

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence :/MM/2021

المرجع:م/م / 2021

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Réalisé par :

IDRIGUENE Sarah

Et

CHIBANE Amel

Thème

Routage pour minimiser l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil

Soutenu le: **30/10/2021**

Devant la commission composée de :

Mr : BOUCENNA Mohamed Lamine	M.C.B	Univ. Bouira	Président
HADJADJ Abdelkrim		Univ. Bouira	Rapporteur
KASMI Reda	M.C.A	Univ. Bouira	Examinateur

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné le courage, la volonté et la santé pour mener à bien ce travail.

Nous voudrions exprimer nos sincères remerciements à notre promoteur «Mr. HADJADJ Abdelkrim» pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période de travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercions aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, et à qui nous exprimons notre profonde gratitude.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Au nom de Dieu, le tout miséricordieux, le très miséricordieux

Je dédie ce modeste mémoire aux êtres qui me sont les plus chers

A ma très chère mère source de tendresse ;

A mon très cher père, qui m'encourage dans les instants délicats ;

A mes chers frères et sœurs ;

A toute ma famille ;

A tous mes amis

*A la mémoire de mon grand-père et à celle de ma tante qui nous ont quittés cette
année, puisse Dieu les accueillir dans son infinie Miséricorde.*

Sarah



Dédicace

Je dédie ce travail

A ma famille qui m'a doté d'une éducation digne, avec un amour qui a fait de moi ce que je suis devenu aujourd'hui.

Particulièrement à mes parents, pour tous les efforts et les sacrifices qu'ils ont pu traverser pour que je puisse atteindre ce niveau.

A mes amis qui m'ont toujours encouragé quand j'en avais eu le besoin.

Amel



Résumé :

Dans les réseaux de capteurs sans fil, la consommation d'énergie est une contrainte très cruciale puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. A cet égard, plusieurs approches de routage ont été proposées pour conserver la ressource énergétique au niveau des capteurs et pouvoir surmonter les défis inhérents à sa limitation.

L'objectif de notre étude est de proposer un nouveau protocole de routage à basse consommation d'énergie basé sur l'approche de clustering. Notre contribution vise à exploiter plus équitablement l'énergie des nœuds électionnés cluster-heads, et à économiser l'énergie dissipée lors de l'acheminement des données capturées à la station de base. Les résultats des simulations ont montré que notre protocole permet de prolonger la durée de vie du réseau.

***Mot clés :** Réseaux de capteurs sans fil, les protocoles de routage, consommation d'énergie.*

Abstract :

In wireless sensor networks, energy consumption is a very crucial constraint since sensors are generally deployed in inaccessible areas. Thus, it is difficult or even impossible to replace the batteries after their exhaustion. Therefore, several routing approaches have been proposed to conserve the energy resource at the sensors level and overcome the challenges inherent to its limitation.

The objective of our study is to propose a new low energy routing protocol based on the clustering approach. Our contribution aims to make more equitable use of the energy of the selected cluster-heads nodes, and to save the energy dissipated during the transmission of the captured data to the base station. The results of the simulations showed that our protocol allows a longer lifetime of the network.

***Keywords :** Wireless sensor networks, routing protocol, energy consumption.*

المخلص :

في شبكات الاستشعار اللاسلكية، يعد استهلاك الطاقة قيدًا بالغ الأهمية حيث إن أجهزة الاستشعار تنتشر عموماً في المناطق التي يتعذر الوصول إليها. وهذا يجعل من الصعب، إن لم يكن من المستحيل استبدال البطاريات بعد استنفادها. وفي هذا السياق، اقترحت عدة نُهج لتحديد المسار للحفاظ على موارد الطاقة على مستوى أجهزة الاستشعار والتغلب على التحديات الكامنة في محدوديتها.

الهدف من دراستنا هو اقتراح بروتوكول من اجل تحديد مسارات ذات طاقة منخفضة وذلك اعتماداً على نهج التجميع. تهدف مساهمتنا إلى استخدام أكثر إنصافاً لطاقة رؤساء العقد المنتخبة، وتوفير الطاقة المبددة أثناء توجيه البيانات الملتقطة إلى المحطة الأساسية. أظهرت نتائج المحاكاة أن بروتوكولنا يسمح بإطالة عمر الشبكة.

***الكلمات المفتاحية :** شبكات الاستشعار اللاسلكية، بروتوكول التوجيه، استهلاك الطاقة.*

*Sommaire***INTRODUCTION GENERALE 1***Chapitre 1 : Etat de l'art des réseaux de capteur sans fil*

1.1	Introduction	3
1.2	Un réseau Ad hoc	3
1.3	Capteur sans fil.....	4
1.3.1	Définition	4
1.3.2	Architecture d'un nœud capteur	4
1.4	Réseau de capteur sans fil	5
1.4.1	Définition	5
1.4.2	Architecture d'un réseau de capteur sans fil.....	6
1.5	Classification des RCSFs	7
1.5.1	Mode d'acquisition et de livraison des données aux puits	8
1.5.2	Distance entre les nœuds capteurs et le puits.....	9
1.5.3	Modèle de mobilité dans le réseau.....	9
1.5.4	Capacité des nœuds du réseau	9
1.6	Domaines d'application des RCSFs.....	10
1.7	Intégration des RCSFs à Internet des Objets.....	13
1.8	Contraintes de conceptions de RCSFs	13
1.8.1	Durée de vie	13
1.8.2	Tolérance aux fautes	14
1.8.3	Facteur d'échelle (<i>scalability</i>)	14
1.8.4	Coûts de production	14
1.8.5	Media de transmission	14
1.8.6	Topologie de réseau	14
1.8.7	Agrégation des données.....	15
1.9	Pile protocolaire	15
1.9.1	Les couches protocolaires.....	16
1.9.2	Les niveaux de gestion dans les RCSFs	16

1.10	Consommation d'énergie dans les réseaux de capteur sans fil.....	17
1.10.1	Opérations dues à la consommation d'énergie.....	17
1.10.2	Mécanismes de conservation de l'énergie	18
1.9	Conclusion	19

Chapitre 2 : Etat de l'art des protocoles de routage dans les réseaux de capteur sans fil

2.1	Introduction.....	20
2.2	Routage dans les réseaux de capteur sans fil.....	20
2.3	Classifications des protocoles de routage dans les RCSFs.....	20
2.3.1	Classifications selon la structure du réseau	21
2.3.2	Classifications selon le fonctionnement de protocole	23
2.3.3	Classifications selon la manière d'établissement de route	23
2.3.4	Classifications selon l'initiateur de communication	24
2.4	Protocole de routage dans les RCSFs.....	25
2.4.1	Protocole Flooding.....	25
2.4.2	Protocole DD (Directed Diffusion)	26
2.4.3	Protocole HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering).....	27
2.4.4	Protocole LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy).....	28
2.4.5	Protocole GAF (Géographic Adaptive Fidelity).....	29
2.4.6	Protocole SAR (Sequential Assignment Routing).....	31
2.4.7	Protocole SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)	31
2.4.8	Protocole DSDV(Dynamic-Sequenced Distance-VectorRouting Protocol)	32
2.4.9	Protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)	33
2.4.10	Protocole ZRP (Zone Routing Protocol))	34
2.5	Synthèse des protocoles de routage dans les RCSFs	35
2.6	Conclusion	36

Chapitre 3 : Contribution : EECRMH (Energy-Efficient Based on clustering with Routing Multi-Hop)

3.1	Introduction.....	37
3.2	Motivations	37

3.3 Hypothèses.....	38
3.4 Principe de fonctionnement	38
3.4.1 Phase d'initialisation	39
3.4.2 Phase de routage des données	48
3.5 Discussion sur l'efficacité du protocole.....	49
3.6 Validation de la proposition	50
3.6.1 Environnement de simulation	51
3.6.2 Paramètres de simulation	51
3.7 Métriques de performance.....	52
3.8 Résultats de simulation	52
3.8.1 Formation des niveaux.....	52
3.8.2 Election des cluster-heads.....	53
3.8.3 Formation des clusters	54
3.9 Interprétation et discussion des résultats.....	54
3.10 Conclusion	56
CONCLUSION GENERALE	57
BIBLIOGRAPHIE	58

Liste des Figures

Figure 1.1.	Réseau Ad hoc	4
Figure 1.2.	Exemple des capteurs sans fil.....	4
Figure 1.3.	Anatomie explicative d'une architecture d'un nœud capteur	5
Figure 1.4.	Réseau de capteur sans fil.....	6
Figure 1.5.	Architecture d'un RCSF	7
Figure 1.6.	Les types d'applications dans les RCSFs	8
Figure 1.7.	Les modes multi-sauts et à un seul saut.....	9
Figure 1.8.	Quelques domaines d'application des RCSFs.....	10
Figure 1.9.	Les capteurs dans le domaine militaire.....	10
Figure 1.10.	Mise en œuvre d'un RCSF pour la surveillance d'activité volcanique	11
Figure 1.11.	Un exemple des capteurs dans le corps humain	11
Figure 1.12.	Les RCSFs dans le domaine d'agriculture.....	12
Figure 1.13.	Les nœuds capteurs dans la domotique	12
Figure 1.14.	La pile protocolaire.....	15
<hr/>		
Figure 2.1.	Diagramme de classification des protocoles de routage.....	21
Figure 2.2.	Topologie hiérarchique d'un RCSF.....	22
Figure 2.3.	Problème d'implosion	25
Figure 2.4.	Problème de chevauchement	25
Figure 2.5.	Fonctionnement du protocole DD	26
Figure 2.6.	Protocole de routage LEACH	28
Figure 2.7.	Exemple d'une grille virtuelle dans GAF	29
Figure 2.8.	Transition des états dans GAF	30
Figure 2.9.	Fonctionnement de la procédure de demande de route dans AODV	33
<hr/>		
Figure 3.1.	Formation des niveaux	29
Figure 3.2.	Exemple illustratif du calcul de degré d'un nœud	40
Figure 3.3.	Election des cluster head	42

Figure 3.4. Organigramme de l'étape d'élection des clusters head	43
Figure 3.5. Organigramme de la formation des clusters	46
Figure 3.6. Phase de transmission de données	49
Figure 3.7. Visualisation du réseau après la formation des niveaux.....	53
Figure 3.8. Visualisation du réseau après l'élection des cluster-heads.....	53
Figure 3.9. Formation des clusters	54
Figure 3.10. L'énergie restante de chaque nœud dans EECRMH	54
Figure 3.11. L'énergie restante de chaque nœud dans ECBDA	55

Liste des Tableaux

Tableaux 2.1. Classification et comparaison des protocoles de routage dans les RCSFs	35
Tableaux 3.1. Type des messages échangés	50
Tableaux 3.2. Paramètres de simulation	51
Tableaux 3.3. Quantité d'énergie des nœuds du réseau.....	56

Liste des Acronymes

<i>WSN</i>	Wireless Sensor Networks
<i>RCSF</i>	<i>Réseau de capteurs sans fil</i>
<i>MANET</i>	Mobile Ad hoc NETwork
<i>ADC</i>	Analog to Digital Converter
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>IoT</i>	Internet of Things
<i>OSI</i>	Open System Interconnexion
<i>MAC</i>	Media Access Control
<i>CH</i>	Cluster-head
<i>QoS</i>	Qualité de service
<i>DD</i>	Directed Diffusion
<i>HEED</i>	Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering
<i>LEACH</i>	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy
<i>GAF</i>	Géographic Adaptive Fidelity
<i>SAR</i>	Sequential Assignment Routing
<i>SPIN</i>	Sensor Protocols for Information via Negotiation
<i>DSDV</i>	Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing Protocol
<i>AODV</i>	Ad-hoc On Demand Distance Vector
<i>ZRP</i>	Zone Routing Protocol
<i>IARP</i>	Intrazone Routing Protocol
<i>IERP</i>	Interzone Routing Protocol
<i>BRP</i>	Bordercast Routing Protocol
<i>EAR</i>	Energy Aware Routing
<i>EEPSCZ</i>	Energy Efficient Protocol Static Clustering Zones
<i>TDMA</i>	Time Division Multiple Access
<i>SB</i>	Station de base
<i>ECBDA</i>	Energy-Efficient Cluster Based Data Aggregation
<i>EEPSCZ</i>	Energy-Efficient Protocol Static Clustering Zones

INTRODUCTION GENERALE

La grande partie de la recherche actuelle du monde informatique s'est orientée vers les réseaux de capteurs sans fil (*Wireless Sensor Network*). Ces réseaux de capteurs représentent la partie la plus intéressante parmi l'ensemble des technologies fondatrices de l'IoT (*Internet of Things*), leurs avantages et rendements applicatifs sont prévus à prendre un espace beaucoup plus large avec de nouvelles perspectives. Ce type de réseau est composé d'un grand nombre de nœuds capteurs communicants, capable de prélever des grandeurs physiques à partir d'un environnement donné et de les transformer en données numériques, tout en effectuant des traitements éventuels sur ces dernières afin de les transférer vers un utilisateur final. Dans un tel réseau, chaque nœud est un dispositif électronique qui possède une capacité de calcul, de stockage, de communication et d'énergie.

La technique des réseaux de capteurs sans fil permet de faciliter le suivi et le contrôle à distance de l'environnement physique avec une meilleure précision. Les nœuds capteurs peuvent aussi être déployés pour exploiter diverses applications telles que les applications médicales, environnementales, commerciales, les applications domotiques et autres.

Les caractéristiques particulières des RCSFs modifient les critères de performances par rapport aux réseaux sans fil traditionnels. En fait la longévité du réseau est primordiale, pour les réseaux de capteurs conçus pour surveiller un phénomène d'intérêt dans une zone généralement inaccessible. De ce fait, la conservation de l'énergie représente un défi perpétuel et de première importance afin de prolonger la durée de vie du réseau autant qu'il faut pour atteindre l'objectif initial de l'application pour laquelle le réseau est dédié.

Les protocoles de routage dans les RCSFs sont indispensables afin de transférer les données apparues dans le champ de captage vers l'utilisateur final vu l'absence de toute infrastructure. En effet, c'est à chaque nœud du réseau de jouer le rôle d'un routeur. Ainsi, tous les nœuds collaborent afin de router une information vers une certaine destination. L'objectif de cette étude est de traiter le problème du routage dans les réseaux de capteurs, surtout ceux à taille importante. Le souci principal est de prolonger la vie du réseau en économisant l'énergie dépensée par chaque capteur du réseau. Pour répondre à cette problématique et dans le but de procurer un gain maximal en termes d'énergie lors des communications, nous proposons un nouveau protocole de routage en utilisant la méthode de routage à multi-sauts des données, ainsi qu'une meilleure technique de formation des clusters.

