus dans plusieurs contextes notamment dans la surveillance des habitations (concept de bâtiments intelligents), des infrastructures, des installations et des zones à risques. Leur utilisation permet de réduire considérablement le budget consacré à la sécurité des humains tout en garantissant des résultats sûrs et fiables[54].

#### **1.6.4.3 Domaine agricole et environnemental**

Les réseaux de capteurs sans fil sont très utiles dans la protection de l'environnement. Ils peuvent être utilisés pour la détection des feux de forêts, des inondations, surveillance des volcans, contrôle de la qualité de l'air par le suivi de l'évolution de la densité moyenne de Co<sub>2</sub>, le déplacement des animaux...etc. Dans le domaine agricole, on cite le déploiement des capteurs sur un champ agricole afin d'identifier les zones sèches et permettre leur irrigation à temps[54].

#### **1.6.4.4 Domaine médical**

C'est le domaine propice des applications des RCSFs, les variables comme la température, la pression et l'humidité se distribuent sur une zone très vaste ce qui nécessite des moyens importants en terme de cout. Des capteurs environnementaux peuvent être utilisés pour étudier les effets des changements climatiques et des maladies qui touchent la faune et la flore; les RCSFs permettent de suivre de près le développement de la population des espèces menaces adans la nature[54].



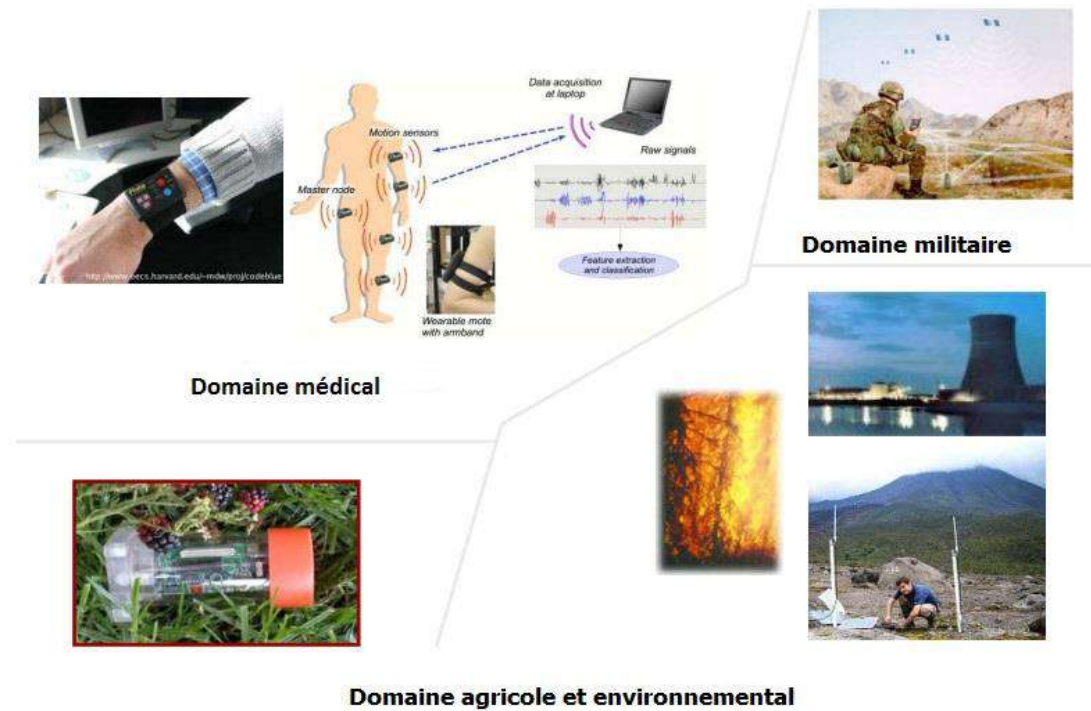


Figure 1.7 : Domaine d’application de RCSF[55].

### 1.6.5 Modèle de communication dans les RCSF

Les RCSF utilisent une architecture de communication en cinq couches seulement parmi les sept couches standard définies dans le modèle OSI , la couche physique, la couche liaison de données, la couche réseau, la couche transport et la couche application. Ces couches ont les mêmes rôles que celles de la pile OSI. Ainsi que cette pile de communication pour les RCSF comporte trois autres plan de gestion dédiées respectivement pour la gestion de l’énergie, la gestion de la mobilité et celle de la gestion des tâches (interrogation du réseau de capteurs) [19].

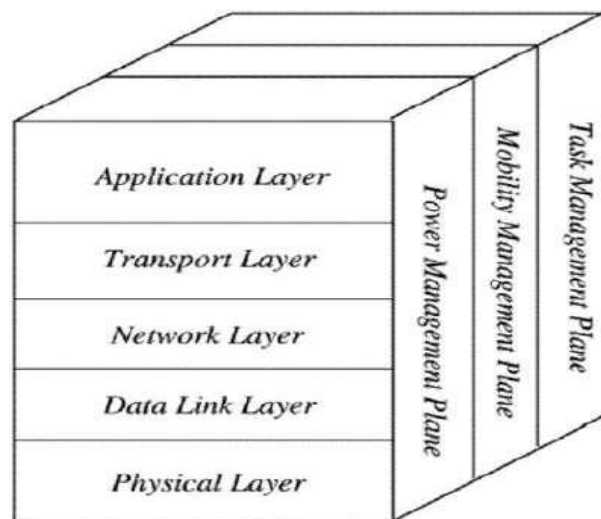


Figure 1.8 : Modèle en couche pour la communication dans les RCSF[19].

### Rôle des couches :

- **La couche physique** : assure la transmission et la réception des données au niveau bit.
- **La couche liaison de données** : permet la gestion des liaisons entre les noeuds et les stations de base. Elle permet aussi le contrôle d'erreurs.
- **La couche réseau** : cette couche s'occupe du routage de données et la découverte de voisin.
- **La couche transport** : assure le transport des données et le contrôle de flux.
- **La couche application** : assure l'interface avec les applications.
- **Le plan de gestion de l'énergie** : contrôle l'utilisation de l'énergie. Par exemple un capteur peut éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un noeud voisin afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. De plus, quand un noeud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser à ses voisins un message pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante au captage.
- **Le plan de gestion de la mobilité** : détecte et enregistre les mouvements du noeud capteur, d'une manière à leur permettre de garder des traces sur l'ensemble de ses noeuds voisins. Parfois un changement de position est nécessaire à cause de la destruction de quelques noeuds.
- **Le plan de gestion des tâches** : assure l'équilibrage des efforts des noeuds capteurs et l'ordonnancement des tâches sur les différents noeuds du réseau afin d'économiser de l'énergie. Les noeuds qui appartiennent à la même zone de captage ne doivent pas obligatoirement effectuer en même temps une tâche donnée. Certains noeuds capteurs peuvent accomplir cette tâche de capture au moment où d'autres noeuds vont se mettre dans le mode éteint afin de sauvegarder leur énergie. Ainsi, prolonger la durée de vie du réseau.

### 1.6.6 Contraintes des RCSF

Les principaux facteurs et contraintes influençant l'architecture des réseaux de capteurs peuvent être résumés comme suit[19]:

- **Tolérance aux pannes:** Certains noeuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau, c'est le principe de la tolérance de fautes. La tolérance de fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs.
- **Passage à l'échelle (Scalabilité):** Le nombre de noeuds déployés pour un projet peut atteindre le million. Un nombre aussi important de noeuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que le puits "sink " soit équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues.
- **Coût de production:** Souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de noeuds . Le prix d'un noeud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel. Actuellement un noeud ne coûte souvent pas beaucoup plus que 1\$. A titre de

comparaison, un noeud bluetooth, pourtant déjà connu pour être un système low-cost, revient environ à 10\$.

- **L'environnement** : Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au delà des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés,... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.
- **Topologie du réseau** : Le déploiement d'un grand nombre de noeuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : Déploiement, Post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...), Redéploiement de noeuds additionnels
- **Contraintes matérielles** : La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont que la consommation d'énergie doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau,...), qu'il soit autonome et très résistant vu qu'il est souvent déployé dans des environnements hostiles.
- **Média de transmission** : Dans un réseau de capteurs, les noeuds sont reliés par une architecture sans-fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être normé. On utilise le plus souvent l'infrarouge (qui est license-free, robuste aux interférences, et peu onéreux), le bluetooth et les communications radio ZigBee.
- **Consommation d'énergie**: Un capteur, de par sa taille, est limité en énergie ( $< 1.2V$ ). Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque noeud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques noeuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un re-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation.
- **Sécurité limitée** : Les réseaux Ad hoc en général et les réseaux de capteurs en particulier, sont basés sur des communications sans fil, ce qu'il les rend plus sensibles aux attaques qui menacent les données transmises. Autrement dit, ils sont les plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Les techniques conventionnelles utilisées pour faire face à ces attaques ne sont pas applicables dans les réseaux de capteurs à cause des limitations de ressources, connues dans les éléments constituant ce type de réseau, comme par exemples : la puissance de calcul et la capacité mémoire. L'absence de sécurité dans les réseaux de capteurs augmente le risque des pannes de ce type de réseaux[56].

### 1.6.7 Comparaison réseaux de capteurs et réseaux ad hoc

Les caractéristiques des réseaux de capteurs leur assurent une large gamme d'applications. La réalisation de ces dernières nécessite des techniques de réseau ad hoc sans fil. Bien que de nombreux protocoles et algorithmes ont été proposés pour les réseaux classiques ad hoc sans fil, ces

derniers ne sont pas bien adaptés pour les caractéristiques et les exigences d'application des réseaux de capteurs. Pour clarifier ce point, nous illustrons ci-dessous les principales différences entre les réseaux de capteurs et les réseaux ad hoc[56]:

- Les noeuds d'un réseau ad hoc classique sont souvent utilisées directement par des personnes (par exemple : les portables, les PDA, etc.). Dans les RCSFs, les noeuds capteurs interagissent essentiellement avec la nature ou l'environnement et/ou entre eux.
- Les noeuds capteurs sont déployés avec une grande densité, et leur nombre peut être plus élevé que le nombre de noeuds dans un réseau ad hoc.
- Le fait que les noeuds capteurs dans un RCSF sont souvent déployés dans des environnements hostiles (par exemple forêt, volcan, terrain accidenté, etc.), les rend vulnérables et risquent de tomber en panne beaucoup plus souvent que les noeuds dans un réseau ad hoc classique.
- La topologie d'un réseau de capteurs change très fréquemment du fait des pannes des noeuds ou de leur mobilité.
- Le flot de données dans les réseaux de capteurs est "Many-to-one" : Dans la plupart des cas, les données sont collectées par plusieurs noeuds capteurs et envoyées à une seule station de base (appelée aussi sink) ou à une passerelle. Dans les réseaux ad hoc le flot de données est "Any-to-any".
- Les noeuds capteurs sont limités en puissance, capacités de calcul et de mémoire.
- Les noeuds capteurs peuvent ne pas avoir d'identification globale (ID) en raison de leur nombre élevé. Mais dans les réseaux ad hoc il y'a toujours la notion d'ID.
- Dans un réseau de capteurs, les noeuds collaborent pour remplir un objectif, par contre dans les réseaux ad hoc chaque noeud a son propre objectif.
- Dans les réseaux de capteurs l'énergie est un facteur déterminant, et dans les réseaux ad hoc le débit est majeur.

## 1.7 Conclusion

Nous avons essayé à travers ce chapitre de mettre le point sur l'architecture des RCSFs, ainsi que leurs caractéristiques et les domaines d'applications. Cette mise au point nous a permis de déduire que les protocoles de routage et la dissipation d'énergie jouent un rôle déterminant et crucial dans la conception des RCSFs. Cela nous a mené à faire une étude des principaux protocoles de routage dans le chapitre qui suit.

## Chapitre 2 : Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil

### 2.1 Introduction

L'objectif principal d'un protocole de routage pour un réseau de capteurs sans fil est l'établissement correct et efficace d'itinéraires entre une paire de noeuds afin que des messages puissent être acheminés. Le protocole de routage permet aux noeuds de se connecter directement les uns aux autres pour relayer les messages par des sauts multiples et de transmettre les données vers un point de collecte.

Nous présenterons dans ce chapitre un état de l'art des principaux protocoles de routage dans les réseaux RCSF car la présentation de ces protocoles nous permettra de mieux analyser le fonctionnement.

### 2.2 Contraintes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Le routage dans les réseaux de capteurs diffère de celui des réseaux Ad Hoc dans les points suivants :

- il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global pour le grand nombre de noeuds.
- les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement de données mesurées depuis des sources multiples vers la destination finale « Sink ».
- les différents capteurs peuvent générer produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (problème de la redondance des données).
- les noeuds capteurs exigent ainsi une gestion soigneuse des ressources.
- Limitations :
  - ✓ Contraintes d'énergie : toutes les couches doivent tenir compte de la limitation d'énergie pour
  - ✓ maximiser la durée de vie du réseau.
  - ✓ Bande passante
  - ✓ Puissance de calcul : les protocoles réseau ne doivent pas être complexe.

En raison de ces différences, de nouveaux protocoles de routage ont été proposés dans les réseaux de capteurs.

### 2.3 Classification des protocoles de routage dans les RCSF

- Les protocoles de routage dans les RCSFs peuvent être divisés en trois catégories[20,21] :
  - La structure de réseau
  - Le processus de découverte des routes
  - La stratégie de routage du protocole

Cependant, il existe certains protocoles de routage peuvent être classés dans plus d'une classe et sous-classe tel qu'illustré par le figure 2.1.

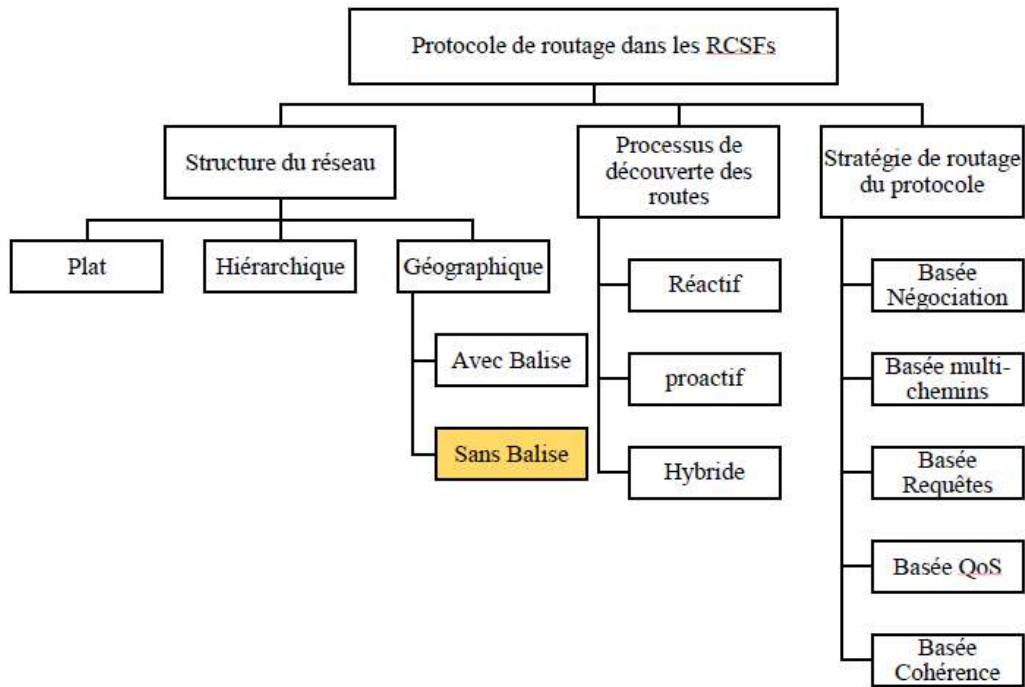


Figure 2.1 : Classification des protocoles de routage dans les RCSF[22].

### 2.3.1 Classification selon Processus de découverte des routes

Les protocoles de routage sont classés selon le processus de découverte des routes pour l'acheminement des données entre les nœuds sources et les nœuds destinations.

#### 2.3.1.1 Les protocoles de routage proactifs

Les protocoles de routage proactifs pour les réseaux mobiles ad hoc sont basés sur la même philosophie que les protocoles de routage utilisés dans les réseaux filaires conventionnels. Les deux principales méthodes utilisées dans cette classe de protocoles proactifs sont:

- La méthode Etat de Lien ("Link State") [28].
- La méthode du Vecteur de Distance ("Distance Vector") [28].

Ces méthodes sont utilisées aussi dans les réseaux sans fil. Parmi les protocoles de routage proactifs les plus connus on citera le DSDV, FSR, OLSR [25].

#### 1. Le protocole de routage «DSDV»

Destination Sequence Distance Vector (DSDV) est un protocole proactif unicast mobile ad hoc qui est basé sur l'algorithme de Bellman-Ford [29]. Dans les tables de routage de DSDV on trouve :

- Toutes les destinations possibles.
- Le nombre de noeuds (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination.
- Le numéro de séquences (SN : sequence number) qui correspond à un noeud destination.

Les numéros de séquence sont utilisés dans DSDV pour distinguer les anciennes et nouvelles routes et pour éviter la formation de boucles de parcours. Chaque noeud transmet périodiquement des mises à jour, y compris des informations de routage à ses voisins immédiats.

## **2. Le protocole de routage « FSR »**

Le protocole FSR (Fisheye State Routing) [30] est basé sur l'utilisation de la technique "oeil de poisson" (fisheye) et utilisé dans le but de réduire le volume d'information nécessaire pour représenter les données graphiques [31, 32]. Dans la pratique, l'oeil d'un poisson capture avec précision, les points proches du point focal. La précision diminue quand la distance, séparant le point vu et le point focal augmente.

Dans le contexte du routage, l'approche du "fisheye" matérialise, pour un noeud, le maintien des données concernant la précision de la distance et la qualité du chemin d'un voisin direct, avec une diminution progressive du détail et de la précision, quand la distance augmente.

### **2.3.1.2 Les protocoles de routage réactifs**

Les protocoles de routage réactifs (dits aussi protocoles de routage à la demande) détectent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, un processus de découverte de routes est lancé. Par conséquent des retards avant la transmission seront détectés [20, 14, 33, 34]. Un exemple de ces protocoles : AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector) [35]

### **2.3.1.3 Protocoles hybrides**

Dans ce type de protocole, ils utilisent une approche proactive pour connaître le proche voisinage à un nombre prédéfini de sauts. Les routes vers les noeuds plus lointains sont obtenues par l'utilisation d'une approche réactive. Le plus connu de ces protocoles est ZRP (Zone Routinier Protocol) [33, 34].

