

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Akli Mohand Olhaj / Bouira**



**Faculté des Sciences et sciences appliqués**

**Département de Génie Électrique**

**MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE**

En vue de l'obtention du **diplôme de Master en télécommunication**

**Option : Systèmes des télécommunications**

**Par :**

M<sup>lle</sup> MEKKI Samira

M<sup>lle</sup> BRAHMI Seloua

**Thème**

**Évaluation des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs  
sans fil (RCSF)**

Soutenu publiquement, le 29 / 09 /2018, devant le jury composé de :

M. Dr.ing. SAOUD Bilal	M .C.B	Univ. Bouira	Encadreur
M. Dr .DJEBIRI Mustafa	M.A.A	Univ. Bouira	Président
M. Dr. BENZAOUI Amir	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur
M. Dr. ISSAOUNI Salim	M.A.A	Univ. Bouira	Examineur

Promotion : 2017/2018

## *Remerciements*

*A travers ce modeste travail nous tenons tous d'abord à remercier dieu Louange à notre Seigneur **ALLAH** qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement. Louange à notre Créateur qui nous a incité à acquérir le savoir.*

*Nous tenons exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur **M Dr Saoud Bilal**, ce fut une grande fierté et honneur pour nous de travailler sous la houlette d'un homme pour lequel nous avons une grande admiration, nous le remercions vivement pour son aide et ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apporté durant notre étude.*

*Nos remerciements s'adressent également à monsieur le président et les membres des jurys pour l'honneur qu'ils nous font d'assister à notre soutenance.*

*Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants (es) qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.*

*Sans omettre bien sur nous remercions profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

*Enfin , nos chers parents et familles , et bien avant tout, trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères et les plus profonds en reconnaissance de leurs sacrifices , aides ,soutien et encouragement afin de nous assurer ce projet fin d'étude dans les meilleures conditions.*

*Samira et Seloua ..... *

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

### *A mon cher père*

*L'homme qui mérite tout mon grand respect je veux lui dédier ma réussite, mon bonheur ; l'homme qui m'a beaucoup aidé à terminer mes études, qui a sacrifié pour moi ; Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi. Qu'Allah te préserve bonne santé et longue vie mon père.*

### *A ma chère et tendre mère*

*A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir. Qu'Allah te préserve bonne santé et longue vie tous mes sentiments de reconnaissance pour toi ma mère.*

### *A mes sœurs*

*Souhila Amel et Samia aux qui je souhaite toute la réussite et le bien-être. J'espère atteint le seuil de vos espérances. Que ce modeste travail soit l'expression de ma profonde affection. Je vous remercie pour le soutien moral et l'encouragement que vous m'avez accordé. Je vous souhaite tout le bonheur que vous méritez.*

*Sans oublier bien sur mon petit frère Fateh et mon neveu Abderrahmane, Que dieu vous protège et vous préserve le bonheur et la santé. Ainsi que bien sur mes oncles Djamel et sa famille et Abde llaziz et sa famille et ma petite tante ghania, Que dieu vous protège et vous préserve le bonheur et la santé.*

### *À l'âme de ma grande mère*

*Qu'ALLAH le Tout-Puissant elle accorde son infinie Miséricorde Et l'accueil dans Son éternel Paradis.*

### *À mes grands pères*

*Ali et Mohammed que dieu vous préserve bonne santé et longue vie.*

*Et spécialement pour une certaine personne Mohammed Bendahou je vous remercie pour votre soutien morale, que dieu vous protège.*

*A mes amies surtout Amina, Hanaa et Nesrine qu'elle trouve ici mes meilleurs vœux de bonheur*

*A tous mes ami(e)s, tous ceux qui j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers*

*Enfin je dédie ce modeste travail à ma très chère copine et mon fidèle amie seloua*

**SAMIRA**

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon cher père*

*L'homme qui mérite tout mon grand respect ; mes sincères sentiments ; je veux aujourd'hui lui dédier ma réussite, mon bonheur ; l'homme qui m'a beaucoup aidé à terminer mes études, qui a sacrifié pour nous à avoir une belle vie ; Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi. Qu'Allah te protège et te donnera une bonne santé et longue vie meilleur père.*

*A ma chère et tendre mère*

*A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir. Qu'Allah te préserve pour nous mama ; bonne santé et longue vie, tous mes sentiments de reconnaissance pour toi ma chère maman je t'aime infiniment.*

*A mes chers frères*

*Menad, Soufiane, Youcef, Lounis aux qui je souhaite toute la réussite et le bien-être. J'espère atteint le seuil de vos espérances. Que ce modeste travail soit l'expression de ma profonde affection. Je vous remercie pour le soutien moral et l'encouragement que vous m'avez accordé surtout Menad je suis très fière d'avoir une famille comme vous. Je vous souhaite tout le bonheur que vous méritez.*

*Sans oublier ma grande sœur et bien sur ma petite cousine amie Lilia, Que dieu vous protège*

*Ainsi que mon oncle et sa famille ; tous mes cousins(es) sans exceptions, mes tentes, ma grande mère, ma belle-mère je vous souhaite tout le bonheur, paix, réussite dans votre vie*

*A mes amies surtout Amina, Hanaa et Nesrine qu'elle trouve ici mes meilleurs vœux de bonheur*

*A tous mes ami(e)s, A tous les personnes que j'aime, a tous qui m'aiment et tous qui sont chers*

*A une personne qui fait une tache très spéciale dans ma vie ; je te remercie pour ta fidélité, ton vrai amour mon fiancé Malek*

*Enfin je dédie ce modeste travail à ma très chère sœur et ma meilleure et fidèle amie Samira*

*Seloua*

## Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) est un domaine de recherche en évolution continue avec une multitude de contextes d'application. Le déploiement et la mobilité des nœuds capteurs influent considérablement le fonctionnement, la performance et la durée de vie du réseau. Dans notre travail d'étude nous avons évalué les performances des protocoles de routage dans l'environnement des réseaux de capteur sans fil. Nous avons exploité deux protocoles de routage des réseaux Ad Hoc (AODV et AOMDV) dans une topologie d'un RCSF. Nous avons comparé ces deux protocoles en termes de Délai, Débit, Nombres de paquets perdus et consommation de l'énergie. Ensuite, nous avons évalué les performances de protocole de routage de RCSF Directed Diffusion (DD) avec et sans mobilité. Les simulations ont été réalisées sur le simulateur des réseaux sans fil NS-2. Les résultats de simulation montrent qu'on peut utiliser des protocoles de routage Ad Hoc dans un RCSF.

**Mots clé :** RCSF, Réseau Ad Hoc, Protocole de Routage, Simulation, NS2

## Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) is a continuously evolving field of research with a multitude of application contexts. The deployment and mobility of the sensor nodes greatly affects the operation, performance and lifespan of the network. In our study work, we evaluated the performance of routing protocols in the wireless sensor network environment. We exploited two Ad Hoc network routing protocols (AODV and AOMDV) in a topology of a WSN. We compared these two protocols in terms of Delay, Rate, Number of lost packets and energy consumption. Next, we evaluated the WSN Directed Diffusion (DD) routing protocol performance with and without mobility. Simulation was performed on the NS-2 wireless network simulator. The simulation results show that Ad Hoc routing protocol can be used in a WSN.

**Keywords:** WSN, Ad Hoc Network, Routing Protocol, Simulation, NS2

# Table des matières

Liste des figures.....	V
Liste des tables.....	VI
Liste des abréviations.....	VII
Introduction générale.....	1
<b><u>Chapitre 1 : Généralité sur les réseaux de capteur sans fil (RCSF)</u></b>	
<b>1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Historique des réseaux de capteurs sans fil .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Définitions .....</b>	<b>4</b>
3.1. Les réseaux sans fil.....	4
3.2. Les réseaux ad-hoc .....	4
3.3. Un capteur.....	5
3.3.1. Classification des capteurs .....	6
3.4. Un réseau de capteur sans fil .....	6
<b>4. Architecture d'un nœud capteur .....</b>	<b>7</b>
4.1. Architecture matérielle .....	7
4.2. Architecture logicielle .....	8
<b>5. Architecture d'un RCSF.....</b>	<b>8</b>
5.1. Les réseaux de capteur sans fil plat .....	9
5.2. Les réseaux de capteurs sans fil hiérarchiques .....	9
<b>6. Architecture protocolaire .....</b>	<b>10</b>
<b>7. Les caractéristiques des réseaux de capteur sans fil.....</b>	<b>12</b>
<b>8. Domaine d'application des RCSF.....</b>	<b>13</b>
8.1. Application militaire.....	13
8.2. Application à la sécurité .....	13
8.3. Application médicale .....	14
8.4. Applications environnementales.....	14
8.5. Le Transport .....	15
<b>9. Facteurs et contraintes conceptuelles des RCSF .....</b>	<b>15</b>
9.1. Contraintes conceptuelles .....	15
9.2. Contraintes matérielles .....	16

10. Conclusion .....	16
----------------------	----

## **Chapitre 2 : routage dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)**

<b>1. Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>2. définition de routage .....</b>	<b>17</b>
<b>3. Objectifs du routage dans les RCSF .....</b>	<b>17</b>
<b>4. Les critères de performance des protocoles de routage en RCSF .....</b>	<b>18</b>
<b>5. Classification des protocoles de routage dans les RCSF.....</b>	<b>18</b>
5.1. Les protocoles à plat et Data-centric .....	19
5.1.1. Protocoles de capteur pour l'information par négociation (SPIN).....	19
5.1.2. Le protocole Directed Diffusion (DD) .....	20
5.2. Les protocoles basés sur la localisation .....	22
5.2.1. Protocole de Transfert basé sur la trajectoire (TBF) .....	22
5.2.2. Fidélité adaptative géographique (GAF).....	23
5.2.3. Minimum Energy Communication Network (MECN) .....	23
5.3. Les protocoles hiérarchiques .....	24
5.3.1. Low-Energy Adaptive Clustering. Hierarchy (LEACH) .....	24
5.3.2. Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (TEEN) .....	25
5.4. Les protocoles non hiérarchiques .....	26
5.4.1. Les protocoles réactifs.....	26
5.4.1.1. Dynamic Source Routing (DSR) .....	26
5.4.1.2. Ad hoc on demand Distance Vector (AODV) .....	27
5.4.1.3. Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector(AOMDV) .....	30
5.4.2. Les protocoles proactifs .....	31
5.4.2.1. Fisheye State Routing (FSR) .....	31
5.4.2.2. Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV).....	32
<b>6. La comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs .....</b>	<b>33</b>
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>33</b>

## **Chapitre 3: Simulation et évaluation des performances des protocoles AODV, AOMDV et DD**

<b>1. Introduction .....</b>	<b>34</b>
<b>2. Les outils de la simulation .....</b>	<b>34</b>
2.1. Choix de l'environnement de simulation.....	35

2.2.	Présentation de NS-2 .....	36
2.2.1.	Script TCL.....	37
2.2.2.	NAM.....	37
<b>3.</b>	<b>Caractéristiques d'une entité communicante sous NS-2 .....</b>	<b>38</b>
3.1.	Le Classifieur.....	38
3.2.	Le lien .....	38
3.3.	L'agent.....	39
<b>4.</b>	<b>Le processus de simulation.....</b>	<b>39</b>
<b>5.</b>	<b>Métriques de performances.....</b>	<b>40</b>
5.1.	Débit .....	40
5.2.	Paquets perdus .....	40
5.3.	Délai (End-to-end Delay) .....	41
5.4.	Consommation d'énergie.....	41
<b>6.</b>	<b>Simulation .....</b>	<b>41</b>
6.1.	Paramètres de simulation.....	41
6.2.	Discussion des résultats .....	42
<b>7.</b>	<b>Synthèse des résultats de consommation d'énergie.....</b>	<b>47</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>48</b>
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>49</b>
	<b>Perspectives.....</b>	<b>49</b>
	<b>Annexe A.....</b>	<b>51</b>
	<b>Liste bibliographique .....</b>	<b>52</b>

## Liste des figures

Figure 1.1 : Catégories des réseaux sans fil .....	4
Figure 1.2: MANET (Mobile Ad-hoc Networks).....	5
Figure 1.3 : Exemples des capteurs sans fil.....	5
Figure 1.4 : Réseaux de capteur sans fil (WSN).....	6
Figure 1.5 : Architecture matérielle d'un capteur sans fil .....	7
Figure 1.6 : Architecture d'une RCSF.....	9
Figure 1.7 : Réseaux de capteurs sans fil plats.....	9
Figure 1.8 : Réseaux de capteurs sans fil hiérarchiques.....	10
Figure 1.9 : La pile protocolaire dans les RCSF.....	10
Figure 1.10 : Un service militaire utilisant les RCSF .....	13
Figure 1.11 : Application des RCSF dans le domaine sécurité.....	14
Figure 1.12 : Ensemble de capteurs dans un corps humain .....	14
Figure 1.13 : Application des RCSF dans le domaine environnementale.....	15
Figure 2.1 : Classifications des protocoles de routage pour les RCSF.....	19
Figure 2.2 : Le protocole SPIN.....	20
Figure 2.3 : Phases du protocole de diffusion dirigée.....	21
Figure 2.4 : Topologie Basée sur Localisation.....	22
Figure 2.5 : Diagramme de transition d'état de GAF.....	23
Figure 2.6 : Le routage hiérarchique.....	24
Figure 2.7 : Architecture du routage hiérarchique LEACH.....	25
Figure 2.8 : Approche à base de cluster.....	26
Figure 2.9 : Exemple de protocole AODV .....	27
Figure 2.10 : Méthode de construction d'une route.....	29
Figure 2.11 : Principe de fonctionnement des protocoles proactifs.....	31
Figure 2.12 : Principe de fonctionnement de FSR.....	32
Figure 2.13 : Exemple utilisant le protocole DSDV.....	32
Figure 3.1 : L'architecture générale du NS2.....	37
Figure 3.2 : L'outil de visualisation NAM.....	38
Figure 3.3 : Schéma d'un nœud dans NS2.....	39
Figure 3.4 : Le processus de simulation NS-2.....	40
Figure 3.5 : Le délai de bout en bout en fonction de temps .....	43
Figure 3.6 : Débit du réseau en fonction du temps.....	43

Figure 3.7 : Nombre de paquet perdus en fonction de temps.....44  
Figure 3.8 : Consommation d'énergie en fonction de temps.....45  
Figure 3.9 : Consommation d'énergie (sans mobilité et avec des nœuds).....46  
Figure 3.10 : Consommation d'énergie en fonction de temps des trois protocoles simulés....47

### Liste des tables

Table 1.1 : Les trois générations des nœuds de capteurs.....3  
Table 2.1 : Format de message RREQ.....28  
Table 2.2 : Format de message RREP.....28  
Table 2.3 : Format de message RERR.....28  
Table 2.4 : Comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs.....33  
Table 3.1 : Paramètres de simulation et leurs valeurs dans les différents scénarios.....42

---

**Liste des abbreviations**

<b>ADC</b>	Analog to <b>D</b> igital <b>C</b> onverters
<b>AODV</b>	Ad hoc <b>O</b> n <b>D</b> emand <b>D</b> istance <b>V</b> ector
<b>AOMDV</b>	Ad hoc <b>O</b> n <b>D</b> emand <b>M</b> ulti-path <b>D</b> istance <b>V</b> ector
<b>CH</b>	Cluster <b>H</b> ead
<b>DD</b>	<b>D</b> irected <b>D</b> iffusion
<b>DSR</b>	<b>D</b> ynamic <b>S</b> ource <b>R</b> outing
<b>DSDV</b>	<b>D</b> estination- <b>S</b> equenced <b>D</b> istance- <b>V</b> ector
<b>FSR</b>	<b>F</b> isheye <b>S</b> tate <b>R</b> outing
<b>GEAR</b>	<b>G</b> eographic and <b>E</b> nergie- <b>A</b> ware <b>R</b> outing
<b>GAF</b>	<b>G</b> eographic <b>A</b> daptive <b>F</b> idelity
<b>GPS</b>	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ysteme
<b>J-SIM</b>	<b>J</b> ava <b>S</b> imulator
<b>LLC</b>	<b>L</b> ogiciel <b>L</b> ink <b>C</b> ontrol
<b>LEACH</b>	<b>L</b> ow <b>E</b> nergy <b>A</b> daptive <b>C</b> lustering <b>H</b> ierarchy
<b>MANET</b>	<b>M</b> obile <b>A</b> d hoc <b>N</b> etwork
<b>MAC</b>	<b>M</b> edium <b>A</b> ccess <b>C</b> ontrol
<b>MECN</b>	<b>M</b> inimum <b>E</b> nergy <b>C</b> ommunication <b>N</b> etwork
<b>NS</b>	<b>N</b> etwork <b>S</b> imulator
<b>NS-2</b>	<b>N</b> etwork <b>S</b> imulator- <b>2</b>
<b>NAM</b>	<b>N</b> etwork <b>A</b> nimator
<b>OSI</b>	<b>O</b> pen <b>S</b> ystems <b>I</b> nterconnection
<b>OMNET++</b>	<b>O</b> bjective <b>M</b> odular <b>N</b> ETwork <b>T</b> est-bet in <b>C++</b>
<b>QoS</b>	<b>Q</b> uality <b>o</b> f <b>S</b> ervice
<b>RREQ</b>	<b>R</b> oute <b>R</b> equst
<b>RREP</b>	<b>R</b> oute <b>R</b> eplu
<b>SPIN</b>	<b>S</b> ensor <b>P</b> rotocols <b>I</b> nformation <b>N</b> égociation
<b>TEEN</b>	<b>T</b> hreshold <b>S</b> ensitive <b>E</b> nergy <b>E</b> fficient <b>S</b> ensor <b>N</b> etwork <b>P</b> rotocol

<b>TBF</b>	<b>T</b> rajectory– <b>B</b> ased <b>T</b> ransfer
<b>TCL</b>	<b>T</b> ool <b>C</b> ommand <b>L</b> anguage
<b>TCP</b>	<b>T</b> ransmission <b>C</b> ontrol <b>P</b> rotocol
<b>WLAN</b>	<b>W</b> ireless <b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
<b>WMAN</b>	<b>W</b> ireless <b>M</b> etropolitan <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
<b>WPAN</b>	<b>W</b> ireless <b>P</b> ersonnel <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
<b>WWAN</b>	<b>W</b> ireless <b>W</b> ired <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
<b>WSN</b>	<b>W</b> ireless <b>S</b> ensors <b>N</b> etworks

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Ces dernières années, l'innovation technologique a été marquée par l'émergence de nombreuses applications basées sur des réseaux de capteurs sans fil. Un capteur sans fil est une plateforme autonome capable de récolter des données sur un environnement et de les diffuser grâce à un module radio embarqué. Ces plateformes peuvent embarquer une large gamme de capteurs possibles (de lumière, de température, d'humidité, etc.) et leur mode de communication les rend polyvalentes et adaptables à pour de nombreuses applications du domaine militaire, de la santé, de l'environnement, commercial, domestique ou de la sécurité.

Un RCSF est un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs qui sont limités en ce qui concerne l'approvisionnement en énergie, la capacité de calcul restreinte et la consommation de bande passante. Une des problématiques centrales des réseaux de capteurs sans fil est la maximisation de la durée de vie du réseau. Cette maximisation s'obtient par la minimisation de la consommation et la conservation de l'énergie de chaque nœud capteur. Cette consommation est due à trois opérations d'un nœud qui s'agit de : la capture, le calcul (traitement), la communication. Cette dernière est l'opération la plus coûteuse. Pour maîtriser l'effet de la communication sur la consommation énergétique, la communauté des chercheurs a proposé un très grand nombre de protocoles de communications à base de la consommation d'énergie.

Le routage est l'une des opérations fondamentale dans un RCSF, son principe ressemble à celui des réseaux ad-hoc, car la communication des données captées est faite en saut jusqu'à ce que les données arrivent aux nœuds puits. Classiquement, le mécanisme d'acheminement a comme but réduire le nombre de saut ou le temps pris par les données routées. Dans notre réseau, le protocole de routage devra être capable de construire des chemins prenant en compte de l'énergie résiduelle de chaque nœud d'un chemin.

L'objectif de notre projet est d'évaluer certaines performances des protocoles de routage (AODV et AOMDV) dédiés aux réseaux Ad Hoc mais dans une topologie des réseaux capteurs sans fil. Nous avons choisi le protocole AODV parce que c'est un protocole standardisé par IETF (Internet Engineering Task Force). AODV c'est un protocole qui utilise le nombre de saut comme une métrique pour installer les routes entre la source et la destination. Une amélioration d'AODV est le protocole AOMDV qui installe plusieurs routes entre la source et la destination. L'utilisation de ces deux protocoles nous permette étudier l'adaptabilité des protocoles de routage Ad Hoc dans un réseau de capteurs sans fil. Nous avons aussi évalué un autre protocole de routage Directed Diffusion. Ce protocole a été

proposé pour les RCSF. Finalement nous avons terminé par une comparaison entre AODV, AOMDV, DD en termes de la consommation de l'énergie.