Pour mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en trois chapitres selon le plan méthodologique suivant :

- Le premier chapitre comporte des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil et leurs composants, les critères de classification des RCSFs, ainsi que les contraintes de conception de ce type de réseau. Une brève présentation des mécanismes de conservation d'énergie sera abordée à la fin de ce chapitre.
- Le second chapitre est consacré , en premier lieu, à la définition et la classification des différentes approches du routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite une deuxième partie est dédié à la présentation de quelques protocoles de routage proposés pour ce type de réseau.
- Dans le troisième et dernier chapitre, on se focalisera, dans un premier temps, sur le principe de fonctionnement de notre contribution, en le détaillant en deux principales phases. Ainsi des simulations de ce protocole sous MATLAB ont été effectuer, suivies, dans un deuxième temps, par une étude des résultats de la comparaison de ce dernier avec le protocole choisi, montrant ainsi l'efficacité de notre protocole proposé en termes de prolongation de durée de vie du réseau.
- Nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui englobera les résultats obtenus au cours de notre étude, ainsi que des perspectives futures.

Chapitre 1 : Etat de l'art des réseaux de capteur sans fil

1.1 Introduction

Les innovations récentes marquées par le développement des techniques et technologies dans le domaine de la miniaturisation des systèmes de micro-électromécanique ainsi que dans le marché des réseaux et des applications sans fil, ont permis de créer un nouveau type de réseau, appelé réseau de capteurs sans fils (en anglais *WSN: Wireless Sensor Networks*).

Les RCSFs pénètrent de plus en plus dans notre vie quotidienne; Leurs caractéristiques comme la flexibilité, la facilité de déploiement et l'auto-organisation leur permettent de couvrir une gamme importante d'applications allant du domaine militaire au domaine civil. Néanmoins une batterie limitée entraîne la contrainte d'énergie qui limite les performances du réseau de capteur sans fil, et qui est devenu un vrai défi critique dans ce type de réseau.

Ce chapitre présente une vue générale sur les réseaux de capteurs sans fil et leurs composants, les critères de classification des RCSFs, ainsi que les contraintes de conception de ce type de réseau. Une brève présentation des mécanismes de conservation d'énergie sera abordée à la fin de ce chapitre.

1.2 Un réseau Ad hoc

Dans l'espace des réseaux mobiles, nous pouvons distinguer deux classes de réseaux, à savoir, les réseaux mobiles basés sur une infrastructure de communication (*modèle cellulaire*), et les réseaux mobiles sans infrastructure (*modèle Ad hoc*).

Un réseau mobile Ad hoc, appelé généralement MANET (*Mobile Ad hoc NETWORK*), consiste en une grande population, relativement dense, d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque. Le seul moyen de communication est l'utilisation des ondes radio qui se propagent entre les différents nœuds mobiles, sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou administration centralisée [1].

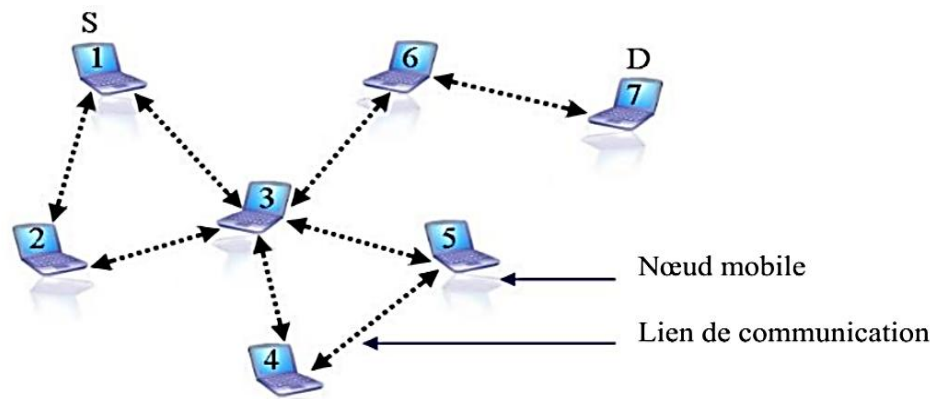


Figure 1.1 : Réseau Ad hoc [1].

1.3 Capteur sans fil

1.3.1 Définition

Un capteur sans fil est un dispositif électronique autonome, peu coûteux et d'une taille extrêmement réduite, cet organe est doté de ressources limitées en énergie (*batterie*), en puissance de calcul et en capacité de stockage [2].

Un capteur est destiné à mesurer une grandeur physique environnementale telle que la température, la lumière, la pression, et même capturer une image puis de la transmettre via des liaisons radio à un centre de traitement appelé station de base.



Figure 1.2 : Exemple des capteurs sans fil [3].

1.3.2 Architecture d'un nœud capteur

Un nœud capteur est composé principalement de quatre unités ou éléments, correspondant chacun à un rôle spécifique. La figure ci-dessous illustre cette architecture.

- **Unité de capture** (*en anglais : Sensing unit*) : Unité composée généralement de deux sous-unités, un dispositif de capture physique qui prélève et transforme en signal analogique l'information de l'environnement local, et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (*Analog to Digital Converter*), qui convertit ce signal en un signal numérique puis le transmette à l'unité de traitement [4].

- **Unité de traitement (*Processing unit*)** : Unité qui possède deux interfaces, qui sont une interface pour l'unité de capture et l'autre pour l'unité de communication, elle est composée d'un processeur et d'une mémoire [5]. Elle analyse les données captées puis les envoyer à l'unité de communication, elle peut aussi contrôler l'exécution des protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le nœud avec les autres entités du réseau.
- **Module de communication (*Transceiver unit*)** : Ou l'unité de transmission de données, elle permet de connecter tous les nœuds de réseau en effectuant les opérations d'émission et de réception de données via un support de communication radio [6].
- **Unité de puissance (*Power unit*)** : Un nœud capteur est muni d'une ressource énergétique (*une batterie*) qui se charge d'alimenter les autres éléments. Cette batterie est limitée et souvent irremplaçable [7]. Pour cela, l'énergie est la ressource la plus précieuse puisqu'elle influe directement sur la durée de vie des capteurs.

Un nœud capteur peut contenir également, des modules supplémentaires tels que :

- Un système de localisation (GPS : *Global Positioning System*).
- Un générateur de puissance.
- Un système mobilisateur chargé de déplacer ce dernier en cas de nécessité.

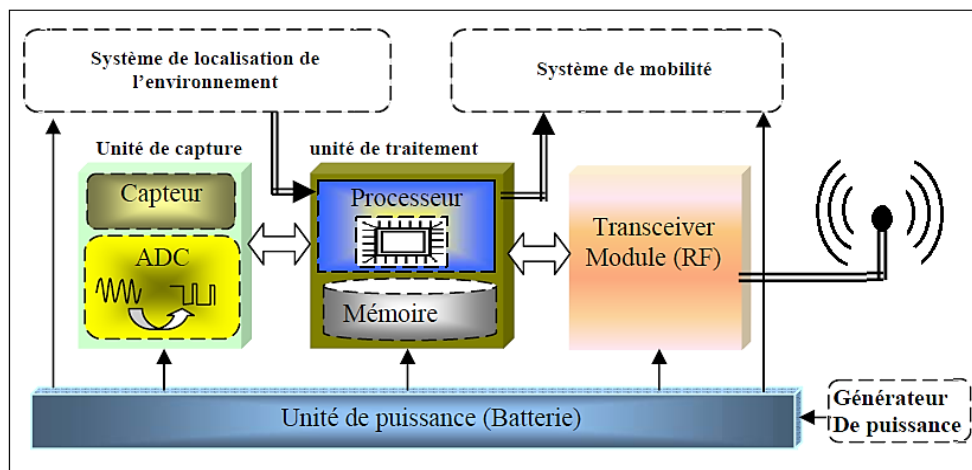


Figure 1.3 : Anatomie explicative d'une architecture d'un nœud capteur [8].

1.4 Un réseau de capteurs sans fil

1.4.1 Définition

Un réseau de capteurs sans fil est un type particulier de réseau Ad-hoc dont ses nœuds sont des capteurs à faible coût, à faible puissance et facilement déplorables, ces derniers sont des capteurs intelligents capables d'accomplir trois tâches complémentaires: le relevé d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec

d'autres capteurs, à travers une liaison sans fil, pour la transmission d'information et le traitement coopératif [9].

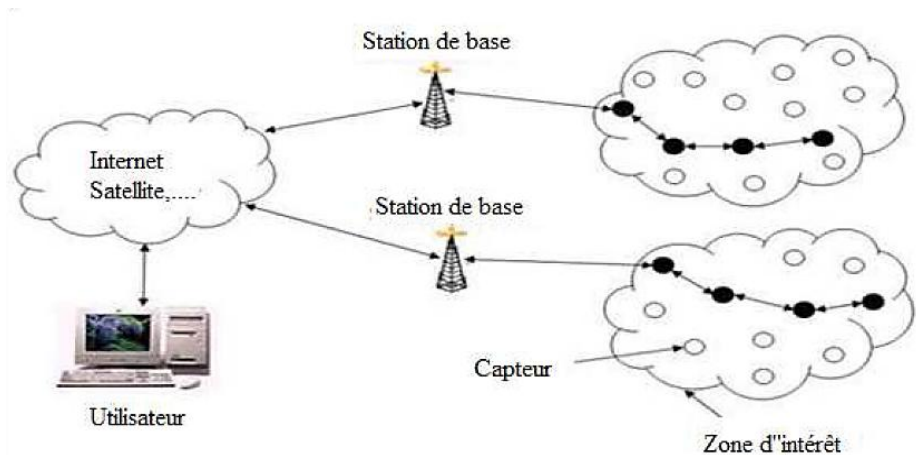


Figure 1.4 : Réseau de capteurs sans fil [9].

Dans ce type de réseau les capteurs sont déployés souvent d'une manière aléatoire dans une zone d'intérêt appelée zone de couverture ou champ de détection. Chacun de ces nœuds collecte les données puis il les transfère au nœud passerelle appelé puits (*sink*) en utilisant un routage mono-sauts ou multi-sauts, le puits transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite vers le centre de traitement [5].

Lorsqu'un capteur détecte un événement pertinent, un message est envoyé à la station de base par le biais d'une communication entre les capteurs. Les données collectées sont traitées et analysées par des machines puissantes.

1.4.2 Architecture d'un réseau de capteur sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont construits autour des cinq principales entités suivantes :

- **Capteurs (Sensor)** : Leur type, leur architecture et leur disposition géographique dépendent de l'exigence de l'application en question. Leur énergie est limitée puisqu'ils sont alimentés par des piles [10].
- **Puits (Sink)** : Est un nœud particulier du réseau. Il est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif puisque l'arrivée des informations est aléatoire. C'est pourquoi son énergie doit être illimitée. Dans un réseau de capteur sans fils ; plus ou moins large et à charge un peu élevée. Il peut arriver qu'il y ait plusieurs puits sur un même réseau de capteurs pour alléger la charge [11].

- **Agrégateur (Aggregator)** : Il est chargé d'agréger les messages qu'il reçoit de plusieurs capteurs puis de les envoyer en un seul message au puits (*Sink*). Cette opération a pour principal but de limiter le trafic sur le réseau et donc de prolonger la durée de vie globale du réseau de capteur. Les agrégateurs sont facultatifs dans les réseaux de capteurs sans fil [5].
- **Centre de traitement de données** : Qui est le centre vers lequel les données collectées par le sink sont envoyées. Ce centre a le rôle de regrouper les données issues des nœuds et les traiter de façon à en extraire de l'information utile exploitable. Le centre de traitement peut être éloigné du sink, alors que les données doivent être transférées à travers un autre réseau, c'est pourquoi on introduit une passerelle (*Gateway*) entre le sink et le réseau de transfert [12].
- **Passerelle (Gateway)** : La passerelle est un dispositif qui a la particularité d'avoir deux interfaces réseau. Il permet de relier le réseau de capteurs sans fils à un réseau plus traditionnel, typiquement l'Internet. En effet, habituellement le réseau de capteurs ne sert qu'à faire remonter les mesures, les applications traitant ces informations étant exécutées sur la machine de l'utilisateur final [5].

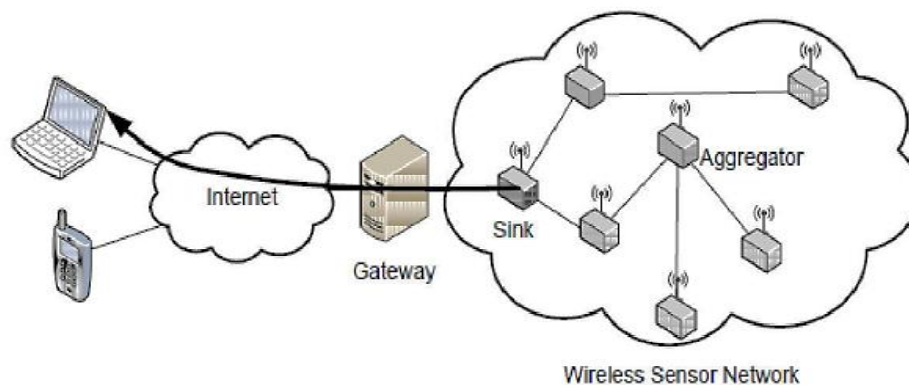


Figure 1.5 : Architecture d'un RCSF [5].

Le principe est que les nœuds doivent surveiller un événement en récupérant des données grâce à leurs capteurs, puis ils envoient les informations à l'agrégateur, puis ils envoient les données collectées à une station de base (*puits*). Cette station de base (*sink*) est un nœud particulier doté d'une puissance de calcul supérieure. Il est en général soit connecté à internet ou par satellite qui lui permet d'envoyer les informations à un serveur pour l'utilisateur final à travers une passerelle (*voir la figure 1.5*).

1.5 Classification des RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil sont classifiés, en réponse à chaque type d'application, selon quatre critères qui se résument en : mode d'acquisition et de livraison des données aux puits, la

distance entre les nœuds capteurs et le puits, le modèle de mobilité dans le réseau, les capacités des nœuds du réseau.

1.5.1 Mode d'acquisition et de livraison des données aux puits

Ce modèle dépend de l'application et ses exigences, on distingue alors quatre types d'application :

- **Orientées temp** (*en anglais : time driven*) : La figure 1.6 (a) représente cette classe où l'acquisition et la transmission des données capturées sont liées au temps [13]. Les nœuds doivent agir selon des instants précis pour réveiller leur émetteur et d'envoyer les données captées à la station de base.
- **Orientées événements** (*event driven*) : Dans ce cas, les capteurs envoient leurs données seulement si un événement spécifique se produit [13]. La figure 1.6 (b) illustre un exemple de ce cas qui est la surveillance des feux dans les forêts, où un capteur envoi des alarmes à la station de base dès que la température dépasse un certain seuil.
- **Orientées requêtes** (*query driven*) : Dans ce type d'application comme montré dans la figure 1.6 (c), les capteurs envoient les informations et les mesures effectuées uniquement après une demande explicite de la station de base [14].
- **Hybride** : Ce type d'application met en œuvre les trois modes de fonctionnement décrits précédemment.