### 2.3.2 Classification selon la structure du réseau

La classification selon la structure détermine l'organisation des noeuds capteurs dans le réseau.

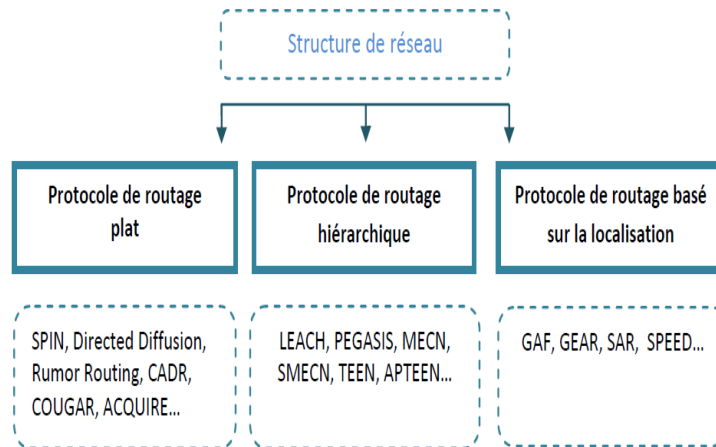


Figure 2.2 : Protocoles de routage pour les RCSF selon la structure du réseau[23].

#### 2.3.2.1 Protocoles de routage à plat

Tous les noeuds du réseau sont identiques et communiquent entre eux sans aucun autre intermédiaire sauf le noeud sink, qui est chargé de collecter toutes les informations provenant de différents noeuds capteurs afin de les transmettre vers l'utilisateur final. Exemple de ces protocoles : [36, 37, 33].

- Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [36]
- Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA) [38]
- Energy Aware Routing (EAR) [37]

#### 2.3.2.2 Protocoles hiérarchiques

L'objectif principal du routage hiérarchique [42, 43] est de maintenir efficacement la consommation d'énergie de noeuds de capteurs en les impliquant dans la communication multi-hop au sein d'un cluster et en effectuant l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination. La formation de clusters est généralement fondée sur la réserve d'énergie des capteurs et sur les capteurs qui sont à proximité de cluster-head (voir figure 2.3). LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical) [41] est l'une de premières approches de routage pour les réseaux de capteurs. L'idée proposée par LEACH a été une inspiration pour de nombreux protocoles de routage hiérarchique, bien que certains protocoles aient été développés de manière indépendante.



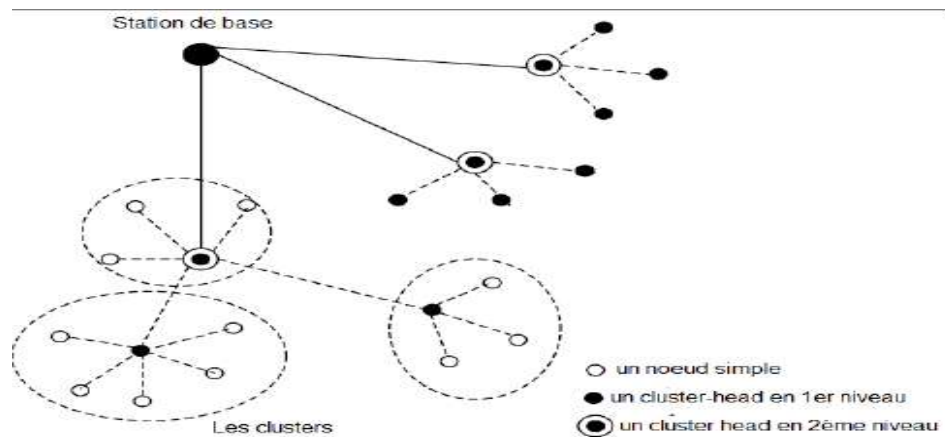


Figure 2.3 : Topologie hiérarchique.

### 2.3.2.3 Protocoles de routage géographique

L'idée des protocoles de routage géographique est d'utiliser les positions géographiques des nœuds pour prendre les décisions de routage. Les pré-requis pour effectuer un routage géographique dans un réseau ad hoc sont :

- Tous les nœuds du réseau possèdent un moyen de localisation, soit par un système comme GPS (Global Position System), soit par un logiciel comme un protocole de localisation
- Tous les nœuds connaîtront la position de la destination finale (sink).

Exemple de ces protocoles :

- Sequential assignment outing (SAR) [37]
- Sd-hoc positioning system (APS) [39]
- Geographic adaptive fidelity (GAP) [40]
- Greedy other adaptive face routing (GOAFR) [37]

## 2.4 Protocole de routage géographique

Le principe des protocoles de routage géographique est de transmettre le paquet dans la direction de la destination. Les protocoles de routage géographique se basent sur les positions des nœuds pour expédier les informations vers la destination définie [44]. Ils n'ont pas besoin de maintenir des tables de routages ou calculer des routes. En effet, pour acheminer les paquets de données, tout nœud du réseau doit connaître :

- Sa position grâce à un mécanisme de localisation (soit par un système natif intégré comme le GPS, soit par un système logiciel comme un protocole de localisation).
- La position de la destination finale peut être fixe et enregistrée dans chaque nœud ou être contenue dans le paquet transitant.

Les protocoles de routage géographique sont très adaptés aux réseaux de capteurs sans fils car ils

minimisent les coûts en mémoire et le travail des noeuds en évitant des communications superflues.

En plus de sa simplicité, le routage géographique est très apprécié et offre de bonnes performances aux RCSF en raison de ses caractéristiques [44] :

- **Localité** : les décisions d'acheminement et routage des paquets sont prises en utilisant les informations locales seulement.
- **Fonctionnement distribué** : le même algorithme sera exécuté sur tous les noeuds.
- **Sans état et sans mémoire** : les décisions sont prises à chaque étape et indépendamment des choix précédents, un noeud n'a donc pas besoin de garder des tables de routage.
- **Absence des boucles** : en essayant de progresser à chaque étape on évite les boucles dans les routes.
- **Évolutif/passage à l'échelle** : toutes les caractéristiques citées ci-dessus améliorent la flexibilité du routage géographique dans les réseaux de grande échelle et de densité croissante.

Le mécanisme de balisage dans le routage géographique exige que les noeuds transmettent périodiquement des balises (messages hello, beacons en anglais) à un saut (one-hop) afin de permettre aux voisins de connaître leur position. Pour réduire la charge de contrôle due à ces messages, des algorithmes de routage sans balises (beacon-less) ont récemment été proposés [45].

## 2.5 Stratégies de routage géographique

Différentes stratégies de routage géographique (mode de transmission) ont été proposées. Nous expliquons ci-dessous quelques stratégies d'acheminement :

Dans ce mode chaque noeud transmet le paquet au voisin qui minimise la distance euclidienne à la destination. Le but est de se rapprocher de la destination à atteindre en sélectionnant le voisin le plus proche de la destination à chaque étape [46]. Dans la figure 2.4,  $y$  est le voisin de  $x$  le plus proche de la destination  $D$ .

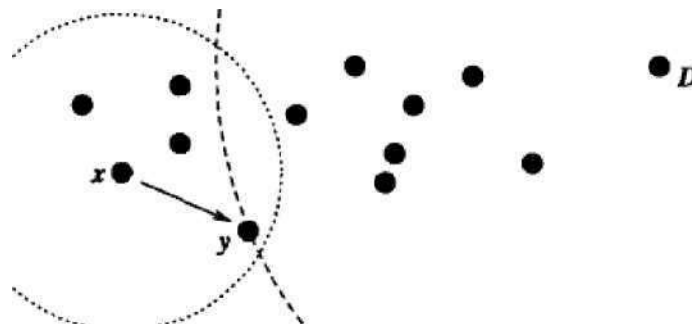


Figure 2.4 : Exemple de Greedy Forwarding[46].

**La distance euclidienne :**

La distance euclidienne entre de point  $a(x_1,y_1)$  et  $b(x_2,y_2)$  est :

$$d(a,b) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

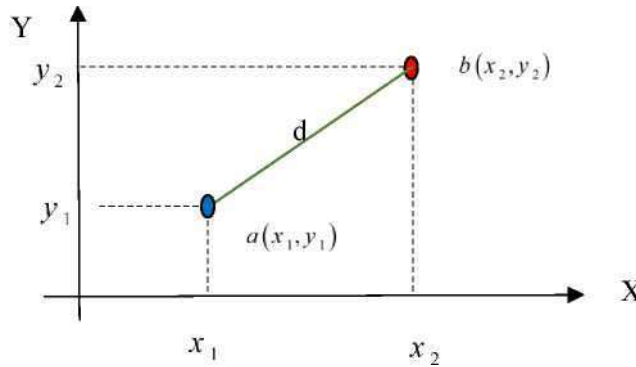


Figure 2.5 : La distance entre 2 points.

Parfois, la méthode gloutonne peut échouer ; atteindre un nœud où aucun voisin plus proche de la destination n'existe. Dans ce cas, une stratégie de récupération doit être utilisée pour entourer la zone vide atteinte. Dans la figure 2.6, nous constatons que  $x$  est aussi proche de  $D$  que ses voisins  $w$  et  $y$ . Bien que deux chemins mènent à la destination ( $x-y, y-z, z-D$ ) et ( $x-w, w-v, v-D$ ), le nœud  $x$  ne choisit aucun d'eux. Pour sortir de cette situation problématique nous utilisons le mode périmètre (la règle de la main droite).

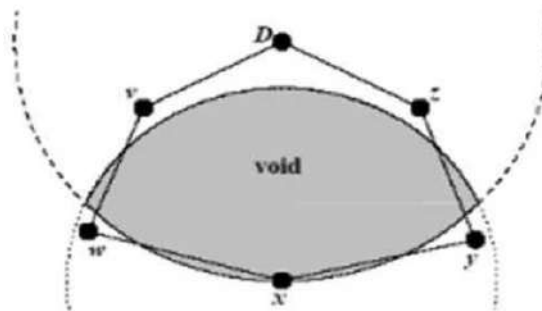


Figure 2.6 : Présence d'un trou[46].

**2.5.1 Routage géographique en mode périmètre (Perimeter Forwarding)**

Le mode périmètre consiste à transmettre un paquet à sa destination finale en utilisant la règle de la main droite (Right Hand Rule en anglais), qui consiste à router le paquet autour du trou dans le sens contraire des aiguilles d'une montre jusqu'à atteindre un nœud capable d'effectuer la progression gloutonne [22].

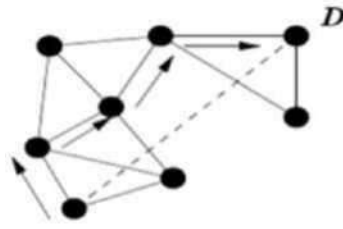


Figure 2.7: mode périmètre [46].

## 2.5.2 Routage géographique en mode glouton et périmètre

Cette stratégie utilise le mode glouton pour router les paquets de données vers les nœuds qui diminuent plus la distance à la destination, en cas d'échec (rencontre d'un trou par exemple), en passe à la mode périmètre qui utilise la méthode de main droite [46, 22].

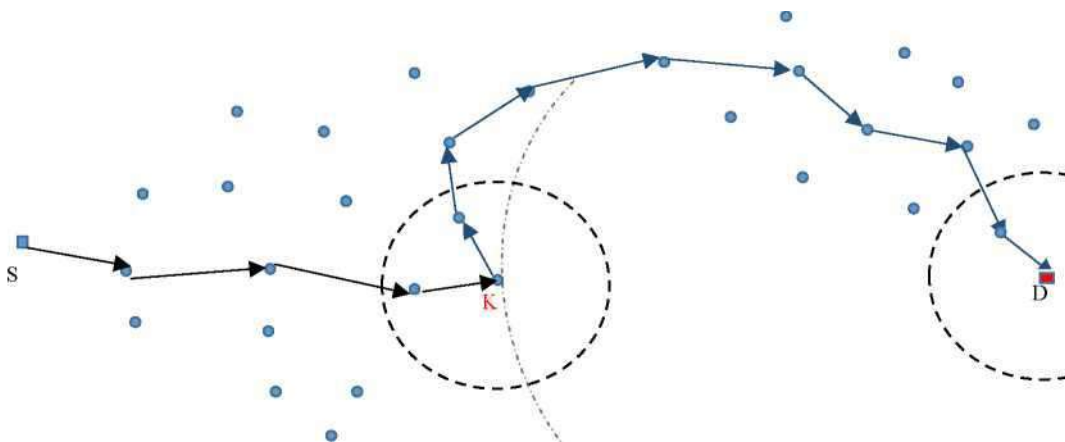


Figure 2.8 : Mode glouton et périmètre[22].

Le nœud K n'a pas de voisins dans sa zone de progrès positif vers D (Figure 2.8). Le nœud K ne peut plus faire progresser le paquet en utilisant le routage glouton. Donc le passage vers le mode périmètre est nécessaire.

## 2.6 Catégorie de routage géographique

Les protocoles de routage géographiques sont classés en deux catégories :

- Les protocoles de routage géographique avec balise (beacon)
- Les protocoles de routage géographique sans balise (beacon-less)

### 2.6.1 Protocole de routage géographique avec balise

Les protocoles de routage géographique basé sur des balises, utilisent des tables pour stocker les positions des voisins à un saut. Des mises à jour sur ces tables sont nécessaires. Pour ce faire les

nœuds doivent envoyer périodiquement des messages hello appelés balises contiennent leur position [45].

Ce mécanisme de balisage, pose certains problèmes, tels que :

- Une surcharge de communication supplémentaire.
- La consommation d'énergie et de bande passante.
- La génération d'interférences avec la transmission de données régulière.

Pour résoudre ces problèmes, plusieurs protocoles de routage sans balise ont été proposés pour les réseaux de capteurs sans fil.

## 2.6.2 Protocole de routage géographique sans balise

Les protocoles de routage géographique sans balise (Beacon-less) ont été proposés dans le but de pallier les problèmes liés à l'utilisation des balises dans un environnement mobile. Ces protocoles n'utilisent pas les balises (message hello) périodiques pour acquérir des informations sur les positions de ses voisins. Par contre, la découverte du voisinage est faite uniquement à la demande à travers un mécanisme de sélection du prochain saut d'un message [44]. Le nœud qui détient actuellement le paquet de donnée détermine le prochain saut (relais) parmi ses voisins. Pour cela, il diffuse ses informations de localisation aux voisins. Les voisins utilisent ces informations et contribuent au processus de routage. Par conséquent, les demandes de bande passante, mémoire et d'énergie liée à l'échange d'informations sont diminuées [45].

Plusieurs protocoles de routage géographique sans balises sont conçus, tels que :

- **IGF (Implicit Geographic Forwarding)** : Blum et al dans [51], ont proposé le transfert géographique implicite où ils intègrent le routage et la couche MAC dans un protocole commun, en prenant comme base le schéma de contention IEEE 802.11 DCF. Le principe est le même que BLR et CBF; IGF essaie d'acheminer de manière non déterministe des paquets en utilisant un processus de compétition entre les nœuds candidats, l'IGF intègre ici une métrique d'énergie restante (ER) dans le processus de sélection d'itinéraire[52].
- **GeRaF (Geographic Random Forwarding)** : GeRaF[53], est un autre type de BLGR qui prend la zone d'avancement positif de la zone de couverture de nœud en N sous-régions (voir Figure 2.10). Chacun d'eux est délimité par la zone de couverture du nœud émetteur et une ou deux zones de cercle centrées au niveau du puits. Lors de la transmission d'un paquet, l'expéditeur diffuse un paquet RTS à tous les nœuds de la sous-région la plus proche de la destination et attend une réponse CTS. S'il n'y a pas de réponse, l'expéditeur diffusera un autre paquet RTS vers la sous-région qui est la seconde la plus proche de la destination. Ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'un CTS soit reçu ou que toutes les sous-régions aient été recherchées, auquel cas la transmission échoue[52].

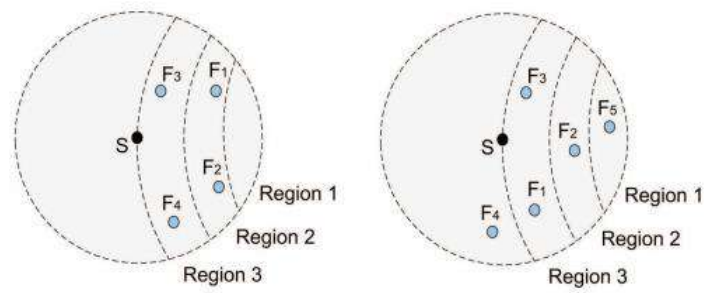


Figure 2.9 : Régions du point de vue de la destination[52].

- **BOSS (Beacon-less On Demand Strategy)** : Pour transmettre un paquet, BOSS utilise un mécanisme de 3-way handshake . Le nœud détenant le paquet pour l'envoyer le diffuse et attend la première réponse du voisinage puis, il confirme la sélection avec un paquet de contrôle final. Pour réduire la surcharge, ils utilisent un schéma d'accusé de réception passif pour confirmer la réception réussie du paquet transmis[52].

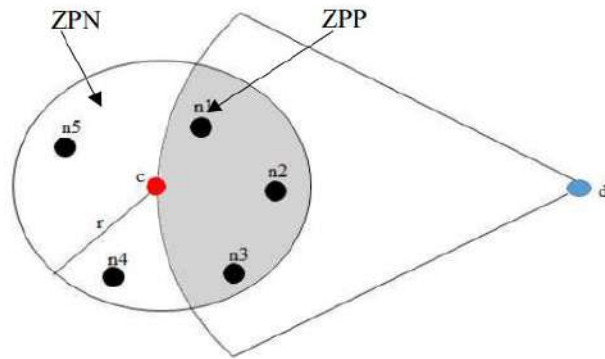


Figure 2.10 : La zone de progression [45].