La suite de ce mémoire sera organisée comme suit : En premier chapitre, nous allons présenter quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, dans le deuxième chapitre nous allons présenter les différents protocoles de routage dans les RCSF. Dans le dernier chapitre nous allons illustrer les outils de simulation ou on va montrer les résultats de la simulation de protocoles afin d'évaluer leur performances.

Enfin, notre mémoire sera terminé avec une conclusion générale et quelques perspectives.

# **Chapitre 1**

## **Généralité sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF)**

## 1. Introduction

Après le développement d'un réseau complet de réseaux câblés pour transmettre différents flux (données numériques, sons, images, etc.). Le câblage dur rend ce type de réseau moins adaptable aux applications. Le développement des technologies sans fil offre aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine de la communication. L'environnement sans fil permet aux utilisateurs d'accéder facilement et de traiter des informations sur des dispositifs informatiques mobiles (ordinateur portable, PDA, périphérique PC, capteurs, etc.).

En raison des progrès de la microélectronique, les applications liées au traitement sans fil mobile devraient être plus courantes. Les réseaux de capteurs sans fil suscitent de l'intérêt pour le développement d'une nouvelle génération de systèmes intégrés à haut potentiel pour de nombreuses applications, telles que la surveillance militaire, la surveillance environnementale, la médecine d'urgence et la domotique...etc.

L'importance des réseaux de capteurs sans fil a progressivement augmenté en raison de la recherche accrue dans ce domaine. Par conséquent, il est également mentionné que la gamme de programmes offerts pour une utilisation par cette riche source de données [1].

Dans la suite de ce chapitre nous allons voir, un peu d'historique sur les RCSF. Ensuite nous allons présenter l'architecture des RCSF, leurs caractéristiques et leur système d'exploitation. Nous allons terminer par les différentes applications des RCSF.

## 2. Historique des réseaux de capteurs sans fil

Les récents progrès des nouvelles techniques ont provoqué une énorme importance dans le domaine des réseaux sans fil. La technologie des réseaux de capteurs sans fil est devenue une des merveilleuses technologies dans le 21<sup>ème</sup> siècle [2]. Les réseaux de capteurs ont montré leur impact sur notre vie quotidienne [3]. Les RCSF nous permettent de faciliter l'exécution de plusieurs tâches. Le tableau suivant illustre l'évaluation des réseaux de capteurs.

Génération	Période	Taille	Poids	Batterie
1ère	Les années <b>80</b> et <b>90</b>	Grande boîte à chaussures	Kilogramme	Grosse
2ème	Entre <b>2000</b> et <b>2003</b>	Boîte de carte	Grammes	AA
3ème	<b>2010</b>	Particule de poussière	Négligeable	Solaire

Table 1.1 : Trois générations des nœuds de capteurs

### 3. Définitions

#### 3.1. Les réseaux sans fil

Un réseau sans fil (*wireless network*) est un réseau dans lequel au moins deux nœuds peuvent avoir une communication sans liaison filaire [4]. Les réseaux de communication tirent parti de tous les services de réseau traditionnels, quelle que soit leur situation géographique. Les réseaux sans fil peuvent être classés selon deux critères. Le premier est la zone de couverture du réseau. Selon ce critère, il existe quatre catégories: les réseaux personnels, les réseaux locaux, les réseaux métropolitains et les grands réseaux. Le deuxième critère est l'infrastructure et le modèle accepté. En ce qui concerne ce critère, les réseaux sans fil peuvent être distribués: réseaux sans infrastructures et réseaux avec infrastructures [5], comme on peut le voir sur la figure 1.1 :

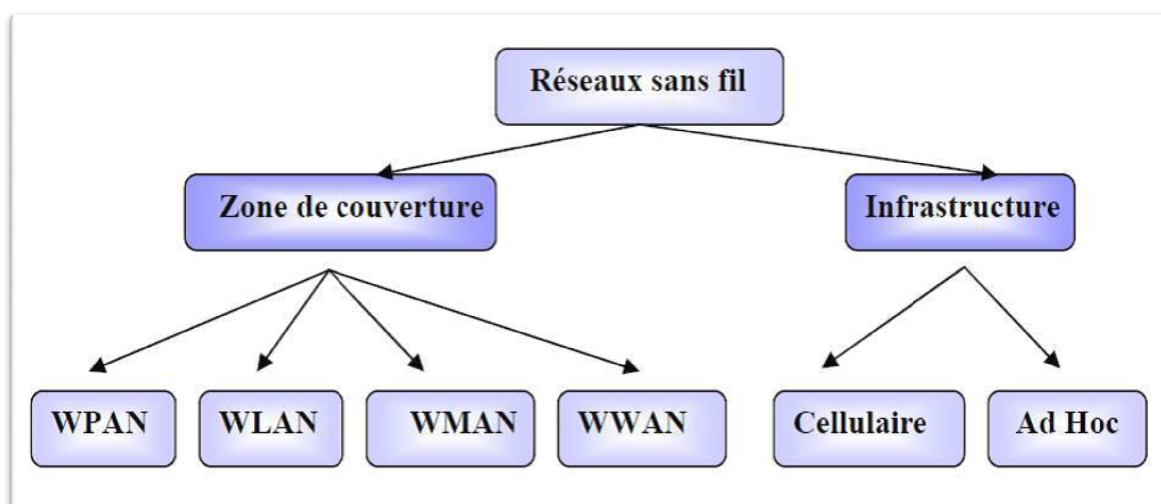


Figure 1.1 : Catégories des réseaux sans fil

#### 3.2. Les réseaux ad-hoc

Un réseau ad hoc, communément appelé un réseau mobile MANET (Mobile Ad hoc Network), est un ensemble d'unités mobiles avec des interfaces de communication sans fil (un réseau dynamique de nœuds sans fil) qui ne repose pas sur un réseau temporaire sans infrastructure fixe ou une administration centralisée se produit, le réseau est également capable de se reconfigurer en fonction de la topologie, qui peut changer à volonté. Dans de tels environnements, les unités agissent comme hôtes ou routeurs [6].

Des nœuds de MANET sont équipés d'émetteurs et récepteurs sans fil en utilisant des antennes qui peuvent être omnidirectionnelle (broadcast), directionnel (point à point), ou une combinaison entre les deux, il maintient la connectivité du réseau d'une manière coopérative en fonction de la position, à l'expéditeur configuration du récepteur, puissance d'émission et

interférences entre canaux de communication. La modélisation de cette connectivité est décrite en détail dans la section suivante.

Un réseau ad hoc peut être isolé, mais peut aussi avoir une passerelle ou des interfaces qui se connectent à un réseau fixe [7].

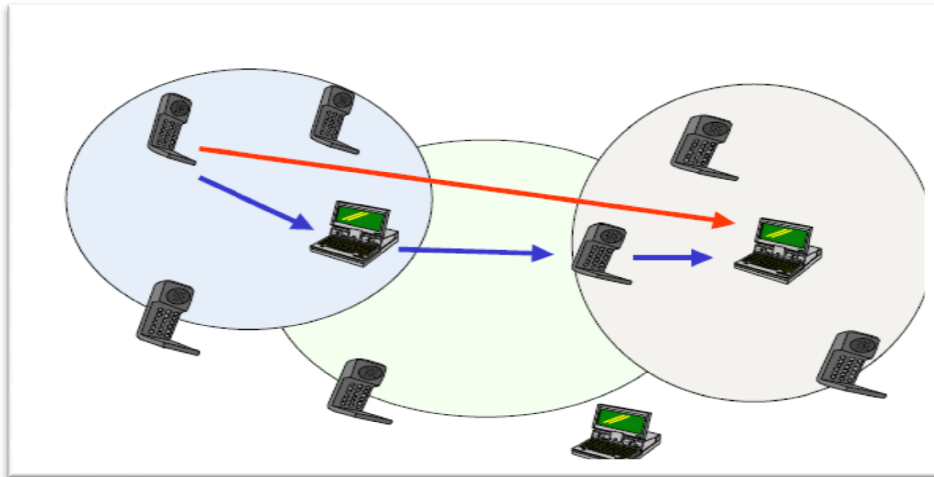


Figure 1.2: MANET (Mobile Ad-hoc Networks)

### 3.3. Les capteurs

Les capteurs sont définis comme étant des petits dispositifs déployés aléatoirement dans une zone géographique appelée champ de captage [8]. Ces derniers sont de capacité de calcul, d'énergie et de bande passante limitées. Le champ de captage définit le terrain d'intérêt pour le phénomène capté. Les données captées (par ces capteurs) sont acheminées grâce à un protocole routage multi-sauts vers un point de collecte appelé nœud puits ou station de base (*sink*). La station de base est liée à l'utilisateur du réseau via internet ou un satellite. La station de base permet à l'utilisateur d'établir des requêtes aux autres nœuds du réseau en fournissant le type de données requises et en récoltant les données environnementales captées [9].

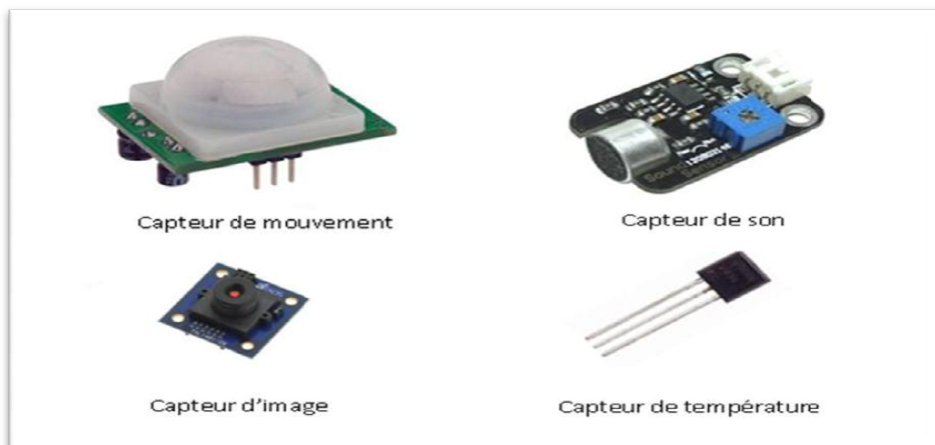


Figure 1.3 : Exemples des capteurs sans fil

### 3.3.1 Classification des capteurs

#### a. Capteurs passifs

Sont des capteurs qui peuvent être formés par impédance. Une variation du phénomène physique étudié (mesuré) produit une variation de l'impédance. Aucune entrée d'alimentation externe n'est requise pour le boîtier (exemple: thermistance, potentiomètre, thermomètre à mercure..).

#### b. Capteurs actifs

Il se compose d'un ensemble de transformateurs (chronomètre mécanique, extensomètre, échelle d'éblouissement..). Ce sont des capteurs qui peuvent être modélisés par des générateurs tels que des systèmes photovoltaïques et électromagnétiques. Ainsi ils génèrent soit un courant, soit une tension en fonction de l'intensité du phénomène physique mesuré.

### 3.4. Un réseau de capteur sans fil

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) ou WSN en anglais (*Wireless Sensor Networks*) est un type particulier de réseaux mobiles Ad Hoc MANET [10]. Il est composé d'un ensemble de dispositifs très petits, nommés 'nœuds' capteurs, ils ont une faible vitesse traitement et des capacités de stockage réduites (section 3.3). Les capteurs peuvent être déployés de façon aléatoire dans une zone. Généralement les capteurs sont placés près des objets auxquels ils s'intéressent dans les environnements où ils sont déployés. Variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans les RCSF chaque capteur possède la capacité de récolter, traiter et acheminer les données environnementales de la région surveillée d'une manière autonome. Dans un RCSF un capteur réagit en cas de besoin par la transmission de l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte (des stations de bases) à travers d'une connexion sans fil [11]. La figure 1.4 illustre un exemple de RCSF.

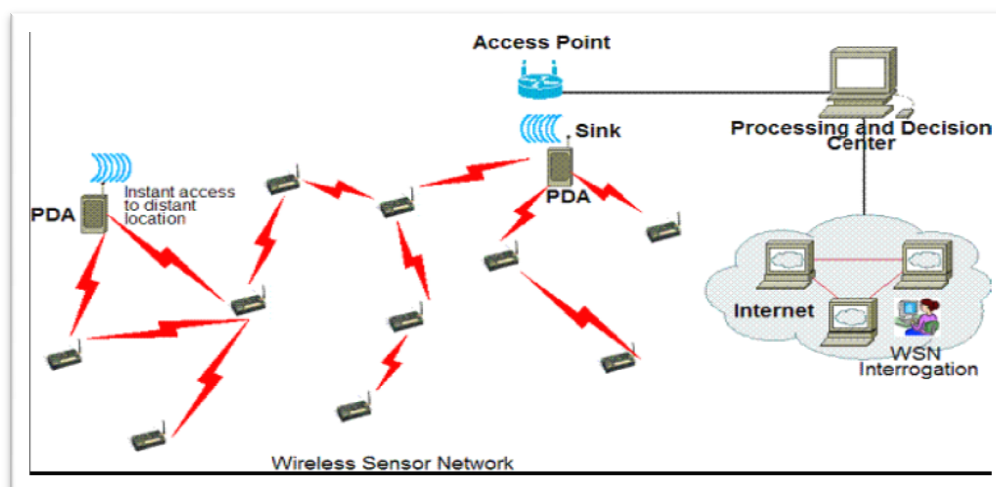


Figure 1.4 : réseaux de capteur sans fil (WSN)

## 4. Architecture d'un nœudcapteur

Le capteur sans fil est utilisé pour mesurer des grandeurs physiques ou des paramètres d'utilisation (détection) pour l'évaluation ou le contrôle de l'environnement, ainsi que pour communiquer avec d'autres entités via les médias radio. L'architecture du capteur comprend deux parties: le matériel et le système d'exploitation [12].

### 4.1. Architecture matérielle

La structure matérielle du nœud est constituée de plusieurs blocs fonctionnels: l'unité de traitement, l'unité d'acquisition, l'unité de communication et l'unité d'entraînement. Elle peut également inclure, en fonction de la portée, des unités supplémentaires telles qu'un système de suivi GPS ou un système de génération d'énergie (cellules solaires). On peut même trouver des capteurs microscopiques, légèrement plus grands, équipés d'un système de remplissage pour déplacer le micro capteur, si nécessaire [13]. La figure 1.5 montre l'architecture d'un capteur sans fil.

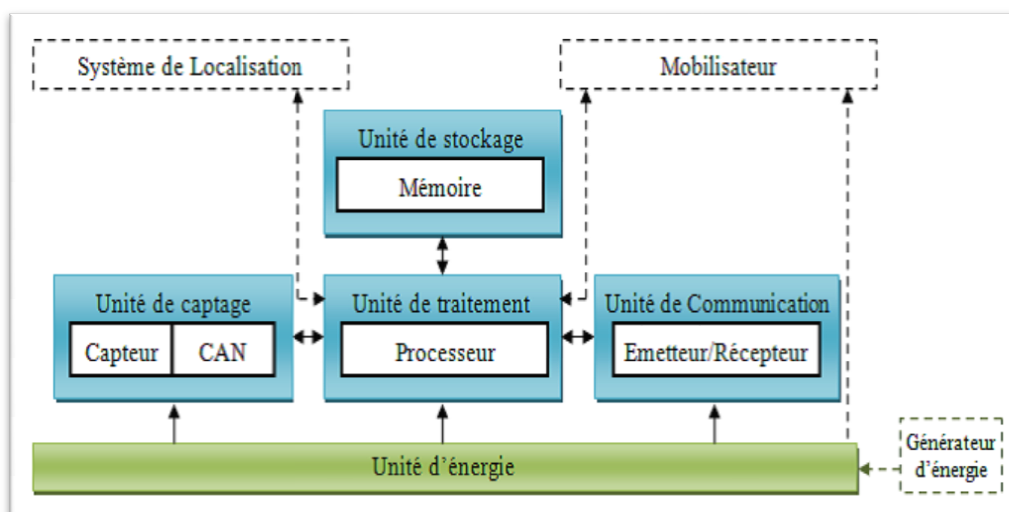


Figure 1.5 : Architecture matérielle d'un capteur sans fil

Dans une architecture d'un capteur on trouve quatre unités fondamentales :

- **L'unité de traitement (processeur):** c'est l'unité principale du capteur. Généralement, elle est représentée par un processeur ou microcontrôleur. Son rôle est de contrôler le bon fonctionnement des autres unités [14]. Sur certains capteurs elle peut embarquer un système d'exploitation pour faire fonctionner le capteur. Elle peut aussi être couplée à une unité de stockage, qui servira par exemple à y enregistrer les informations transmises par l'unité d'acquisition de données.
- **L'unité d'acquisition:** la mesure des grandeurs physiques ou analogiques et leur conversion en données numériques sont assurés par cette unité dans un capteur. Elle

est constituée du capteur lui-même et de l'ADC qui permet la conversion des données. Le capteur récupère les signaux analogiques qu'il transmet vers l'ADC. Ensuite l'ADC transforme les données analogiques en données numériques compréhensibles pour l'unité de traitement [15].

- **l'unité de communication** : la fonction de cette unité est la transmission et la réception des informations. Elle est équipée d'un couple émetteur/récepteur pour communiquer au sein du réseau. Il existe plusieurs possibilités de transmission (optique, infrarouge, etc.).
- **l'unité d'alimentation** : c'est un élément primordial de l'architecture du capteur, c'est elle qui fournit en énergie toutes les autres unités [16]. Elle correspond le plus souvent à une batterie ou une pile alimentant le capteur, dont les ressources limitées en font une problématique propre à ce type de réseau puisque ces derniers sont généralement déployés dans des zones non accessibles. La réalisation récente d'unités d'alimentation à base de panneaux solaires tente d'apporter une solution pour prolonger sa durée de vie.

## 4.2. Architecture logicielle

On peut voir un capteur comme un système embarqué avec une partie matérielle (section 4.1) et partie logicielle. La partie logicielle dans un capteur est représenté le système d'exploitation embarqué. L'un des systèmes d'exploitation les plus connus dans le domaine des RCSF est «*TinyOS*». Il est libre. *TinyOS* est très utilisé dans des simulations pour le développement et le test des algorithmes et protocoles réseau [17].

## 5. Architecture d'un RCSF

Un RCSF est composé d'un ensemble de nœuds capteurs. Ces nœuds capteurs sont organisés en champs « *sensorfields* » (voir la figure 1.6). Chacun de ces nœuds a la capacité de collecter des données et de les transférer au nœud passerelle (*sink*) par l'intermédiaire d'une architecture multi-sauts. Le puits transmet ensuite ces données par internet ou par satellite à l'ordinateur central «Gestionnaire de tâches» pour analyser ces données et prendre des décisions [18].

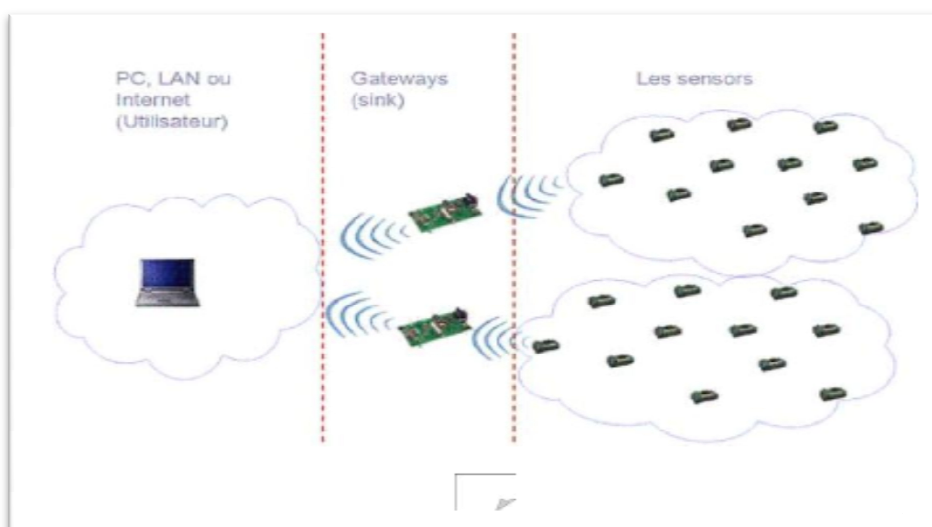


Figure 1.6 : Architecture d'une RCSF

### 5.1. Les réseaux de capteur sans fil plats

Un réseau de capteur sans fil plat [20] est un réseau homogène, où tous les nœuds disposent des mêmes capacités et fonctionnalités concernant le captage, la communication et la complexité du matériel, sauf le " Sink ". Cette dernière joue le rôle d'une passerelle, il est responsable de la transmission de l'information collectée à l'utilisateur final.