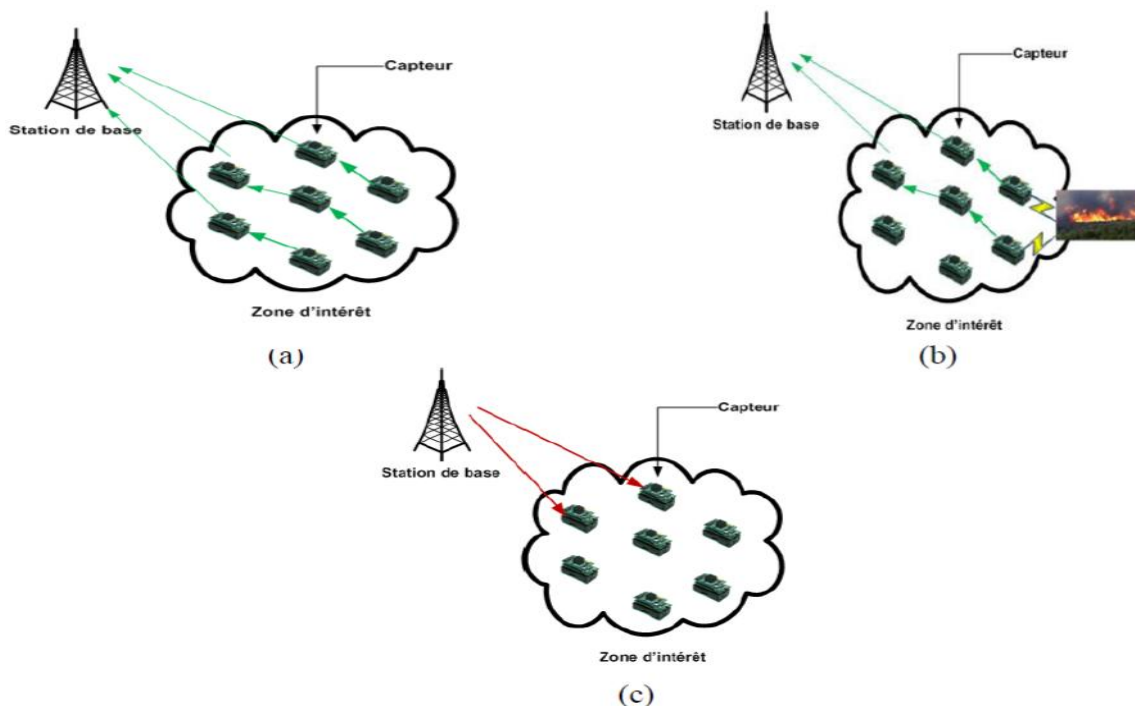


Figure 1.6 : Les types d'application dans les RCSFs [15].

1.5.2 Distance entre les nœuds capteurs et le puits

Dans cette classe, il existe deux types de RCSFs, réseau multi-sauts et les réseaux à un seul saut :

- **RCSFs multi-sauts (*multi-hop WSNs*)** : La distance entre quelques nœuds capteurs et la station de base dépasse leur portée maximale [16] ; donc pour envoyer leurs données à la station de base, ils doivent le faire par l'intermédiaire d'autres nœuds.
- **RCSFs à un seul saut (*single-hop WSNs*)** : Les nœuds capteurs sont dans le voisinage immédiat de la station de base. Ils envoient alors leurs données captées directement à la station de base sans passer par aucun autre nœud intermédiaire.

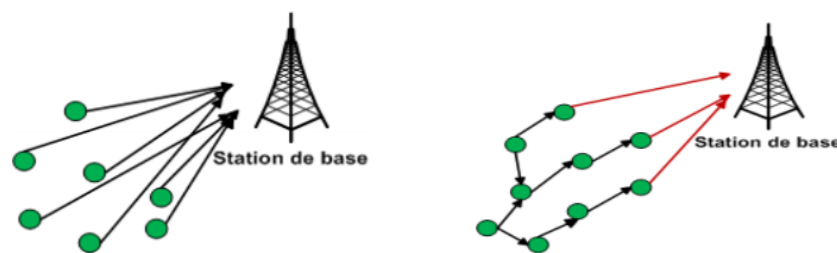


Figure 1.7 : Les modes multi-sauts et à un seul saut [15].

1.5.3 Modèle de mobilité dans le réseau

Cette catégorie dépend de la mobilité des nœuds capteurs et celle de la station de base, il s'agit de deux grandes classes de réseaux : réseaux statiques et réseaux dynamiques [15]. En effet, on peut avoir un réseau constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles et d'une station de base fixe, qui est généralement pour l'exploration de zones inaccessibles ou dangereuses. Quant à un réseau constitué de capteurs et d'une station de base fixes, qui est dédié à la surveillance d'occurrence d'événements sur une zone géographique.

1.5.4 Capacités des nœuds du réseau

Dans cette classification, on distingue deux catégories :

- **Réseau de capteurs homogène** : Les nœuds de ce type du réseau ont les mêmes capacités du point de vue énergie, calcul et stockage.
- **Réseau de capteurs hétérogène** : Dans ce type on trouve des nœuds particuliers qui ont plus de capacité de traitement et de communication que les nœuds normaux, et qui peuvent être utilisés pour accomplir des tâches plus complexes tel qu'un chef du cluster [17]. Mais il est difficile de mettre en place un tel réseau du fait qu'au moins chaque type de nœuds du réseau sera programmé différemment.

1.6 Domaines d'application des RCSF

À l'origine, la motivation initiale derrière la recherche sur les RCSFs était des applications militaires en raison de l'absence de câble entre les nœuds, le déploiement rapide, et l'auto-organisation. Puis, la diminution des coûts de fabrication des capteurs ainsi que la réduction de leur taille ont entraîné l'utilisation de nombreuses autres applications y compris celles utilisées à des fins civil et environnementales.

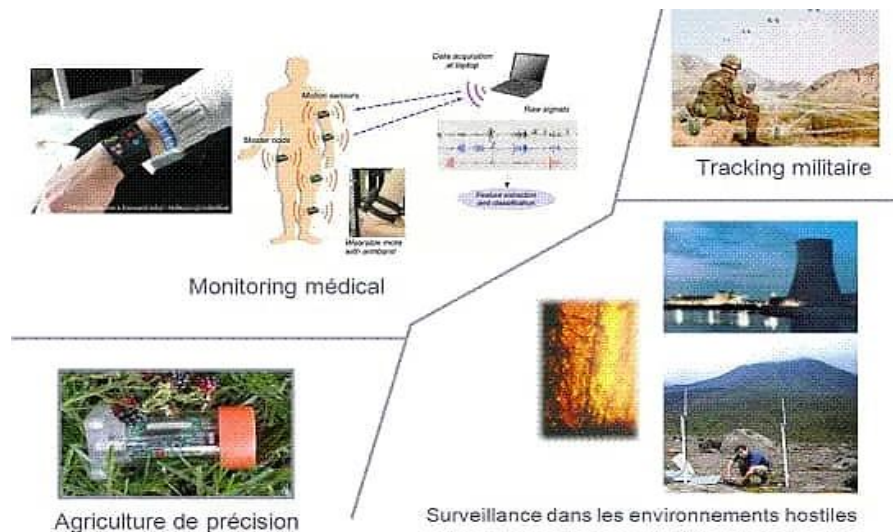


Figure 1.8 : Quelques domaines d'application des RCSFs [18].

Dans ce qui suit, nous présentons une explication plus détaillée des différentes applications :

- **Application militaire :** Dans le domaine militaire, les nœuds capteurs peuvent être des soldats, des chars, des avions de chasse. Cette technologie a impulsé de nouvelles stratégies de communication ou de détection des dispositifs nucléaires et les dépister. Un réseau de capteurs peut être déployé dans un endroit stratégique ou hostile, afin de surveiller les mouvements des forces ennemies, ou analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes [19] ,[20].

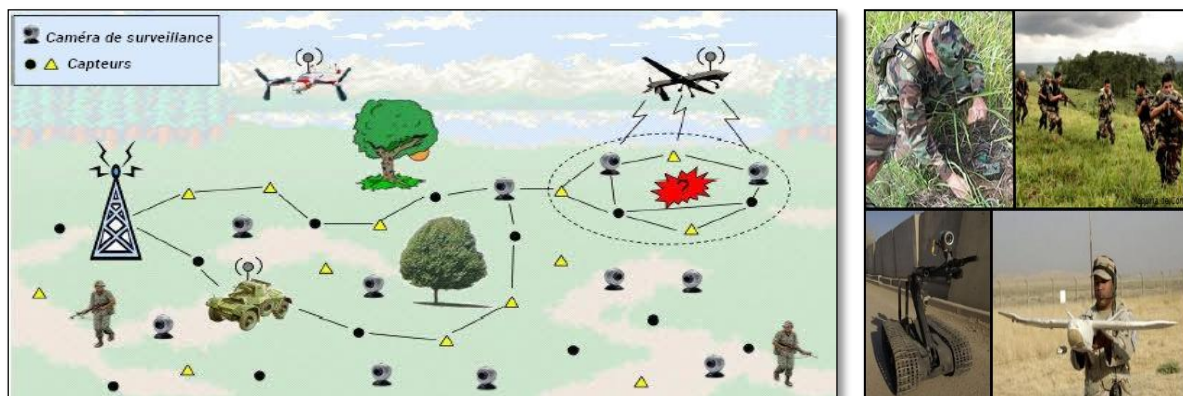


Figure 1.9 : Les capteurs dans le domaine militaire [21].

- Surveillance environnementale** : La création d'un réseau autonome en dispersant les nœuds dans la nature, permet aux capteurs de signaler des incendies, détecter de la pollution, ainsi que de surveiller des catastrophes naturelles [22]. Ce qui assure une intervention beaucoup plus rapide et efficace des secours. La figure 1.10 montre un exemple d'implémentation d'un RCSF pour la détection et la surveillance d'une éruption volcanique.

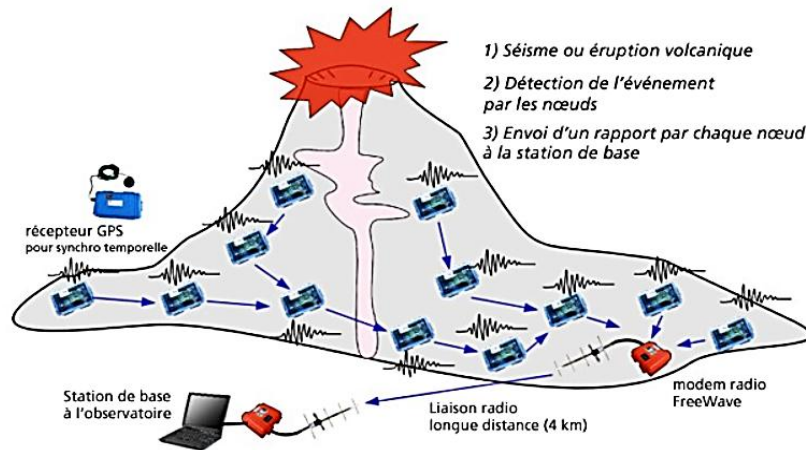


Figure 1.10 : Mise en œuvre d'un RCSF pour la surveillance d'activité volcanique [23].

- Surveillance médicale** : L'implantation des capteurs à des fins de santé est un domaine interdisciplinaire qui a révolutionné le système de soins à distance, ils peuvent être utilisés pour surveiller et contrôler les fonctions vitales d'un être humain. Des micro-capteurs avalés ou implantés sous la peau peuvent traiter certaines maladies sans recours à la chirurgie [24].

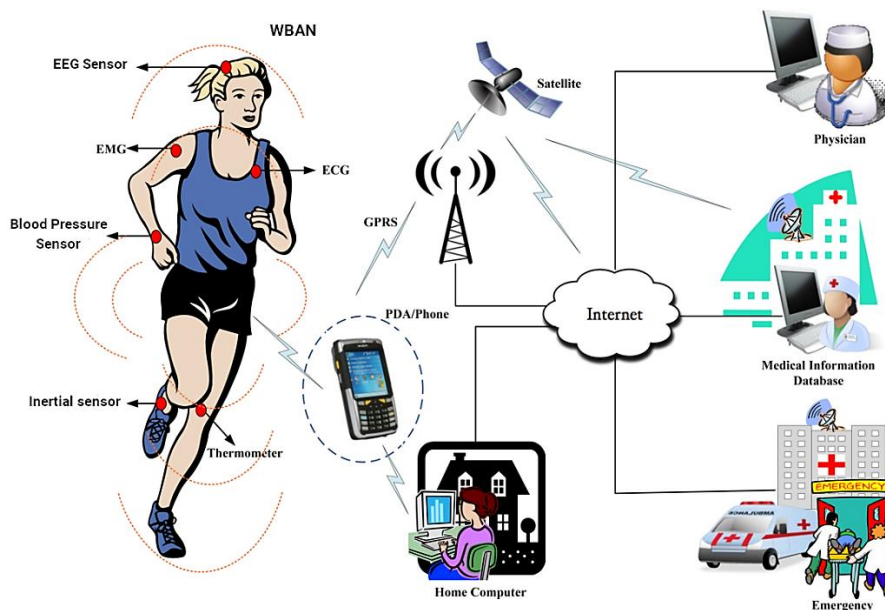


Figure 1.11 : Un exemple des capteurs dans le corps humain [25].

- **Domaine d'agriculture de précision** : Des nœuds capteurs peuvent être incorporés dans la terre pour permettre une meilleure gestion de ressources, et d'assurer un bon suivi de développement des maladies des espèces [18]. Ces capteurs servent aussi à contrôler l'état du champ pour déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité.



Figure 1.12 : Les RCSFs dans le domaine d'agriculture [26].

- **La domotique** : Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière qui s'éteint et la musique qui se met en état d'arrêt quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure [27].

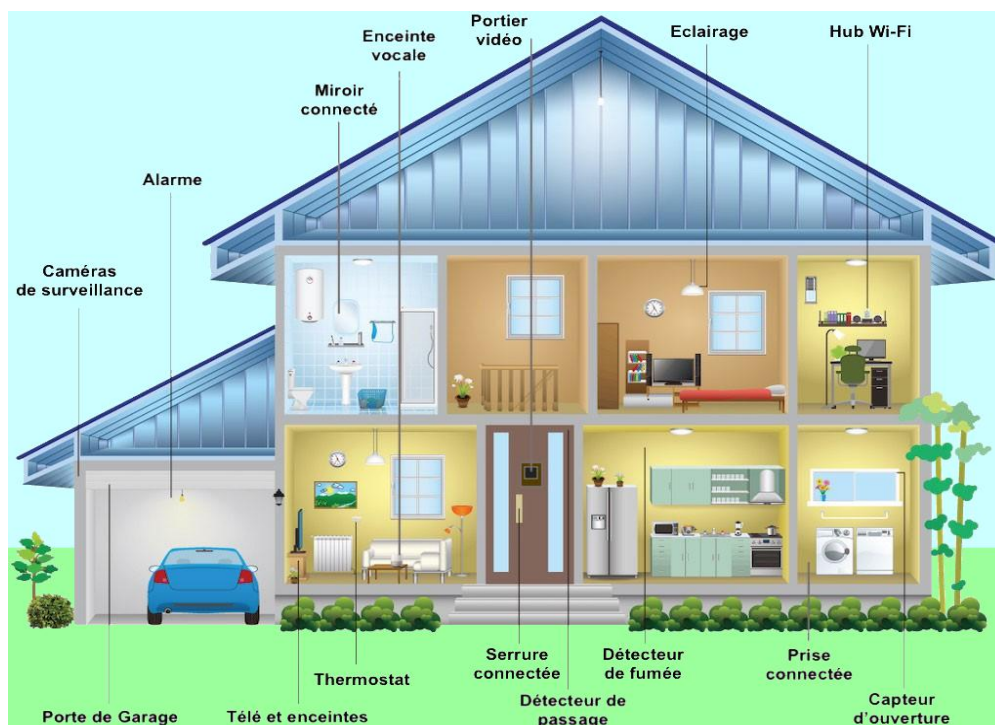


Figure 1.13 : Les nœuds capteurs dans la domotique [28].