- **BLR (beacon-less routing algorithm)** dont il fait l'objet de notre étude.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le routage dans les RCSF et nous avons présenté les différentes classifications des protocoles de routage selon la structure de réseau, la découverte des routes. Ensuite, nous avons abordé le routage géographique qui repose sur la notion de position des nœuds pour prendre des décisions de routage.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons le protocole BLR

## **PARTIE II : Contribution**

## Chapitre 3 : Présentation du protocole BLR

### 3.1 Introduction

Le routage de paquets dans des réseaux mobiles ad hoc avec un grand nombre de nœuds ou avec une mobilité élevée est une tâche très difficile et les protocoles de routage actuels ne s'adaptent pas vraiment bien à ces scénarios. L'algorithme de routage sans balise (BLR) est un protocole de routage qui utilise les informations de localisation pour réduire la surcharge de routage. Cependant, contrairement à d'autres protocoles de routage basés sur la position, BLR n'exige pas que les nœuds diffusent périodiquement des messages Hello (appelés beaconing), et évite ainsi des inconvénients tels qu'une utilisation intensive d'une faible puissance de batterie, des interférences avec la transmission régulière de données et une dégradation des performances[47].

### 3.2 Les zones de transfert

Les zones de transfert sont relatives au nœud de relais et peuvent être fondamentalement de n'importe quelle forme à condition que tous les nœuds à l'intérieur de la zone se trouvent dans la portée de transmission les uns des autres[47].

Cependant, la zone de transfert doit être grande afin d'augmenter la probabilité de trouver un nœud dans la zone. Par ailleurs, un autre objectif de la zone est de favoriser les nœuds qui sont situés à proximité de la limite de la portée de transmission, ce qui permet une grande progression par transmission et réduit ainsi le nombre de sauts vers la destination[47].

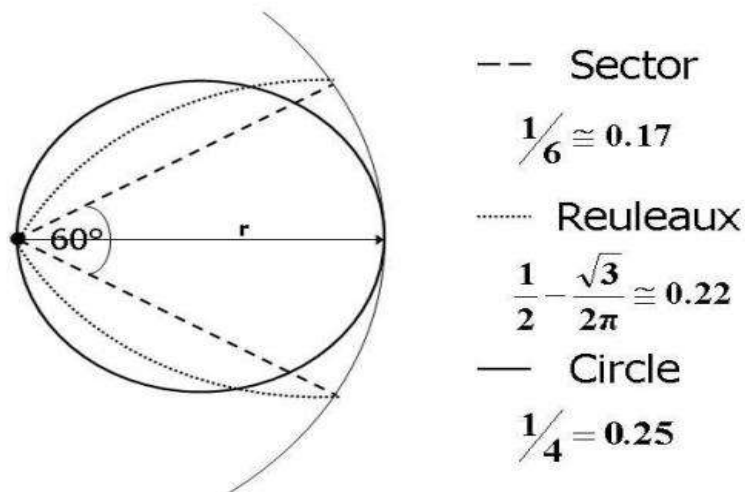


Figure 3.1 : Zones de transfert différentes[47].

Sur la figure 3.1, trois zones possibles sont représentées, à savoir un secteur, un triangle de Reuleaux et un cercle, qui remplissent tous la condition de réception mutuelle possible pour les nœuds situés dans ces zones. Pour le secteur et le triangle de Reuleaux, ceci est obtenu par un angle au sommet de 60, ce qui limite la distance de deux nœuds placés arbitrairement à la portée de transmission  $r$ . Le cercle a juste un diamètre de  $r$ . Les nombres sur la figure 3.1 indiquent le rapport couvert par la



zone de transfert correspondante par rapport à la zone de transmission globale[47].

### 3.3 Délai de transmission dynamique (DFD)

La fonction qui calcule les valeurs de temporisateur DFD de nœuds individuels peut appliquer différentes politiques de transfert. Chaque nœud au sein de la zone de transfert détermine d'abord différents paramètres, tels que sa progression  $p$  vers la destination par rapport au dernier saut et sa distance  $d$  de la ligne S-D (Figure 3.2). À partir de ces valeurs, le nœud dérive la valeur DFD  $Add\_delay$  dans l'intervalle  $[0, Max\_delay]$ .

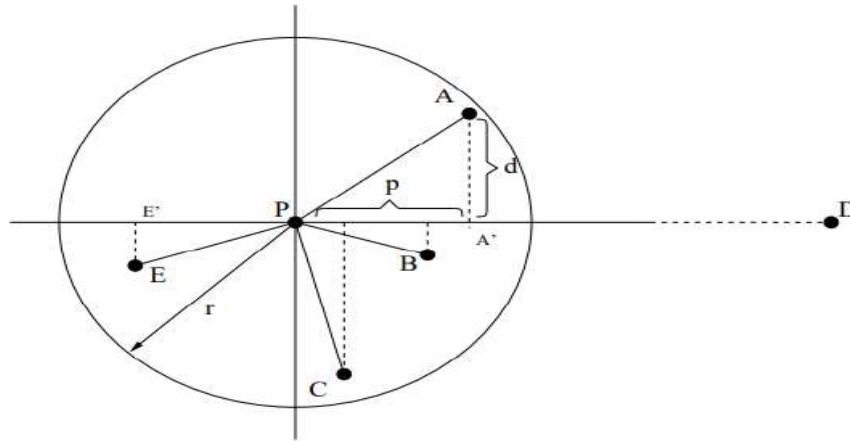


Figure 3.2 : Stratégies de transfert[47].

$$Add\_delay = Max\_delay \cdot \left( \frac{r - p}{r} \right) \quad (1)$$

$$Add\_delay = Max\_delay \cdot \left( \frac{p}{r} \right) \quad (2)$$

$$Add\_delay = Max\_delay \cdot \left( \frac{e^{\sqrt{p^2 + d^2}}}{e} \right) \quad (3)$$

Figure 3.3 : Les fonctions de delai[47].

Trois fonctions de délai différentes sont décrites ci-dessous :

La fonction dans (1) implémente essentiellement MFR [48]. Un nœud avec moins de progression introduit un délai plus important qu'un nœud avec plus de progression. Par conséquent, le nœud avec le plus de progrès dans la zone de transfert transmet le paquet dans un premier temps afin de minimiser le nombre de sauts vers la destination.

La fonction dans (2) implémente un NFP légèrement modifié [49]. NFP n'est pas directement applicable car un nœud ne sait pas quel voisin est le plus proche. Le nœud avec le moins de progrès introduit le délai le plus court et transmet le paquet. L'objectif est de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter le nombre de transmissions simultanées possibles, ce qui augmente la

capacité globale du réseau comme indiqué dans [49].

Au lieu de ces fonctions de base, des fonctions DFD plus avancées sont possibles qui prennent non seulement en compte la progression d'un nœud mais aussi la distance au nœud précédent. Si la progression est utilisée comme seul paramètre, les nœuds situés loin de la ligne directe S - D vers la destination peuvent être favorisés par rapport à un nœud avec seulement un peu moins de progrès mais dans une direction presque droite vers la destination. En outre, il a été montré dans [50] que les temporisateurs aléatoires distribués de manière exponentielle peuvent réduire davantage le nombre de réponses par rapport aux temporisateurs uniformément répartis. Dans (3), ces observations sont combinées à une fonction DFD plus avancée.

Sur la figure 3.3, le délai supplémentaire introduit par (3) pour tous les nœuds avec une progression vers l'avant est représenté. Les nœuds proches du nœud précédent introduisent un court délai, tandis que les nœuds situés plus loin calculent un temporisateur DFD plus élevé.

## **3.4 Procédures de routage du protocole BLR**

### **3.4.1 Phase de transfert d'un paquet data**

Si un nœud source a un paquet de données à envoyer, il détermine d'abord la position de la destination et stocke ces coordonnées géographiques avec sa propre position actuelle dans l'en-tête du paquet.

### **3.4.2 Phase de réception d'un paquet data**

Tous les nœuds intermédiaires remplacent simplement la position du nœud précédent par leur position actuelle dans l'en-tête avant de transmettre le paquet. Puisqu'un nœud ne possède pas la connaissance des nœuds voisins, il diffuse le paquet à tous les nœuds voisins. Lors de la réception d'un paquet, la seule information disponible dont dispose un nœud intermédiaire est sa propre position et la position du nœud précédent et du nœud de destination, extraites de l'en-tête du paquet. Ainsi, un nœud peut facilement dériver s'il est situé dans une zone spécifique par rapport au nœud émetteur précédent.

### **3.4.3 Phase de retransmission d'un paquet data**

Les nœuds situés dans cette zone de transfert appliquent un délai de transmission dynamique (DFD) avant de relayer le paquet, tandis que les nœuds en dehors de cette zone abandonnent le paquet reçu. La valeur du DFD  $[0, \text{Max Delay}]$  dépend des coordonnées de position relatives du courant, précédent et le nœud de destination. Finalement, le nœud qui a calculé le DFD le plus court transmet le paquet en premier. Chaque nœud de la zone de transfert détecte le prochain relais du paquet et annule sa transmission programmée du même paquet.

### **3.4.4 Phase d'envoi d'un acquittement**

De plus, des accusés de réception passifs sont utilisés. Le nœud émetteur précédent détecte également le prochain relais du paquet et conclut ainsi qu'il a été reçu avec succès par un autre nœud. Ainsi, les acquittements sur la couche MAC peuvent être évités. (Par exemple, dans IEEE

802.11, il n'y a même aucun accusé de réception fourni pour les paquets de diffusion.)

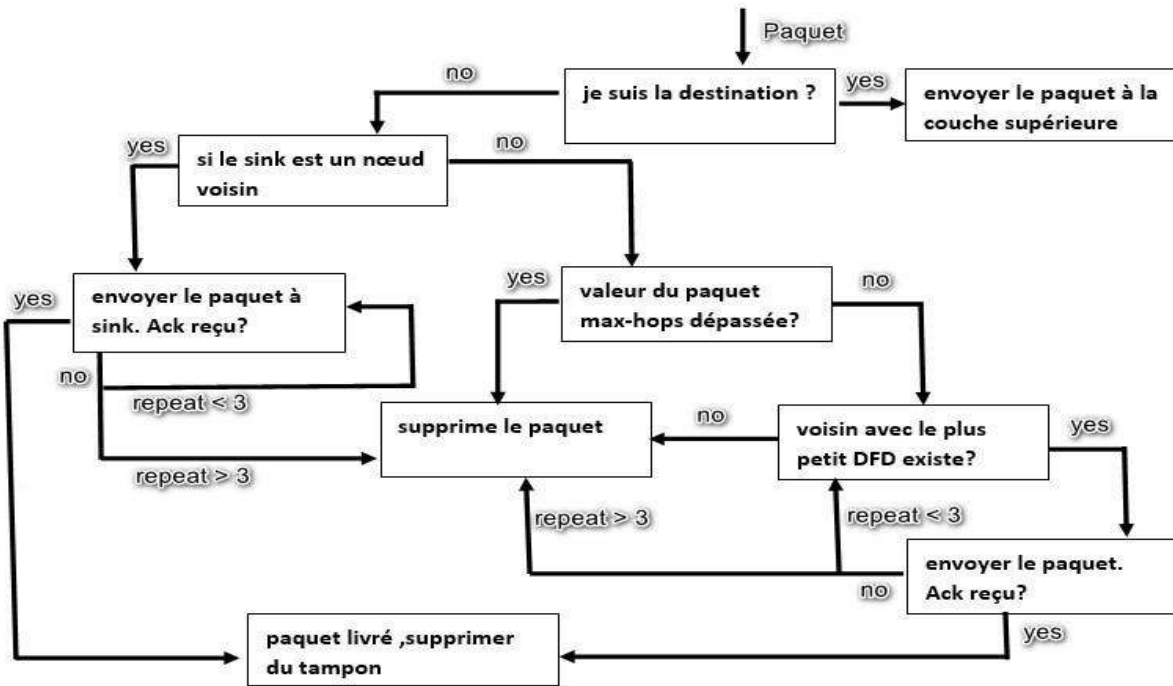


Figure 3.4 : Schéma de gestion des paquets dans le protocole BLR.

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé notre protocole d'étude, qui est le protocole BLR, qui utilise une fonction de délai d'attente dont la valeur dépend de la position du nœud appelé DFD. Enfin, nous avons détaillé les procédures de routage du protocole BLR, cette étude nous facilite la simulation de ce dernier dans le chapitre suivant.

## Chapitre 4 : Implémentation et analyse des performances du BLR

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons implémenter et tester le protocole BLR et pour cela nous avons choisi un simulateur capable de représenter les principales caractéristiques d'un réseau RSCF et d'intégrer les protocoles de routage avec la possibilité de réaliser plusieurs scénarios en peu de temps, ce simulateur s'appelle OMNeT++.

### 4.2 Le Simulateur OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++)

OMNeT++ est un environnement de simulation à événements discrets basé sur le langage C++, utilisé pour la simulation des réseaux de communication, et d'autres systèmes distribués. Grâce à son architecture modulaire, OMNeT++ est très largement répandu dans divers domaines d'applications tel que[4]:

- La modélisation des protocoles de communications.
- La modélisation des réseaux filaires et sans fils.
- La modélisation des systèmes répartis.

Le simulateur OMNeT++ n'est pas spécialisé pour les réseaux de capteurs sans fils, pour cela il existe plusieurs extensions, plateforme et simulateurs basés sur OMNeT++ qui essayent d'introduire ce manque comme "Mobility Framework", "Mixim", "Castalia" ...etc.

### 4.3 Castalia

Castalia est un simulateur pour les réseaux de capteurs sans fil (WSN), les réseaux de zone corporelle (BAN) et généralement les réseaux d'appareils embarqués à faible puissance. Il est basé sur la plate-forme OMNeT ++ et peut être utilisé par les chercheurs et développeurs qui souhaitent tester leurs algorithmes et/ou protocoles distribués dans des modèles de canaux et radio sans fil réalistes[10].

Les principaux modules sont le nœud, processus physiques et les canaux sans fil, les nœuds ne se connectent pas directement les uns aux autres mais via le(s) module(s) de canal sans fil (wireless channel), Lorsqu'un nœud a un paquet à envoyer, celui-ci va au canal sans fil qui décide alors quels nœuds doivent recevoir le paquet . Les nœuds sont également liés via les processus physiques qu'ils surveillent[10].

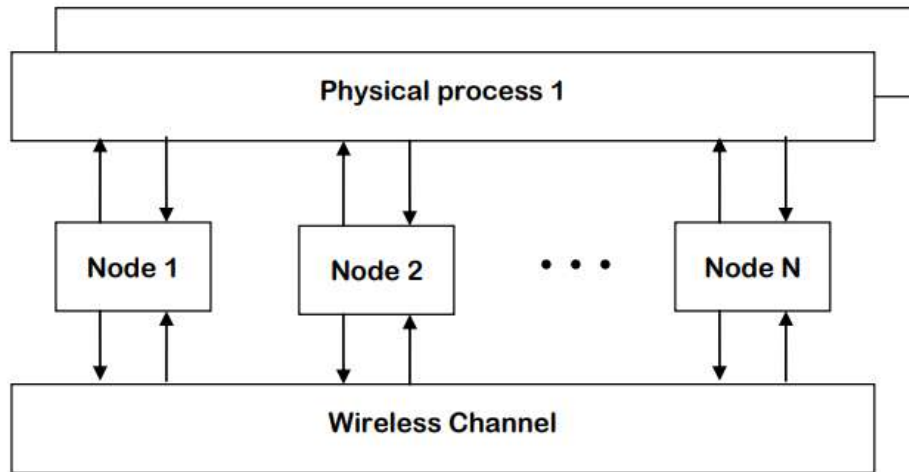


Figure 4.1 : Les connexions des modules sous Castalia[10].

**La structure d'un nœud :**

Le nœud est un module composite. La figure 4.2 montre la structure interne du module composite de nœud. Les flèches pleines signifient que le message passe et les flèches en pointillé signifient un simple appel de fonction[10].

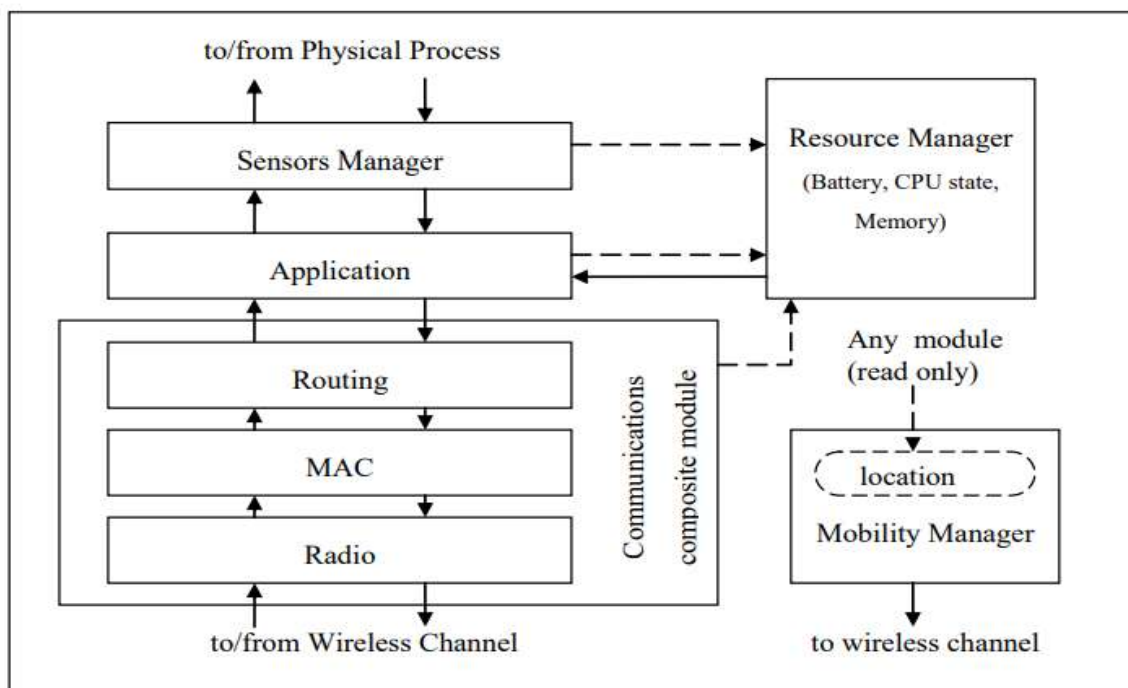


Figure 4.2 : Les principaux composants d'un nœud[10].