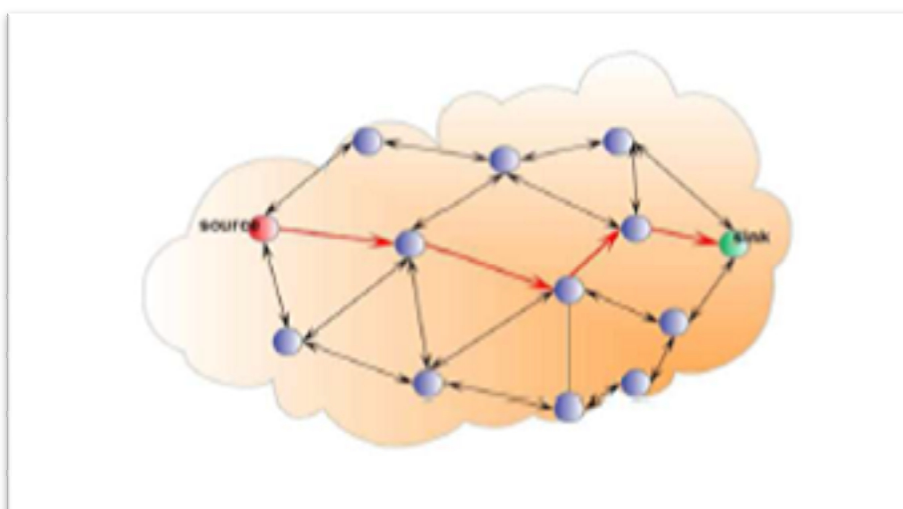


Figure 1.7 : Réseaux de capteurs sans fil plats

### 5.2. Les réseaux de capteurs sans fil hiérarchiques

Une architecture hiérarchique a été proposée pour réduire le coût et la complexité de la plupart des nœuds capteurs. Elle consiste à introduire un ensemble des nœuds plus coûteux et plus puissants, en créant une infrastructure qui décharge la majorité des nœuds simples à faible coût de plusieurs fonctions du réseau[21].

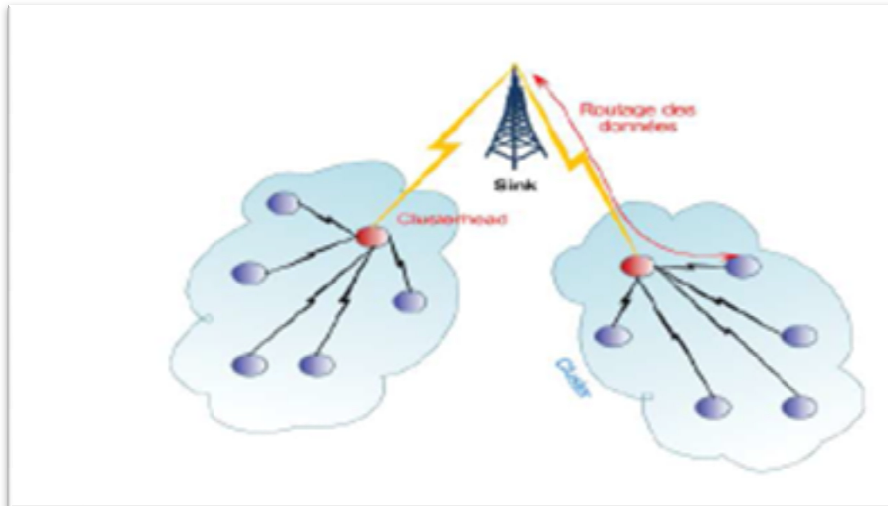


Figure 1.8 : Réseaux de capteurs sans fil hiérarchiques

## 6. Architecture protocolaire

Contrairement aux réseaux Ad-hoc, les réseaux de capteurs sans fil imposent des contraintes supplémentaires aux protocoles de communication. Par conséquent, le modèle traditionnel en couches (modèle OSI [22]), ne répond pas aux exigences de ce type particulier de réseaux. En effet, les RCSF adoptent une version simplifiée du modèle OSI, à laquelle sont ajoutées de nouvelles couches afin de remédier aux contraintes et aux limitations imposées. Ainsi, le nouveau modèle se compose de 5 couches similaires à celles du modèle OSI (physique, liaison, réseau, transport et application), et trois plans de gestion dédiés pour le contrôle d'énergie, de mobilité et des tâches particulières[23]. Figure 1.9 montres l'architecture protocolaire avec les différents plans dans un RCSF.

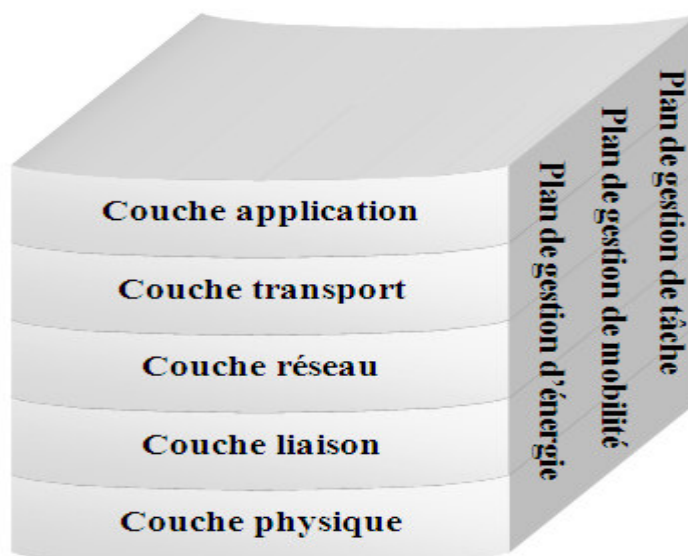


Figure 1.9 : La pile protocolaire dans les RCSF

### ➤ La couche physique

Cette couche doit assurer des techniques d'émission, de réception et de modulation de données d'une manière robuste.

### ➤ La couche liaison

Elle spécifie comment les données sont expédiées entre deux nœuds dans une distance d'un saut. Elle est responsable du multiplexage des données, du contrôle d'erreurs, de l'accès au médium, elle assure la liaison point à point et point à multipoint dans un réseau de communication. Elle est composée de la couche de contrôle de liaison logique (LLC pour Logiciel Link Control) qui fournit une interface entre la couche liaison et la couche réseau en encapsulant les segments des messages de la couche réseau avec des informations d'en-tête additionnelles, et la couche de contrôle d'accès au médium (MAC pour Medium Access Control) qui contrôle la radio. Comme l'environnement des réseaux de capteurs est bruyant et les nœuds peuvent être mobiles, la couche de liaison de données doit garantir une faible consommation d'énergie et minimiser les collisions entre les données diffusées par les nœuds voisins.

### ➤ La couche réseau

La couche réseau s'occupe de l'acheminement des données fournies par la couche transport : routage, relayage, etc. Le protocole de routage est le principal acteur dans cette couche, il permet de trouver une route et une transmission performante des données. Plusieurs algorithmes de routage ont été conçus pour les problèmes de routage dans les réseaux capteurs (optimisation de l'utilisation de l'énergie des capteurs, gestion des trafics, etc.).

### ➤ La couche transport

Cette couche est chargée du transport des données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.

### ➤ La couche application

Cette couche assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc d'un niveau le plus proche des utilisateurs, gère directement par les logiciels.

- **Le plan gestion d'énergie** : chargé de contrôler et gérer la manière de consommation de l'énergie par un nœud.
- **Le plan de gestion des tâches** : ce plan assure l'équilibrage de la distribution des tâches sur les différents nœuds afin d'accomplir un travail coopératif suivant l'application souhaitée.

- **Le plan de gestion de la mobilité** : détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs.

## 7. les caractéristiques des réseaux de capteurs sans fil

Les RCSF sont différents par rapport aux réseaux Ad Hoc ou réseau filaire. Les RCSF possèdent des caractéristiques un peu particulières. Dans cette section nous allons présenter les caractéristiques les plus importantes dans un RCSF.

### ➤ **La densité des nœuds**

Les réseaux de capteurs se composent généralement d'un nombre très important de nœuds pour garantir une couverture totale de la zone à surveiller. Cette densité peut varier de 0.05 à 1 nœuds /m<sup>2</sup> [24].

### ➤ **La durée de vie limitée**

Les nœuds capteurs sont très limités par la contrainte d'énergie, ils fonctionnent généralement sans surveillance dans les régions géographiques éloignées et par conséquent recharger et remplacer leur batterie est la plus part du temps impossible[24].

### ➤ **Absence d'infrastructure**

Les réseaux RCSF, en général, se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.

### ➤ **Topologie dynamique**

Les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles (suivant l'application) qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi, la topologie du réseau fréquemment changeante.

### ➤ **Auto organisation du réseau**

Ceci peut être nécessaire dans plusieurs cas. Par exemple, un réseau comportant un grand nombre de nœuds placés dans des endroits hostiles où la configuration manuelle n'est pas faisable, doit être capable de s'auto organiser. Un autre cas est celui où un nœud est inséré ou retiré (à cause d'un manque d'énergie ou de destruction physique), ainsi le réseau doit être capable de se reconfigurer pour continuer sa fonction.

### ➤ **Sécurité physique limitée**

Les RCSF mobiles sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.

### ➤ La qualité de service (QoS)

La QoS pour les RCSF est que la quantité et la qualité d'informations extraites à partir des puits deviennent appropriées. 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 [24].

## 8. Domaine d'application des RCSF

Les caractéristiques particulières des nœuds capteurs (faible coût, petite taille, communication sans fil...), ont permis d'étendre rapidement leurs domaines d'application. Parmi les domaines où ces réseaux peuvent offrir les meilleures contributions, nous citons les domaines : militaire, environnemental, domestique, santé, sécurité, etc.

### 8.1. Application militaire

Le domaine militaire ne sera pas épargné non plus. Il pourra utiliser les RCSF par exemple dans la détection et la collecte d'informations sur la position de l'ennemi et ses mouvements, la détection d'agents chimiques ou bactériologiques, etc.



Figure 1.10 : Un service militaire utilisant les RCSF

### 8.2. Application à la sécurité

L'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter des fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou un vieillissement de la structure. Avec une activation périodique de ces capteurs, le système peut fonctionner durant des années, voir des décennies [25].

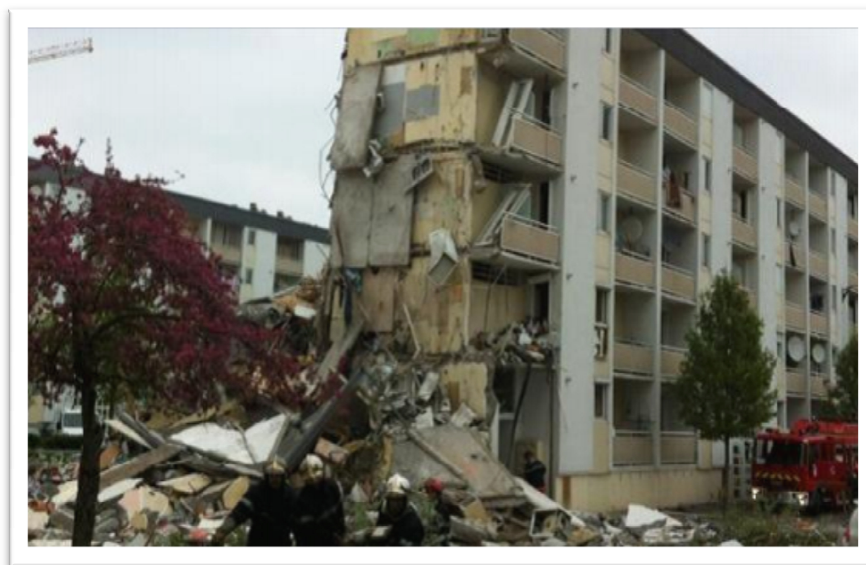


Figure 1.11: Application des RCSF dans le domaine sécurité

### 8.3. Application médicale

Le domaine médical peut lui aussi intégrer des applications pertinentes. Comme par exemple : l'aide à la médication et le suivi des patients à distance (rythme cardiaque, pression du sang, etc.), l'identification des allergies et des médicaments administrés aux patients, la localisation des docteurs et des patients dans l'hôpital, etc.

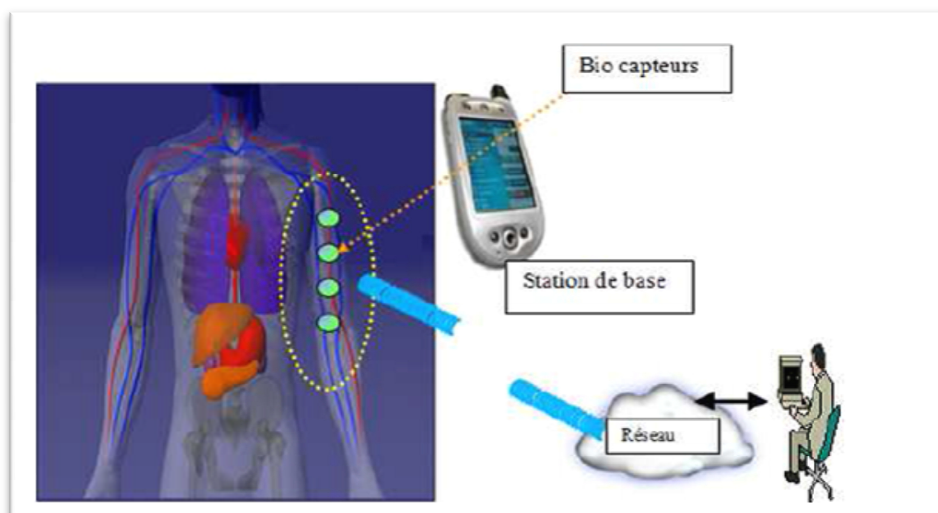


Figure 1.12 : Ensemble de capteurs dans un corps humain

### 8.4. Applications environnementales

Les réseaux de capteurs sans fil peuvent être utilisés afin de surveiller des phénomènes environnementaux. Ainsi, ils sont déployés dans les forêts afin de détecter et de signaler un éventuel début d'incendie. Les capteurs peuvent aussi être semés avec les graines, afin de contrôler l'arrosage des plantes. Dans le domaine industriel, les capteurs sont généralement

utilisés afin de détecter des fuites de produits toxiques, ou pour la surveillance des paramètres critiques tels que la température d'un réacteur nucléaire [23].

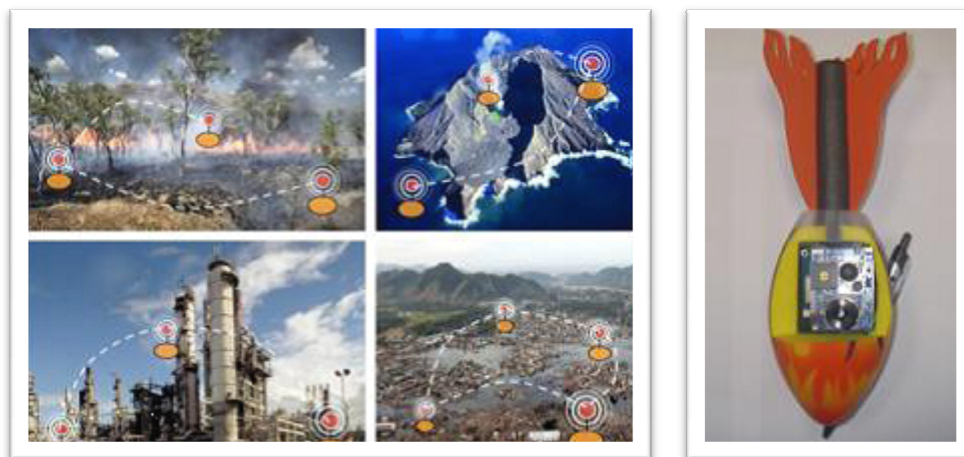


Figure 1.13 : Application des RCSF dans le domaine environnementale.

## 8.5. Le Transport

Les réseaux de capteurs déployés dans les moyens de transport peuvent donner un mode de transport intelligent puisque les informations sur le trafic en temps réel sont collectées par les réseaux de capteurs pour améliorer plus tard des modèles de transport et signaler une alerte de la congestion et des problèmes de circulation aux conducteurs.

## 9. Facteurs et contraintes conceptuelles des RCSF

La conception et la mise en place des RCSF sont influencés par plusieurs contraintes qui peuvent être des contraintes conceptuelles ou matérielles [26]. Ces facteurs importants servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les réseaux de capteurs. Ils sont considérés également comme métrique de comparaison de performances entre différents travaux dans le domaine.

### 9.1. Contraintes conceptuelles

La conception des RCSF, leurs protocoles et algorithmes sont guidés par plusieurs facteurs parmi ces facteurs on cite :

- **Tolérance aux fautes :** Le réseau doit être capable de maintenir ses fonctionnalités sans interruption en cas de défaillance d'un de ses capteurs. Cette défaillance peut être causée par une perte d'énergie, par un dommage physique ou par interférence de l'environnement. Le degré de tolérance dépend du degré de criticité de l'application et des données échangées.
- **Scalabilité :** Une des caractéristiques des RCSF est qu'ils peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Le réseau doit être capable de

fonctionner avec ce nombre de capteurs tout en permettant l'augmentation de ce nombre et la concentration (densité) des nœuds dans une région.

- **Coût de production:** Le coût des RCSF, qui sont constitués d'un grand nombre de nœuds, dépend de celui d'un seul nœud qui ne doit pas, par conséquent, être cher.

## **9.2. Contraintes matérielles**

Les composantes d'un capteur nécessitent d'être regroupées dans un module convenable avec la contrainte de la taille qui ne doit pas être très petite, et ne dépasse pas quelques centimètres [27].

## **10. Conclusion**

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont une nouvelle technologie qui a surgi après les grands progrès technologiques concernant le développement des capteurs intelligents. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vu la diversité de ces applications : militaire, environnement, médicale, et même dans le domaine de transport.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté quelques définitions de base sur les RCSF, l'architecture des RCSF, ainsi que leurs principaux domaines d'application, leurs facteurs de conception et leurs caractéristiques. Dans le chapitre suivant nous allons présenter les protocoles de routage dans les RCSF.

**Chapitre 2**

**Routage dans les**

**réseaux de capteurs**

**sans fil (RCSF)**

## **1. Introduction**

Dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, il est nécessaire que le routage soit économe en énergie (c'est-à-dire une route qui ne consomme pas trop d'énergie, une route qui n'est pas trop longue). Pour cette raison, il est nécessaire de pouvoir trouver une stratégie (ou protocole de routage) qui a ces caractéristiques. La stratégie (ou le protocole) de routage est utilisé afin de rendre compte les chemins qui se trouve entre les nœuds. L'objectif principal d'une telle procédure est l'établissement de routes qui soient robustes, puissantes et actives entre un couple d'unité quelconque, ce qui affirme l'échange des messages d'une manière régulière.

Dans ce chapitre nous allons déterminer c'est quoi le routage et son objectif dans les réseaux de capteur sans fil ainsi que les différents protocoles de routage dans ces réseaux.

## **2. définition de routage**

Le routage est une méthode d'acheminement des informations vers la bonne destination à travers un réseau d'interconnexion donné. Il s'agit de fournir une stratégie qui assure à tout moment un établissement de routage correct et efficace entre toute paire de nœuds appartenant au réseau. Cela garantit l'échange continu de messages. Compte tenu des limites des réseaux de capteur sans fil, la construction de routes doit être réalisée avec un minimum de contrôle et de consommation de bande passante. La conception des protocoles de routage dans WSN est affectée par plusieurs facteurs exigeants. La communication efficace peut être réalisée dans WSN en surmontant ces facteurs [28].

## **3. Objectifs du routage dans les RCSF**

Le principal défi dans le routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance. En effet, le problème consiste à trouver l'investissement de moindre coût en capacités nominales et de réserves qui assure le routage du trafic nominal et garantit sa survie en cas d'un nœud ou plusieurs nœuds du réseau sont en panne [29].

Donc il est nécessaire que tout protocole de routage soit conçu pour explorer les problèmes suivants :

- Assure un routage optimal.
- Minimise le rechargement.
- Fournir un soutien pour des communications multi-communication fiables.
- Proposer une bonne qualité de latence. etc.

## 4. Les critères de performance des protocoles de routage en RCSF

La performance des réseaux de capteurs sans fil [30] est fondée sur les facteurs suivants :

- **L'énergie** : chaque nœud utilise peu d'énergie pour des activités telles que la détection, le traitement, le stockage et la transmission. Un nœud du réseau doit savoir quelle quantité d'énergie sera utilisée pour effectuer une nouvelle tâche à laquelle il est soumis. L'énergie consommée peut varier en fonction du type de caractéristique ou d'activité à atteindre.

- **Le temps de traitement** : se réfère au temps qu'il faut au nœud dans le réseau pour confirmer l'ensemble de l'opération commençant avec la détection, le traitement ou le stockage des données, la transmission ou la réception des données dans le réseau.