1.7 Intégration des RCSFs à l'Internet des Objets

La dernière décennie a vu l'émergence d'une nouvelle thématique de recherche autour des systèmes cyber physiques se basant sur de nouvelles générations de réseaux de capteurs sans fil intelligents appelée Internet des Objets ou IoT (*Internet of Things*) ; où grâce à l'utilisation de capteurs toute l'infrastructure physique est associée étroitement aux technologies de l'information et de la communication.

L'Internet des Objets (*IoT*) vise à déployer des réseaux de capteurs ultra miniaturisés présentant des consommations les plus faibles possibles afin de garantir des durées de vie les plus longues possibles. En effet, les réseaux de capteurs représentent la partie la plus intéressante parmi l'ensemble des technologies fondatrices de l'IoT. Ils ont déjà réalisé un succès remarquable dans différents domaines d'applications urbaines, rurales, civiles et militaires et avec l'intégration à internet, leurs avantages et rendements applicatifs sont prévus à prendre un espace beaucoup plus large avec de nouvelles perspectives [27].

L'incorporation des RCSFs dans l'internet est assez bénéfique. D'une part, ça permet à l'internet de s'étaler aux objets physiques (*autres que les ordinateurs et les téléphones mobiles*) en intégrant des capteurs connectés à internet. De l'autre part, l'accès ubiquitaire aux informations et services fournis par tels capteurs crée de nouvelles perspectives avantageuses aidant à maximiser le confort, optimiser les rendements et minimiser le gaspillage et les dépenses.

1.8 Contraintes de conception de RCSFs

Le processus de conception d'un réseau de capteurs est une tâche cruciale qui dépend de plusieurs contraintes telles que :

1.8.1 Durée de vie

La définition la plus connue de la durée de vie c'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement de l'instant où le premier capteur épuise son énergie [29]. Elle doit être maximisée puisque le remplacement des batteries des capteurs peut être pénible voire impossible. Par conséquent, la durée de vie des capteurs dépend fortement de la durée de vie de leurs batteries. Pour cela, les nœuds capteurs doivent bien gérer leur consommation d'énergie.

Dans un réseau de capteurs multi-sauts, chaque nœud collecte des données et les transmet à la station de base, et joue également le rôle d'un routeur. Le dysfonctionnement de quelques nœuds entraîne un changement significatif de la topologie globale du réseau, et peut nécessiter

un reroutage des paquets et une réorganisation du réseau. Toutes ces opérations consomment beaucoup d'énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les algorithmes et protocoles à faible consommation d'énergie [30].

1.8.2 Tolérance aux fautes

La capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs [18]. Autrement dit, les nœuds capteurs peuvent générer des défaillances ou des dysfonctionnements à cause d'un épuisement de l'énergie, un problème physique ou les interactions externes (*chocs, interférences liées à l'environnement, pertes de nœuds*). La panne d'un nœud capteur ne doit pas affecter le fonctionnement global de son réseau.

1.8.3 Facteur d'échelle (*scalability*)

Selon l'application, le nombre de nœuds déployés sur une zone d'intérêt peut atteindre plusieurs centaines voire des milliers de capteurs. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues [31].

1.8.4 Coûts de production

Souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. A cause de leur grande échelle, le prix d'un nœud devient critique afin d'avoir une utilisation rentable de cette technologie et pour pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel.

1.8.5 Media de transmission

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être normalisé.

1.8.6 Topologie de réseau

Le nombre de nœuds de capteurs inaccessibles et non surveillés, qui sont sujets à de fréquentes défaillances, rend la maintenance de la topologie difficile. C'est pourquoi le déploiement de ces nœuds nécessite une gestion minutieuse de la maintenance de la topologie[32], qui se résume en trois phases : déploiement, post-déploiement et redéploiement de nœuds additionnels.

1.8.7 Agrégation des données

Les réseaux de capteurs sans fil sont caractérisés par leur forte densité, les données produites par les nœuds capteurs sont très corrélées spatialement et temporellement, ce qui entraîne à la redondance de données [33]. Laisser à chaque nœud la liberté de transmettre ses données de capture entraînerait une duplication significative de l'information au niveau de la station de base et ainsi, une surconsommation (*inutile*) de l'énergie.

De ce fait, un choix efficace des nœuds relais et une fusion des données reçues de plusieurs sources permettent de réduire de façon considérable la consommation globale de l'énergie. Cependant, selon les applications, un compromis se pose souvent entre la qualité des données transmises et la durée de vie du réseau [34].

1.9 Pile protocolaire

Pour la gestion de la communication dans les RCSF, une approche basée sur le modèle en couche est adoptée. Ce modèle appelé la pile protocolaire a pour but de standardiser la communication entre les différents composants du réseau afin que les matériels de différents constructeurs puissent être compatibles [35].

A l'instar du modèle de référence OSI (Open System Interconnexion), la pile protocolaire présentée sur la figure 1.14 comporte cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI, ainsi que trois niveaux de gestion.

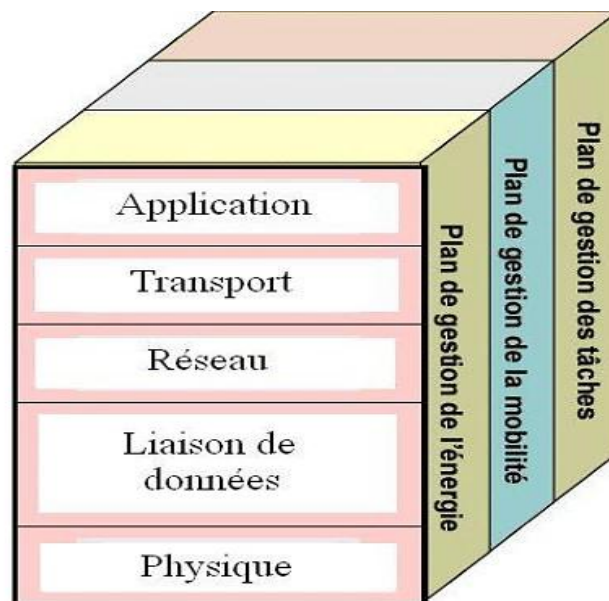


Figure 1.14 : La pile protocolaire [6].

Dans ce qui suit, nous décrivons les rôles associés à chaque couche du modèle, ainsi que ceux des différentes couches de gestions :

1.9.1 Les couches protocolaires

- **La couche physique** : Elle spécifie les caractéristiques matérielles, elle assure l'émission et réception de données, elle est aussi chargée de la sélection des fréquences et de la détection du signal.
- **La couche liaison de données** : Cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, de la détection et du verrouillage des trames de données et du contrôle des erreurs. Elle garantit une connexion fiable (*point à point ou point à-multipoints*) selon la topologie du réseau de capteurs. La sous-couche MAC (*Media Access Control*) de la couche liaison de données gère le contrôle d'accès au média, elle détermine, pour un nœud, la possibilité et le moment d'accéder au canal de communication [17].
- **La couche réseau** : Son rôle principal est de router les données fournies par la couche transport de façon fiable jusqu'à la station de base, tout en essayant d'optimiser au mieux la consommation énergétique induite par l'ensemble des nœuds capteurs participant à ce routage [35].
- **La couche transport** : Elle est chargée de découpage en paquets des données et les transporter, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission [5].
- **La couche application** : C'est la couche la plus haute, qui assure l'interfaçage avec les applications. Elle peut également gérer l'agrégation des données avant leur transfert à la couche transport [6].

1.9.2 Les niveaux de gestion dans les RCSFs

- **Plan de gestion de l'énergie** : Les fonctions intégrées à ce niveau consistent à gérer l'énergie consommée par les capteurs c'est-à-dire contrôler l'utilisation de la batterie [36]. Par exemple après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie devient bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte les informant qu'il ne peut pas participer au routage. L'énergie restante est réservée au captage.

- **Plan de gestion la mobilité :** Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs. Ainsi, un retour arrière vers l'utilisateur est toujours maintenu et le nœud peut garder une image récente sur les nœuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie [8].
- **Plan de gestion des tâches :** Cette couche assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, elle ordonnance les événements captés, et les tâches détectées dans une zone de capture spécifique. Par conséquent, il n'est pas nécessaire que tous les nœuds capteurs qui appartiennent à la même zone de capture effectuent les tâches de capture en même temps; certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie [6], [32].

1.10 Consommation d'énergie dans les RCSFs

La source d'énergie est l'un des composants les plus importants d'un nœud capteur. Elle peut être généralement représentée par une simple batterie à faible autonomie d'énergie. Au-delà de l'endroit inaccessible avec moins de contrôle et d'existence humaine, les sources d'énergie jouent un rôle critique dans la survie des nœuds capteurs.

Ainsi, l'énergie devrait être intelligemment divisée selon le besoin, sur les tâches de captage, de calcul, et de communication. Les capteurs peuvent être mis en veille lorsqu'ils sont inactifs. Un bon nombre de recherches courantes se concentrent sur la conception de protocoles et d'algorithmes de consommation d'énergie minimale (*power-aware*) pour les réseaux de capteurs sans fil.

1.10.1 Opérations dues à la consommation d'énergie

L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes :

- **Energie de capture :** Les sources de consommation d'énergie dans cette phase sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture [12].
- **Energie de traitement :** L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie :
 - L'énergie de commutation : est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (*en exécutant un logiciel*).
 - L'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement.

- **Energie de communication** : L'énergie de communication se décline en trois parties :
 - L'énergie de réception.
 - L'énergie de l'émission.
 - L'énergie en état de veille.

Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur [5].

1.10.2 Mécanismes de conservation de l'énergie

Comme nous l'avons déjà cité, c'est la transmission de données qui se révèle extrêmement consommatrice par rapport aux tâches du nœud capteur. Cette caractéristique conjuguée à l'objectif de maximisation de la durée de vie du réseau a suscité de nombreux travaux de recherche [37].

Avant de citer ces travaux dans le chapitre suivant, nous introduisons dans ce qui suit certains mécanismes de base :

- **Mode d'économie d'énergie** : Ce mode est possible quelle que soit la couche MAC adoptée. Cela consiste à éteindre le module de communication dès que possible.
- **Traitement local** : L'idée de cette technique est que la source peut se censurer. Ainsi une programmation événementielle semble bien adaptée aux réseaux de capteurs. Seuls les changements significatifs de l'environnement devraient provoquer un envoi de paquets le réseau.
- **Organisation des échanges** : Ce procédé revient à limiter les problèmes de retransmission dus aux collisions. La principale innovation, apportée par ce protocole, est d'avoir un mécanisme de mise en veille distribué sur chaque nœud du réseau dans le but de réduire la consommation d'énergie.
- **Répartition de la consommation d'énergie** : La formation de *clusters* permet d'envisager des réseaux comportant un très grand nombre de capteurs. Elle favorise une meilleure répartition de la consommation d'énergie.

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à l'étude des réseaux de capteurs sans fil, en présentant en vue générale sur les capteurs sans fil et leurs architectures. Nous avons également essayé à travers cette partie de mettre le point sur les critères de classification des RCSFs, et leurs domaines d'application, ainsi que les contraintes de conception de ce type de réseau.

Les principales opérations dues à la consommation d'énergie ont été ensuite mises en relief, notamment les mécanismes de conservation d'énergie.

Dans ce qui suit, nous détaillons les différents protocoles de routages des RCSFs.

Chapitre 2 : Routage dans les réseaux de capteurs sans fil

2.1 Introduction

Les RCSFs sont caractérisés par leurs déploiements dans des environnements hostiles, leurs architectures sans infrastructure, ainsi que les limites imposées par les nœuds capteurs qui les constituent tels que leurs limites en termes d'énergie et en capacité de stockage. Ces caractéristiques figurent parmi les facteurs primordiaux à prendre en compte lors de la conception d'un protocole de routage.

Ce chapitre présente, en premier lieu, la définition et la classification des différentes approches du routage dans les réseaux de capteurs sans fil. Ensuite une deuxième partie est dédiée à la présentation de quelques protocoles de routage proposés pour ce type de réseau.

2.2 Routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Le routage est un processus qui permet de sélectionner des chemins dans un réseau pour transmettre des données depuis un expéditeur jusqu'à un ou plusieurs destinataires. On parle de routage dans différents domaines : réseaux téléphoniques, réseaux électroniques (*comme Internet*), réseaux de transports.

L'objectif principal d'un protocole de routage pour un réseau de capteurs sans fil est l'établissement correct et efficace d'itinéraires entre une paire de nœuds afin que des messages puissent être acheminés. Le protocole de routage permet aux nœuds de se connecter directement les uns aux autres pour relayer les messages par des sauts multiples et de transmettre les données vers un point de collecte [38].

2.3 Classification des protocoles de routage dans les RCSFs

Les protocoles proposés présentent les points communs et donc peuvent être classifiés suivant un certain nombre de critères. La figure 2.1 ci-dessous résume une classification qui se base sur quatre critères : la structure du réseau, mode d'établissement des chemins, les paradigmes de communication et selon le mode de fonctionnement du protocole.

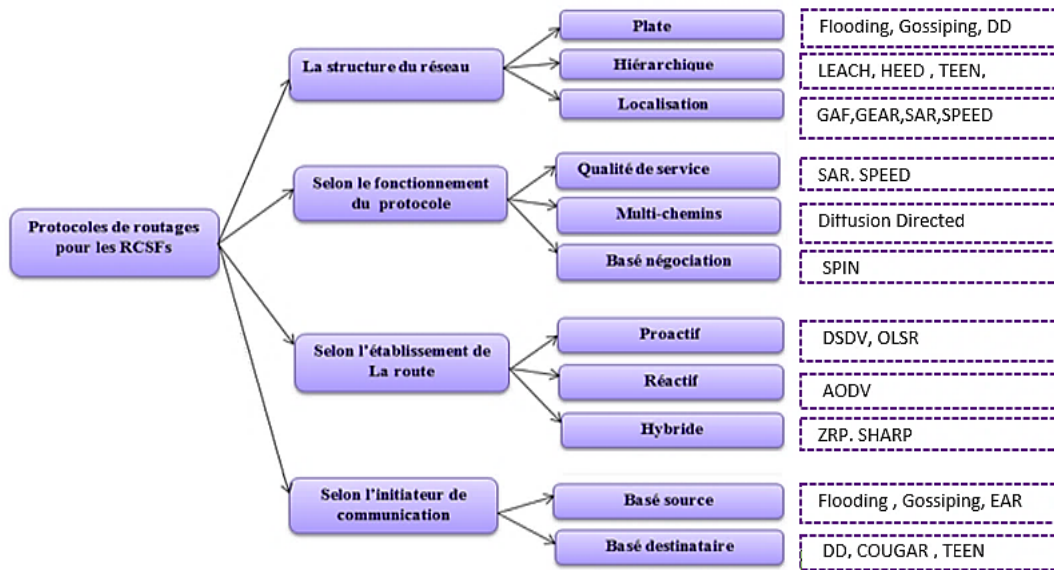


Figure 2.1 : Diagramme de classification des protocoles de routage.