**4.4 Implémentation de BLR**

Pour implémenter le protocole BLR et dans le but d'améliorer les performances de réseau de

capteurs sans fil, on va utiliser l'approche cross-layer (inter couche) qui exploite les fonctionnalités raditionnelles de la couche MAC dans les décisions de routage, afin de minimiser la consommation d'énergie. Le simulateur Castalia fournit une source bien structurée pour l'ajoute et le développement d'un nouveau protocole d communication. Les séquences d'action de l'émission et réception sont présentées ci-dessous :

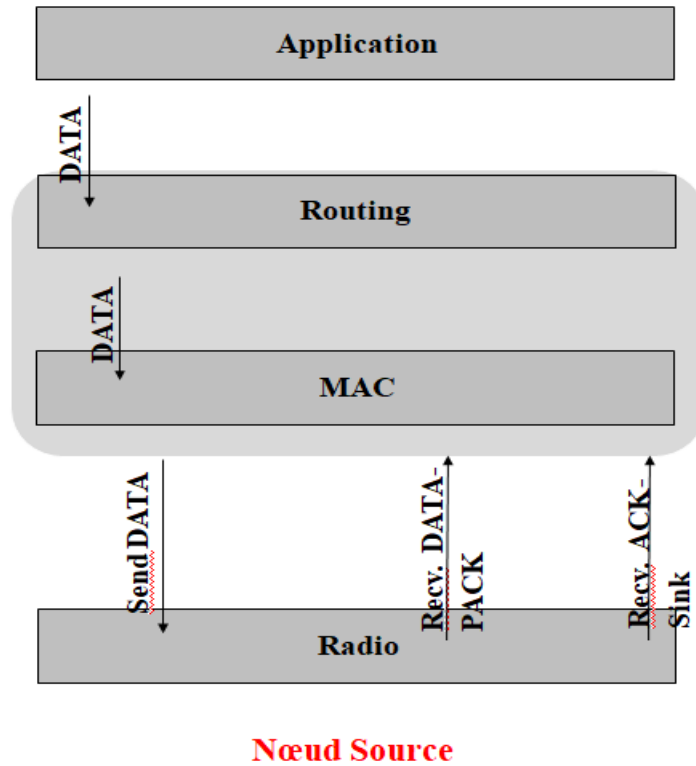


Figure 4.3 : Protocole BLR-Emission/Réception (Nœud Source).

Lorsqu'un paquet DATA est généré par la couche application, on doit vérifier si le sink est dans La zone de transmission, si c'est le cas le paquet sera envoyé directement et un message ACK sera attendu de la part de sink. Si le sink est loin de la zone de transmission du noeud source, on doit diffuser le message DATA et attendre un accusés de réception passifs , le noeud source écoute et attend la réémission de son paquet DATA sinon un nouveau processus d'envoi pour ce paquet DATA sera lancé.

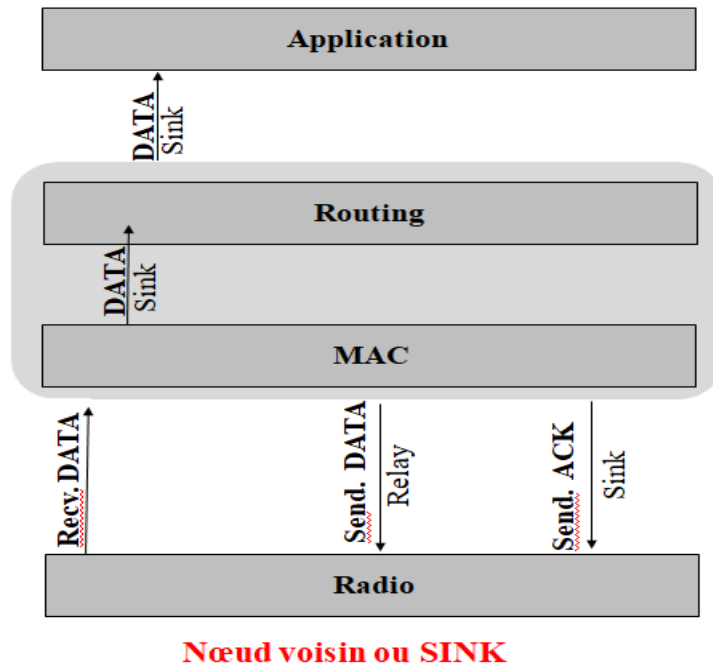


Figure 4.4 : Protocole BLR-Emission/Réception (Nœud voisin ou SINK).

#### 4.4.1 Aspects algorithmiques

Le protocole de routage BLR, sera présenté par la classe nommée BLRRoutingMAC, décrit comme suivant :

```

class BlrRoutingMAC: public VirtualMac
{
protected: //definition de tous les variables utilisés

    void startup();
    void finish();
    void fromRadioLayer(cPacket *, double, double);
    void fromNetworkLayer(cPacket *, int);
    void timerFiredCallback(int);
    void handleCarrierSenseResultToSendDataRelay(int);

    void handleCarrierSenseResultToSendDataSink(int);
    NodeLocation_type getNodeLocation();
    void finishSpecific();
    void initTx();
    void attemptTx();
    void addPacketReceivedToTable(int src, double latency,
    unsigned int sequenceNbr);
    int bufferFrontPacket(cPacket *);
};
    
```

Chaque noeud sera sur un état connu tout le temps, ceci est déterminé par la variable `NegotiationState`, il prendra une valeur entière de :

```
enum NegotiationState {
    NEG_STATE_DEFAULT = 1,
    NEG_STATE_WAITING_FOR_DATA = 3,
    NEG_STATE_WAITING_FOR_ACK = 4,
    NEG_STATE_SLEEPING_NAV = 6,
    NEG_STATE_SENSING_CARRIER = 7,
    NEG_STATE_ATTEMPT_TX = 8,
    NEG_STATE_ATTEMPT_RTSTX = 9,
    NEG_STATE_WAITING_FOR_PACK = 11
};
```

Un noeud peut recevoir deux types de paquets provenant de la couche radio :

```
enum BlrRoutingMacFrameTypeDef {
    BLR_DATA = 1,
    BLR_ACK = 2,
};
```

La prochaine action dépendra du paquet reçu :

- À la réception d'un paquet de type `BLR_DATA`, chaque noeud calculera le délai de transmission de paquet.
- À la réception d'un paquet de type `BLR_ACK` par le sink, le noeud émetteur supprime le paquet `DATA` déjà envoyer.

#### 4.4.2 Environnement de la simulation

- **Paramètre matériel** : la simulation a été réalisée sur un ordinateur dont la configuration :

Processeur	Intel Core I5-CPU 2.4 GHz
Mémoire	8 GB
Disque dur	500 GB

Tableau 4.1 : Caractéristique du PC de la simulation.

- **Paramètre logiciel** : la simulation a été réalisée dans un environnement logiciel suivant:
  - Système d'exploitation : WINDOWS 10.
  - Le simulateur OMNet++ 4.6.
  - Le simulateur Castalia 3.2.



• **Paramètre de la simulation :**

- Nous avons effectué des simulations avec 50 noeuds en état de mouvement répartis aléatoirement sur le terrain.
- Le sink prend trois cas de mobilité :
  1. Sink fixe : pas de mouvement.
  2. Sink mouvement aléatoire.
  3. Sink mouvement linière régulier (un déplacement sur une ligne  $y=0$  et  $x=$ valeur).

Nombre de noeuds	50
Temps de Simulation	[50s, 100s, 150s, 200s, 250s, 300s, 350s, 400s]
Champ de simulation	[80m, 120m, 160m, 200m, 240m]
Rayon de transmission	50 m
Energie initial	17 joules
Modèle de Radio	CC2420
Tx Power	-5 dbm
Idle Listening Power	1.4 mw
Vitesse de mobilité du noeud	[1, 2, 3, 4, 5, 6]
Intervalle créer paquet	5 s
Déploiement du noeud	Aléatoire
Nombre de région	[3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]
Nombre max de saut	Indéterminé
Nombre total des paquets générés	Durée*50*5

Tableau 4.2 : Les paramètres de la simulation.

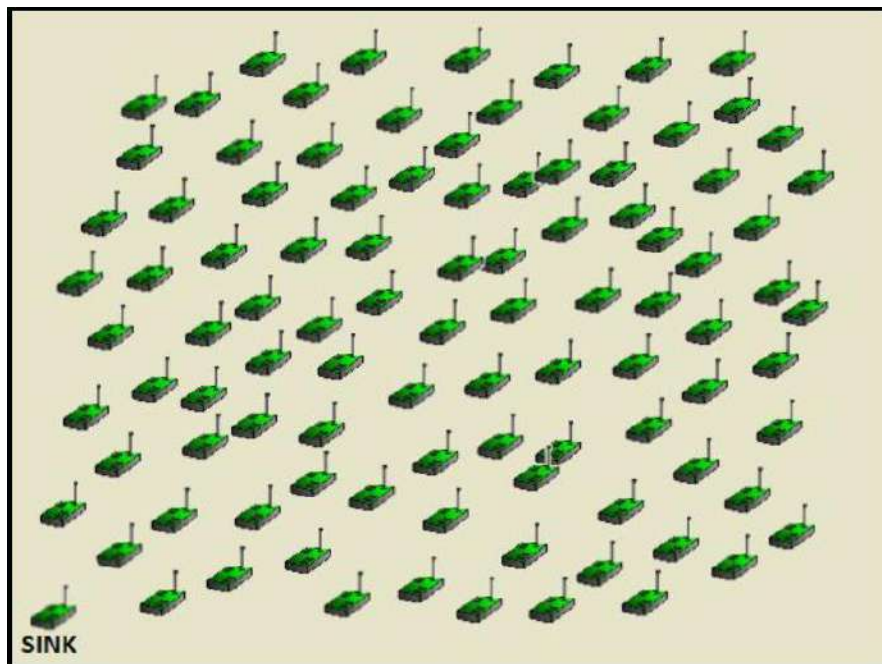


Figure 4.5 : Déploiement aléatoire des nœuds.

### 4.4.3 Métriques de la simulation

Les métriques utilisées pour l'analyse des performances du protocole sont :

- Les paquets dupliqués : le nombre de paquets de données dupliqués reçus par le sink.
- Consommation d'énergie : l'énergie initiale est fixée à 17 joules. Il est important de garder les capteurs en vie aussi longtemps que possible. Cela permet de surveiller la durée de vie du réseau.
- Les paquets délivrés : le nombre de paquets de données livrés aux sink
- Délai moyen de bout en bout : le délai pour un paquet est le temps pris pour atteindre le sink. Et le délai moyen est : 
$$\text{Délai moyen} = \frac{\text{somme des délais}}{\text{nombre des paquets délivrés}}$$

### 4.5 Etude de performances du BLR selon la mobilité du sink

Nous avons effectué la simulation du protocole BLR selon les quatre métriques utilisées par rapport aux trois types de mouvements du sink :

On doit faire varier les paramètres de simulation et voir le comportement du protocole BLR selon le mouvement du sink.

### 4.5.1 Les paquets délivrés

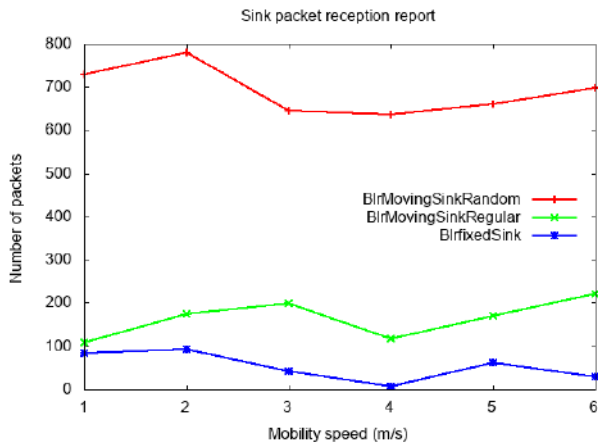


Figure 4.6 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité

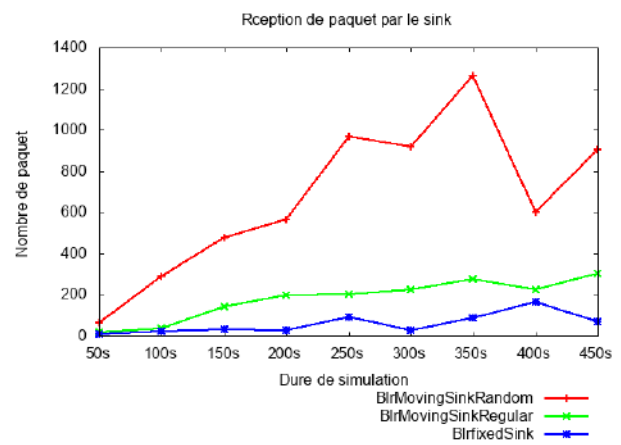


Figure 4.7 : Paquet délivré-Durée de simulation

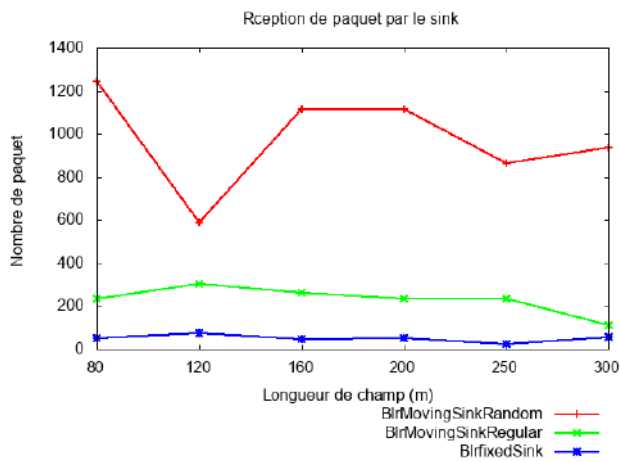


Figure 4.8 : Paquet délivré-Longueur de champ

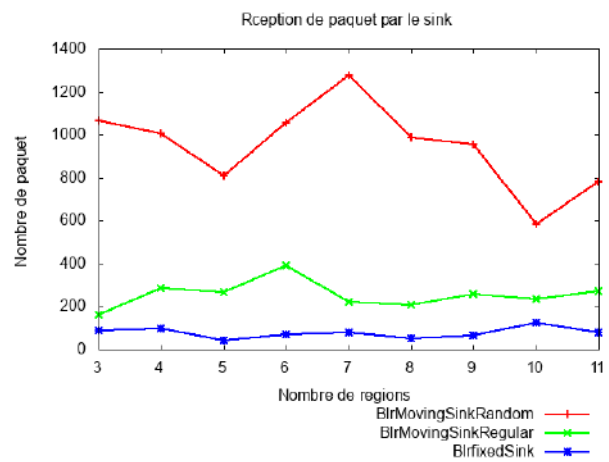


Figure 4.9 : Paquet délivré-Nombre de régions

En ce qui concerne le paquet délivré, il est remarquable que BLR donne de meilleurs résultats lorsque le sink est en mouvement aléatoire que régulier. En revanche, les paquets délivrés diminuent considérablement lorsque le champ est étendu, comme le montre la figure 4.8. D'un autre côté, le nombre de paquets délivrés sera augmenté si la durée de simulation est plus longue comme indiqué sur la figure 4.7.

### 4.5.2 Les paquets dupliqués

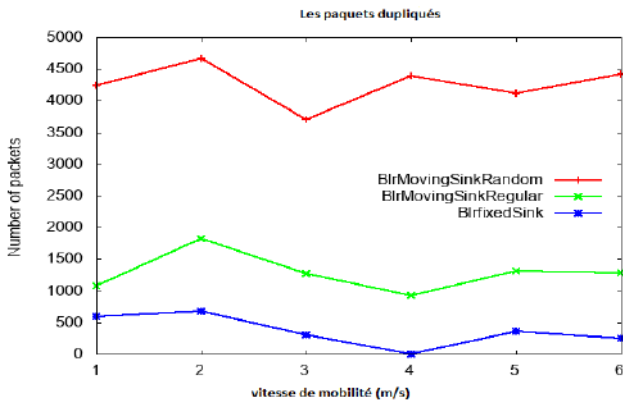


Figure 4.10 : Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité

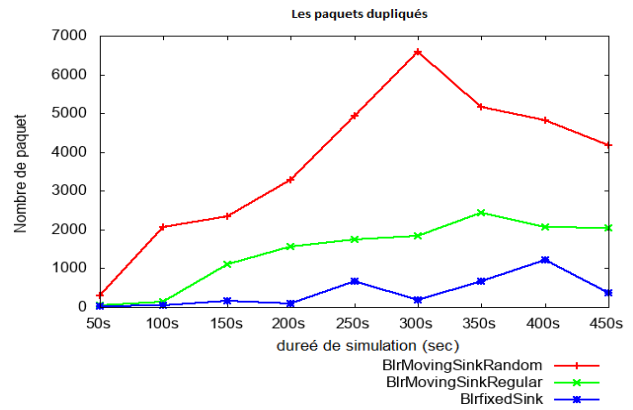


Figure 4.11 : Paquet délivré-Durée de simulation

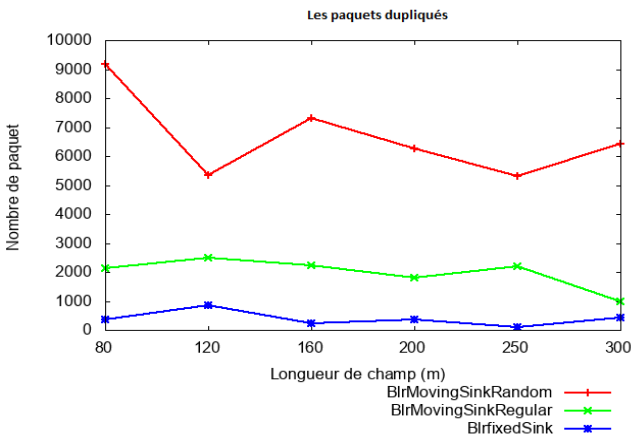


Figure 4.12 : Paquet délivré-Longueur de champ

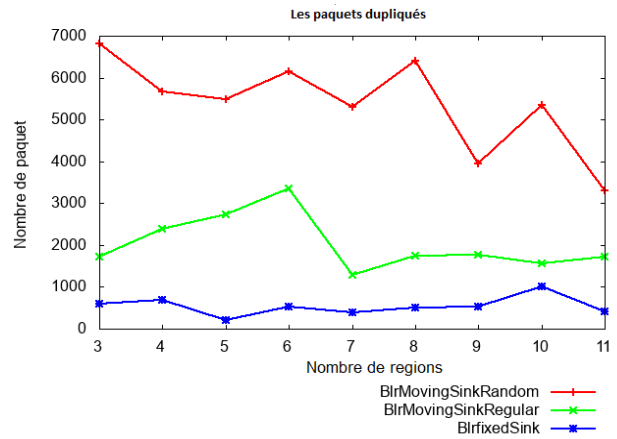


Figure 4.13 : Paquet délivré-Nombre de régions

En ce qui concerne le paquet dupliqué, le protocole BLR donne de meilleurs résultats avec un sink fixe plutôt qu'un sink mobile. D'autre côté, les paquets dupliqués ont diminué de manière considérable lorsque le champ a été étendu, comme le montre la figure 4.12.