- **Le schéma de transmission** : la transmission des données par les nœuds capteurs à la destination ou à la station de base se fait au moyen d'un schéma de routage à saut unique ou multiple.

- **Evolutivité** : L'évolutivité est un facteur important dans les réseaux de capteurs sans fil. Une zone réseau n'est pas toujours statique, mais change en fonction des besoins des utilisateurs. Tous les nœuds dans le domaine du réseau doivent être évolutifs ou être capables de s'adapter aux changements dans la structure du réseau selon l'utilisateur.

- **Contrôle de paquets** : Un paquet envoyé avant la transmission entre deux nœuds est appelé un paquet de contrôle. Le paquet de contrôle contient la quantité de bits de données envoyés, l'adresse du nœud de destination et certaines informations qui aident à éviter les collisions pendant la transmission.

- **Synchronisation** : Dans les communications radio entre les nœuds d'un CWNF, les capteurs écoutent en permanence les transmissions et consomment de l'énergie s'ils ne sont pas synchronisés entre eux. Pour cela, un nœud doit avoir la même notion de temps pour aller dormir et se réveiller comme ses voisins.

## 5. Classification des protocoles de routage dans les RCSF

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil diffère du routage conventionnel dans les réseaux fixes. Il n'y a pas d'infrastructure, les liaisons sans fil ne sont pas fiables, les nœuds de capteurs peuvent échouer, et les protocoles de routage doivent répondre à des exigences strictes en matière d'économie d'énergie. De nombreux algorithmes de routage ont été développés pour les réseaux sans fil. Tous les principaux protocoles de routage proposés pour les WSN peuvent être divisés en 4 catégories comme les montre dans la figure 2.1 [31].

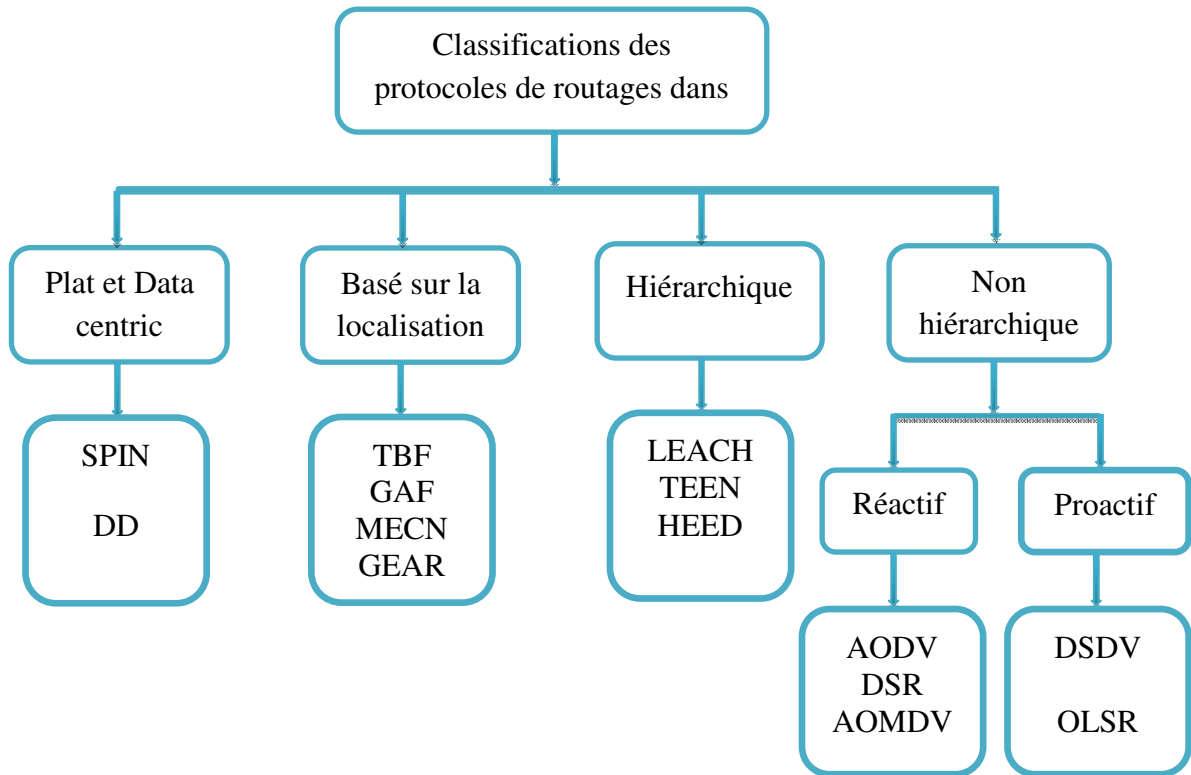


Figure 2.1 : Classifications des protocoles de routage pour les RCSF

## 5.1. Les protocoles à plat et Data-Centric

Appelé aussi un routage centré dans lequel tous les nœuds sont égaux, ont les mêmes tâches à accomplir et peuvent communiquer entre eux sans passer par un nœud ou une passerelle particulière. Si la destination ne fait pas partie de l'environnement source, les données sont transmises via les nœuds intermédiaires en utilisant les sauts multiples.

Parmi ses avantages, la simplicité et donc la possibilité d'établir des contacts sans coût supplémentaire où chaque nœud. Il aura seulement besoin d'informations de ses voisins immédiats. L'inconvénient est l'épuisement des ressources énergétiques des nœuds près de la station de base à cause de tout le trafic vers cette dernière passe obligatoirement par eux. On peut citer comme exemple : SPIN [32], DD [33].

### 5.1.1. Sensor Protocol Information Négociation (SPIN)

SPIN est un protocole de routage adaptatif de haut niveau ou des métadonnées qui transmet l'information d'abord en négociant [32]. Les métadonnées sont échangées entre les capteurs avant d'être transmises via un mécanisme de publication de données, qui est la caractéristique clé de SPIN. Chaque nœud recevant de nouvelles données le fait connaître à ses voisins et voisins intéressés, c'est-à-dire ceux qui n'ont pas les données, récupère les informations en envoyant un message de requête. La négociation de métadonnées de SPIN résout les

problèmes classiques d'inondation tels que le passage d'information redondant, réalisant ainsi beaucoup d'efficacité énergétique.

➤ SPIN utilise 3 messages à savoir :

1. ADV : new data advertisement qui permet généralement à un capteur d'annoncer une métadonnée particulière.
2. REQUEST : d'identification pour demander les données spécifiques.
3. DATA : request for data qui achemine les données réelles.

En SPIN ; les changements topologiques sont localisés puisque chaque nœud n'a besoin de connaître que ses voisins à saut unique. De plus, SPIN n'est pas utilisé pour des applications telles que la détection d'intrusion qui nécessitent une livraison fiable de paquets de données à intervalles réguliers.

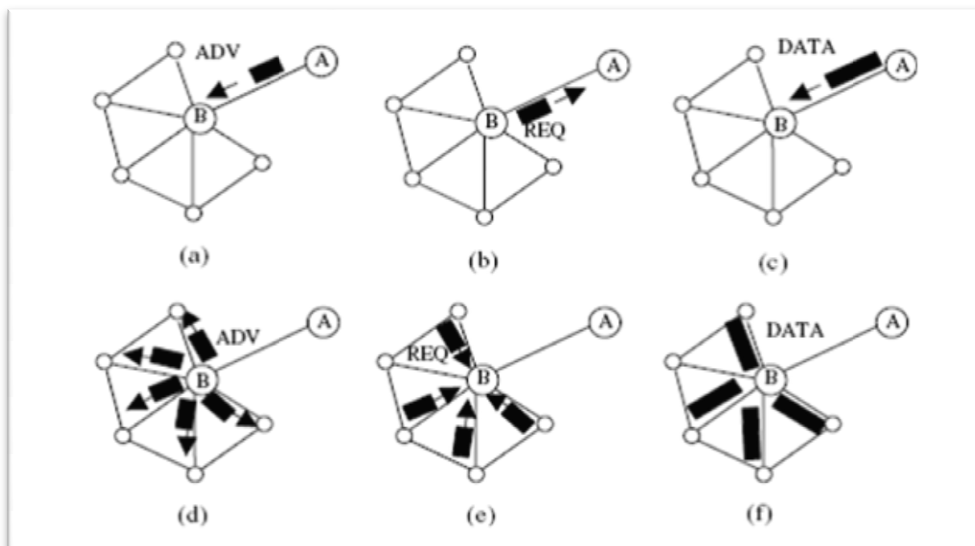


Figure 2.2 : le protocole SPIN

### 5.1.2. Directed Diffusion (DD)

Fut l'un des premiers protocoles centrés-données. Il a été proposé par C.Intanagonwiwat, R.Govindan et D.Estrin et est devenu l'un des protocoles les plus répandus dans les réseaux de capteurs. Sa création représente une importante avancée dans le domaine du routage. Il a été une base pour la conception de plusieurs protocoles de routage pour les RCSF.

Dans la diffusion dirigée, les données sont nommées en utilisant des paires attribut-valeur et renforcement de chemin. La diffusion dirigée est un protocole de routage réactif qui crée des chemins en fonction des besoins, pas à l'avance. L'un de ces chemins est sélectionné par renforcement. Si ce chemin échoue un nouveau ou un alternatif doit être identifié puisque les données sont demandées par des requêtes. En outre, cette méthode est coûteuse en termes de consommation d'énergie et ne représente pas un bon modèle pour WSN (Wireless Sensor

Network). Les données détectées sont stockées dans des paires attribut-valeur. Lorsqu'un nœud connu sous le nom de nœud récepteur souhaite des informations sur un attribut particulier, il diffuse des messages d'intérêt à ses voisins. Ces messages d'intérêt inondent le réseau et sont ajoutés au cache d'intérêt de chaque nœud. Chaque enregistrement d'intérêt dans ce cache a un ou plusieurs gradients qui correspondent aux nœuds voisins qui ont transmis l'intérêt. Le gradient stocke également la vitesse à laquelle les données sont souhaitées, la durée de l'intérêt et un horodatage. Lorsqu'un nœud génère des données qui correspondent à un intérêt dans son cache, il renvoie les données à la source le long des dégradés. La figure 2.3 illustre les phases de fonctionnement de ce protocole [33].

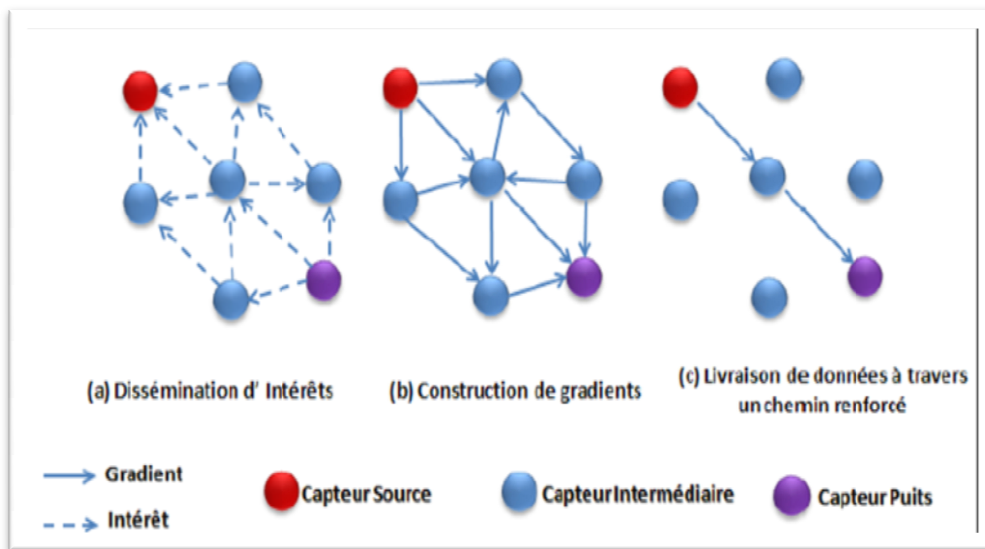


Figure 2.3 : Phases du protocole de diffusion dirigée

### ➤ Les avantages et les inconvénients

- **Avantages**
  - L'agrégation des données utilisées par les protocoles de ce type conserve une quantité considérable d'énergie.
  - Le fait que tous les nœuds d'un réseau plat ont le même rôle et les mêmes propriétés.
  - les nœuds ont besoin de connaître seulement leurs voisins, rend ce protocole passable à l'échelle.
  - La possibilité de réaliser un routage optimal réside de l'une des caractéristiques de routage plat telle que tous les nœuds peuvent communiquer entre eux sans avoir appel à un intermédiaire.
  - Les réseaux à plat permettent aux protocoles de routage d'être simples, puisque les nœuds communiquent entre eux sans avoir appel à un intermédiaire.

- **Inconvénients**
- Réactivité croisée et liaison non spécifique.
- Déséquilibre de la durée de vie du nœud.
- L'énergie du nœud sur le plus court chemin est drainée plus rapidement qu'une autre.
- Technique de synchronisation temporelle pour implémenter l'agrégation de données.
- La mise en correspondance de données avec des requêtes peut nécessiter des frais supplémentaires.

## 5.2. Les protocoles basés sur la localisation

Dans ce type de routage ; Les nœuds de capteurs sont adressés en fonction de leurs localisations. La distance entre les nœuds voisins peut être estimée sur la base des forces entrantes de signal. Des coordonnées relatives des nœuds voisins peuvent être obtenues en échangeant une telle information entre les voisins. Ces informations de localisation permettent le calcul des positions des capteurs et les distances qui les séparent afin de construire les chemins les plus courts entre un nœud source et sa destination. La location des nœuds peut être disponible directement en communiquant avec un satellite en utilisant GPS (système de positionnement global) [34].

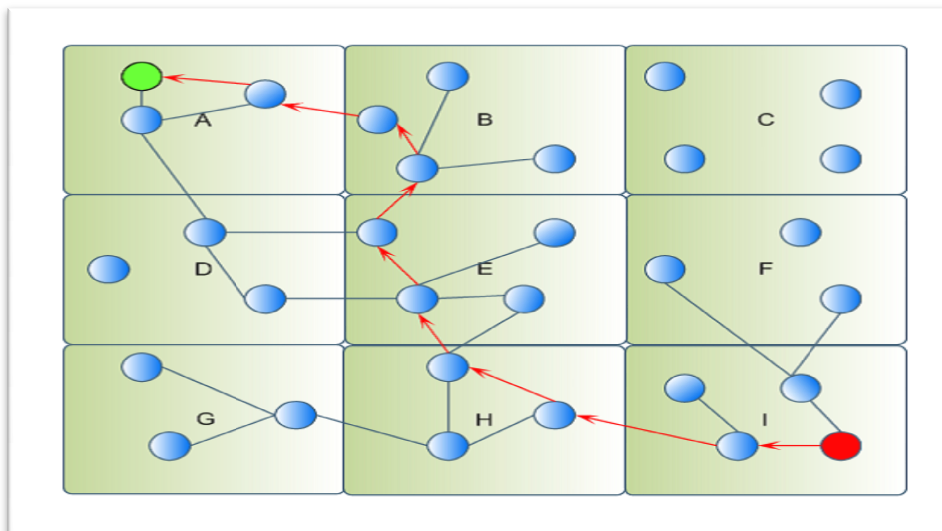


Figure 2.4 : Topologie Basée sur Localisation

Parmi ces protocoles on peut mentionner : TBF [35], GAF [36], MECN [37].

### 5.2.1. Trajectory-Based Transfer (TBF)

TBF est un protocole de routage qui nécessite suffisamment réseau dense et la présence d'un système de coordonnées, par exemple, un GPS, de sorte que les capteurs peuvent se positionner et estimer la distance à leurs voisins. La source spécifie la trajectoire dans un

paquet, mais n'indique pas explicitement le chemin sur une base hop-by-hop. Sur la base des informations de localisation de ses voisins, un capteur de transfert prend une décision gloutonne déterminé le prochain saut qui est le plus proche de la trajectoire fixée par le capteur de source. La maintenance de la route dans TBF n'est pas affectée par la mobilité des capteurs étant donné qu'une route de source est une trajectoire qui n'inclut pas les noms des capteurs de transfert [35].

### 5.2.2. Fidélité Adaptative Géographique (GAF)

GAF est employé pour RCSF car il favorise la conversation d'énergie. Le diagramme de transition d'état tel qu'illustré dans la figure ci-dessous décrit trois étapes, telles que la découverte, l'activité et le sommeil. Une fois qu'un capteur passe en mode veille, il éteint la radio pour économiser l'énergie. Dans l'état de détection, un capteur échange des messages de découverte pour se renseigner sur les autres capteurs de la grille. En état actif, pour notifier des capteurs équivalents sur son état un capteur diffusait périodiquement son message de découverte à eux. GAF fonctionne bien comme un protocole de routage ad hoc normal en termes de latence et de perte de paquets et augmente encore la durée de vie du réseau en économisant de l'énergie dans la transmission [36].

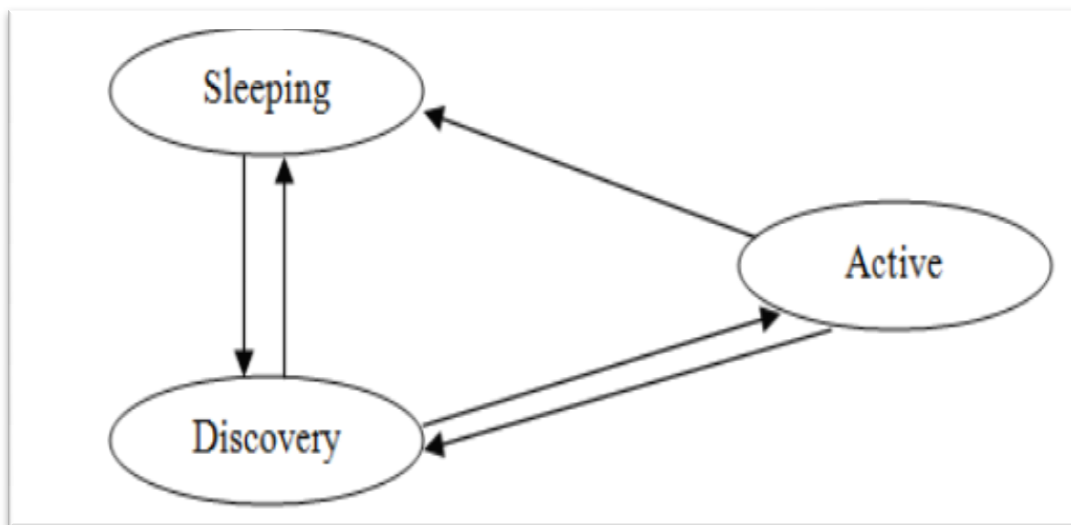


Figure 2.5: Diagramme de transition d'état de GAF

### 5.2.3. Minimum Energy Communication Network (MECN)

C'est un protocole de routage géographique conçu pour des nœuds capteurs équipés d'un GPS à basse puissance. MECN établit et maintient un réseau d'énergie minimale pour les réseaux sans fil en utilisant un GPS de faible puissance.

Ce protocole a 2 phases :

1. Il prend les positions d'un plan bidimensionnel et construit un graphique mince, qui se compose de toutes les enceintes de chaque transmetteur le nœud dans le graphique. Le graphique ci-joint contient des mots-clés pour des raisons de consommation d'énergie.

2. Trouve les meilleurs liens possibles sur le graphique de l'enceinte.

MECN utilise l'algorithme de chemin plus la puissance avec la consommation en tant que métrique de coût [37].

### 5.3. Les protocoles hiérarchiques

Les protocoles de routage hiérarchique dans les RCSF est l'un des domaines les plus émergents et les plus rapides du monde scientifique. Il se compose d'une collection de dispositifs de détection et ces derniers sont connus sous le nom de nœuds de capteur. Chaque capteur est déployé dans le réseau pour surveiller l'état physique ou environnementale comme la température, le son, les vibrations à un endroit différent. Les données sont transférées sur le réseau et chaque nœud de capteur consomme une certaine énergie dans l'envoi et la réception des données.

Le routage hiérarchique est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique. Il se base sur le concept (nœuds standard – nœud maître) où les nœuds standard acheminent leurs messages à leur maître, lequel les achemine ensuite dans le réseau tout entier via d'autres nœuds maîtres jusqu'à la station de base (sink). Un grand nombre de protocoles de routage ont été proposés depuis quelque décennie. Certains des protocoles de routage les plus populaires sont LEACH [38], TEEN [31].