2.3.1 Classifications selon la structure du réseau

La structure ou la topologie détermine l'organisation des capteurs dans le réseau, Les protocoles inclus dans cette catégorie sont divisés en trois sous catégories en fonction de leurs fonctionnalités.

- **Protocoles de routage plat (*flat routing*) :**

Un réseau de capteurs sans fil plat est un réseau homogène où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et de complexité du matériel et ont le même rôle, excepté la station de base qui joue le rôle d'une passerelle et qui est responsable de la transmission de l'information collectée à l'utilisateur final. Selon le service et le type de capteur, une densité de capteurs élevée, ainsi qu'une communication multi-sauts peuvent être nécessaires pour une architecture plate [39]. Ce type de solution permet une grande tolérance aux pannes, cependant, elle souffre d'une faible scalabilité. En effet, si tous les nœuds opèrent de la même façon et d'une manière distribuée, on aura un grand nombre de messages de contrôle nécessaires pour le bon fonctionnement du réseau.

- **Protocoles de routage hiérarchique (*hierarchical routing*) :**

Dans une topologie hiérarchique ou le routage par groupement, l'objectif principal est de maintenir efficacement la consommation d'énergie de nœuds de capteurs en les impliquant dans la communication multi-hop au sein d'un cluster et en effectuant l'agrégation et la fusion des données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination [9]. Cette approche

est basée sur le *clustering*, qui consiste en un partitionnement du réseau en groupes appelés clusters (*zones communes*). Le principe est de router les données récoltées par chaque nœud du cluster à son chef de zone (*Cluster Head*), le *CH* est élu suivant différents critères et informations sur le réseau: le niveau de l'énergie d'un capteur, la connexion avec les autres capteurs, la position géographique [40], son rôle est de faire le relais entre les nœuds du cluster et la station de base directement ou via d'autres CHs. L'inconvénient majeur de ce type concerne la taille du réseau. En outre, quand la taille du réseau augmente, le processus d'élection du *Cluster Head* devient critique et gourmand en ressources.

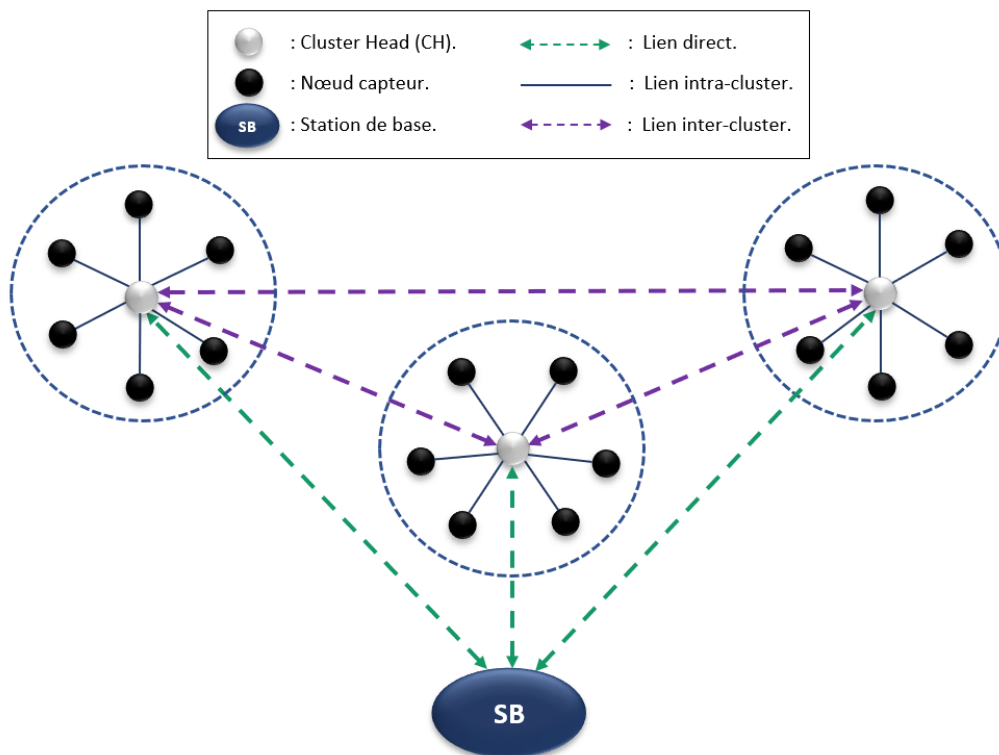


Figure 2.2 : Topologie hiérarchique d'un RCSF.

▪ **Protocoles de routage basés sur la localisation (géographique) :**

Dans ce type de protocoles la position du nœud prime sur son adresse, pour cela il est supposé que chaque nœud du réseau connaisse sa position et les positions de ses voisins. Le positionnement du nœud peut être obtenu en utilisant un système de géo-positionnement tel que le GPS. Le principe général consiste à obliger les nœuds, qui ne sont pas sur le chemin du routage choisi, à entrer en mode sommeil pour conserver l'énergie. Chaque nœud source de donnée connaît la position du destinataire de ses données de cette façon une estimation de la consommation de l'énergie est réalisée au préalable pour désigner le chemin le plus rentable énergétiquement [19].

2.3.2 Classifications selon le fonctionnement de protocole

Le fonctionnement des protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil, peut être utilisé comme un facteur de classification de ces derniers. En utilisant ce critère, on peut distinguer les trois catégories de protocoles de routage suivantes :

- **Routage basé sur la QoS (Qualité de service) :**

Dans ce routage, le réseau bascule entre l'énergie et la qualité des données transmises. Le délai d'acheminement de bout en bout, la bande passante et le taux d'erreurs, peuvent être les qualités de service qui réalisent un routage équilibré en termes de consommation d'énergie et de délivrance de données en temps réel. Pour cela, la QoS doit être prise en compte dans les approches de ce protocole [42].

- **Routage multi-chemins :**

Afin d'augmenter les performances du réseau les protocoles de routage de cette approche maintiennent divers chemins au lieu d'un seul. Une alternance de chemins est prise par les données pour qu'ils puissent être acheminés de la source vers la destination. Ces derniers sont maintenus par l'envoi périodique des messages [5].

Malgré l'augmentation de la fiabilité et la robustesse du réseau vu par ce protocole une perte additionnelle d'énergie due à l'envoi des messages périodiques pour maintenir les chemins alternatifs est provoquée. Aussi, une augmentation de risque de perte des paquets à cause d'une utilisation des chemins ayant des nœuds communs qui peuvent tomber en panne.

- **Routage basé sur la négociation :**

Ce protocole est basé sur la suppression des données redondantes dans le réseau. Avant la transmission de données, une négociation se fait entre les nœuds capteurs et leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciales pour vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre [10].

2.3.3 Classifications selon la manière d'établissement de route

Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage nous distinguons trois catégories de protocoles de routages.

- **Protocoles proactifs :**

Dans ce protocole l'établissement de route est fait à l'avance, en se basant sur l'échange périodique des tables de routage. Pour maintenir les meilleurs chemins existants vers toutes les destinations possibles dans ce routage, chaque élément de réseau cherche à établir des tables de routage valides en permanence [43]. Ce qui est bien dans ce protocole est la facilité d'acheminement des données, mais le problème est le stockage des routes malgré leur inutilité

- **Protocoles réactifs :**

Dits aussi protocoles de routage à la demande, Dans ce protocole une route n'est calculée qu'au besoin d'une communication entre deux nœuds. Suite à ce besoin, une procédure de découverte de route est lancée, la route est découverte chaque fois qu'elle existe. La durée d'obtention d'une route est souvent plus longue car la recherche d'un chemin vers la destination commence uniquement lorsque la source veut transmettre des données [44].

- **Protocoles hybrides :**

Ils combinent les deux idées des protocoles proactifs et réactifs, ce protocole utilise les méthodes proactives pour découvrir les routes dans un voisinage, puis il les dispose immédiatement. Au-delà de cette dernière, une politique réactive est mise en place pour chercher les routes [43].

2.3.4 Classifications selon l'initiateur de communication

Les communications dans les réseaux de capteurs peuvent être lancées par les nœuds sources ou par les nœuds destinations.

- **Communication lancée par la source :**

Dans ce protocole de communication, quand les données sont capturées les nœuds les envoient à la destination. Ces protocoles sont utilisés dans les applications orientés temps (*time driven*), et orientées événement (*event driven*). À cause de l'absence des requêtes générées par le nœud puits qui consomme beaucoup d'énergie, une efficacité énergétique s'effectue avec ce protocole.

- **Communication lancée par la destination :**

Ces protocoles sont utilisés généralement dans les applications orientées requêtes (*query driven*), dans lesquelles ces dernières sont envoyées à la destination en décrivant ses besoins. A la réception d'une demande, le nœud de capteur s'occupe de répondre par une transmission des données s'il y a lieu, si non les données seront diffusées à tous les nœuds d'une région topologique [43].

L'avantage de ce protocole est l'élimination des transmissions inutiles du fait que les requêtes sont envoyées avec une description des données requises par le nœud puits. Mais, les requêtes à grande taille qui circulent peuvent causer un épuisement au niveau des batteries des capteurs.

2.4 Protocoles de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Plusieurs exemples de protocoles de routages dans les réseaux de capteurs sans fil sont décrits dans la littérature, nous allons présenter les plus référencés :

2.4.1 Protocole Flooding

Dans le protocole Flooding appelé aussi l'inondation, les nœuds reçoivent les messages sous forme d'un paquet de données, ensuite il les diffuse à tous les voisins et ce processus continue jusqu'à ce que le paquet arrive à la destination ou le nombre maximum de saut pour le paquet est atteint [5].

▪ Avantages :

- Cette technique ne nécessite pas des algorithmes complexes pour la découverte des routes.

▪ Inconvénients :

- Ce protocole présente deux inconvénients majeurs qui sont le problème d'implosion et le problème de chevauchement, comme illustrés dans la figure 2.3 et la figure 2.4 respectivement :

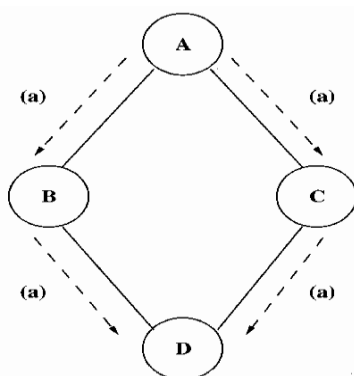


Figure 2.3 : Problème d'implosion [31].

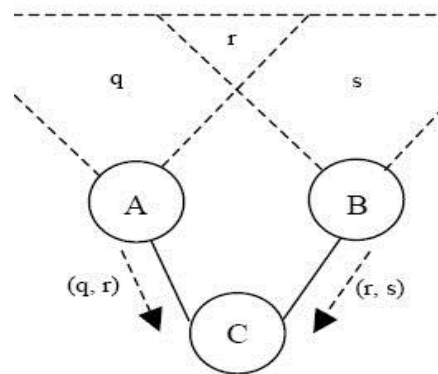


Figure 2.4 : Problème de chevauchement [31].

Implosion : Se produit lors que les mêmes messages dupliqués sont envoyés à un même nœud, ensuite vont diffuser le même paquet au nœud suivant, d'où ce dernier reçoit deux copies de même paquet donc il peut plus distinguer entre les anciens paquets et les plus récents.

Chevauchement : Se produit lorsque deux nœuds captent le phénomène dans la même région, la même information sera envoyée deux fois aux nœuds voisins (*redondance*).

2.4.2 Protocole DD (Directed Diffusion)

C'est un protocole de routage de catégorie centré données (*Data-Centric*) et appartient aussi à la famille des protocoles réactifs [45], permettant d'utiliser plusieurs chemins pour le routage d'information. La figure illustre le fonctionnement de ce protocole :

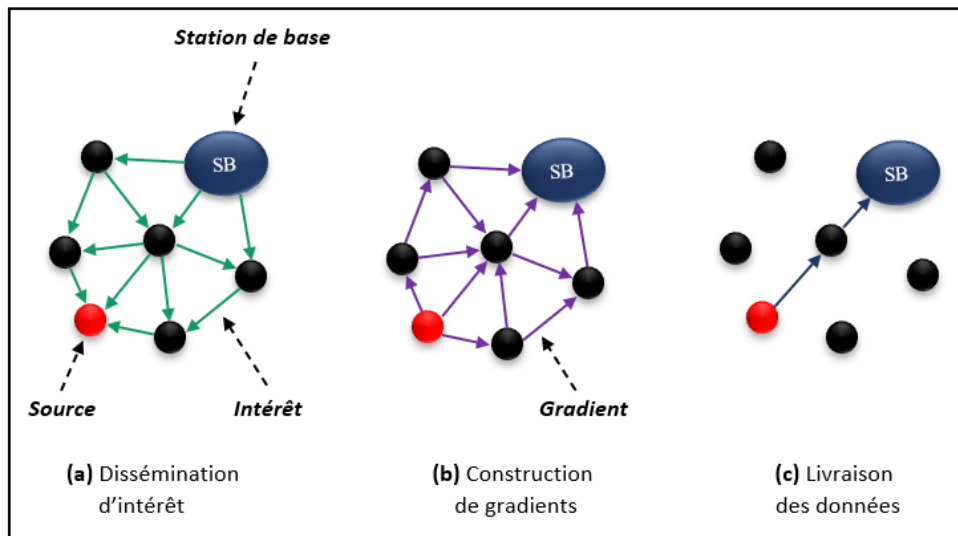


Figure 2.5 : Fonctionnement du protocole DD.

La première phase appelée la dissémination d'intérêt où la station de base diffuse un intérêt qui indique une liste de paires (*Attribut, valeur*), par exemple (*température, 30*), c'est-à-dire acheminer les données de tous les nœuds ayant mesuré une température supérieure à 30. Avec cette requête, la station de base aura seulement les données pertinentes dont l'utilisateur a besoin, l'intérêt est une liste qui contient la fréquence avec laquelle les nœuds vont envoyer leurs données, et il peut également avoir une estampille qui indique le moment où les nœuds vont arrêter l'envoi de ces données ainsi que l'identifiant des voisins qui ont envoyé l'intérêt, et le débit vers ces voisins.