### 4.5.3 Consommation d'énergie

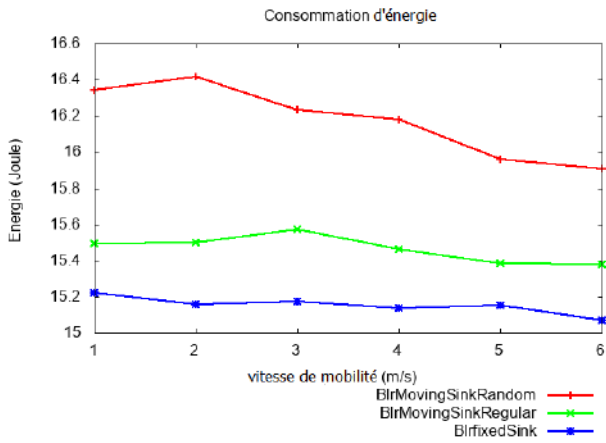


Figure 4.14 : Energie-Vitesse de mobilité

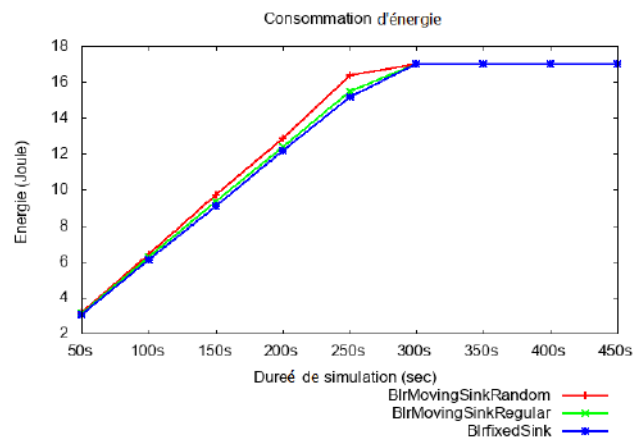


Figure 4.15 : Energie-Durée de simulation

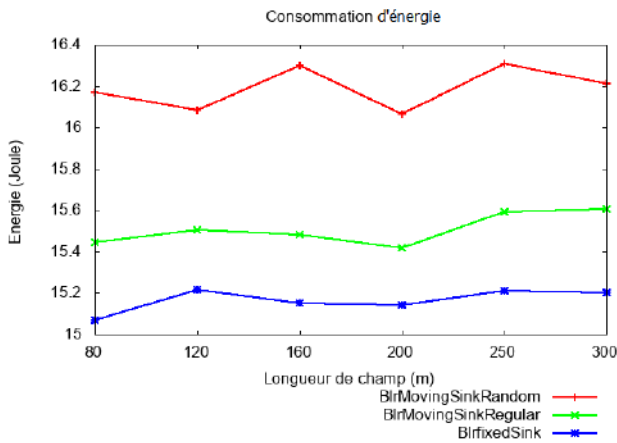


Figure 4.16 : Energie-Longueur de champ

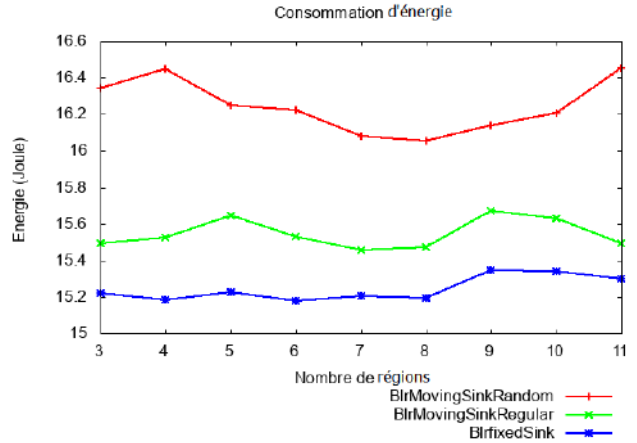


Figure 4.17 : Energie-Nombre de régions

En ce qui concerne l'énergie, BLR donne de meilleurs résultats lorsque le sink est fixe plutôt qu'un sink en mouvement. D'autre part, la figure 4.15 montre qu'une augmentation de la durée de simulation donne une consommation d'énergie presque identique pour les trois types de mouvements de sink.

En plus, l'augmentation du nombre de région de transmission implique une légère différenc de la consommation d'énergie pour le protocole BLR selon les trois types de mouvements du sink.

D'autre côté, l'augmentation du Longueur de champ de transmission implique une légère différence de la consommation d'énergie pour le protocole BLR selon les trois types de mouvements du sink.

### 4.5.4 Délai moyen de bout en bout

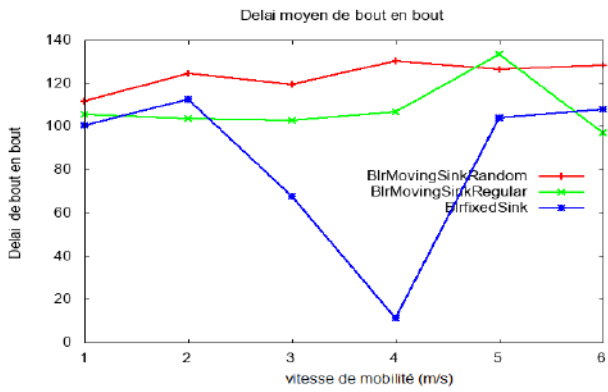


Figure 4.18 : Délai moyen-Vitesse de mobilité

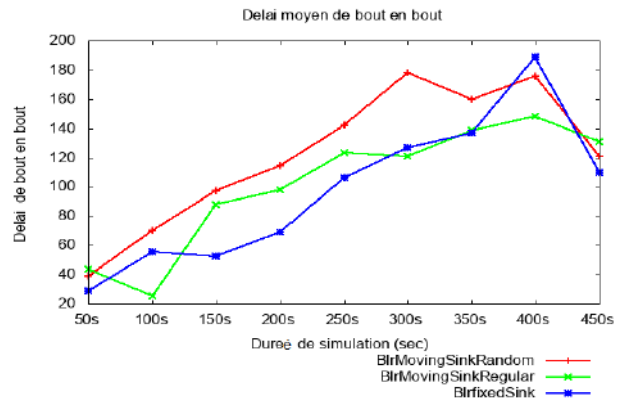


Figure 4.19 : Délai moyen-Durée de simulation

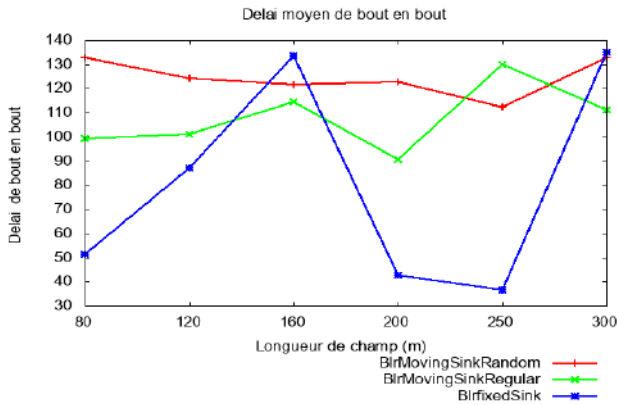


Figure 4.20 : Délai moyen-Longueur de champ

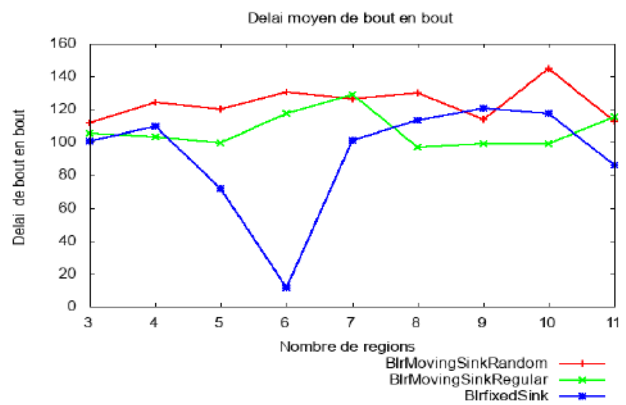


Figure 4.21 : Délai moyen-Nombre de régions

En ce qui concerne le délai moyen, BLR donne des meilleurs résultats lorsque le sink est fixe plutôt qu'un sink en mouvement.

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons implémenté le protocole BLR en utilisant Castalia et OMNeT++ avec le langage de programmation C++. Nous avons utilisé l'approche cross-layer qui permet de fusionner les deux couches réseau et MAC en une seule couche (MAC/Réseau), afin de minimiser la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau. Puis, nous avons étudié les performances du protocole BLR selon la mobilité du sink pour les différents paramètres de simulation et les résultats des analyses ont montré que :

- BLR donne de meilleurs résultats lorsque le sink est en mouvement aléatoire que régulier pour les paquets délivrés.
- les paquets délivrés diminuent considérablement lorsque le champ est étendu.
- L'utilisation d'un sink fixe garantit des bons résultats pour la consommation d'énergie, délai moyen et les paquets dupliqués.
- Lorsque le nombre de région augmenté implique une augmentation de la consommation d'énergie pour le protocole BLR selon les trois types de mouvements du sink.
- L'augmentation de la durée de simulation donne une consommation d'énergie presque identique pour les trois types de mouvements de sink.
- Lorsque la longueur de champ de transmission augmente on remarque une légère différence de la consommation d'énergie pour le protocole BLR selon les trois types de mouvements du sink.

## Chapitre 5 : Comparaison BLR avec BOSS

### 5.1 Introduction

Après avoir fait la simulation et l'évaluation de protocole BLR, il est très important de le comparer avec un autre protocole pour voir et prendre en compte les points forts et les points faibles de ce protocole que nous avons implémenté. Le choix est tombé sur le protocole BOSS qui est de la même famille des protocoles de routage géographique sans balise. La comparaison entre les deux protocoles se fait selon les trois cas de mobilité de Sink en variant quatre paramètres de simulation (la vitesse de mobilité, la durée de simulation, le nombre de région et la longueur du champ).

### 5.2 Cas sink fixe

#### 5.2.1 Les paquets délivrés

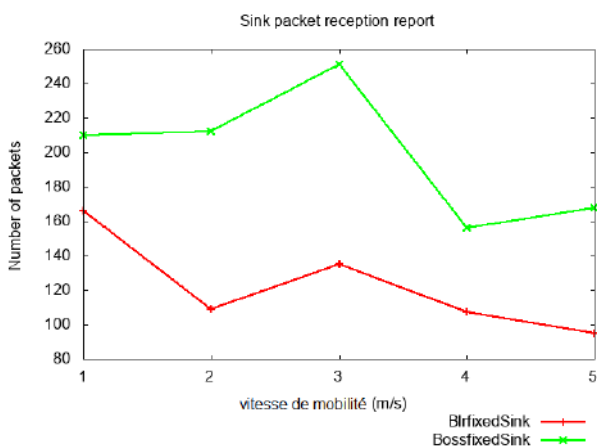


Figure 5.1 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité-sink fixe

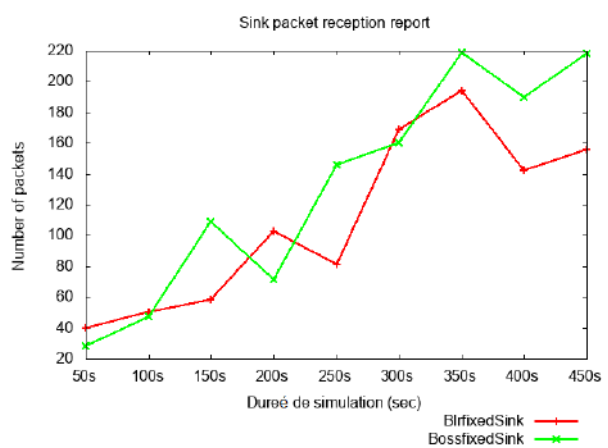


Figure 5.2 : Paquet délivré-Durée de simulation-sink fixe

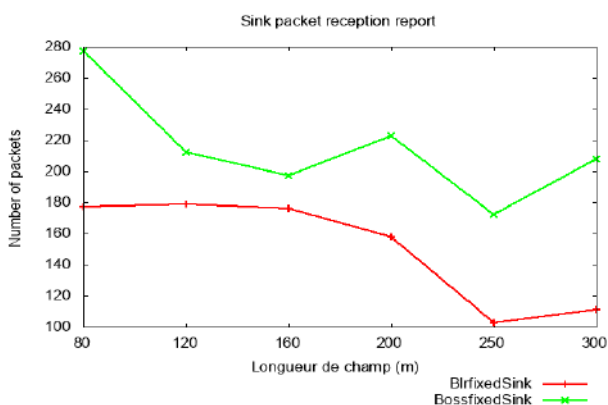


Figure 5.3 : Paquet délivré-Longueur de champ-sink fixe

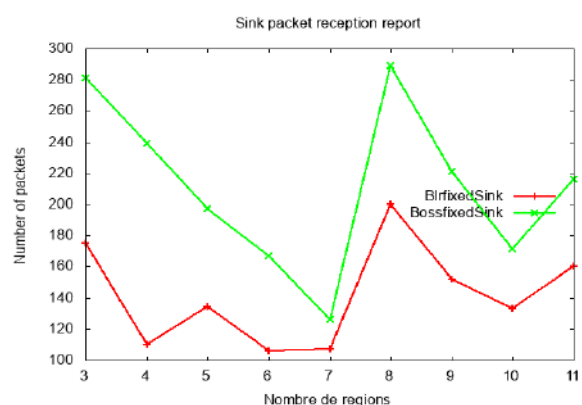


Figure 5.4 : Paquet délivré-Nombre de régions-sink fixe

Dans le cas de sink fixe et pour la métrique paquet délivré, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats dans La plupart des cas par rapport le protocole BLR.



- Pour les deux protocole :
  - L'augmentation du nombre de paquets délivré est liée à l'augmentation de la durée de simulation.
  - Diminution du nombre des paquets délivrés est liée à l'augmentation de la vitesse de mobilité des nœud.
  - Avec l'augmentation du Longueur de champ ,on remarque une Diminution du nombre des paquets délivrés.
- Quel que soit le nombre de régions augmente, le nombre de paquets délivrés sur BOSS plus que BLR.

### 5.2.2 Les paquets dupliqués

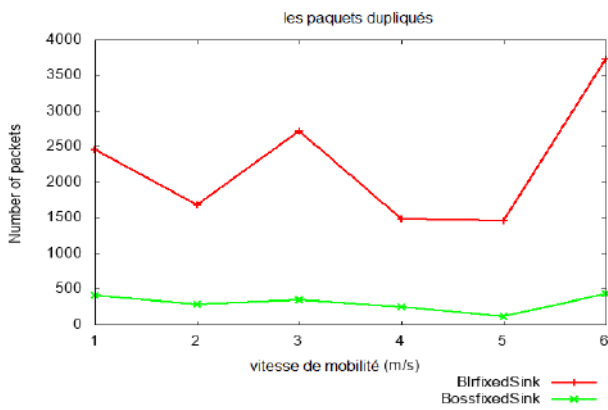


Figure 5.5 : Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité-sink fix

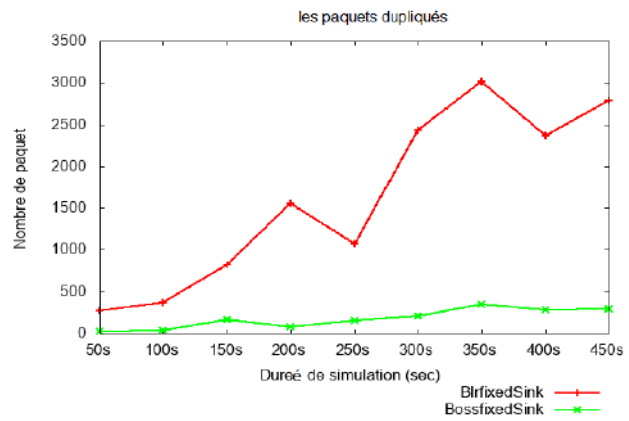


Figure 5.6 : Paquet dupliqué-Durée de simulation-sink fix

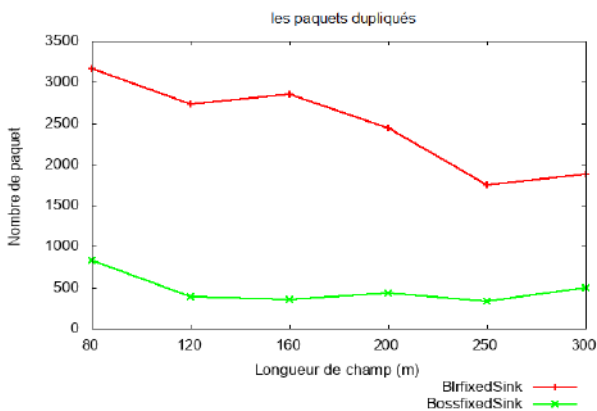


Figure 5.7 : Paquet dupliqué-Longueur de champ-sink fix

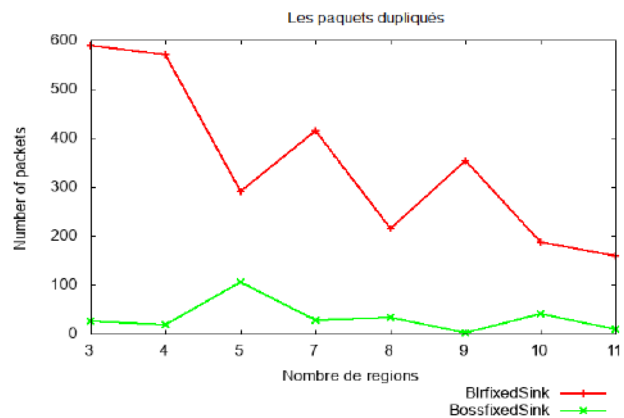


Figure 5.1 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité-sink fix

Dans le cas de sink fixe et pour la métrique paquet dupliqué, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats dans toutes les cas par rapport le protocole BLR.