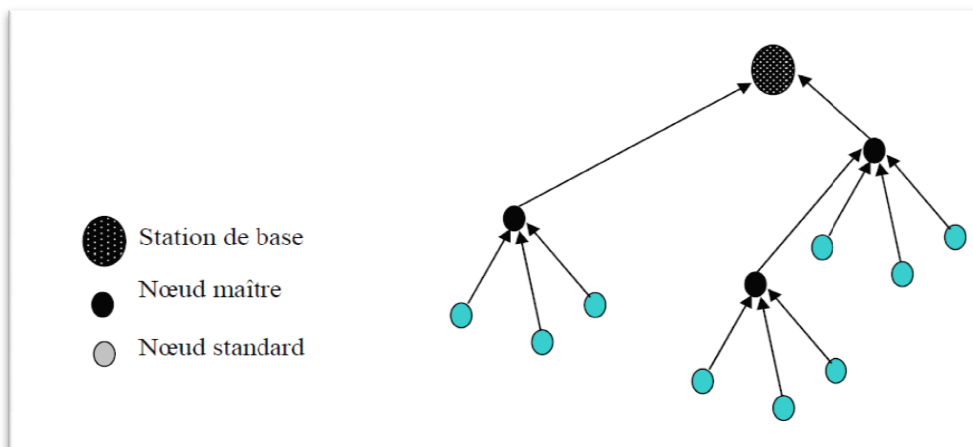


Figure 2.6 : Le routage hiérarchique

#### 5.3.1. Low-Energy Adaptive Clustering. Hierarchy (LEACH)

LEACH est un protocole de routage hiérarchique bien connu appliqué au RCS

LEACH divise le réseau en zones et clusters distribués, des nœuds CH (Cluster-Head) ils sont constitués puis ils sont utilisés comme relais pour atteindre le puits en optimisant la consommation d'énergie en utilisant un algorithme qui utilise la rotation aléatoire des têtes de groupe (CH) à répartir la charge d'énergie de manière égale entre les nœuds du réseau. Un nœud décide quel groupe rejoindre en fonction de la force des signaux reçus. Lorsque les groupes sont formés comme indiqué sur la figure 2.7 tous les nœuds non-CH transmettent leurs données à la tête du groupe. Lorsque le CH reçoit des données de tous les membres du groupe, effectue des fonctions de traitement de données (agrégation et compression de données), et les transmet à la station de base (BS) en fonction de la communication unicast (single hop) [38].

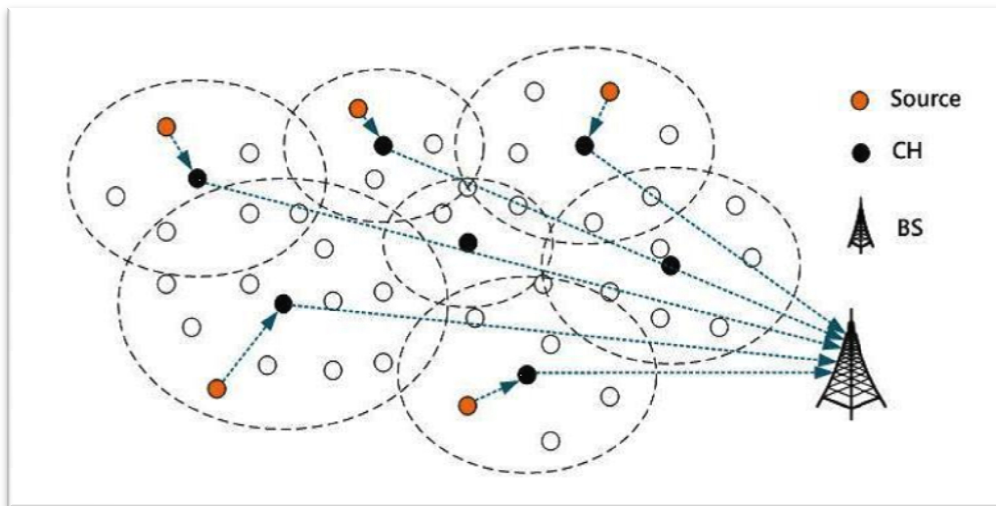


Figure 2.7 : Architecture du routage hiérarchique LEACH

### 5.3.2. Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (TEEN)

TEEN est un protocole de classification hiérarchique, qui regroupe les capteurs en grappes dirigés chacun par un CH. Les capteurs d'un cluster rapportent leurs données détectées à leur CH. Le canal CH envoie des données agrégées au niveau supérieur CH jusqu'à ce que les données atteignent le puits. Ainsi, l'architecture de réseau de capteurs dans TEEN est basée sur un groupement hiérarchique où des nœuds plus proches forment des clusters et ce processus passe au deuxième niveau jusqu'à ce que la BS (sink) soit atteinte. TEEN est utile pour les applications où les utilisateurs peuvent contrôler un compromis entre l'efficacité énergétique, la précision des données et le temps de réponse de façon dynamique [31].

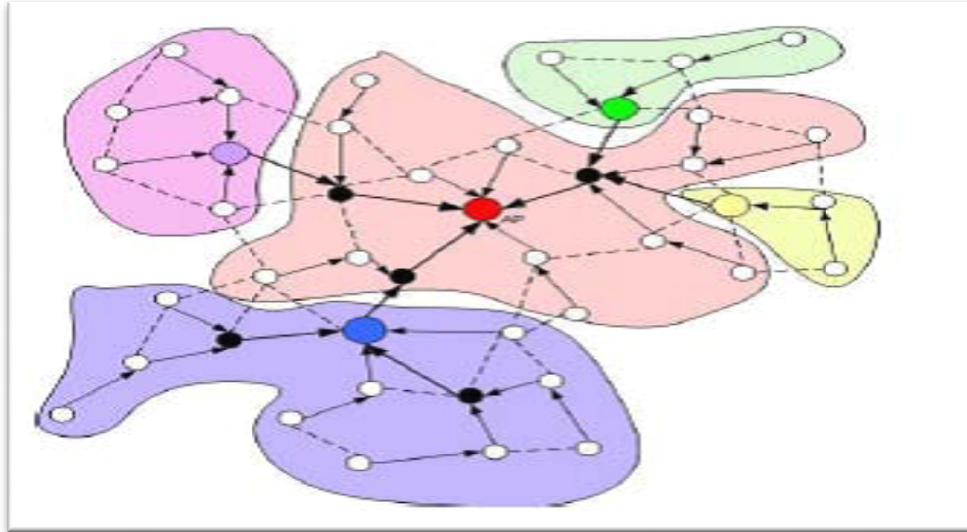


Figure 2.8 : Approche à base de cluster

## 5.4. Les protocoles non hiérarchiques

Ce sont des protocoles de routage ad hoc adaptés au RCSF. Ces protocoles peuvent être classés en deux catégories : les protocoles réactifs et proactifs.

### 5.4.1. Les protocoles réactifs

Un protocole réactif permet d'établir une table de routage lorsqu'un nœud capteur décide de transmettre des données (suite à un événement). Il n'a pas de données dans le réseau. Sans connaître la topologie de cette énergie ou de l'énergie disponible.

Le protocole réactif permettra de collecter les différentes données des entités du réseau pour déterminer la route la plus optimale à prendre pour communiquer avec un autre nœud du réseau, ou avec les nœuds puits (sinks) [39]. Parmi les protocoles les plus utilisables dans ce type on peut mentionner :

#### 5.4.1.1. Dynamic Source Routing (DSR)

DSR (*Dynamic Source Routing*) est un protocole réactif basé sur l'utilisation de la technique source routing (routage source) [40]. C'est à dire que le chemin à parcourir par le paquet est inclus dans l'entête du paquet de données par la source pour être lu par les routeurs.

Ce protocole ne génère pas de messages périodiques, et ne réagit que lors des changements concernant une communication en cours entre deux nœuds.

Dans cette technique les nœuds intermédiaires ne doivent pas nécessairement garder trace de la route. Cela permet de résoudre facilement le problème des boucles. En Effet, chaque paquet contient dans son en-tête la liste complète des adresses des nœuds à traverser vers la destination. Le protocole DSR, est composé de deux mécanismes distincts ; le premier est

utilisé pour rechercher les routes à la demande, et le second est pour s'occuper de la maintenance de route de communication en cours.

#### 5.4.1.2. Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV)

Le protocole de routage AODV (vecteur de distance ad-hoc sur demande) est conçu pour les réseaux ad hoc avec des nœuds mobiles. C'est un protocole multi-sauts, adaptable et dynamique par rapport aux conditions de la topologie, et évite les situations en boucle fermée dans le routage. Ce protocole utilise trois types de paquets (message), RREQ (Route Request), RREP (Route Reply), et RERR (Route Error). Ces messages sont reçus via le protocole UDP en attribuant une adresse IP à chaque nœud [41].

Lorsqu'une source recherche une route vers une destination, une requête RREQ est transmise en broadcast à tout le voisinage. Chaque nœuds qui reçoit cette requête envoie de nouveau cette requête jusqu'à ce que celle-ci atteigne sa destination. La route est validée en renvoyant une réponse RREP via le chemin inverse de la requête jusqu'à sa source. Chaque nœud recevant la requête sauvegarde dans sa table l'adresse du nœud précédent. Lorsqu'un lien est reconnu avec un nœud, un message d'erreur RERR est envoyé aux autres nœuds pour les avertir que la route vers les destinations qui ne sont plus disponibles.

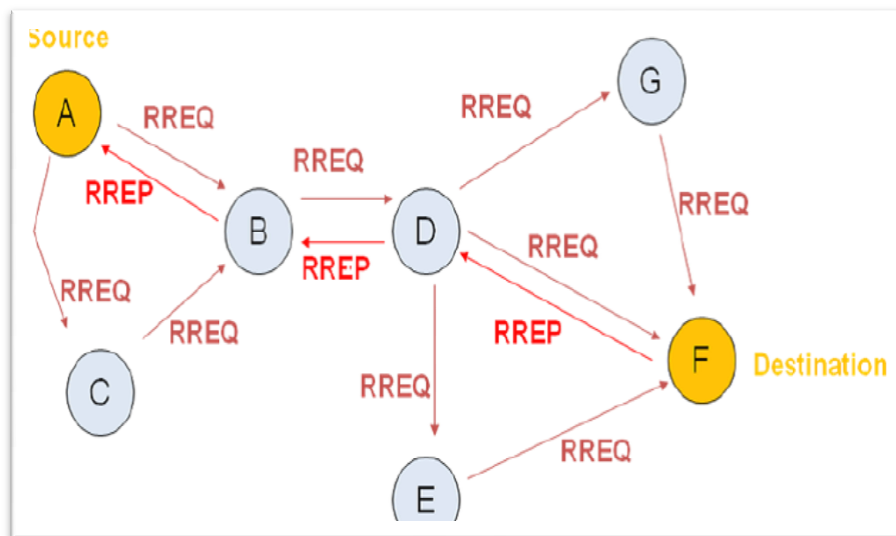


Figure 2.9 : exemple de protocole AODV

Le protocole AODV utilise la table de routage [41] qui contient essentiellement :

- Adresse IP de destination
- Numéro de séquence de destination
- Indicateur de numéro de séquence de destination valide
- Autres drapeaux d'état et de routage
- Interface réseau

- Hop Count (nécessaire pour atteindre la destination)
- Prochain Hop
- Liste des précurseurs
- Durée de vie de la route

A chaque utilisation d'une entrée, son temps d'expiration est remis à jour. Si une nouvelle route est nécessaire, ou si une route disparaît, la mise à jour de ces tables s'effectue par l'échange de trois types de messages entre les nœuds :

- ✓ RREQ (Route Request) : Message de demande de route.
- ✓ RREP (Route Reply) : Message de réponse à un RREQ.
- ✓ RERR (Route Error) : Message qui signale la perte d'une route [42].

Le format des paquets est donné ci-dessous :

- **RREQ**: contient essentiellement les champs suivants :

Type	J	R	G	D	U	Reserved	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP Address							
Destination SequenceNumber							
OriginatorIP Address							
Source SequenceNumber							

Table 2.1 : Format de message RREQ

- **RREP**: contient essentiellement les champs suivants :

Type	R	A	Reserved	Hop Count
Destination IP Address				
Destination Séquence Number				
Originator IP Address				
Lifetime				

Table 2.2 : Format de message RREP

- **RERR** : Un message d'erreur de route contient essentiellement les champs

Type	N	Reserved	DectCount
Type N ReservedDectCount			
Type N ReservedDectCount			

Table 2.3 : Format de message RERR

#### d. principe de fonctionnement

- **Numéros de séquences**

Dans AODV, chaque nœud maintient une table qui contient une entrée pour chaque destination accessible. Pour éviter le problème du comptage à l'infini, AODV utilise les numéros de séquences dans les tables de routage en plus de la distance. Chaque nœud possède un numéro de séquence, et il est le seul habilité à l'incrémenter [43].

- **Découverte d'une route**

Un nœud diffuse une requête de route (RREQ) pour connaître la route vers une certaine destination si celle-ci n'est pas connue au préalable, ou si le chemin existant vers la destination a expiré sa durée de vie ou il est devenu défaillant.

Le champ numéro de séquence de destination du paquet RREQ, contient la dernière valeur connue du numéro de séquence, recopiée de la table de routage. Si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut. Le numéro de séquence source du paquet RREQ contient la valeur du numéro de séquence du nœud source.

Après la diffusion du RREQ, la source attend le paquet réponse de route (RREP). Si ce dernier n'est pas reçu durant une certaine période (appelée RREP\_WAIT\_TIME), la source peut rediffuser une nouvelle requête RREQ. Quand un nœud de transit (intermédiaire) envoie le paquet de la requête à un voisin, il sauvegarde aussi l'identificateur du nœud à partir duquel la première copie de la requête est reçue [44].

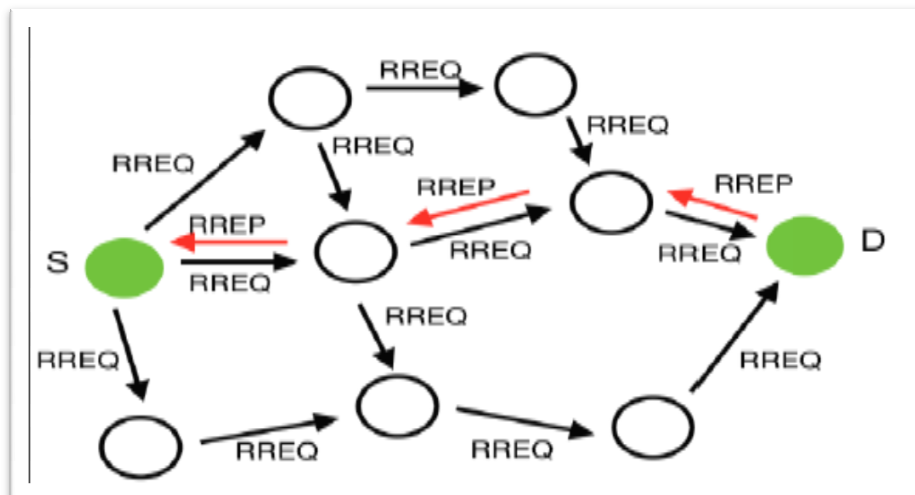


Figure 2.10 : Méthode de construction d'une route

#### e. Avantages et inconvénients d'AODV

- L'avantage de ce protocole est qu'il ne présente pas de boucle de routage et évite le problème du "comptage à l'infini" de Bellman Ford.

- Il est possible d'introduire la qualité de service dans AODV par l'ajout d'un champ dans les paquets de contrôle RREQ, RREP.
- À la réception d'un message RREQ, chaque mobile vérifie qu'il est en mesure d'honorer le service demandé, avant de retransmettre le message.
- Parmi les inconvénients du protocole de routage AODV, est le fait qu'il n'assure pas l'utilisation du meilleur chemin existant entre la source et la destination.
- le protocole AODV basé sur les algorithmes de recherche des plus courts chemins [45].

#### **5.4.1.3. Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector (AOMDV)**

AOMDV est synonyme de protocole de routage de vecteur de distance multipath à la demande ad-hoc. AOMDV est une extension multipath au protocole AODV.

Il a de nombreuses caractéristiques qui sont similaires à AODV. Il dépend de la théorie des vecteurs de distance et utilise une technique de routage saut par saut. En outre, AOMDV découvre également des routes à la demande en utilisant une méthode de découverte d'itinéraire. La variation la plus importante est le nombre de routes trouvées dans chaque découverte d'itinéraire. Dans AOMDV, la transmission RREQ de la source vers la cible établit plusieurs chemins de retour, à la fois sur les nœuds intermédiaires en plus de la destination. Plusieurs RREP naviguent sur cette route inverse pour former plusieurs routes vers la cible au niveau des nœuds source et intermédiaire. De plus, AOMDV rend également disponibles des nœuds intermédiaires avec des routes alternatives, car ils sont établis pour aider à réduire la fréquence de découverte des routes [46].

La base du protocole AOMDV consiste à garantir que les routes multiples révélées sont sans boucle et disjointes, et à découvrir de manière compétente de telles routes au moyen d'une découverte d'itinéraire basée sur les inondations. Le chemin AOMDV révisé, exploité localement à chaque nœud, joue un rôle majeur dans la préservation des caractéristiques de liberté de boucle et de disjonction.

AOMDV dépend plus des informations de routage précédemment disponibles dans le protocole AODV fondamental, empêchant ainsi le surcoût acquis dans la détermination des chemins multiples. Plus précisément, il n'utilise aucun paquet de contrôle particulier. Des RREP et RERR supplémentaires pour la découverte et la protection par trajets multiples ainsi qu'une petite quantité de champs supplémentaires dans les paquets de contrôle de routage à savoir (RREQ, RREP et RERR) constituent le seul sur débit supplémentaire dans AOMDV comparé à AODV.

➤ **Les avantages**

- Il établit l'itinéraire à la demande.
- Il crée des nœuds sans boucle.
- Il maintient la connectivité.
- Récupération rapide et efficace des échecs.

➤ **Les inconvénients**

L'inconvénient de l'utilisation d'AOMDV est qu'il a plus de frais de messages pendant la découverte d'itinéraire en raison de l'inondation accrue et comme il s'agit d'un protocole de routage multipath, la destination répond aux multiples RREQ qui entraînent des paquets plus longs en réponse à un seul paquet RREQ. À un contrôle lourd frais général.

#### 5.4.2. Les protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs suivent le principe du routage réseau câblage Ils sont basés sur l'existence de tables de routage dans chacun des nœuds. Lorsqu'un nœud du réseau souhaite envoyer un message, vérifiez sa table de routage pour connaître l'itinéraire à suivre pour le destinataire du message. Le principal avantage de ces protocoles est leur capacité de réponse. En fait, à tout moment, chaque élément du réseau connaît un moyen d'atteindre les autres membres du réseau.

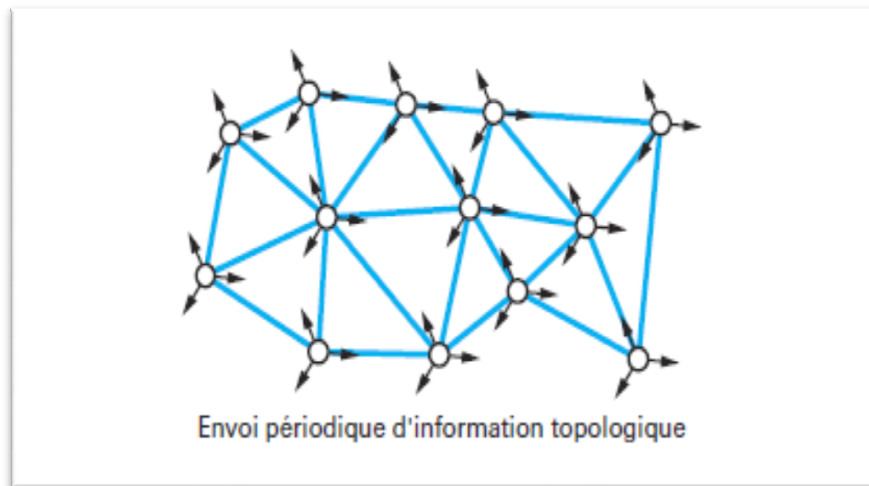


Figure 2.11 : Principe de fonctionnement des protocoles proactifs

##### 5.4.2.1. Fisheye State Routing(FSR)

FSR est un protocole classique de type état des liens [47]. Son originalité réside dans le fait que chaque nœud diffuse son voisinage local avec une fréquence qui dépend du nombre de sauts qu'un paquet doit effectuer. Par conséquent, si un nœud peut obtenir des informations précises sur son voisinage local, les informations concernant les nœuds à grande distance lui sont moins disponibles.