La deuxième phase présente la réception de l'intérêt où le nœud vérifie s'il existe dans sa mémoire, puis il enregistre l'identifiant du nœud émetteur de telle façon à établir plusieurs gradients pour le même intérêt, sinon il le rediffuse vers ses voisins. Un gradient est un chemin créé par chaque nœud qui reçoit un intérêt, Chaque nœud établit plusieurs gradients associés à chaque intérêt stocké dans sa mémoire, il est caractérisé par le débit, la durée et le temps d'expiration fournis par l'intérêt. Ces gradients sont établis afin de tracer les routes, pour que l'une de ces routes sera ensuite renforcée pour être utilisée [39].

▪ **Avantages :**

- Ce protocole permet l'agrégation de données au niveau de chaque nœud, ce qui élimine la retransmission de messages redondants,
- Ce protocole utilise la notion de routage par multi saut (*multi-hop path routing*) qui permet de réduire la consommation énergétique lors de la transmission de données,
- La capacité de scalabilité, permettant au protocole de fonctionner sans une dégradation des performances dans un grand réseau.

▪ **Inconvénients :**

- L'absence d'une infrastructure de sécurité qui permet de sécuriser les communications,
- L'absence d'une métrique de consommation d'énergie qui lui permet le choix des routes les plus efficaces en consommation d'énergie parmi celles explorées.

2.4.3 Protocole HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering)

HEED est un protocole de clustering distribué pour les réseaux de capteurs. Par opposition aux techniques de routages précédentes, HEED ne fait aucune restriction sur la distribution et la densité des nœuds. Il ne dépend pas de la topologie du réseau ni de sa taille mais il suppose que les capteurs ont la possibilité d'ajuster leur puissance de transmission. Dans HEED, les CHs sont élus en fonction des critères tels que l'énergie résiduelle et le degré des nœuds [46]. Il vise ainsi à réaliser une distribution uniforme des clusters heads dans le réseau et à générer des clusters équilibrés en taille afin de garantir la connectivité du graphe formé par l'ensemble des CHs.

L'élection d'un nœud U comme cluster head se fait avec une probabilité P_{CH} égale à :

$$P_{CH} = C_{prob} \cdot \frac{E_R(U)}{E_{Total}} \quad (2.1)$$

Où :

- E_R est l'énergie résiduelle du nœud U .
- E_{Total} est l'énergie totale dans le réseau.
- C_{prob} est le nombre optimal de clusters.

Toutefois, il est difficile d'évaluer E_{Total} à cause de l'approche distribuée (*absence de toute commande centrale*). Une autre difficulté dans HEED réside également dans la détermination du nombre optimal de clusters.

▪ Avantages :

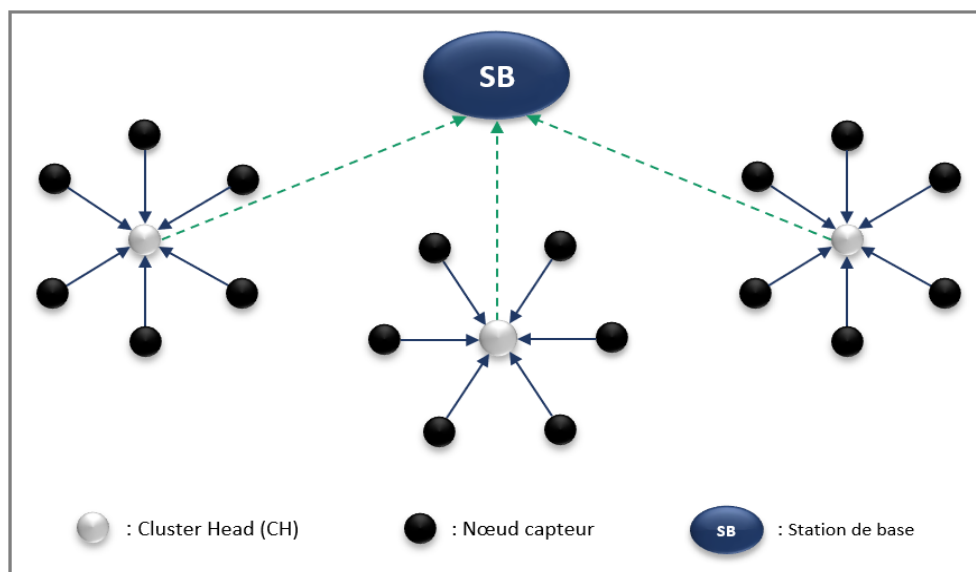
- HEED prolonge la durée de vie du réseau en distribuant l'énergie de la communication et le nombre de CHs d'une façon uniforme et donc produire des clusters compacts tout en minimisant la charge des messages de contrôle.
- HEED n'indique aucune supposition sur la distribution ou la densité des nœuds, ainsi que leurs capacités

▪ Inconvénients :

- Avec HEED, la topologie en clusters ne réalise pas de consommation minimale d'énergie dans les communications intra cluster.
- Les clusters générés avec HEED ne sont pas tellement équilibrés en taille.

2.4.4 Protocole LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)

Dans ce protocole un clustering est distribué pour le routage dans les réseaux de capteurs homogènes, il choisit aléatoirement les nœuds qui vont être des CHs (*cluster heads*) et il donne un rôle aux différents nœuds suivant la méthode de tourniquet. Cette dernière permet une équitable consommation d'énergie entre tous les nœuds d'un même cluster. Une agrégation de données est faite par les clusters heads afin de minimiser la quantité de données transmises à la station de base [47]. Le protocole LEACH se compose de deux phases : La phase d'installation (*set-up*) et la phase de communication (*steady-state*), Dans la première phase, les clusters heads sont sélectionnés et les clusters sont formés, et dans la seconde phase, le transfert de données vers la station de base aura lieu (voir figure 2.6).

**Figure 2.6** : Protocole de routage LEACH.

▪ Avantages :

- Dans le protocole LEACH, la consommation d'énergie est partagée sur l'ensemble des nœuds prolongeant ainsi la durée de vie du réseau.

▪ Inconvénients :

- Dans certains cas, la transmission périodique des données pourrait ne pas être nécessaire, ce qui épuise rapidement l'énergie limitée des capteurs.
- La distance entre le chef du groupe et la station de base peut être longue après une agrégation de données ce qui provoque une consommation d'énergie éventuelle.

2.4.5 Protocole GAF (Géographic Adaptive Fidelity)

GAF est un protocole de routage basé sur la localisation des nœuds, il est conçu principalement pour les réseaux Ad hoc mais peut être applicable pour les réseaux de capteur. Le principe de GAF est de former une grille virtuelle à travers le champ de captage, où chaque nœud est affecté à une zone selon les coordonnées géographiques par GPS (*global Positioning System*) dont l'objectif est la déconnection des nœuds inutiles du réseau sans affecter le niveau de fidélité de l'opération de routage, le niveau de fidélité concerne la connectivité persistante des nœuds capteur communicant entre eux [48]. De ce fait les nœuds se trouvant dans la même zone de la grille sont considérés équivalents en termes de coût lié au routage des paquets, cette équivalence est assurée en utilisant un seul nœud à la fois et de mettre en veille les autres nœuds associés au même point de la grille afin d'optimiser la quantité d'énergie consommée.

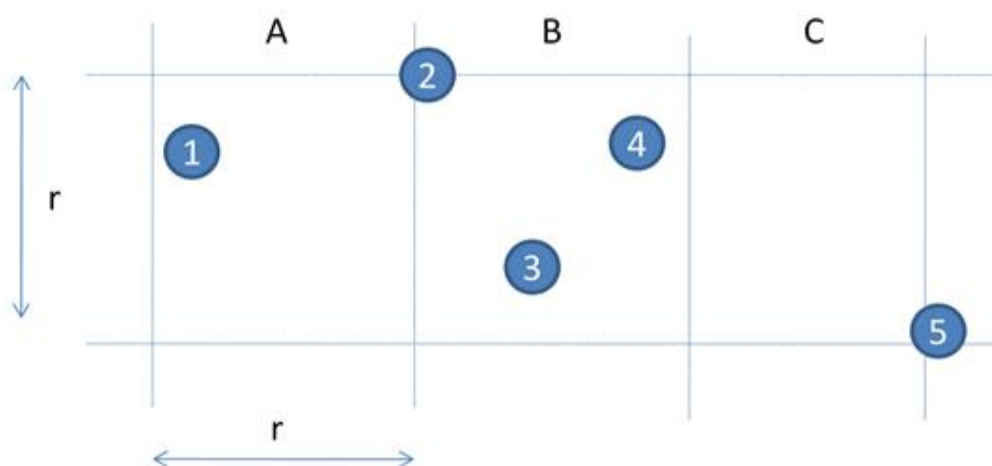


Figure 2.7 : Exemple d'une grille virtuelle dans GAF.

La figure ci-dessus illustre l'exemple de la grille dans GAF, où le nœud 1 peut atteindre les nœuds 2,3 et 4, Ces derniers peuvent atteindre le nœud 5, donc les nœuds 2,3 et 4 sont équivalents alors deux d'entre eux peuvent être mis en veille.

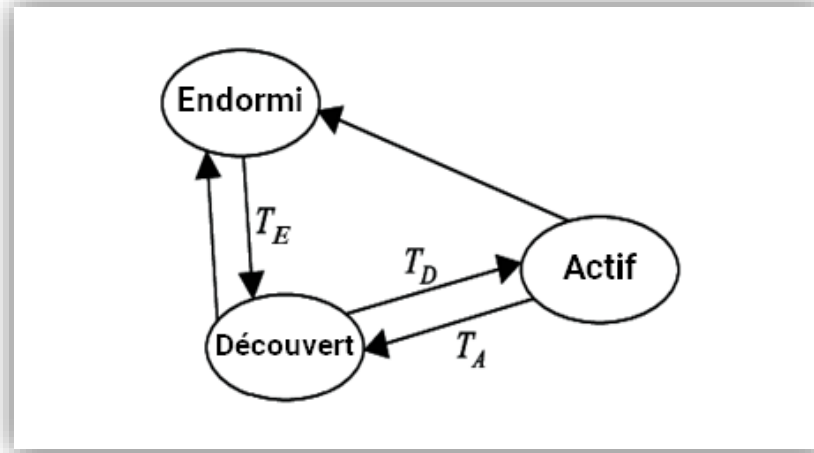


Figure 2.8 : Transitions des états dans GAF.

Dans GAF, le nœud peut se retrouver dans l'un des trois cas possibles, comme montré dans la figure ci-dessus :

- Mode découvert (*en anglais : Discovery*) : pour déterminer ses voisins de zone.
- Mode actif (*active*): s'il participe dans le routage de données.
- Mode endormi (*sleeping*) : s'il ne participe pas au routage.

▪ **Avantages :**

- Le GAF, grâce à des techniques géométriques, il permet de faciliter le contrôle de la topologie et la puissance de transmission entre nœuds.
- L'espace de stockage en utilisant le routage avec GAF est très réduit car il ne nécessite aucune table de routage.

▪ **Inconvénients :**

- Dans certains environnements où les nœuds sont fortement mobiles, la fidélité du routage de ce protocole pourrait être réduite si un nœud actif quitte la grille. Ainsi, le nombre de données perdues sera important.
- GAF ne prend pas en compte l'énergie du nœud lors du choix du représentant, ce qui peut générer des trous dans le réseau une fois que ce dernier épuise son énergie.

2.4.6 Protocole SAR (*Sequential Assignment Routing*)

Ce protocole est une approche de clustering pour l'agrégation des données dans les réseaux de capteurs surveillant plusieurs cibles. Ce dernier crée des arbres de routage aux voisins à un seul saut du puits en prenant en considération certaines métriques telle que la qualité de service (*quality of service*), la ressource énergétique sur chaque chemin et le niveau de priorité de chaque paquet.

L'objectif de cet algorithme est de déterminer le nombre de cibles et les localisations approximatives des clusters associés aux cibles dans la zone d'intérêt, puis les surveiller quand elles se déplacent, rejoignent ou quittent la zone d'intérêt. Au début, les nœuds examinent les caractéristiques spatiales des signaux associés aux cibles. Ainsi, lorsque plusieurs nœuds proches surveillent des cibles données, alors ils sont regroupés en clusters selon leurs proximités avec ces dernières et de sorte qu'il y ait un seul pic par cluster. Un pic pourrait représenter une cible, plusieurs cibles proches ou aucune cible [22]. Le mécanisme d'élection des CH (*cluster Head*) se fait dans un voisinage à un seul saut et le nœud ayant le plus grand niveau de signal parmi ses voisins à un saut va se déclarer le CH (*cluster head*).

Avantages :

- La haute précision de choix des clusters-head produit une économisation d'énergie.
- La surveillance de plusieurs cibles, fixes ou mobiles, rend ce protocole très adopté au RSCSFs.

▪ **Inconvénients :**

- Chaque capteur doit avoir une connaissance géographique du réseau.

2.4.7 Protocole SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*)

Le principal but de ce protocole est de résoudre le problème d'inondation causée généralement à la duplication inutile des réceptions d'une même donnée et à la redondance de couverture liée au déploiement dense des capteurs. En effet, en utilisant l'inondation, les capteurs qui ont des zones de couverture qui se chevauchent vont émettre des mesures similaires ou presque identiques. Ce phénomène cause généralement des dépenses inutiles d'énergie et affecte grandement les performances du réseau surtout la durée de vie de ce dernier. Afin de résoudre de tels problèmes [35]. SPIN adopte les deux principes :

- La négociation : permet aux nœuds capteurs d'éviter le problème d'implosion avec une description de données en utilisant le concept de méta donnée, puis est au récepteur d'accepter ou de refuser la donnée envoyée.
 - L'adaptation aux ressources : permet aux nœuds capteurs de contrôler leurs niveaux d'énergie continuellement, et il s'adapte à l'état de chaque nœud capture en fonction de son énergie résiduelle.
- **Avantages :**
 - Une précision lors de l'envoi de données donc un contrôle de consommation d'énergie.
 - **Inconvénients :**
 - SPIN est un protocole non évolutif.

2.4.8 Protocole DSDV (*Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing Protocol*)

Le protocole DSDV est un protocole de routage proactif. Il a été conçu spécialement pour les réseaux mobiles, dans ce protocole chaque nœud maintient une table de routage qui contient la plus courte distance et le plus court chemin à tous les autres nœuds voisins. Dans ces tables de routage de DSDV on trouve :

- Toutes les destinations possibles,
- Le nombre de nœuds nécessaire pour atteindre la destination,
- Le numéro de séquences qui correspond à un nœud destination,
- Les numéros de séquence sont utilisés dans DSDV pour distinguer les anciennes et nouvelles routes et pour éviter aussi la formation de boucles de parcours.

Afin d'établir ces tables de routages dans ce protocole, chaque nœud envoie périodiquement sa table de routage à ses voisins directs, il peut aussi transmettre sa table de routage si le contenu de cette dernière est variable par rapport au dernier contenu envoyé [44].