- Pour les deux protocole :
  - une augmentation de manière significative de nombre de paquets dupliqué a cause de l'augmentaion de la dureé de simulation.
- Avec l'augmetaion du nombre de régions on remarque une diminution remarquable du nombre de paquets dupliqués sur BLR et une légère stabilité de ce nombre sur BOSS .
- Avec l'augmentaion de la longueur de champ on remarque une diminution des paquets dupliqués sur BLR et une légère stabilité de nombre des paquets dupliqués sur BOSS.
- En ce qui concerne la vitesse de mobilité on remarque que le nombre des packets dupliqués sur BLR sont élevés en comparent avec BOSS.

### 5.2.3 Consommation d'énergie

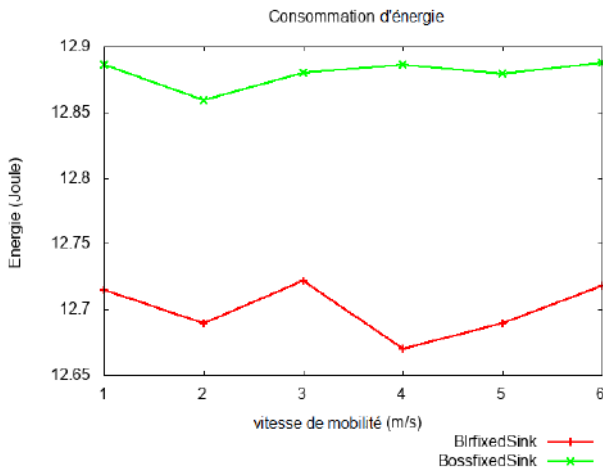


Figure 5.9 : Energie-Vitesse de mobilité-sink fix

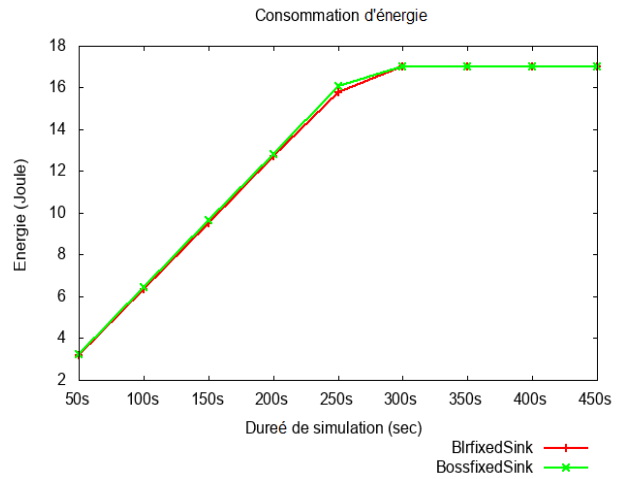


Figure 5.10 : Energie-Durée de simulation-sink fix

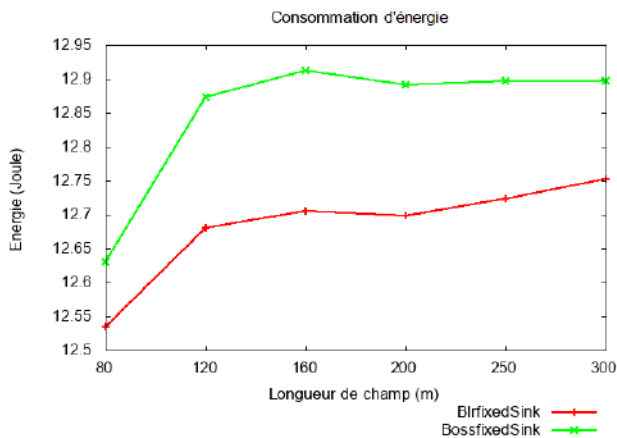


Figure 5.11 : Energie-Longueur de champ-sink fix

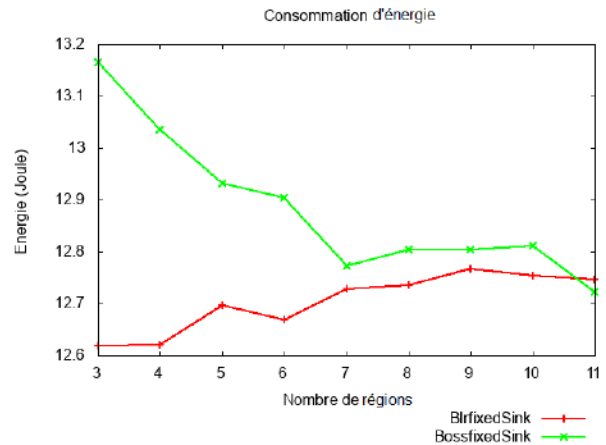


Figure 5.12 : Energie-Nombre de régions-sink fix

Dans le cas de sink fixe et pour la métrique consommation d'énergie, le protocole BLR donne des meilleurs résultats dans la plupart des cas par rapport au protocole BOSS.

- Pour les deux protocoles :
  - L'augmentation de la consommation d'énergie est liée à l'augmentation du durée de simulation.
  - Une augmentation de manière significative de la consommation d'énergie a cause de l'augmentaion de la longueur de champ.
- Quand le nombre de régions augmente, la consommation d'énergie diminue sur BOSS , et augmente sur BLR.
- En ce qui concerne la vitesse de mobilité on remarque que la consommation d'énergie sur BOSS est élevé en comparant avec BLR.

### 5.2.4 Délai moyen de bout en bout

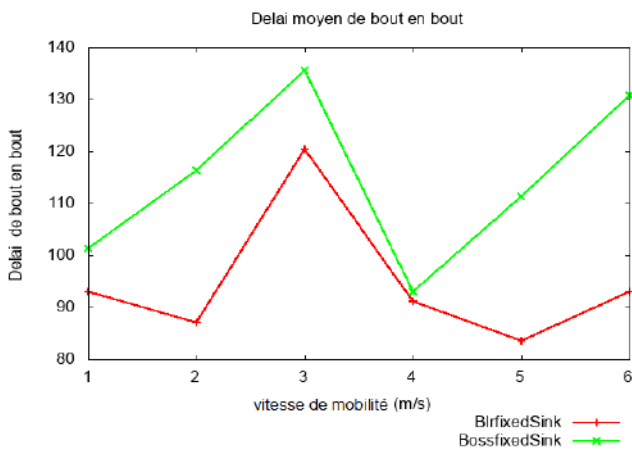


Figure 5.13 : Délai moyen-Vitesse de mobilité-sink fix

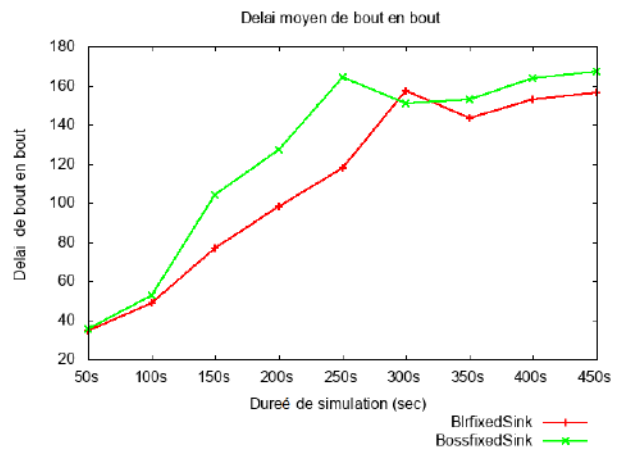


Figure 5.14 : Délai moyen-Durée de simulation-sink fix

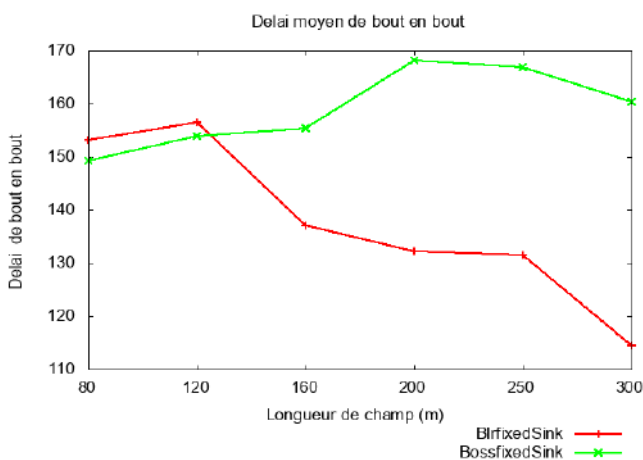


Figure 5.15 : Délai moyen-Longueur de champ-sink fix

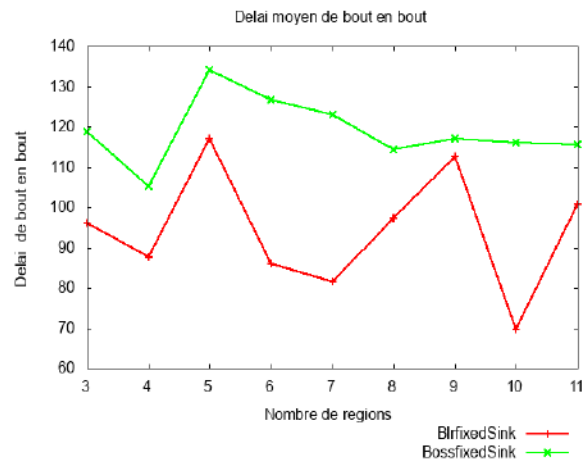


Figure 5.16 : Délai moyen-Nombre de régions-sink fix

Dans le cas de sink fixe et pour la métrique délai moyen, le protocole BLR donne des meilleurs résultats dans la plupart des cas par rapport au protocole BOSS.

- Pour les deux protocoles:
  - Une augmentation de manière significative du délai moyen avec l'augmentation de la durée de simulation.
- L'augmentation de longueur de champ donne une augmentation de délai moyen sur BOSS, et une diminution de ce délai sur BLR.

### 5.3 Cas sink en mouvement aléatoire

#### 5.3.1 Les paquets délivrés

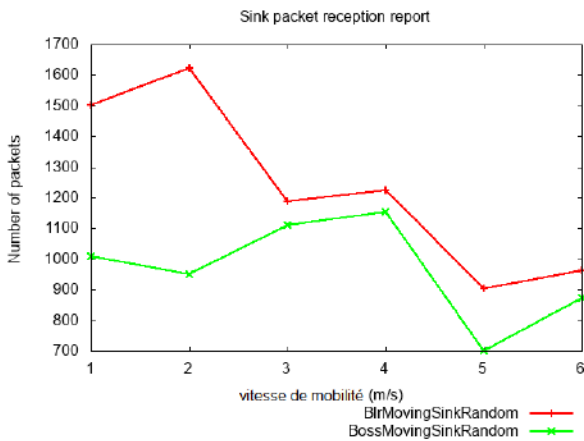


Figure 5.17 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink

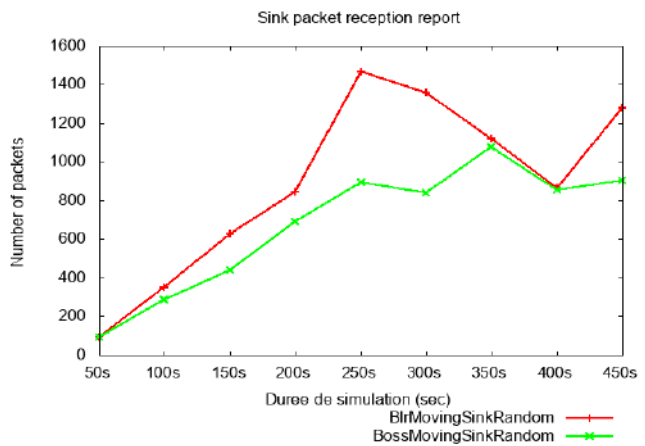


Figure 5.18 : Paquet délivré-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink

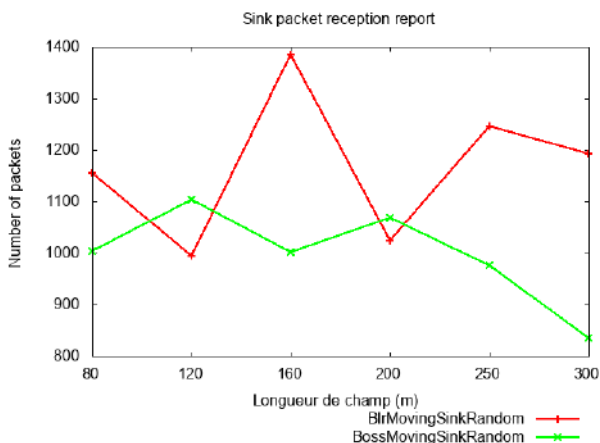


Figure 5.19 : Paquet délivré-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink

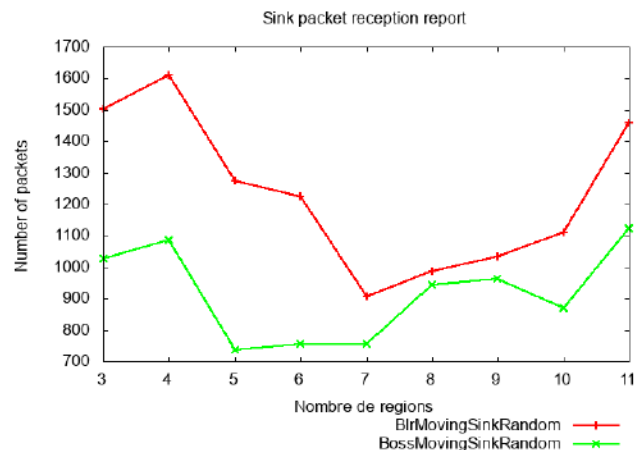


Figure 5.20 : Paquet délivré-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire et pour la métrique paquet délivré, le protocole BLR donne des meilleurs résultats dans tous les cas par rapport au protocole BOSS.

- Pour les deux protocoles:
  - L'augmentation du nombre de paquets délivrés est liée à l'augmentation du durée de simulation.
  - Avec l'augmentation du Longueur de champ ,on remarque une Diminution de nombre des paquets délivrés sur BLR .

### 5.3.2 Les paquets dupliqués

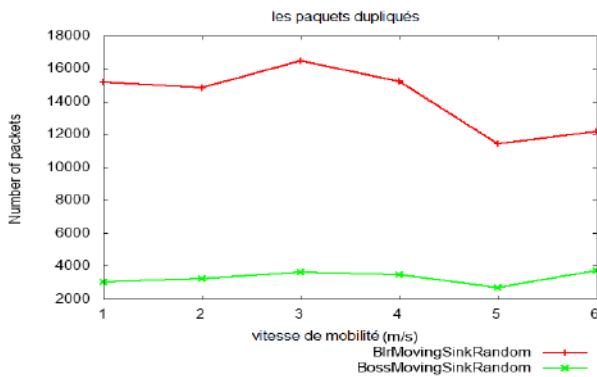


Figure 5.21 : Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink

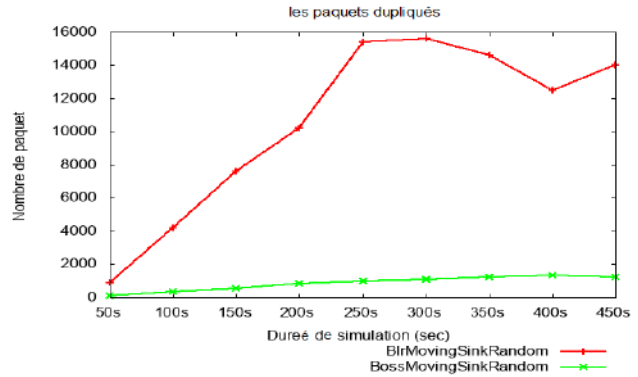


Figure 5.22 : Paquet dupliqué-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink

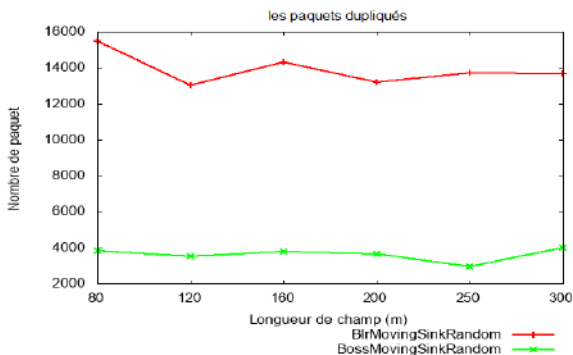


Figure 5.23 : Paquet dupliqué-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink

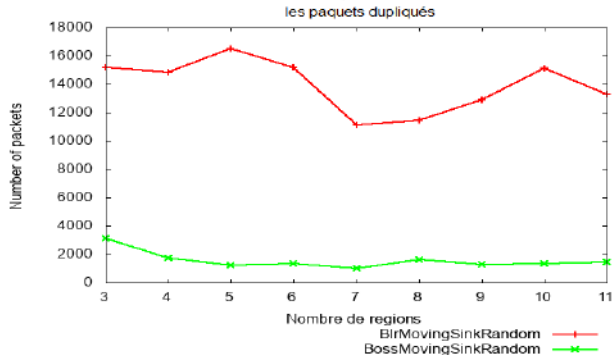


Figure 5.24 : Paquet dupliqué-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire et pour la métrique paquet dupliqué, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats dans tous les cas par rapport aux protocoles BLR.

- Avec l'augmentation de la durée de simulation on remarque une augmentation remarquable du nombre de paquets dupliqués sur BLR et une légère augmentation de ce nombre sur BOSS .
- Le nombre de paquets dupliqués dans BLR est beaucoup plus élevé que ce que l'on trouve en BOSS.