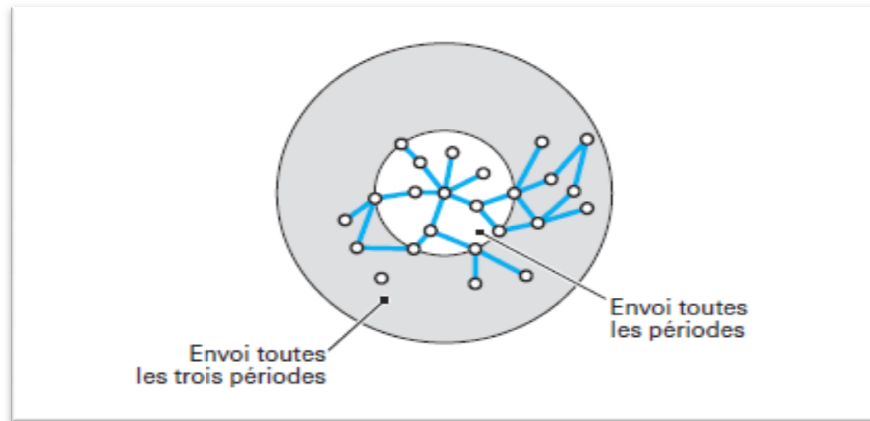


Figure 2.12 : Principe de fonctionnement de FSR

#### 5.4.2.2. Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV)

DSDV est un algorithme de routage dynamique piloté par table. Cet algorithme est dérivé de la technique de routage Bellman-Ford avec des modifications pour produire des routes de routage sans boucles. Les tables de routage sont créées sur chaque nœud mobile. Ils contiennent des routes vers toutes les destinations possibles dans le réseau avec le nombre de sauts dans chaque route. Chaque entrée de la table est associée à un numéro de séquence attribué par la destination. L'algorithme utilise la valeur du nombre pour déterminer si l'itinéraire est valide, nouveau ou précédent. Les tables sont mises à jour régulièrement pour assurer la cohérence de toutes les tables entre tous les nœuds. Les mises à jour peuvent transférer toutes les informations de la table ou uniquement les informations modifiées dans cette table. Les nouveaux transferts d'itinéraire contiennent l'adresse de destination ainsi que le nombre de sauts pour atteindre la destination. De plus, il y a un numéro de séquence de destinations et un numéro de séquence supplémentaire associé à la transmission. L'itinéraire avec le dernier numéro de séquence est toujours composé pour renvoyer le paquet. Dans le cas où deux routes ont le même numéro de séquence, la route avec la plus petite métrique, par exemple moins de sauts, est choisie pour raccourcir la route [48].

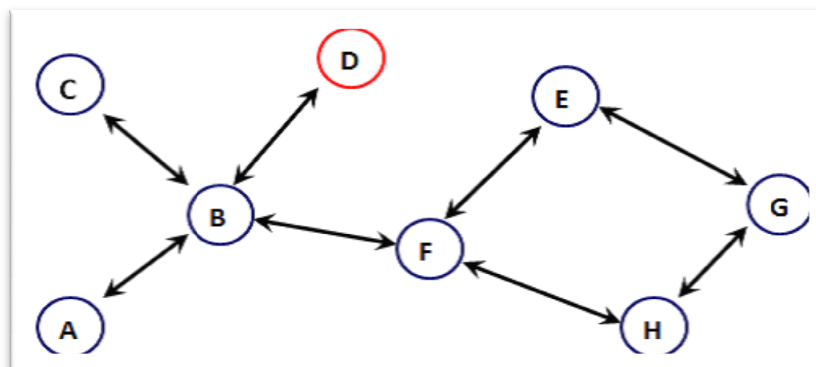


Figure 2.13: Exemple utilisant le protocole DSDV

## 6. La comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs

Les protocoles proactifs	Les protocoles réactifs
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Echange de paquets de contrôle</li> <li>• Mis à jour continue des tables de routage</li> <li>• Les routes sont immédiatement disponibles à la demande</li> <li>• Le trafic de contrôle et de mise à jour peut être important et partiellement inutile</li> </ul> <p>Exemple : FSR</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de tables de routage maintenues et continu</li> <li>• Réaction à la demande en diffusion de requêtes</li> <li>• Pas de trafic de contrôle continu pour les routes non utilisées</li> <li>• Cout important pour la mise en place des routes (inondation)</li> <li>• Délais importants avant l'ouverture de chaque route</li> <li>• Exemple ; DSR</li> </ul>

Table 2.4 : comparaison entre les protocoles proactifs et réactifs [49]

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré les principaux protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Ces réseaux peuvent être classés selon quatre catégories principales les protocoles data-centric, les protocoles basés sur la localisation, les protocoles hiérarchiques, et les protocoles non hiérarchiques. Cette dernière se divise en deux types les protocoles réactifs et proactifs.

Dans le cadre de chapitre qui suit ; nous illustrerons les différents résultats de simulation obtenus à l'aide d'un simulateur spécialisé exclusivement pour les RCSF c'est le second Network Simulator 2 (NS2). Nous allons présenter deux études ; une est comparative entre deux protocoles dédiés aux réseaux ad hoc classiques : AODV et AOMDV et l'autre pour les RCSF : DD.

**Chapitre 3**

**Simulation et**

**évaluation des**

**performances des**

**protocoles AODV,**

**AOMDV et DD**

## **1. Introduction**

Pour tester les performances d'une solution apportée à un problème de communication dans un réseau, il n'est pas toujours possible d'accéder aux infrastructures nécessaires en raison de leurs coûts élevés. De plus, les expérimentations réelles n'offrent souvent pas une grande souplesse. Rappelons que les réseaux sans fil sont des réseaux qui englobent plusieurs unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque et dont le seul moyen de communication est l'utilisation des interfaces radio. En effet, il serait très coûteux voire impossible de mettre en place un réseau à des fins de tests de certains critères. Pour remédier à ce problème et afin de tester les performances d'un nouveau protocole, on a recours à la simulation qui met à la disposition de l'utilisateur un environnement d'expérimentation.

Plusieurs protocoles de routage ad hoc tels qu'AODV et AOMDV ainsi que les protocoles de routage RCSF (DD) ont été proposés pour ce genre de réseau.

Dans ce dernier chapitre nous allons présenter en premier lieu l'environnement de simulation utilisé avec les métriques de performances mesurées afin de comparer ces deux protocoles ad hoc entre eux et une évaluation de protocole Directed Diffusion dédié directement pour les RCSF. Enfin nous exposons les contextes de simulation et l'interprétation des résultats obtenus.

## **2. Les outils de la simulation**

La simulation est une technique de modélisation du monde réel. Elle est la plus utilisée pour l'évaluation des performances des protocoles de routage dans le domaine des réseaux de capteurs. Elle permet de représenter le fonctionnement d'un système composé de différents centres d'activité elle est largement utilisée afin d'évaluer de nouvelles architectures et protocoles de communication, et de tester ces nouveaux protocoles à moindre coût et d'éviter les problèmes pouvant survenir lors de leur mise en œuvre effective [48].

Dans le domaine de réseaux, il existe différents types de simulateurs. Les plus prédominants sont : **NS-2, NS-3, J-Sim, Glomosim et OMNET+** + ... etc. Nous allons découvrir les différences entre eux [49].

- ✓ **Network Simulator 2 - NS2** : C'est un logiciel de simulation multicouche. NS2 est un simulateur orienté objet. Les scénarios de simulation sont écrits avec le langage Otcl/tk, mais les protocoles en C++. Il permet la simulation des réseaux Ad hoc et RCSF.

- ✓ **Network Simulator 3 - NS3** : C'est un programme open source, sous les termes GNU GPL v2. Une extension de simulateur NS2. Il peut être utilisé sur les plateformes Linux/Unix, OS X(Mac), et Windows (via Cygwin ou une machine virtuelle). Il utilise deux langages de programmation : C + +, Python. Contrairement à NS2, tout est écrit en C++ sous NS3.
- ✓ **J-SIM** : J-Sim permet de simuler des réseaux de l'ordre de 1000 nœuds. Le passage à l'échelle peut toutefois être amélioré. J-Sim utilise différemment deux langages : Java et TCL. L'analyse des résultats est aisée et son architecture très modulaire. L'architecture et le code sont suffisamment bien structurés pour permettre une prise en main relativement rapide Il permet d'utiliser n'importe quelle application Java comme générateur de trafic.
- ✓ **Global Mobile Simulator - Glomosim** : Il permet la simulation d'environnement à grande échelle pour des réseaux sans fil et filaires. Il est capable de simuler un réseau purement sans fil, avec tous les protocoles de routage que cela inclut (AODV, DSR, ODMRP, WRP, FSR, ...).
- ✓ **OMNET++** : Il a principalement pour but de simuler des communications réseaux. Son architecture de base flexible lui permet même de simuler des architectures matérielles et des processus commerciaux .Omnet++ gère nativement le TCP / IP, le SCSI et le FDDI. Les composants d'OMNET++ sont codés en C++, puis assemblés sous un modèle d'architecture plus large.

## **2.1. Choix de l'environnement de simulation**

Dans notre travail Notre choix s'est porté sur le simulateur du réseau NS2 afin de simuler les trois protocoles sélectionnés et ceci pour les raisons suivantes :

NS-2 est utilisé sous un environnement Linux [50]. Certain membre de l'équipe utilise Cygwin pour utiliser NS-2 sous Windows. Son domaine d'utilisation est la recherche et l'éducation. Ce domaine-là apparait par exemple dans la mise en place d'une topologie qui n'a pas encore été testée et de pouvoir modifier ses paramètres, tout comme ces simulateurs sont utilisés pour tester de nouveaux protocoles avant de les utilisés réellement. Il est aussi :

- Gratuit et très utilisé avec une Mis à jour régulier.
- Son modèle libre permet l'ajout rapide de modèles correspondant à des technologies émergentes. Ceci le rend le meilleur simulateur par évènements discrets d'après les spécialistes de télécommunications.
- Open-source (Disponibilité du code).

- Flexibilité : Étude des cas difficiles à reproduire dans la réalité.
- Faible coût des expérimentations.
- Reproductibilité des résultats : Tout le monde peut contribuer au code.
- Exhaustif : de nombreux protocoles et mécanismes mis en œuvre dans NS 2.

## **2.2. Présentation de NS-2**

Le simulateur NS-2[51] fournit un environnement de simulation sans fil complet appelé CMU Wireless Model. Ce modèle a été développé dans le cadre du projet Monarch (CMU Monarch Project, 1999), il a été intégré dans NS-2 dès 1998-1999. Il est considéré comme un outil logiciel de simulation de réseaux informatiques développé à LBNL (Lawrence *Berkeley National Laboratory*), il permet de simuler différents types de réseau, incluant les réseaux filaires et sans fil. Son langage de base est le C++ et interfacé via Otcl ; C++ est utilisé pour faire fonctionner le corps du simulateur et OTcl est une extension orientée objet de Tcl (*Tool command language*) est utilisé comme interface et interprète pour les scripts de simulation, et permet une facile intégration avec d'autres langages. Dans NS-2 il existe un module NAM (L'outil Network AniMator) qui permet de visualiser des animations de la simulation.

Le simulateur NS actuel est particulièrement bien adapté aux réseaux à commutation de paquets et à la réalisation de simulations de grande taille (le test du passage à l'échelle). Il contient les fonctionnalités nécessaires à l'étude des algorithmes de routage unicast ou multicast, des protocoles de transport, de session, de réservation, des services intégrés, et des protocoles d'application comme FTP ...etc. La liste des principaux composants actuellement disponibles dans NS par catégorie est :

- Application : Web, ftp, Telnet, générateur de trafic (CBR...);
- transport : TCP, UDP, RTP, SRM ;
- routage unicast : Statique, dynamique (vecteur distance) ;
- routage multicast : DVMRP, PIM ;
- gestion de file d'attente : RED, DropTail, Tokenbucket.

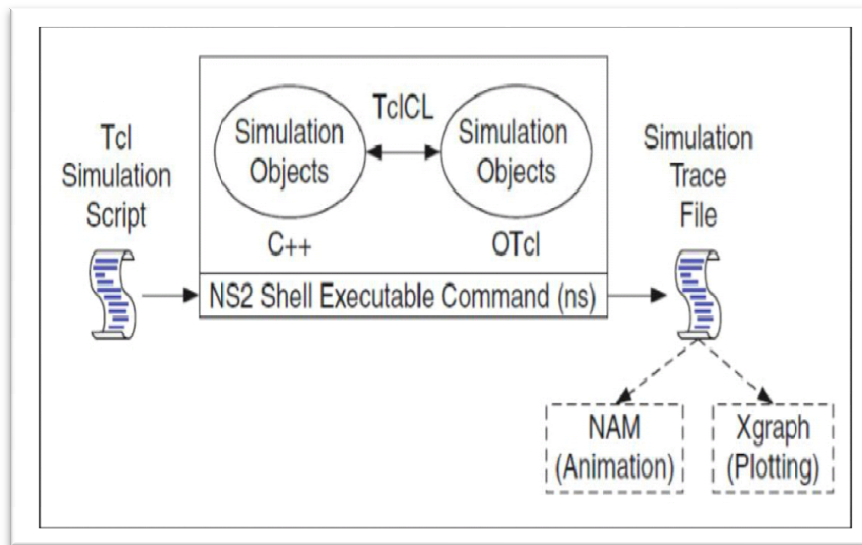


Figure 3.1 : Architecture générale du NS2

### 2.2.1. Script TCL

Est un scénario de simulation dans NS2 est créé en commençant par un script TCL. Ce script [52] va regrouper tous les besoins d'un réseau comme paramètres du canal, des couches OSI, la taille du champ de la simulation, positions des nœuds, le modèle de propagation, le trafic (couche application), le traçage des évènements, et beaucoup d' autres caractéristiques du réseau.

### 2.2.2. NAM

Est un outil de visualisation qui présente deux intérêts principaux : représenter la topologie d'un réseau décrit avec NS-2, et afficher temporellement les résultats d'une trace d'exécution NS-2. Par exemple, il est capable de représenter des paquets TCP ou UDP, la rupture d'un lien entre nœuds, ou encore de représenter les paquets rejetés d'une file d'attente pleine. Ce logiciel est souvent appelé directement depuis les scripts TCL pour NS-2, pour visualiser directement le résultat de la simulation [53].

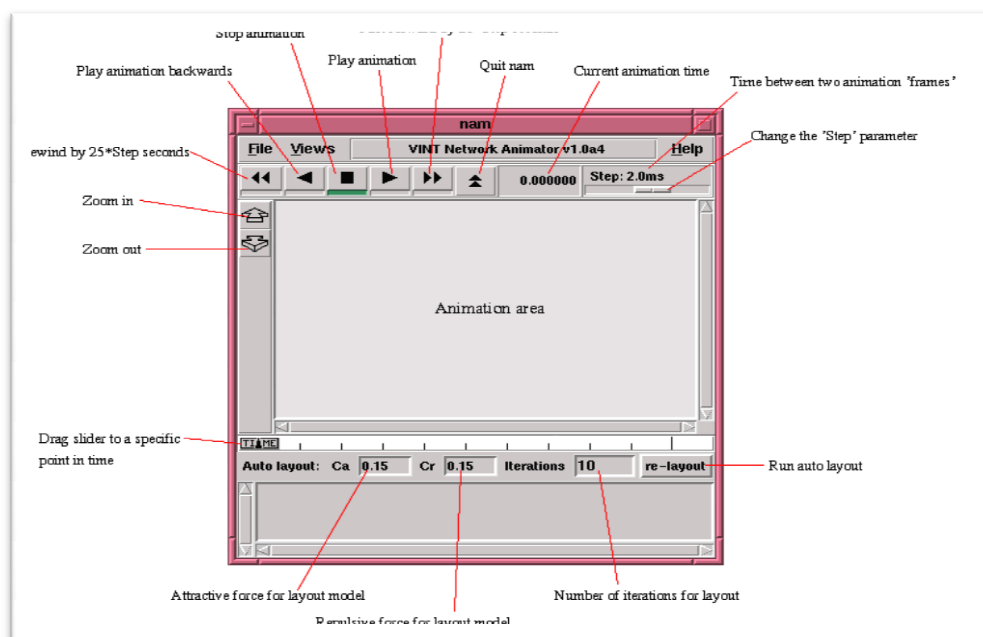


Figure 3.2 : Outil de visualisation NAM

### 3. Caractéristiques d'une entité communicante sous NS-2

Le nœud (entité communicante) constitue l'élément de base de notre modèle. Un nœud dans NS-2 est une classe définie dans OTCL, qui a une adresse et qui contient trois entités : le « classifieur », le lien et l'agent [54].

#### 3.1. Le Classifieur

La fonction d'un nœud est d'examiner des champs du paquet reçu, et plus précisément, l'adresse source et l'adresse destination. Selon ces valeurs, le nœud envoie ce paquet sur ses interfaces de sortie (F). En NS-2, ceci est effectué par un objet qui s'appelle «classifieur ». Il existe plusieurs types de classifieur qui sont utilisés pour différents buts :

- ✓ « adresse classifieur » : il est utilisé pour traiter les paquets unicast, son rôle est de sélectionner les paquets adressés directement au nœud, et de choisir le lien vers le prochain nœud ;
- ✓ « port classifieur » : son rôle est de sélectionner l'agent auquel le paquet est destiné ;
- ✓ « multicast classifieur » : il est utilisé pour classifieur les paquets multicast.

#### 3.2. Le lien

Il est utilisé pour relier les nœuds. Un lien est défini par plusieurs paramètres comme : sa bande passante, le point d'entrée, la durée de vie de chaque paquet, etc. NS2 présente plusieurs types de liens, ainsi on peut distinguer des liens unidirectionnels ou bidirectionnels, des liens filaires et des liens non filaires pour modéliser les réseaux sans fils.

### 3.3 .L'agent

Les agents représentent des points terminaux [55], là où des paquets de couche réseau sont construits ou consommés. Ces agents constituent le troisième composant du nœud. Dans NS2, le rôle de l'agent est de fournir l'adresse de destination, les fonctions pour générer les paquets et l'interface à la classe application (voir figure).

Dans NS2 il existe plusieurs types d'agents, chacun a un rôle spécifique :

- agent TCP : pour émettre un trafic TCP ;
- agent UDP : pour émettre un trafic UDP ;
- agent TCP Sink : pour la réception du trafic TCP ;
- agent NULL : pour la réception des paquets UDP.

La figure représente les entités existantes dans un nœud et les liens entre ses entités.

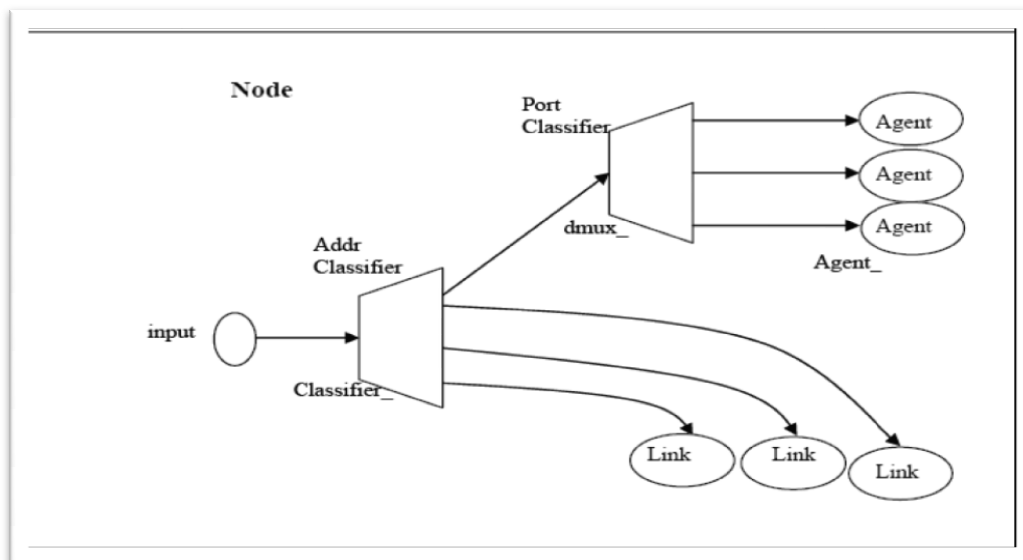


Figure 3.3 : Schéma d'un nœud dans NS2

## 4. Le processus de simulation

Le processus de simulation en utilisant NS-2 est composé de trois phases principales [56] :

- **Phase de préparation** : s'occupe de la génération des fichiers d'entrées. A cette étape, on introduit des fichiers de scripts **Otcl** qui décrivent l'environnement avec tous ses nœuds, leurs déplacements et leur trafic de données
- **Phase de simulation** : pour lancer les simulations et générer les traces.
- **Phase d'analyse** : pour analyser les traces et générer les courbes.