- **Avantages :**
 - DSDV est un protocole qui maintient une vue à jour sur la topologie du réseau grâce à la mise à jour qui se propage dans tous ce dernier.
- **Inconvénients :**
 - Une attente de mise à jour par un nœud destination peut provoquer un retard, ce dernier peut entraîner un routage d'information périmé aux nœuds.

2.4.9 Protocole AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector)

AODV est un protocole réactif basé sur le principe des vecteurs de distance, il réduit le nombre de diffusions de messages, et cela en créant les routes lors du besoin, contrairement au DSDV, qui maintient la totalité des routes. AODV utilise les principes des numéros de séquence d'une façon similaire à DSDV.

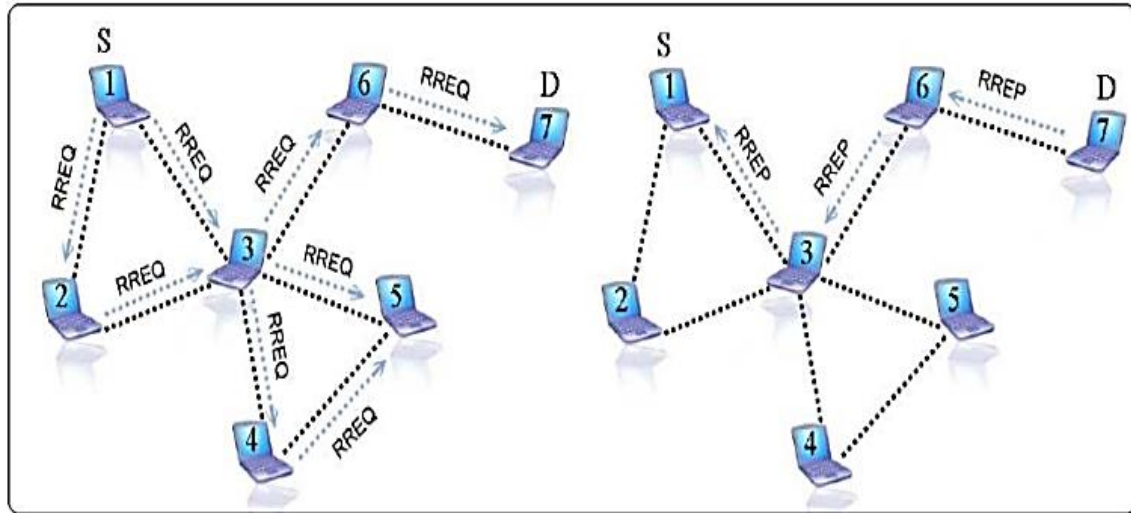


Figure 2.9 : Fonctionnement de la procédure de demande de route dans AODV [40].

La Figure 2.9 illustre le mécanisme de création des routes d'AODV. Commencant par la diffusion de la demande de route, où un nœud diffuse un message de demande de route à son voisin (RREQ : *Route Request message*). Pendant son acheminement dans le réseau, le message RREQ crée des entrées temporaires des tables de routage pour la route inverse des nœuds à travers lesquels il passe. Ensuite, lorsque la destination ou la route d'acheminement est trouvée, la route est rendue accessible par un message RREP (*Route Reply*) répondant au RREQ du nœud source. Le message répondant au RREQ revient sur le chemin temporaire laissé de celui-ci. Au cours de son chemin inverse vers la source, le RREP crée des entrées pour la destination dans les tables de routage des nœuds intermédiaires. Ces entrées de routage ont une durée déterminée après laquelle elles expirent [49].

La détection des nœuds voisins se réalise par l'envoi des message périodiques, si un nœud ne reçoit pas ce message pendant un laps de temps donnée, il considère que la liaison avec ce voisin est rompue et il transmet cette information de défaillance aux autres voisins afin de procéder à la réinitialisation d'une nouvelle découverte de chemins.

▪ Avantages :

- Le protocole AODV ne présente pas de boucle de routage, en outre il évite le problème de comptage à l'infini de l'algorithme de Bellman-Ford, ce qui offre une convergence rapide quand la topologie du réseau ad hoc change.

▪ Inconvénients :

- Le protocole de routage AODV ne possède pas le paramètre énergie dans sa table de routage. Donc, il n'assure pas un meilleur chemin entre la source et la destination en termes de préservation d'énergie.

2.4.10 Protocole ZRP (Zone Routing Protocol)

Ce protocole fait partie des protocoles de routage hybride, il est une combinaison des meilleures caractéristiques des deux protocoles de routage proactifs et réactifs.

Ce protocole fonctionne en principe de répartition des nœuds en zones de routages qui est un l'ensemble des nœuds qui se trouvent à une distance inférieure ou égale au rayon de la zone. À l'intérieur de la zone le routage s'effectue de façon proactive contrairement à l'extérieur le routage s'effectue d'une façon réactive [10].

Donc ZRP repose sur trois procédures : IARP (*IntraZone Routing Protocol*) et IERP (*Interzone Routing Protocol*), et BRP (*Bordercast Routing Protocol*) :

- IARP (*IntraZone Routing Protocol*) : au niveau de chaque nœud interne à la zone, le protocole à état de lien permet de construire une table des routes optimales vers les voisins proches.
- IERP (*Interzone Routing Protocol*) : quand une demande vient d'une zone externe ce protocole charge de la recherche des routes, Comme dans tout protocole réactif cette recherche se fait par inondation, en cas d'un problème de contrôle de flux, une adresse et un identifiant de requête se constitue sur chaque source. Si une requête a déjà été traitée par un nœud, il n'en tiendra plus compte par la suite. Après une troisième procédure intervienne.
- BRP (*Bordercast Routing Protocol*) : permet un contrôle d'inondation du réseau plus précis. Si un nœud source se situe dans la zone IARP et connaît tous ses voisins, il est donc inutile de tous les interroger, donc il se contente d'interroger les nœuds de notre zone de routage et limite dans le broadcast. En effet BRP en premier lieu est pour définir la frontière des zones de chaque nœud grâce à la technique de Bordercasting (*procédure de transmission de paquets entre les nœuds et les nœuds périphériques*).

Si on se base sur l’approche réactive, les routes sont déterminées par des requêtes « RREQ», les réponses par « RREQ » et la détection d’erreurs est transmise par RRER (*Route Error*) des nœuds inaccessibles [10].

▪ **Avantages :**

- Ce protocole est une combinaison des meilleures caractéristiques des protocoles proactive et réactive.

▪ **Inconvénients :**

- Une probabilité de production d’un débit plus élevé à cause de l’absence de contrôle de requête.

2.5 Synthèse des protocoles de routage dans les RCSFs

Pour comparer et analyser les différentes philosophies des protocoles de routage conçus pour les réseaux de capteurs sans fil, il est important d'utiliser des critères de classification appropriés pour pouvoir les distinguer. En effet, la classification permet aux concepteurs de mieux comprendre les caractéristiques de ces protocoles et de discerner les relations qui les relient.

Le tableau 2.1 résume les caractéristiques principales de chaque protocole :

	Topologie	Mobilité	Usage d'énergie	Agrégation des données	Qualité de service	Scalability	Multi-chemins	Basé négociation	Basé requête
Flooding	Plate	Non	Limité	Non	Non	Limitée	Non	Non	Oui
Directed Diffusion	Plate	Limitée	Limité	Oui	Non	Limitée	Oui	Oui	Oui
HEED	Hiérarchique	Non	Max	Oui	Non	Bonne	Non	Non	Non
LEACH	Hiérarchique	SB fixe	Max	Oui	Non	Bonne	Non	Non	Non
GAF	Localisation	Limitée	Limité	Non	Non	Bonne	Non	Non	Non
SAR	Hiérarchique	Non	Min	Oui	Oui	Limitée	Oui	Oui	Oui
SPIN	Plate	Oui	Min	Oui	Non	Limitée	Oui	Oui	Oui
DSDV	Plate	Oui	Max	Non	Non	Limitée	Non	Non	Non
AODV	Plate	Oui	Min	Non	Non	Limitée	Non	Oui	Oui
ZRP	Plate	Oui	Limité	Non	Non	Bonne	Non	Non	Non

Tableau 2.1 : Classification et comparaison des protocoles de routage dans les RCSFs.

2.6 Conclusion

Le principe de fonctionnement de chaque protocole dans les réseaux de capteur sans fil diffère suivant la philosophie de l'approche à laquelle il appartient. Nous avons mis l'accent, dans la première partie de ce chapitre, sur les différents critères de classification des protocoles du routage. Ensuite nous avons cité quelques protocoles et leurs fonctionnements, pour enfin déduire les caractéristiques principales de chaque protocole.

Nous nous sommes appuyés sur ces travaux pour la conception d'un nouveau protocole décrit dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Contribution : EECRMH (Energy Efficient based on Clustering with Routing Multi-Hop)

3.1 Introduction

Après avoir étudié les réseaux de capteurs sans fil, à travers les chapitres précédents; nous allons présenter dans ce chapitre nos contributions dans le domaine du routage sur ce type de réseaux.

Notre objectif de départ était de concevoir un protocole de routage qui garantit une minimisation de la consommation de l'énergie afin d'augmenter la durée de vie du réseau.

Dans ce chapitre-ci, la première partie est consacrée à présenter le principe de fonctionnement du protocole proposé. La seconde partie, quant à elle, vise à étudier les résultats obtenus lors de la simulation de notre protocole.

3.2 Motivations

Le contrôle de la topologie du réseau s'avère une bonne méthode pour faciliter la gestion du réseau et augmenter sa durée de vie et le clustering en est une des plus performantes. L'organisation du réseau en cluster permet d'effectuer des communications locales au niveau de chaque cluster, où chaque nœud envoie ses données vers son cluster head, ceci diminue considérablement le trafic dans le réseau.

Notre contribution consiste en un nouveau protocole de routage hiérarchique nommé EECRMH (*Energy Efficient based on Clustering with Routing Multi-Hop*), qui est une amélioration de quelques lacunes de EAR(*Energy Aware Routing*) [50], ainsi que celles de LEACH concernant le mécanisme d'élection des nœuds cluster head et la formation des clusters.

L'objectif principal de la recherche proposée est de fournir un protocole de clustering à efficacité énergétique, où la décision d'élection des cluster heads (CH) est faite localement au niveau des nœuds. Au lieu d'utiliser une méthode probabiliste pour l'élection des CHs comme est le cas dans certains protocoles tel que LEACH et HEED, nous avons adopté une méthode basée sur une fonction de poids pondéré selon l'importance des paramètres, où chaque nœud s'élit CH si son poids est le plus grand parmi ses voisins. Les métriques utilisées pour l'élection des CHs permettent d'avoir des cluster head distribués de manière équilibrée dans le champ de captage.

3.3 Hypothèses

Afin de développer notre protocole, dans le but d'étendre la durée de vie du réseau nous mettons en place dans ce qui suit, les hypothèses sur lesquelles se base notre travail :

- ✓ Les nœuds capteurs sont tous identiques (*même capacité de stockage et de traitement de données*), mais en simulant avec des valeurs d'énergie initial différentes.
- ✓ Les nœuds sont distribués sur la zone de capture aléatoirement et sont fixes (pas de mobilité).
- ✓ La station de base est vue comme une ressource non limitée ni épuisable et sa position est fixée.
- ✓ La mort de chaque capteur n'est causée que par l'épuisement de son énergie, pas d'autres causes de défaillances.
- ✓ La portée de signal d'un nœud vaut 100m, est supposée identique pour tous les nœuds.
- ✓ Chaque nœud possède un identifiant unique.
- ✓ La station de base connaît les informations de chaque nœud.

3.4 Principe de fonctionnement

Notre protocole se base, en premier lieu, sur la formation des niveaux en fonction de l'affaiblissement de signal qui est géré par la station de base, puis chaque nœud de même niveau construit sa table de voisinage pour ensuite calculer son poids qui est une combinaison de métriques que nous détaillerons dans ce qui suit. Ce poids est diffusé par la suite vers ses voisins afin de procéder à l'élection des cluster-heads. Une fois les CHs désignés, ils annoncent leur statut pour que les nœuds non-cluster heads puissent les rejoindre pour former des clusters.

En suite lors de routage des données , les nœuds envoient les données captées vers leurs cluster head appropriés pour que ces derniers, à leurs tours, applique une opération d'agrégation de ces données reçues pour les insérer dans un nouveau paquet afin de les transmettre vers la station de base.

Etant donné que les cluster heads ont pour mission d'assurer les fonctions les plus coûteuses en énergie, à savoir la communication et les traitements de données, donc dans une communication inter cluster, la transmission des données agrégées par les cluster head vers la station de base se fait par l'intermédiaire des nœuds relais situés entre les clusters, où chaque cluster head envoie le paquet des données agrégées au nœud relais (gateway) au lieu de les envoyer directement à la station de base, ceci contribue à la conservation de son énergie, ainsi prolonger la durée de vie du réseau.

3.4.1 Phase d'initialisation

Cette phase consiste à mettre en œuvre les procédures d'initialisation de notre approche, que nous avons détaillées ci-dessous.

- **Formation des niveaux**

La phase d'initialisation commence par la création des niveaux dans laquelle on adopte la même approche utilisée dans EEPSCZ (*Energy Efficient Protocol Static Clustering Zones*) [12], où la station de base diffuse K-1 messages "Hello" de différentes puissances pour construire K niveaux, où K désigne le nombre de niveaux dans le réseau. La puissance du signal est variée pour avoir des distances différentes à la station de base, ce qui représente les différents niveaux suivant la formule suivante :

$$D_i = K \cdot R_i \quad (3.1)$$

Tel que

R_i : la portée du signal d'un nœud capteur (i), qui est supposé identique pour tous les nœuds.

D_i : la distance entre la station de base et le nœud le plus éloigné.

A la réception du message les nœuds calculent leurs distances par rapport à la station de base en fonction de l'affaiblissement du signal ; à la fin de cette partie le réseau est repartitionné en niveau, où chaque nœud possède un ID_niveau comme le montre la figure ci-dessous.

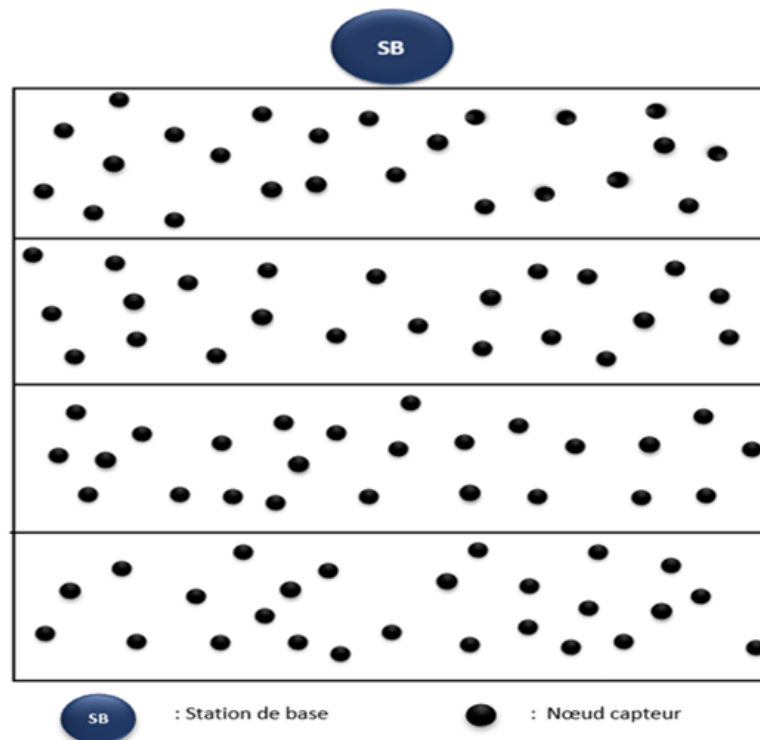


Figure 3.1 : Formation des niveaux.