### 5.3.3 Consommation d'énergie

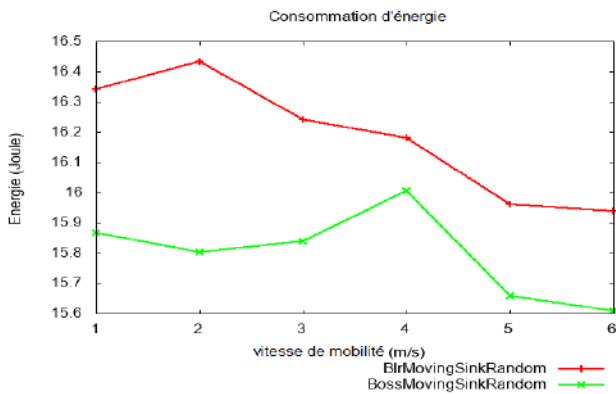


Figure 5.25 : Energie-Vitesse de mobilité-  
Mouv. aléatoire sink

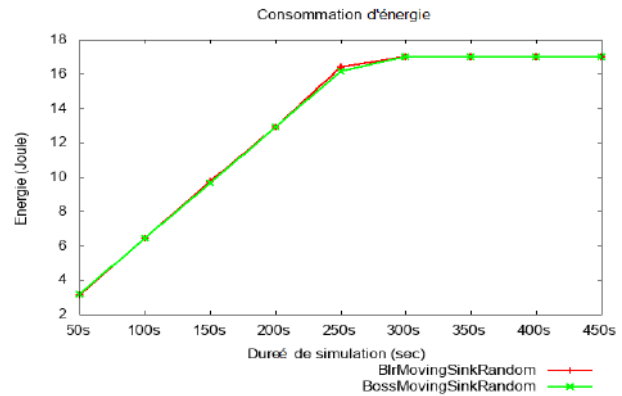


Figure 5.26 : Energie-Durée de simulation-  
Mouv. aléatoire sink

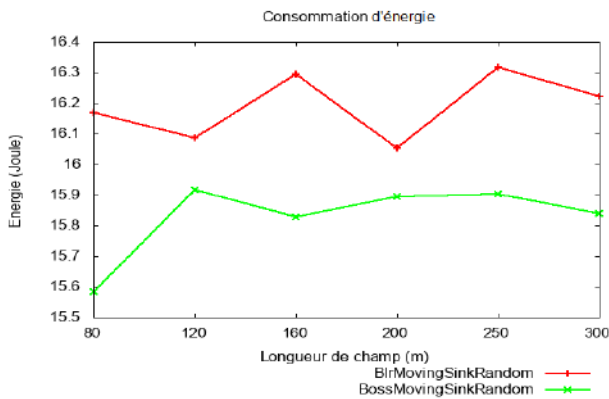


Figure 5.27 : Energie-Longueur de champ-  
Mouv. aléatoire sink

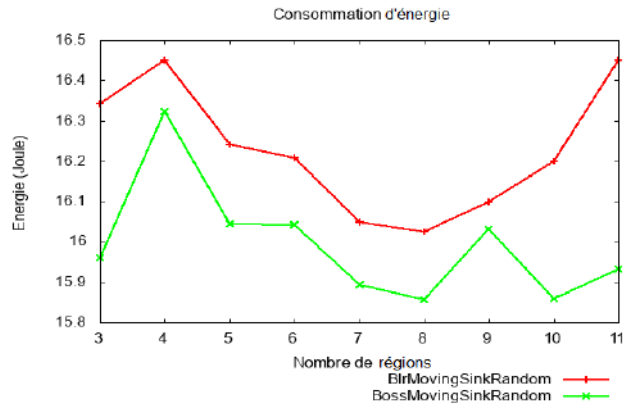


Figure 5.28 : Energie-Nombre de régions-  
Mouv. aléatoire sink

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire et pour la métrique consommation d'énergie, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats dans la plupart des cas par rapport au protocole BLR.

- Pour les deux protocoles :
  - L'augmentation de la consommation d'énergie est liée à l'augmentation de la durée de simulation .
  - Avec L'augmentation de la vitesse de mobilité on remarque que la consommation d'énergie diminue .

### 5.3.4 Délai moyen de bout en bout

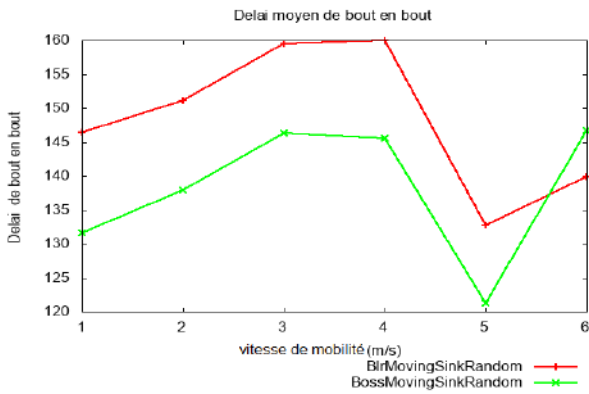


Figure 5.29 : Délai moyen-Vitesse de mobilité-Mouv. aléatoire sink

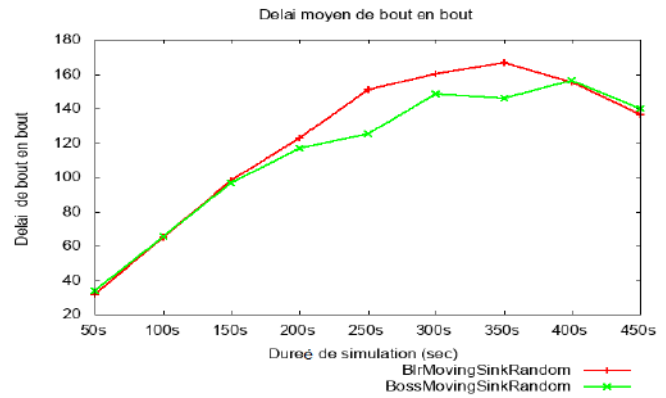


Figure 5.30 : Délai moyen-Durée de simulation-Mouv. aléatoire sink

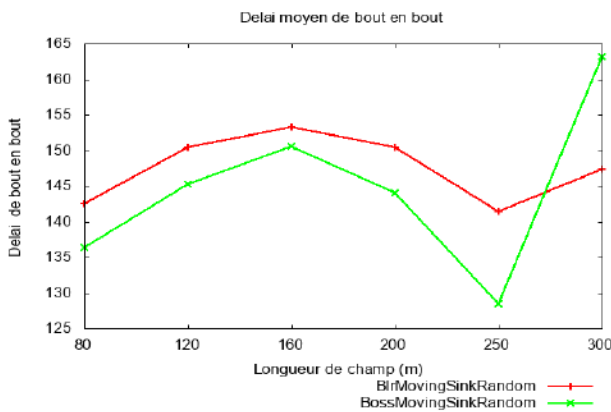


Figure 5.31 : Délai moyen-Longueur de champ-Mouv. aléatoire sink

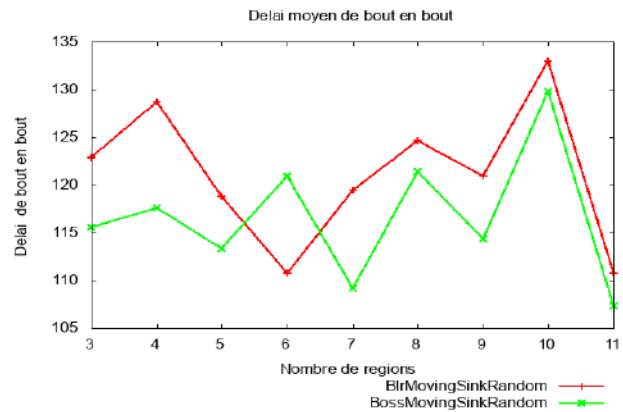


Figure 5.32 : Délai moyen-Nombre de régions-Mouv. aléatoire sink

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire et pour la métrique délai moyen, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats dans la plupart des cas par rapport au protocole BLR.

- Pour les deux protocoles:
  - Une augmentation du délai moyen avec l'augmentation de la durée de simulation.
- La valeur 5m/s de la vitesse de mobilité donne la valeur minimal de délai moyen.

## 5.4 Cas sink en mouvement régulier

### 5.4.1 Les paquets délivrés

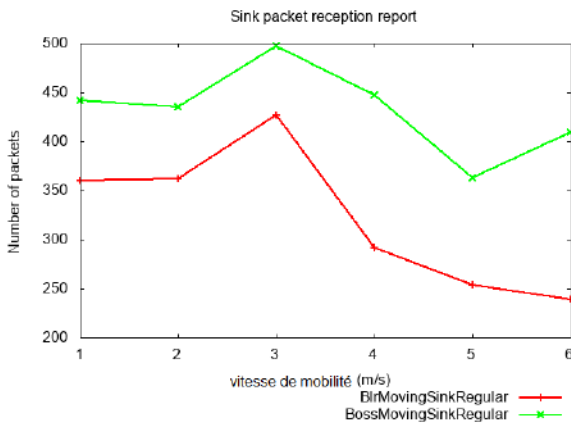


Figure 5.33 : Paquet délivré-Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink

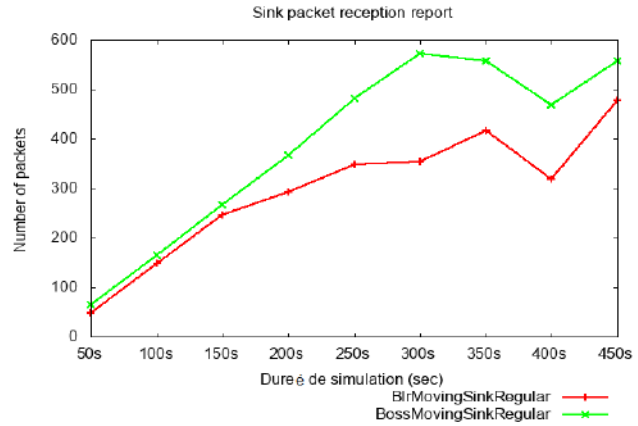


Figure 5.34 : Paquet délivré-Durée de simulation-Mouv. régulier sink

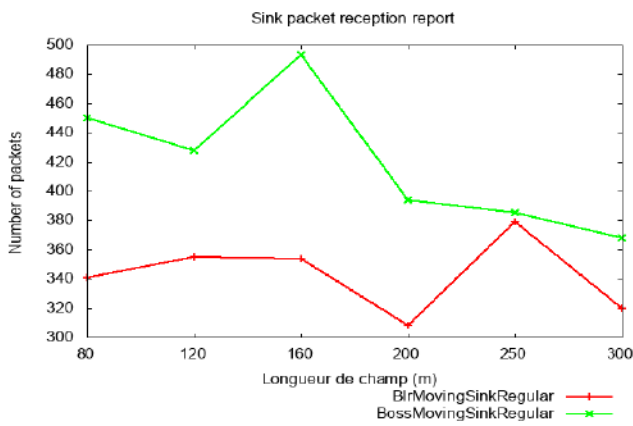


Figure 5.35 : Paquet délivré-Longueur de champ-Mouv. régulier sink



Figure 5.36 : Paquet délivré-Nombre de régions-Mouv. régulier sink

Dans le cas de sink en mouvement régulier et pour la métrique paquet délivré , le protocole BOSS donne des meilleurs résultats dans tous des cas par rapport au protocole BLR.

- Pour les deux protocoles:
  - L'augmentation du nombre de paquets délivrés est liée à l'augmentation du durée de simulation.
- A partir de la vitesse de mobilité 3 m/s on remarque une diminution de nombre de paquets délivrés pour les deux protocole.
- BOSS et BLR donnent leur valeurs minimal de nombres de paquets délivrés pour les nombres de régions 7 et 8 successivement.



### 5.4.2 Les paquets dupliqués

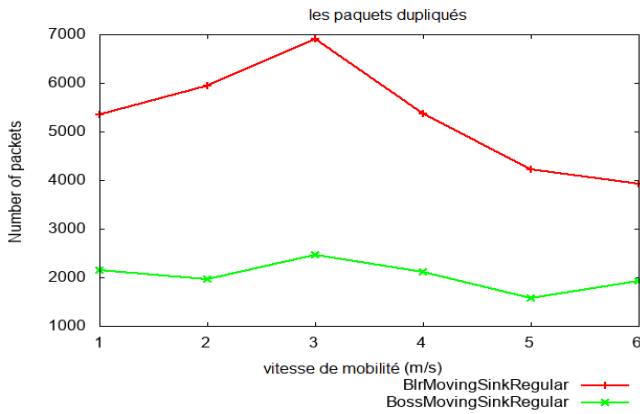


Figure 5.37 : Paquet dupliqué-Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink

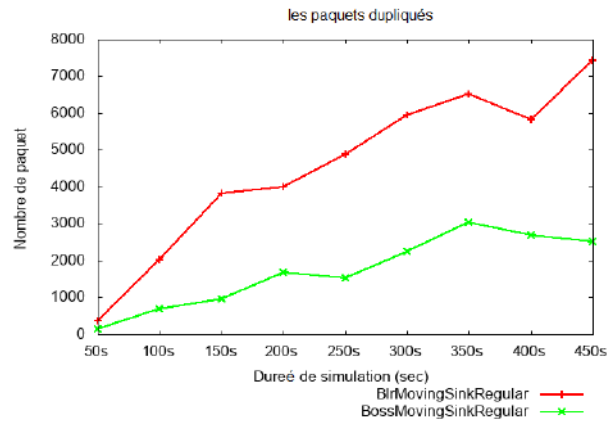


Figure 5.38 : Paquet dupliqué-Durée de simulation-Mouv. régulier sink

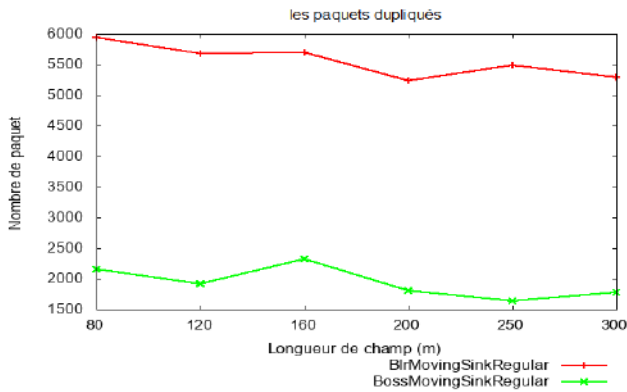


Figure 5.39 : Paquet dupliqué-Longueur de champ-Mouv. régulier sink

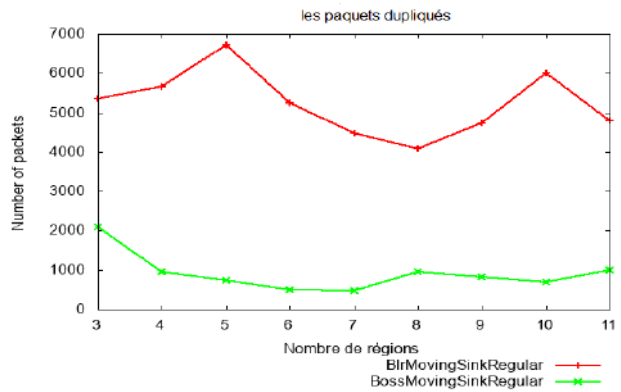


Figure 5.40 : Paquet dupliqué-Nombre de régions-Mouv. régulier sink

Dans le cas de sink en mouvement régulier et pour la métrique paquet dupliqué , le protocole BOSS donne des meilleurs résultats dans tous les cas par rapport au protocole BLR.

- Pour les deux protocoles on remarque une augmentation des paquets dupliqués pour une augmentation de la durée de simulation.
- Le nombre de paquets dupliqués dans BLR est beaucoup plus élevé que ce que l'on trouve en BOSS.

### 5.4.3 Consommation d'énergie

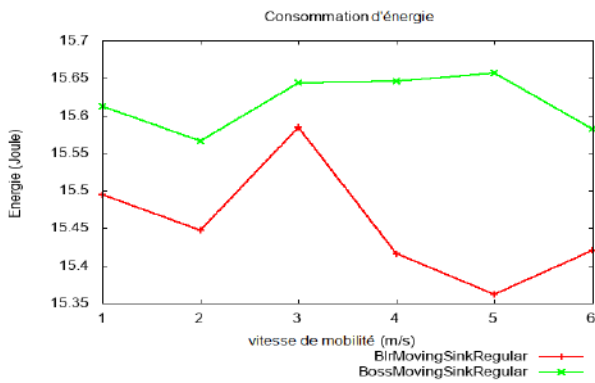


Figure 5.41 : Energie-Vitesse de mobilité-  
Mouv. régulier sink

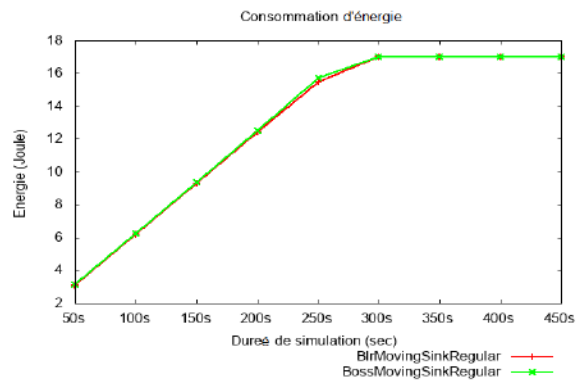


Figure 5.42 : Energie-Durée de simulation-  
Mouv. régulier sink

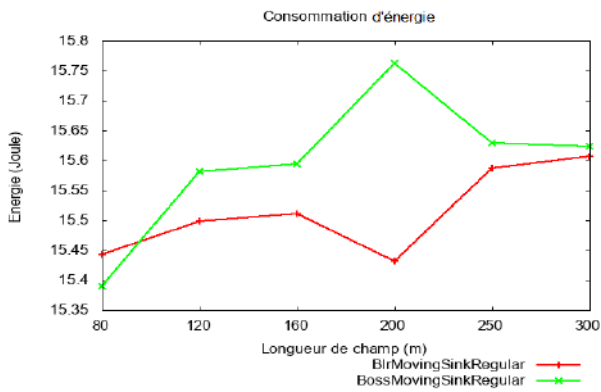


Figure 5.43 : Energie-Longueur de champ-  
Mouv. régulier sink

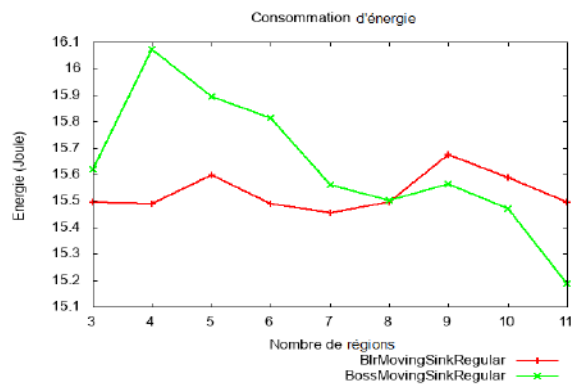


Figure 5.44 : Energie-Nombre de régions-  
Mouv. régulier sink

Dans le cas de sink en mouvement régulier et pour la métrique consommation d'énergie, le protocole BLR donne des meilleurs résultats dans la plupart des cas par rapport au protocole BOSS.

- Pour les deux protocoles la consommation d'énergie augmente avec l'augmentation du durée de simulation .
- On remarque que BOSS consomme d'énergie plus que BLR.