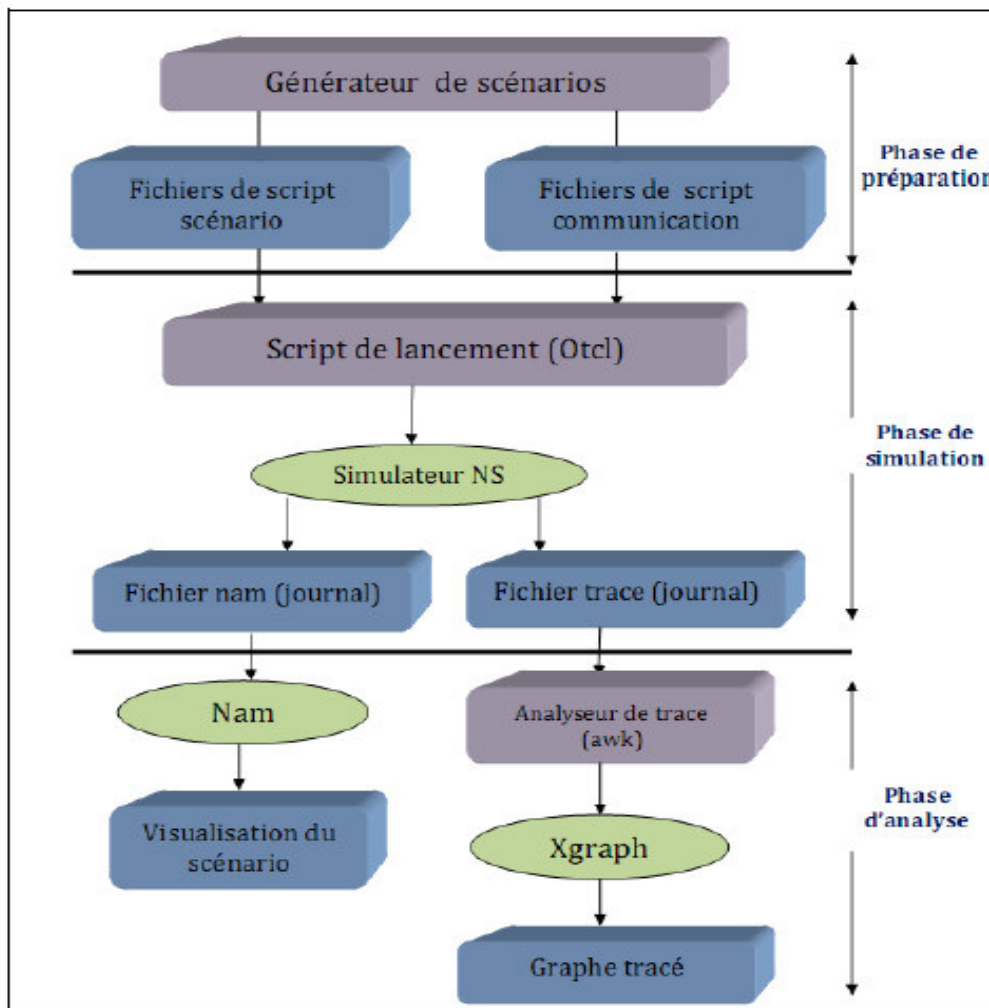


Figure 3.4 : Processus de simulation NS-2

## 5. Métriques de performances

L'objectif principale de notre projet est de faire une évaluation des performances pour les protocoles de routages AODV, AOMDV et Directed Diffusion nous nous sommes focaliser sur les métrique suivantes :

### 5.1. Débit

Ce paramètre représente le ratio du nombre total des paquets reçus sur le temps total de la durée de la simulation. Cette métrique est une preuve que le réseau parvient à envoyer les informations constamment au point de collecte. L'expression mathématique est la suivante :

$$\text{Throughput} = \frac{\sum \text{Nb de bit reçu}}{\text{temps de simulation}} \quad (1)$$

### 5.2. Paquets perdus

Représente le nombre total de paquets perdus durant la simulation. Les paquets perdus sont

due aux collisions durant les transmissions. La formule mathématique représentative de cette métrique est la suivante :

$$\text{Taux paquet perdus} = \frac{\text{Nombre des paquets envoyés} - \text{Nombre des paquets reçus}}{\text{Nombre des paquets envoyés}} * 100 \quad (2)$$

### 5.3. Délai (End-to-end Delay)

Représente le temps mis par les paquets d'information du nœud source au nœud de destination. Ce délai comprend également le temps de la découverte des chemins de routage de l'information, et les files d'attente lors des retransmissions des paquets. Il est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Délai} = \frac{\sum(\text{TempsReception} - \text{TempsEnvoie})}{\sum \text{NB des paquet recue}} \quad (3)$$

### 5.4. Consommation d'énergie

L'énergie c'est l'un des principaux critères de performance pour un réseau de capteur sans fil. L'énergie consommée pendant l'émission et la réception des messages dans la simulation est donné par la relation suivante :

➤ Pour la transmission est donnée par :

$$E_e = E_{elec} * pk + E_{amp} * pk * D^2 \quad (4)$$

Où :

- $E_{elec}$  : l'énergie consommée par le transceiver électronique.
- $pk$  : la taille d'un message.
- $E_{amp}$  : l'énergie consommée par l'amplificateur d'émetteur.
- $D$  : la distance en mètre entre l'émetteur et le récepteur.

➤ Pour la réception est donnée par :

$$E_r = E_{elec} * pk \quad (5)$$

## 6. Simulation

### 6.1. Paramètres de simulation

Les différents paramètres utilisés durant nos simulations sont reportés dans le tableau Suivant :

Paramètres	Scénario 1	Scénario 2
Protocoles	AODV, AOMDV	DD
Nombre de nœuds	100	150
Taille du réseau	800m * 800m	670m * 670m
Déploiement des nœuds	Aléatoire	Aléatoire
Temps de simulation	100s	100s
Le modèle d'antenne	Omni antenna	Omni antenna
Energie initiale	50j	50j
Taille de paquet	512 bit	512 bit
Mobilité	RandomWaypoint	RandomWaypoint
Simulateur	NS2	NS2

Table 3.1 : Paramètres de simulation et leurs valeurs dans les différents scénarios

## **6.2. Discussion des résultats**

Les protocoles que nous avons simulés dans notre étude sont : AODV, AOMDV et Directed Diffusion(DD). Afin d'évaluer ces derniers, on revient sur les métriques de performances mentionnés précédemment. Pour l'évaluation des protocoles AODV et AOMDV nous avons examinés quatre paramètres tel que : Délai, Débit, Nombre de paquet perdus et Consommation d'énergie et un seul paramètre qui est la Consommation d'énergie pour le protocole DD.

### **6.2.1. Premier scénario**

Dans ce scénario nous discutons les résultats de simulations obtenus suivant les métriques de performances citées précédemment entre AODV et AOMDV.

#### **a / Le délai de bout en bout**

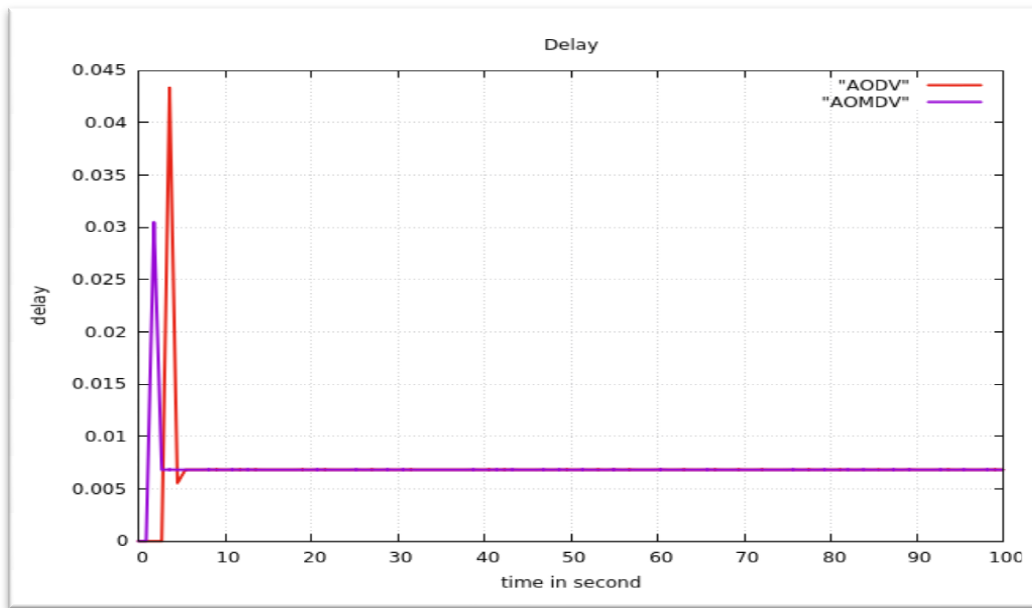


Figure 3.5 : Délai de bout en bout en fonction de temps

La figure 3.5 représente le délai de bout en bout des protocoles comparés. D’après cette figure on peut voir que le délai du réseau augmente de 0 jusqu’à atteindre la valeur 0.03 pour le protocole AOMDV ; un délai considérablement plus élevé pour AODV presque égale à 0.045. Le délai de protocole AODV est très important à cause des ruptures de liens (échec des chemins) parce que les liens sont moins stables. AOMDV installe des liens plus stables. Alors on conclure que les performances du protocole AODV ne sont pas en terme de délai.

**b /Débit(Throughput)**

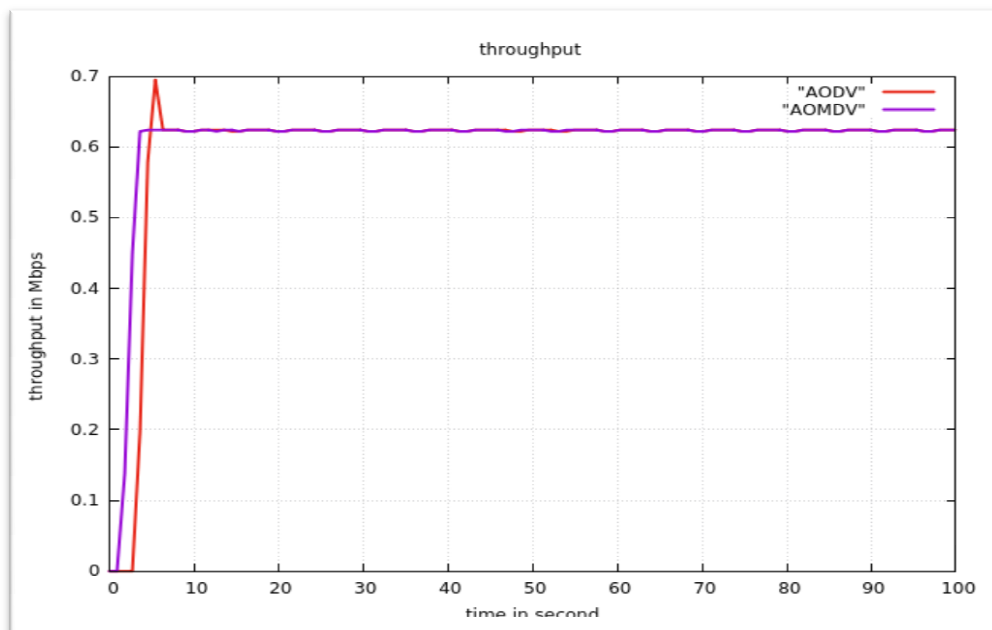


Figure 3.6 : débit du réseau en fonction du temps

La variation du débit du réseau en fonction de temps est montrée sur la figure 3.6. La simulation commence avec une valeur minimale de débit égale à 0(Mbits /s) pour les deux protocoles, puis pour le temps de pause entre 0 et 4 seconds le débit de protocole AODV augmente jusqu'à on obtient une valeur égale à 0.7 (Mbits /s) par rapport à 0,62 (Mbits / s) dans le cas du AOMDV. Cela signifie que AODV a un meilleur débit que celle de l'AOMDV puis à partir du temps égale à 5 second le débit de l' AODV diminue jusqu'à atteindre une valeur égale à celle de l'AOMDV ceci est dû au processus de maintenance de route. Par contre AOMDV garde la même valeur car il peut choisir de passer par des chemins alternatifs. A partir de temps égale à 6 seconds les deux protocoles se stabilisent pour toute la période de simulation restante à cause des nœuds déplacés puis de qu'elle capte le chemin optimal (le plus court).

### C /Nombre de paquet perdus

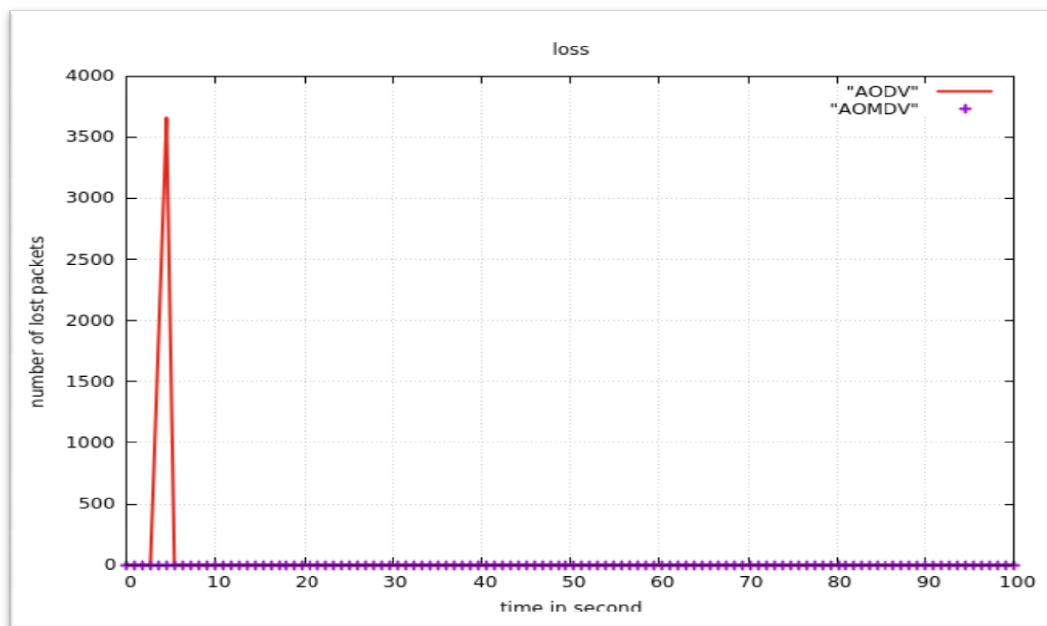


Figure 3.7 : Nombre de paquet perdus en fonction de temps

La figure 3.7représente le nombre de paquet perdus des protocoles comparés en fonction de temps. D'après le graphe on observe que pour le temps entre 2 et 5 seconds la perte des paquets d'AODV est très élevée. Par contre pour le temps entre 5 et 7 seconds, la perte des paquets diminués rapidement jusqu'à 0 et à partir de temps égale à 7seconds on obtient aucune perte de paquets et en ce qui concerne le protocole AOMDV, quelle que soit la couverture radio, nous n'avons aucun paquet perdu. Ceci est le résultat de l'utilisation de plusieurs routes pour atteindre la destination, ce qui évite les collisions et réduit considérablement le nombre de paquets perdus.

#### d/ consommation d'énergie

L'énergie est considérée comme la principale et fondamentale contrainte dans les réseaux de capteurs sans fil. Elle est utilisée pour la concrétisation des différentes opérations dans les RCSF comme la découverte des routes, la maintenance et le chiffrement. La problématique relative à la consommation énergétique doit être prise en compte dans toute conception du réseau de capteur sans fil. Elle est principalement due à la transmission et la réception des paquets de données, ce qui inclut les paquets de mise à jour.

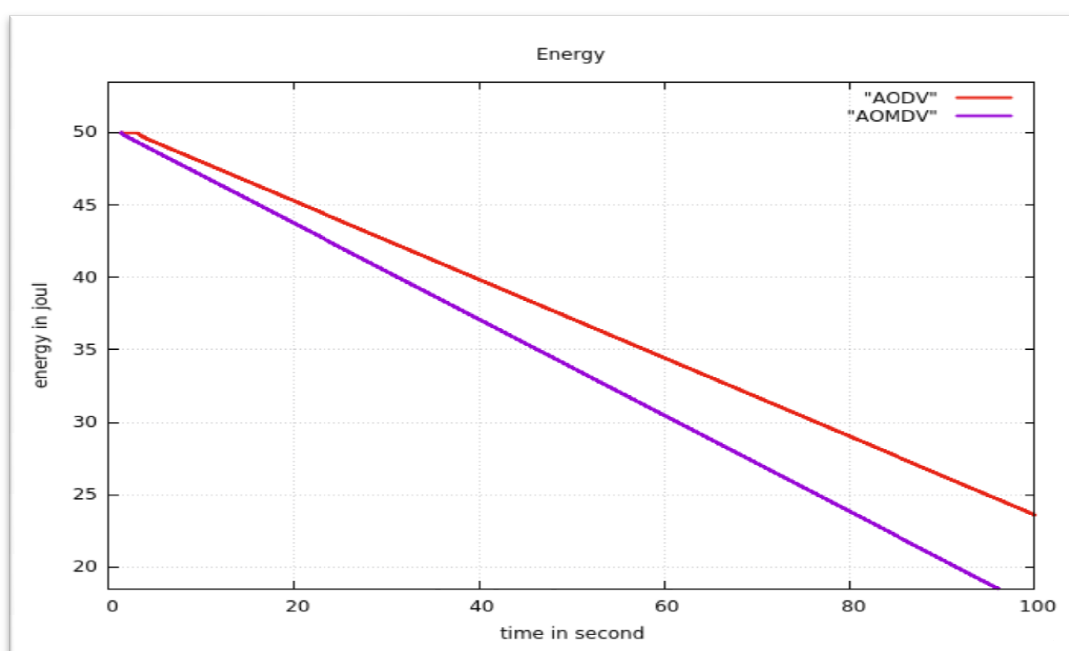


Figure 3.8 : Consommation d'énergie en fonction de temps

La figure ci-dessus 3.8 illustre la consommation énergétique (en joule) en fonction de temps (s). Nous remarquons une augmentation de consommation d'énergie pour les deux protocoles proportionnellement au temps de transmission. Le protocole AODV, consomme d'énergie pour rechercher le chemin d'accès approprié à la destination. Cependant, le protocole AOMDV consomme plus d'énergie qu'AODV. Avec le protocole AODV il sélectionne le premier court chemin qui existe entre la source et la destination pour cette raison il consomme moins d'énergie en tant que l'AOMDV diffuse des broadcast pour chaque route qui maintient la source vers la destination ce qui donne une redondance des paquets, dont cette procédure consomme beaucoup d'énergie. Donc on constate que le protocole AODV est bon en termes de consommation énergétique.

#### 6.2.2. Deuxième scénario

Il existe plusieurs protocoles de routage pour les RCSF parmi ces protocoles on trouve *Directed Diffusion*. Dans notre projet nous avons choisi d'évaluer les performances de ce protocole. Nous avons basé sur la consommation d'énergie. L'énergie est la ressource la plus important dans un RCSF. Nous avons simulé ce protocole dans un RCSF avec et sans mobilité, afin de montrer l'impact de la mobilité sur la consommation de l'énergie dans un RCSF.

#### a/Consommation d'énergie

En générale la consommation d'énergie est proportionnelle au nombre de paquets traités et au type du traitement effectué (émission/réception) plus la mobilité des nœuds. Il est a noté que l'émission d'un paquet demande plus d'énergie que la réception. Le mouvement des nœuds sur une simulation a un impact très important. En effet, la vitesse, la direction et la fréquence du mouvement ont un impact considérable sur la transmission d'information. La mobilité des nœuds de capteurs a été exploitée pour améliorer ou permettre une couverture complète de la détection et de la communication.