### 5.4.4 Délai moyen de bout en bout

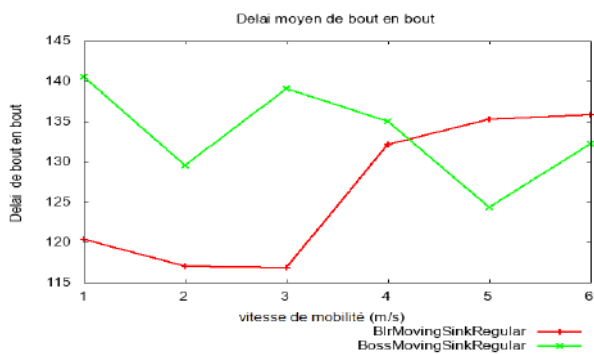


Figure 5.45 : Délai moyen-Vitesse de mobilité-Mouv. régulier sink

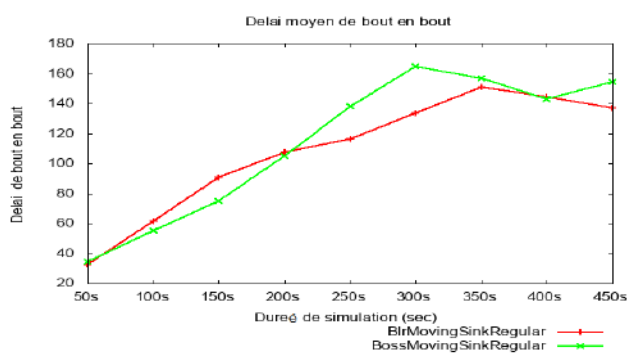


Figure 5.46 : Délai moyen-Durée de simulation-Mouv. régulier sink

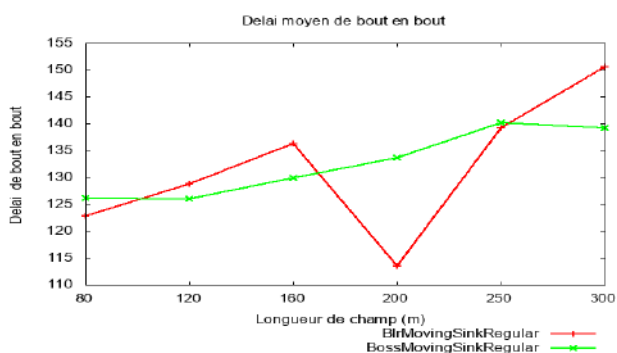


Figure 5.47 : Délai moyen-Longueur de champ-Mouv. régulier sink

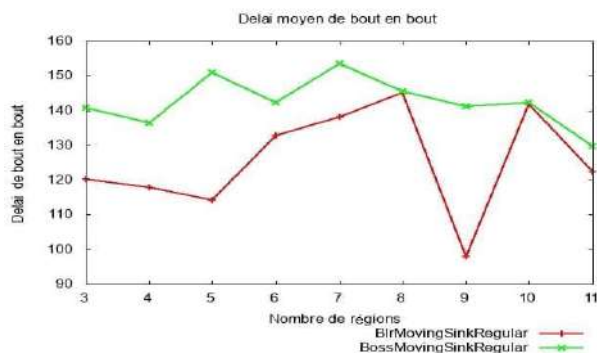


Figure 5.48 : Délai moyen-Nombre de régions-Mouv. régulier sink

Dans le cas de sink en mouvement régulier et pour la métrique délai moyen, le protocole BLR donne des meilleurs résultats dans la plupart des cas par rapport au protocole BOSS.

- Pour les deux protocoles :
  - Une augmentation du délai moyen avec l'augmentation de la durée de simulation.

## 5.5 Conclusion

Nous avons effectué des simulations approfondies en utilisant différentes conditions pour une comparaison avec un autre protocole de la même famille des protocoles de routage géographique, qui est le protocole BOSS .

Cela nous a permis de conclure que le protocole BOSS est beau coup plus efficace que le protocole BLR dans l'énergie dans le cas sink en mouvement aléatoire , par contre le protocole BLR donne mieure resultat dans le cas sink en mouvement régulier et le cas sink fixe.

Le nombre de paquets dupliqués dans BLR est beaucoup plus élevé que ce que l'on trouve en BOSS dans tout les cas de mouvement de sink (aléatoire et regulier ) et dans le cas fixe sink.

L'augmentation du dureé de simulation Mener à l'augmentation des quatre métriques de simulation (les paquets délivrés, les paquets dupliqués, délai moyen de bout en bout et la consommation d'énergie).

Dans le cas de sink en mouvement aléatoire, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats que le protocole BLR .

Dans le cas de sink en mouvement régulier, le protocole :

- Boss donne meilleure resultat pour les deux paramètres paquet dupliqué et paquet dilevré.
- BLR donne meilleure resultat pour les deux paramètre consommation d'énergie et delai moyen boute en boute.

Dans le Cas sink fixe, le protocole :

- Boss donne meilleure resultat pour les deux paramètres paquet dupliqué et paquet dilevré.
- BLR donne meilleure resultat pour les deux paramètre consommation d'énergie et delai moyen boute en boute.

## Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF ou WSN Wireless Sensor Network) sont devenus plus populaires grâce aux grandes avancées dans le domaine de la microélectronique qui ont réduit le coût de fabrication des nœuds de capteurs d'une manière considérable. Ces réseaux ont montré leur efficacité dans le suivi et le contrôle à distance de l'environnement physique avec une meilleure précision. Actuellement ils sont utilisés pour plusieurs domaines d'applications tels le domaine agricole et environnemental.

Le routage géographique est l'un des algorithmes de routage les plus efficaces et les plus évolutifs pour les réseaux de capteurs sans fil. Dans les protocoles de routage géographique traditionnels, les nœuds échangent des informations de position périodiques pour créer une table contenant les positions des nœuds voisins à un seul bond. Cela conduit à une utilisation inutile d'énergie et de bande passante. Des recherches récentes ont montré que ces balises peuvent créer de graves problèmes en raison de la structure hautement dynamique du système sans fil.

Les protocoles de routage géographique sans balise (Beacon-less) ont été proposés dans le but de pallier les problèmes liés à l'utilisation des balises dans un environnement mobile. Ces protocoles n'utilisent pas les balises (message hello) périodiques pour acquérir des informations sur les positions de ses voisins.

De ce fait, on a choisi le protocole BLR, qui est le plus célèbre dans la famille des protocoles de routage géographique sans balise. Pour faire une étude et d'analyser les performances à travers d'une comparaison avec un autre protocole de la même famille, qui est le protocole BOSS.

L'algorithme de routage sans balise (BLR) est un protocole de routage qui utilise les informations de localisation pour réduire la surcharge de routage. Cependant, contrairement à d'autres protocoles de routage basés sur la position, BLR n'exige pas que les nœuds diffusent périodiquement des messages Hello (appelés beaconing), et évite ainsi des inconvénients tels qu'une utilisation intensive d'une faible puissance de batterie, des interférences avec la transmission régulière de données et une dégradation des performances.

Afin d'analyser les performances du BLR, nous avons implémenté ce dernier à l'aide du simulateur Castalia basé sur OMNeT++.

Les résultats obtenus ont montré que :

- L'utilisation d'un sink en mouvement aléatoire donne des meilleurs résultats pour les paquets délivrés.
- L'utilisation d'un sink fixe garantit des bons résultats pour la consommation d'énergie, délai moyen et les paquets dupliqués.
- L'augmentation du nombre de régions de transmission et de longueur du champ de transmission implique une légère différence de la consommation d'énergie pour le protocole BLR selon les trois types de mouvements du sink.

- Lorsque la durée de simulation est étendue implique : le délai moyen et les paquets dupliqués et les paquets délivrés et la Consommation d'énergie seront augmentent.
- Dans le cas de sink en mouvement aléatoire, le protocole BOSS donne des meilleurs résultats que le protocole BLR .
- Dans le cas de sink en mouvement régulier, le protocole :
  - Boss donne meilleur résultat pour les deux paramètres paquet dupliqué et paquet délivré.
  - BLR donne résultat pour les deux paramètres energy et délai moyen bout en bout.
- dans le cas sink fixe, le protocole :
  - Boss donne meilleur résultat pour les deux paramètres paquet dupliqué et paquet délivré.
  - BLR donne résultat pour les deux paramètres energy et délai moyen bout en bout.

Et comme perspective, ce travail peut être l'initiative d'un futur travail qui va étudier les performances de ce protocole avec deux sink.

Enfin, comme perspectives nous envisageons d'améliorer les performances de notre protocole proposé que ce soit au niveau des algorithmes , et que de donner un meilleur résultat par rapport aux protocoles plus récents.

## Bibliographie

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks : a survey", Computer Networks, Vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [2] C-Y. Chong and S.P. Kumar, "Sensor networks : Evolution, opportunities, and challenges" Proceedings of the IEEE, Vol. 91, No.8, pp. 1247- 1256, 2003.
- [3] Pantélis Matsos, "Réseaux Sans Fil et de Mobiles RSFM", 2008.
- [4] Vargas, A. "OMNeT++ User Manual Version 4.3.1", OpenSim Ltd, 2011.
- [5] Tahar Chaouch Amel, Benmoumene Abdellah Mahfoudh, "Analyse par simulation des performances d'un réseau de capteurs sans fil (WSN)", Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, 2016.
- [6] Uwe Herzog, "Ad hoc Networks :New Life For An Old Concept", www.eurescom.de, 2005
- [7] BERRABAH Abdelkrim, SAIDI Hassiba, "Balancement de charges dans les réseaux Ad Hoc", Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen, Juillet 2013 .
- [8] TAHAR ABBES Mounir, "Proposition d'un protocole à économie d'énergie dans un réseau hybride GSM & AD HOC", université d'Oran, 2012 .
- [9] Sedrati Maamar, Aouragh Lamia, Guettala Leila, Bilami Azeddine, "Etude des Performances des Protocoles de Routage dans les Réseaux Mobiles Ad-Hoc", Département d'informatique, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université El Hadj Lakhdar – Batna, 2007.
- [10] Athanassios Boulis, "Castalia, A simulator for Wireless Sensor Networks and Body Area Networks User's Manual", NICTA May 2013
- [11] Yaser Yousef, "Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", Université de Haute Alsace – Mulhouse, France, 2010
- [12] M. Badet, W. Bonneau. " Mise en place d'une plateforme de test et d'expérimentation", Projet de Master Technologie de l'Internet 1ere année, Université Pau et des pays de l'Adour ,2006.
- [13] Claude Castelluccia, "La sécurité des capteurs et réseaux de capteur", INRIA, 2008.
- [14] Akyildiz, W. Su, E. Cayirci, Y. Sankarasubramaniam. "A survey on sensor networks", IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. 2004.
- [15] B. Khalifa. " La sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil", conférence à l'université de Bechar. 2006.
- [16] Sofiane MOAD, Encadrant : Nizar Bouabdallah, "La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil" Master Recherche 2 en Informatique IFSIC-Rennes1, 2008
- [17] Bouabdellah Kechar, "Problématique de la consommation d'énergie dans les réseaux de

capteurs sans fils", LIUPA, Université d'Oran, 2007.

[18] Yasser Romdhane, "Evaluation des performances des protocoles SMAC et diffusion dirigée dans les réseaux de capteurs", Rapport de fin d'étude, Ecole supérieure de communication de Tunis, 2007.

[19] YACINE CHALLAL, "Réseaux de Capteurs Sans Fils",  
"[https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/RCSF\\_web.html](https://moodle.utc.fr/file.php/498/SupportWeb/co/RCSF_web.html)", Version 1, 18/11/2008

[20] A. Khetrpal, "Routing techniques for Mobile Ad Hoc Networks Classification and Quantitative Analysis," Department of Computer Engineering, Delhi College of Engineering University, 2006.

[21] G. Acs and L. Buttyabv. "A taxonomy of routing protocols for wireless sensor networks," BUTE Telecommunication department, Jan. 2007.

[22] Ali BENZERBADJ, "Approche inter-couches pour l'économie d'énergie et la fiabilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil dédiés aux Applications Critiques de Surveillance", Thèse de doctorat en Informatique, université d'Oran, 02/07/2018

[23] Mr SAHRAOUI belkheyr Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil; 2012-2013, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen Faculté des Sciences Département d'Informatique.

[24] S. Sharma, D. Kumar and R. Kumar, "QOS-Based Routing Protocol in WSN," Advances in Wireless and Mobile Communications. ISSN 0973-6972 Vol. 1, No. 1-3, pp.51-57, 2008.

[25] L. Qin and T. Kunz, "Survey on Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols". Carleton University, Systems and Computer Engineering, Technical Report SCE-04-14, August 2004.

[26] "<http://www.commentcamarche.net>", site de documentation informatique, Septembre 2005.

[27] "[https://www.memoireonline.com/02/12/5433/m\\_tat-de-lart-sur-les-reseaux-de-capteurs-sans-fil1.html](https://www.memoireonline.com/02/12/5433/m_tat-de-lart-sur-les-reseaux-de-capteurs-sans-fil1.html)", site de documentation informatique.

[28] A. U. Shankar, C. Alaettinoglu, I. Matta, and K. Dussa-Zieger, "Performance comparison of routing protocols using mars: Distance-vector versus linkstate". In ACM SIGMETRICS Conference on Performance, June 1992.

[29] R. Bellman, "On a Routing Problem, in Quarterly of Applied Mathematics". 16(1), 1958, .87-90.

[30] M. I. Razzak, S. A. Hussain, A. A. Minhas and M. Sher, "Collaborative Image Compression in Wireless Sensor Networks". International journal of computational cognition (<http://www.ijcc.us>), vol. 8, no. 1, march 2010.

[31] L. Zhang, Y. Lu, L. Chen, and D. Dong, "Game Theoretical Algorithm for Coverage Optimization in Wireless Sensor Networks". Proceedings of the World Congress on Engineering 2008 Vol I WCE 2008, London, U.K, July 2008.



- [32] M. Zhang, Y. Lu, C. Gonh, Y. Feng, "Energy-Efficient Maximum Lifetime Algorithm in Wireless Sensor Networks". 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), October 2008.
- [33] Jama N.Al-Karaki, A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks a survey," Wireless Communications, IEEE Publication Vol.11, Issue. Six, pp.6- 28, Dec. 2004.
- [34] M. Frikha, J.B. Slimane, "Conception and Simulation of Energy-Efficient AODV protocol Ad-Hoc Networks," Tunisian Communication's, Tunis, 2006
- [35] Daniel MABELE MONDONGA, "Etude sur les protocoles de routage d'un réseau sans fil en mode Ad Hoc et leurs impacts. "Cas de protocoles OLSR et AODV" ", Institut supérieur d'informatique, programmation et analyse de Kinshasa, 2010.
- [36] Woodrow, Edward, and Wendi Heinzelman. "SPIN-IT: a data centric routing protocol for image retrieval in wireless networks." Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference on. Vol. 3. IEEE, 2002.
- [37] Shah, Rahul C., and Jan M. Rabaey. "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks." Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE. Vol. 1. IEEE, 2002.
- [38] Ye, Fan, et al. "A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks." Computer Communications and Networks, 2001. Proceedings. Tenth International Conference on. IEEE, 2001.
- [39] Niculescu, Dragos, and Badri Nath. "Ad hoc positioning system (APS)." Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM'01. IEEE. Vol. 5. IEEE, 2001.
- [40] Roychowdhury, Sinchan, and Chiranjib Patra. "Geographic adaptive fidelity and geographic energy aware routing in ad hoc routing." International Conference. Vol. 1. 2010.
- [41] M. Ali and S. K. Ravula, "Real-time support and energy efficiency in wireless sensor networks". Technical report, IDE0805, January 2008.
- [42] K. Akkaya, and M. Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks". Journal of Ad Hoc Networks, Vol. 3, No. 3, May 2005, pp. 325-349.
- [43] J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey Wireless Communications". IEEE, Decembre 2004.
- [44] Aytaç Kaya, Ahmet Zengin and Hüseyin Ekiz, "Comparison of the Beacon-less Geographic Routing Protocols in Wireless Sensor Networks", 978-1-4577-9538-2/11/\$26.00 ©2011 IEEE.
- [45] J. A. Sanchez, R. Marin-Perez, and P. M. Ruiz. "BOSS: Beacon-Less On-Demand Strategy for Geographic Routing in Wireless Sensor Networks". In Proceedings of 4th IEEE Int'l. Conf. Mobile Ad Hoc and Sensor Sys, pages 1–10, Oct. 2007.
- [46] Dallinge Laetitia, "Etude d'algorithmes de routage géographique utilisés dans les réseaux de capteurs sans fils", Université de Genève, Computer Science, 4 Avril 2012.

- [47] Marc Heissenbuttel, Torsten Braun, Thomas Bernoulli, and Markus Walchli, "BLR: Beacon-Less Routing Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks", University of Bern, Switzerland, Institute of Computer Science and Applied Mathematics.
- [48] H. Takagi and L. Kleinrock, "Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals," IEEE Trans. Commun., vol. 32, no. 3, pp. 246–257, Mar. 1984.
- [49] T.-C. Hou and V. Li, "Transmission range control in multihop packet radio networks," IEEE Trans. Commun., vol. 34, no. 1, pp. 38–44, Jan. 1986.
- [50] J. Nonnenmacher and E. W. Biersack, "Scalable feedback for large groups," IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 7, no. 3, pp. 375–386, June 1999.
- [51] B Blum, T. He, S. Son & J. Stankovic. IGF: A state-free robust communication protocol for wireless sensor networks. In Tech. rep. CS-2003-11. Department of Computer Science, University of Virginia., 2003.
- [52] Teck Aguilar. Toward a beaconless geographic routing with cooperative communications for wireless sensor networks. Other [cs.OH]. Institut National des Télécommunications, 2010. English. NNT : 2010TELE0032. tel-00612332.
- [53] Michele Zorzi & Ramesh R. Rao. Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: Multihop performance. IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 2, no. 4, pages 337–348, 2003.
- [54] M. BOUDAA Okba, "Conception et réalisation d'un protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil", Université A/MIRA de Bejaïa.
- [55] Yacine CHALLAL, Hatem BETTAHAR, Abdelmadjid BOUABDALLAH, "Les Réseaux de capteurs (WSN: Wireless Sensor Networks)", Université de Technologie de Compiègne, FRANCE.
- [56] Abdelmalek BOUDRIES, "Maintien de la Connectivité dans les Réseaux Ad hoc sans fil", Thèse de Doctorat En Sciences Option Réseaux et Systèmes Distribués, Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2014.