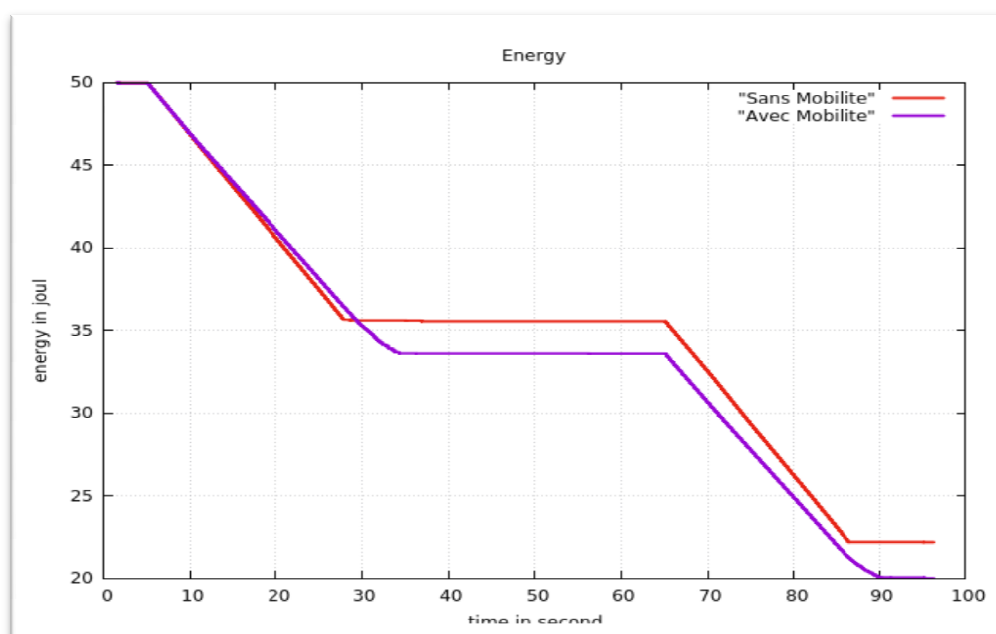


Figure 3.9 : Consommation d'énergie dans un RCSF avec mobilité et sans mobilité

La figure 3.9 illustre la variation de la consommation d'énergie en joule en fonction de temps dans un RCSF (avec et sans mobilité) avec le protocole de routage *Directed Diffusion* (DD) en fonction du temps. La figure 3.9 montre que le taux d'énergie consommée dans le cas où les nœuds sont mobiles analogue au celle quand les nœuds sont statiques entre 0s et 15s. La consommation d'énergie augmente jusqu'au temps égale à 27s pour les nœuds statiques et un temps égale à 34 s pour les nœuds mobiles ceci est dû principalement par les

échanges fréquents et réguliers d'intérêt et de gradient. A partir de 40s l'énergie des nœuds reste stable qui est égale à 36 J pour les nœuds statiques et 33 J pour les nœuds mobiles par conséquent l'agrégation des données utilisées par ce protocole, conserve une quantité considérable d'énergie. Après avec une forte mobilité l'énergie diminue jusqu'à atteindre 0j à temps égale à 90 s. Finalement on peut conclure que l'énergie consommée par le protocole DD dans le cas de mobilité des nœuds est plus importante par rapport au celle de nœuds statiques.

## 7. Synthèse des résultats de consommation d'énergie

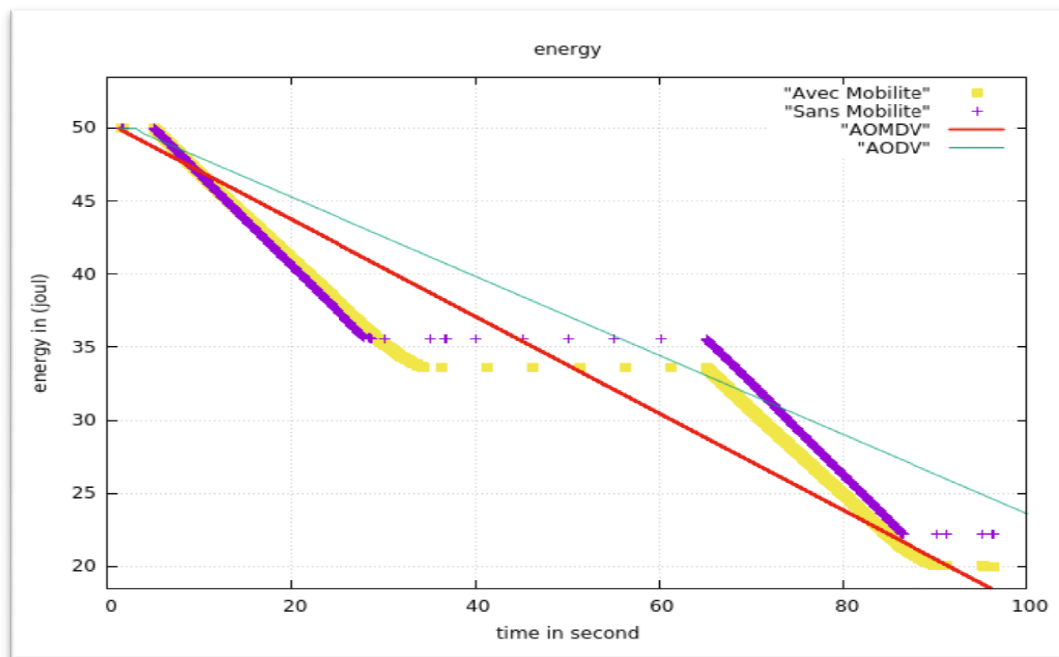


Figure 3.10 : consommation d'énergie en fonction de temps des trois protocoles simulés

Nous avons concentré dans notre étude sur la consommation d'énergie dans les RCSF. Il est clair, à travers les paragraphes précédents que la durée de vie du réseau est strictement liée à la consommation d'énergie par les nœuds.

Notre principal objectif est de maximiser la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil. Afin d'atteindre ce but nous avons exploité des protocoles de routage d'Ad Hoc et de RCSF. La figure 3.10 montrent la variation d'énergie pris en compte les trois protocoles AODV, AOMDV et DD pendant un temps de simulation égale à 100 secondes. On remarque que l'énergie totale consommée augmente dans tous ces protocoles. Cela est expliqué par l'augmentation de compétition des nœuds pour accéder au canal afin d'envoyer les données. En effet, même si les nœuds ne transmettent pas, ils seront dans l'état d'écoute au canal pour mettre à jour les tables de routage. Il est important de noter que l'énergie consommée par un

nœud dans l'état d'écoute au canal est pratiquement égale à celle consommée lors de la réception des données. Cela a pour effet d'augmenter l'énergie totale consommée. D'autre part, les résultats de simulation montrent que le protocole de routage AODV permet une meilleure conservation d'énergie comparée aux autres protocoles AOMDV et DD, qui peut assurer une garantie de grande vie de réseau et une exploitable raisonnable des ressources des capteurs.

En fin, à partir des résultats ci-dessus, on conclure qu'on peut utiliser les protocoles de routage Ad Hoc dans un RCSF comme le protocole de routage AODV.

## **8. Conclusion**

Plusieurs protocoles sont développés pour minimiser la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs. Dans ce chapitre nous avons évalués les performances des protocoles réactifs AODV et AOMDV et de protocole DD utilisant NS-2.35. Les comparaisons sont basées sur Nombres des paquets perdus, Débit et Délai de bout en bout plus Consommation de l'énergie par les nœuds.

Les résultats montrent que, dans deux métriques tel que le débit et la consommation d'énergie, l'AODV est plus performant que l'AOMDV estime que la différence est très faible à chaque terme par contre dans les métriques Nombres des paquets perdus et Délai l'AOMDV est meilleur par rapport à l'AODV en raison de sa capacité à rechercher des itinéraires alternatifs en cas de rupture de lien. Concernant le protocole DD le résultat de la simulation révèle que l'effet de la mobilité sur le paramètre de consommation d'énergie est supérieur à celui du sans mobilité.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Les réseaux de capteurs sans fil sont constitués d'un très grand nombre de dispositifs de communication autonomes de très petite taille, dotés de ressources de calcul et d'énergie limitées. Ils sont actuellement considérés comme l'une des technologies qui changent notre mode de vie, grâce à leur utilisation dans différents domaines d'application tel que : transport, médicale, agricole, militaire, etc. Cependant, les réseaux de capteurs sans fil rencontrent plusieurs problèmes qui affectent leur bon fonctionnement dû à leurs caractéristiques ; tels que les limitations de batterie , leur petite taille et leur déploiement dans des zones souvent hostiles ou difficiles les accédé par l'être humain.

Dans ce mémoire, nous avons présenté une brève description sur les réseaux de capteurs sans fil ainsi que les différents protocoles de routage. Nous avons illustré une description détaillée sur le fonctionnement des protocoles de routage choisis tel que l'AODV et AOMDV entièrement définis pour les MANET et Directed Diffusion pour les RCSF. Nous avons simulé ces trois protocoles à l'aide d'un simulateur des réseaux de capteurs sans fil NS2.

Nous nous sommes intéressés à la comparaison entre les deux protocoles AODV et AOMDV et l'analyse de leurs performances selon les métriques suivantes : Débit, Délai, Consommation d'énergie et le nombre de paquets perdus. Ce qui concerne le protocole Directed Diffusion nous avons basé sur l'évaluation d'une seule métrique qui est la consommation d'énergie dans deux cas où les nœuds sont mobiles et statiques.

Les deux protocoles ont été étudiés, simulés et comparés dans ces scénarios qui ont donné une vision assez claire sur les contraintes. En effet, les comparaisons prouvent que l'AODV offre un meilleur débit et moins consommation d'énergie. Pour délais de bout en bout et moins de perte de paquet perdus l'AOMDV est plus performant.

On constate que globalement l'AODV est le meilleur protocole convenable pour les réseaux de capteurs afin de garantir moins consommation d'énergie pour prolonger la durée de vie de réseau.

### Perspectives

Les réseaux de capteurs constituent un domaine de recherche très vaste. Ils ont de nombreuses perspectives d'application dans des domaines très variés. Il reste encore de nombreux problèmes à résoudre dans ce domaine afin de pouvoir les utiliser dans des conditions réelles.

Nous continuons le travail sur ce domaine pour obtenir la version optimisée des protocoles de routage bien adaptés aux réseaux de capteurs sans fil mobiles. Nous envisageons aussi

d'ajouter d'autres techniques qui prennent en considération d'autres causes de pertes d'énergies.

# **Annexe**

## Annexe A

### Installation du simulateur NS2

NS-2 est conçu pour fonctionner sur les plates-formes Linux. L'installation [57] se fait par les étapes suivantes :

-Tout d'abord, téléchargez Network Simulator (NS-2.35) depuis le site.

-Décompresser l'archive : manuellement où dans un terminal exécute la commande suivante :

```
tar -xvzf ns-allinone-2.35.tar.gz
```

-Maintenant, nous devons mettre à jour l'Ubuntu avec ses derniers composants. Ouvrir un terminal et exécuter ces commandes:

```
sudo apt-get update  
sudo apt-get dist-  
upgradesudo apt-get update
```

-Avant d'installer le NS, nous devons installer quelques paquets essentiels requis par le NS. Alors, lancez les commandes suivantes:

```
sudo apt-get install build-essential autoconf automake  
sudo apt-get install tcl8.5-dev tk8.5-dev  
sudo apt-get install perlxgraph libxt-dev libx11-dev libxmu-dev  
sudo apt-get install gcc-4.4
```

-Après l'importation des packages nécessaires taper la commande d'installation suivante après l'accès au dossier ns-allinone-2.35 :

```
sudo ./install
```

## Liste bibliographique

- [1] Tahar Chaouch Amel et Benmoumene Abdellah Mahfoudh. "Analyse par simulation des performances d'un réseau de capteurs sans fil (wsn) " mémoire de Master , faculté des sciences et de la technologie, Université Djilali Bounaama, khemis miliana, 2016.
- [2] R.Vauzelle."Conception d'un réseau de capteurs sans fil, faible consommation, dédié au diagnostic in-situ des performances des bâtiments en exploitation", thèse de doctorat, secteur de recherche : optoélectronique, micro-ondes, université de Poitiers ,8 décembre 2011.
- [3] Cedric Ramassamy" analyse des protocoles des réseaux de capteurs sans fil", thèse de doctorat, Ecole doctorale pluridisciplinaire : sante, environnement et société dans les Amérique, Université des Antilles et de la Guyane, 23 novembre 2012.
- [4] Umesh Rawat, Mukesh Sharma. "Directed Diffusion: Features, Current Developments, Issues and Analysis", International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Vol. 49– No.12, pages 31-35, July 2012.
- [5] Oussama Drissi. "Implémentation d'une stratégie de routage multi-niveau de données d'un réseau de capteurs sans fil dans le domaine ferroviaire", mémoire de master comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, université du Québec, juin 2014.
- [6] "B .Saoud ,A.Moussaoui(2019).New Routing Protocol in Ad Hoc Networks.In:Smys S ,Bestak R ,Chen JZ,Kotuliak I .(eds) International Conference on Computer Networks and Communication Technologies ,lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies ,vol 15 . Springer, Singapore "
- [7] HADJADJI Samia. "Système de supervision des réseaux de capteurs sans fil " , mémoire de master, Université de Béchar, 2015.
- [8] HAFIR Latifa et SLIMANI Radhia. "Etude et évaluation des performances des protocoles de routage pour les réseaux de capteurs sans fil", mémoire de master, faculté des sciences exactes, Université A/Mira, Bejaia, 2016.
- [9] Nouha LAROUSSE. "Secure Routing in Wireless Sensor Networks", memory In New Technologies of Dedicated Computer Systems discipline, Sfax University, 4 December 2012.
- [10] Laïd Sadoudi."Étude et développement d'une plateforme de communication pour les réseaux de capteurs acoustiques sans fil : application au contrôle-santé des

rails par corrélation du bruit ambiant", Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, 6 juillet 2016.

[11] Kosai Raouf. "Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", thèse de doctorat, école doctorale : SPIGA, Université de Bretagnes Loire, 31 mars 2016.

[12] Mohamed BENAZZOUZ." Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil", Mémoire Online, Ecole nationale supérieure d'informatique Oued- Smar ,2013.

[13] Amadou Baba et Bagayoko. "Politiques de Robustesse en réseaux ad hoc", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Université de de Toulouse ,11 juillet 2012.

[14] Diery Ngom."Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité réseau", Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace (France) et de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) ,17 Mai 2016.

[15] Anouar DARIF. "Contributions à l'amélioration des performances des Réseaux de Capteurs sans fil à base d'IR-UWB", Thèse de Doctorat, Sciences de l'ingénieur, Université Mohammed .V Ibn Batouta Rabat, Maroc ,22 janvier2015.

[16] SAHRAOUI Belkheyr." La Géo-localisation dans les Réseaux de Capteurs sans Fil", Université de Tlemcen, 2011.

[17] BENTARA Nassima et AIT ALIOUA Malika. "Evaluation des performances d'un protocole de routage multi-chemins dans les RCSFs", mémoire de master Faculté des Sciences exactes Université A/Mira, Bejaïa ,2017.

[18] Thérance Hounghadji. "RÉSEAUX AD HOC : SYSTÈME D'ADRESSAGE ET MÉTHODES D'ACCESSIBILITÉ AUX DONNÉES", Thèse de Doctorat, Université de Montréal, 2009.

[19] Omar Cheikhrouhou. "Sécurité des réseaux ad hoc", mémoire, l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Université de Sfax, 4 juillet 2005.

[20] Kabou Salaheddine et Belgourari Abdessamed."Etat de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil", Mémoire, Université de Béchar, Juin 2010.

[21] HAFIR Latifa et SLIMANI Radhia."Etude et évaluation des performances des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil", mémoire de master, université de Bejaia, 2016.

- [22] Vangie Beal. "The 7 Layers of the OSI Model", <https://www.webopedia.com>, September 24, 1999.
- [23] Aina Andriamampionona. "Modélisation de la consommation d'énergie en vue de la conception conjointe (matériel/logiciel) des applications embarquées application aux réseaux de capteurs sans fil (WSN)", thèse de doctorat, Université Nantes Angers le mans, 6 février 2015.
- [24] Kabou Salaheddine, Belgourari Abdessamed "Etat de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil", Mémoire Pour l'obtention Du Diplôme de Licence En Informatique, Université de Béchar, 2009.
- [25] Boubiche Djallel Eddine. " Une approche Inter-Couches (cross-layer) pour la Sécurité dans les R.C.S.F", thèse de doctorat, faculté des sciences, Université de Batna.
- [26] ABDESSELAM Abdelhalim et BELOUATEK Mohammed. " Conception d'un algorithme de routage basé sur l'heuristique du recuit simulé pour les réseaux de capteurs à grande échelle ", mémoire de Master Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [27] Benabdallah Karima. "Optimisation d'un protocole de routage AODV dans les réseaux de capteur sans fil", mémoire de Master Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [28] Fatima Ameza. "Les technologies sans fil : le routage dans les réseaux ad-hoc", Mémoire Online-informatique et télécom, Université de Bejaia ,2007.
- [29] Mehdi Bouallegue. "Protocole de communication et optimisation de l'énergie dans les RCSF", Thèse de doctorat, Université de Bretagne Loire, 31 Mars 2016.
- [30] Kebir Bahia et Rahmouni Samia. "Amélioration des performances du protocole de routage RPL", Mémoire de Master. Université de Tlemcen ,2016-2017.
- [31] Shio Kumar Singh, M .Singh and DK .Singh. "A survey of routing protocols in wireless sensor networks", *International Journal of Computer Science &Engineering Survey* , vol.1,NO.2,Novembre 2010.
- [32] Kumal M Pattani,Palak J.Chauhan."Spin protocol for wireless sensor networks", *International Journal of Advance Research* , volume 2 [5] ,May 2015.
- [33] Umesh Rawat, Mukesh Sharma "Directed Diffusion: Features, Current Developments, Issues and Analysis", *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), Vol.49– No.12, pages 31-35, July 2012.

- [34] Jamal N. Al-Karaki, Ahmed E. Kamal." Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey", Dept. of Electrical and Computer Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa 50011.
- [35] Hanane Aznaoui, Said Raghay and Layla Aziz ."Location-Based Routing Protocols GAF and its enhanced versions in Wireless Sensor Network a Survey", Faculty of sciences and technology, University Cadi Ayyad Marrakech, Morocco ,International Journal of Computer Science and Network Security ,VOL.16 No.6,June 2016.
- [36] Yaser Yousef."Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil", Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace, Juillet 2010.
- [37] Kemal Akkaya, Mohamed Younis." Elsevier: A survey on routing protocols for wireless sensor networks", Ad Hoc Networks 3 (2005), 325–349, 26 November 2003.
- [38] Bouchelaghem Siham, Ghebbi Sofiane et Hamani Mounir." Le Protocole LEACH pour les Réseaux de Capteurs Sans Fil", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa ,2015.
- [39] Mohamed djihad, BEN SALEM Oussama BOUGOFFA. "Etude comparative de deux simulateurs pour les réseaux ad-hoc sans fil", mémoire de Master, Université kasdi merbah,Ouargla, Algérie ,2014.
- [40] Yousef Ziani. " Etude comparative de méthodes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil pour le domaine résidentiel", mémoire de master ; Comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2013.
- [41] Nadjib Badache et Tayeb Lemlouma."Le routage dans les réseaux mobiles Ad hoc", Mini Projet, Université Houari Boumèdiene, Septembre 2000.
- [42] C. Perkins, Nokia Research Center and E. Belding-Royer. "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing (RFC 3561), Network Working Group Request for Comments: 3561, University of California, Santa Barbara S. Das and University of Cincinnati, July 2003.
- [43] Bessaih Aldja et Bouchakel Siham."Routage et Simulation dans les Réseaux Mobile ad hoc", Mémoire de Master, Université de Bejaïa ,2016-2017.
- [44] Benabdallah Karima."Optimisation d'un protocole de routage AODV dans les Réseaux de capteur sans fil", Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, Juin 2017.

- [45] Berrabah Abdelkrim et SAIDI Hassiba. "Balancement de charges dans les réseaux Ad Hoc",Mémoire de Master,Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen,02 Juillet 2013.
- [46] Pankaj Oli, Vivek Kumar Gupta."Simulation and Comparison of AODV and AOMDV Routing Protocols in MANET,"*International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181*, Vol. 3 Issue 9, pages 745- 749, September2014.
- [47] Paul MÜHLETHALER. "Routage dans les réseaux ad hoc", *Cet article est inspiré du livre de chez Eyrolles : 802.11 et Les Réseaux Sans Fil*, pages TE 7520-1-7520-7, août 2002.
- [48] Nabil Ammar TABBANE. "Modèles Stochastiques pour la Préviation de la Qualité de Service dans les Réseaux Ad Hoc Multimédia "Thèse en cotutelle ; Informatique, Ecole supérieure des communications de Tunis et université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines,juillet 2006.
- [49] Céline BURGOD."Contribution à la sécurisation du routage dans les réseaux ad hoc ", Thèse de doctorat, Université de Limoges 2009.
- [50] Walid Fahs."Diffusion d'informations partagées entre mobiles coopérants évoluant sous une même cellule d'un réseau sans fil avec infrastructure", Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal- Clermont II, 14 Novembre 2008.
- [51] P. Anelli & E. Horlait."NS-2 : Principes de conception et d'utilisation", Le Mercredi 15 Septembre 1999.
- [52] WADHAH AL-MANDHARI et all."Ad-hoc On Demand Distance Vector (AODV) Performance Enhancement with Active Route Time-Out parameter ", JAPAN, 2008.
- [53] Eitan Altman and Tania Jiménez. "NS simulator for beginners", France, December 2003, p-146.
- [54] Hervé BELMONTE. "Implémentation et évaluation d'un réseau de capteurs sans fil exploitant le concept de colportage de l'information ", Mémoire de Master, 15 Juin 2014.
- [55] Ibrahima DIANE."Optimisation de la consommation d'énergie par la prise en compte de la redondance de mesure dans les réseaux de capteurs ", thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Toulouse, 17 juillet 2014.

[56] ABDELLAOUI, Rachid. "SU-OLSR UNE NOUVELLE SOLUTION POUR LA SÉCURITÉ DU PROTOCOLE OLSR", Mémoire de Master l'Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, 2009.

[57] Dhyanendra Singh Rathore ."Install With Me! .com" ,2014.