- **Découverte de voisinage**

Après la répartition du réseau en différents niveaux et afin de découvrir leur voisinage, les nœuds échangent entre eux des informations en diffusant un message “*Hello voisins*” sur un rayon de transmission R qui est identiques pour tous les nœuds; ce message contient l’identificateur de chaque nœud et l’identificateur de son niveau. Dès qu’un nœud membre reçoit ce message, il vérifie si le nœud émetteur figure dans sa table de voisinage et il ignore ce message, sinon il l’ajoute à la liste de ses voisins. Une fois les tables de voisinage sont construites, chaque nœud calcule son degré selon le nombre des entrées dans sa table de voisinage, pour informer ses voisins de son statut de positionnement.

La figure ci-dessous illustre le processus du calcul de degré de chaque nœud (en prenant l’exemple de nœud A ayant cinq voisins donc son degré égale à cinq. Le nœud S , quant à lui, qui a six voisins donc son degré égale à six).

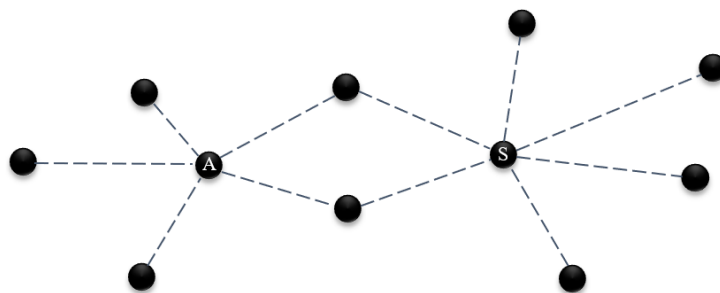


Figure 3.2 : Exemple illustratif du calcul de degré d'un nœud.

Au départ de la phase d’initialisation tous les nœuds sont des nœuds membres et chacun d’eux se charge de calculer son poids puis diffuser un message *Weight Update* vers ses voisins afin de procéder à l’étape d’élection des cluster head, cette dernière sera détaillée ci-dessous.

- **Election des Clusters Head (CH)**

L’élection des clusters head prend en considération le facteur énergétique qui est d’une importance majeure, ainsi que d’autres facteurs qui peuvent être pris en compte tel que le degré de connectivité du nœud et la distance entre les nœuds et la station de base.

Pour cela nous proposons une fonction qui permet de déterminer le poids de chaque nœud. Ce poids est basé sur la combinaison de deux métriques qui sont le niveau d’énergie et le degré de connectivité du nœud.

➤ **Niveau d'énergie :**

Les capteurs sont alimentés par une batterie limitée en énergie. Si un nœud épuise son énergie, il sera considéré comme mort, car il ne peut pas assurer ses fonctionnalités dans le réseau. Ainsi, la mort d'un ou plusieurs nœuds peut provoquer une interruption partielle ou complète de la communication dans le réseau.

De ce fait le cluster-head choisi doit avoir un niveau d'énergie élevé afin qu'il puisse exécuter les tâches dont il est responsable.

➤ **Degré de connectivité :**

La connectivité des nœuds représente une recommandation à prendre en considération lors de la conception des cluster head. Pour optimiser la latence des données, il est nécessaire de diminuer le nombre de sauts formant le chemin vers la destination.

Donc le nœud choisi comme cluster head doit être connecté au grand nombre de nœuds possible.

La formule utilisée pour le calcul du poids de chaque nœud (i) est définie par :

$$\text{Poids}_{(i)} = \alpha \cdot \frac{E_i}{E_{\text{totale}}} + \beta \cdot \frac{D_i}{D_{\text{max}}} \quad (3.1)$$

Tel que :

E_i : Energie résiduelle.

E_{Totale} : Energie totale de l'ensemble des nœuds voisins.

D_i : Degré de connectivité du nœud.

D_{max} : Degré de connectivité maximal parmi les nœuds voisins.

α et β : constantes de pondération qui doivent être méticuleusement choisis afin de favoriser l'impact d'énergie résiduelle d'un nœud par rapport à l'impact du degré de connectivité lors du choix d'un CH.

Dès la réception de message *Weight Update*, les nœuds mettent à jour leurs tables de voisinages (*ID_nœud*, *ID_niveau* et *le poids*) et les nœuds qui ont le poids le plus élevé seront élus comme cluster head.

La figure ci-dessous illustre le repartitionnement du réseau après l'élection des cluster-heads.

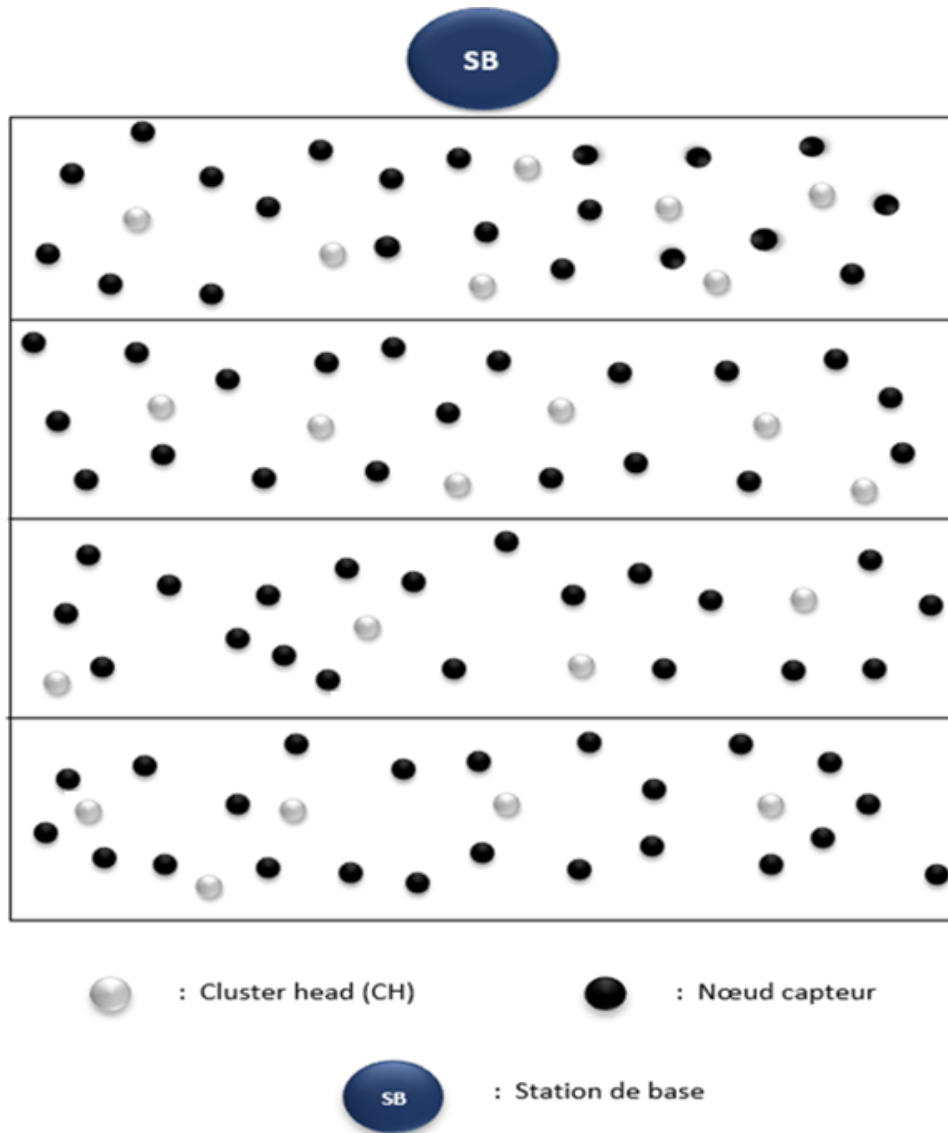


Figure 3.3 : Election des cluster-heads.

La figure suivante représente l’organigramme résumant le principe d’élection des CHs :

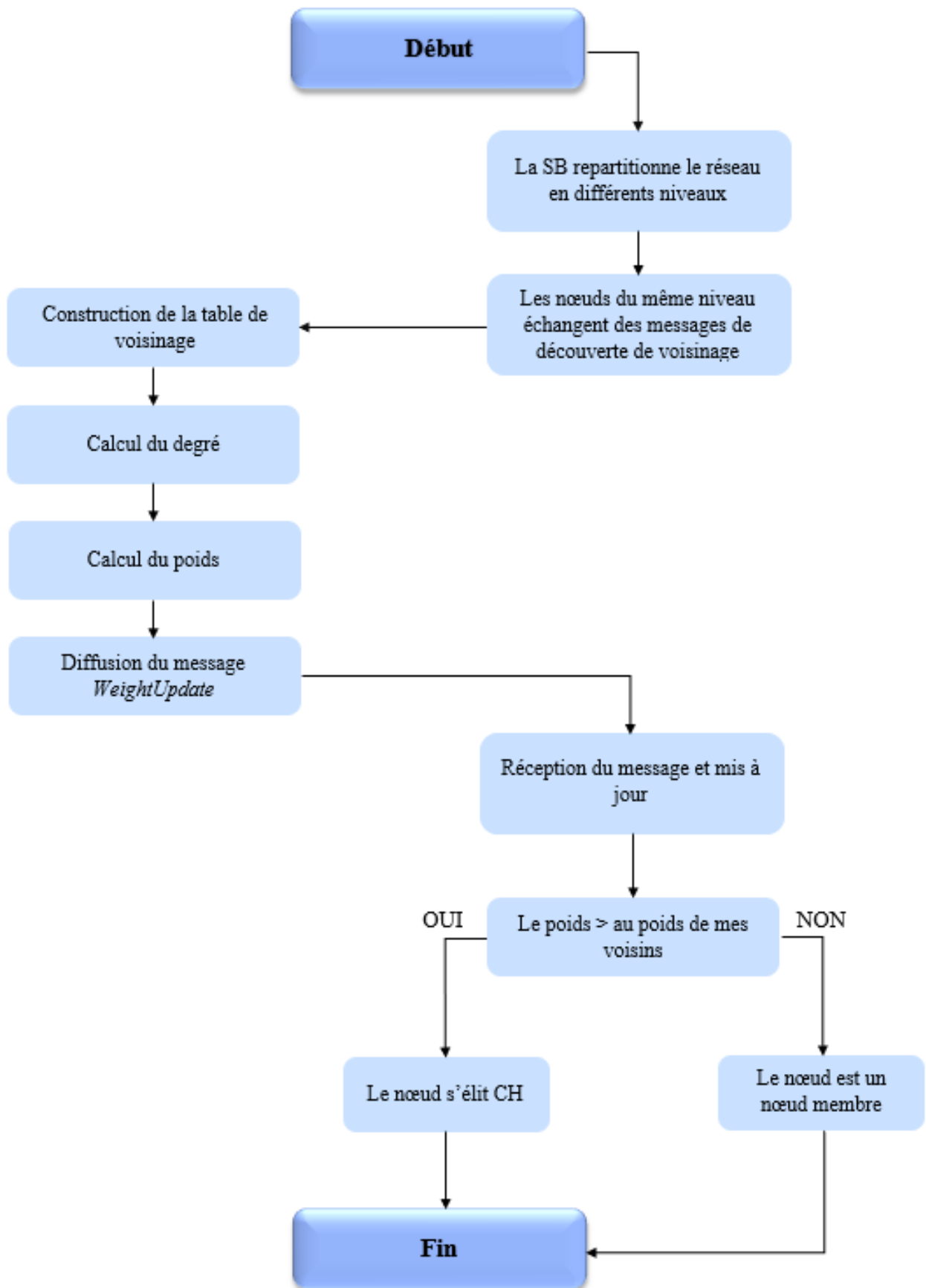


Figure 3.4 : Organigramme de l’étape d’élection des clusters head.

- **Formation des clusters**

La répartition équilibrée des capteurs sur les clusters est généralement un objectif pour les configurations où les CHs sont électionnés par ces capteurs, afin d'effectuer des fonctions de traitement de données et de gestion intra-clusters.

Au cours de cette étape, les cluster-heads annoncent leur statut, et les nœuds membres décident du cluster qu'ils vont rejoindre.

Les nœuds élus comme CH annonce à leurs voisins leurs statut en diffusant un message "INVIT" afin de les inviter à les rejoindre pour former les clusters, le paquet du message contient l'identificateur du CH, son degré de connectivité, son niveau d'énergie et la distance entre le CH et le nœud récepteur.

Ensuite, chaque nœud membre décide du cluster-head auquel il va appartenir en s'appuyant sur ces trois paramètres l'énergie de CH, la distance entre le nœud et le CH invitant, le degré de connectivité du CH, ainsi le choix se portera sur le cluster head ayant la valeur de P la plus élevée autrement dit le cluster head le plus proche au nœud récepteur et le plus puissant en termes d'énergie. La valeur de P se calcule suivant la formule ci-dessous :

$$P = \Omega \cdot E_{(CH_i)} + \sigma \cdot \frac{1}{d_{i,(CH)} + D(CH)} \quad (3.2)$$

Tel que

$E_{(CH)}$: Energie résiduelle du CH.

$d_{i,(CH)}$: Distance entre CH et le nœud invité.

$D_{(CH)}$: Degré de connectivité du CH.

Ω et σ : Facteurs de pondération, qui se sont justifié pour avoir un bon compromis entre le niveau d'énergie résiduelle du CH et son degré de connectivité ainsi que la distance qui le sépare du nœud invité, en favorisant le paramètre d'énergie.

Chaque nœud invité doit donc informer le cluster-head choisi de son intention de le rejoindre en lui transmettant un message JointMsg.

Durant la diffusion du message d'invitation par les clusters head, Il se peut qu'un nœud ne reçoive aucun message "INVIT", dans ce cas le nœud sera isolé, il se charge d'envoyer ses données captées vers la station de base; En fait ces nœuds isolés jouent le rôle d'un CH.

- **Le nœud relais (gateway)**

Afin d'éviter la surcharge sur les cluster-heads, nous avons intégré la technique des nœuds gateway, ces nœuds assurent le rôle de relais qui se charge d'envoyer les données agrégées par les cluster-heads vers la station de base pour diminuer la portée des communications entre les cluster-heads, quand ces derniers se sont séparés par de grandes distances avec la station de base, ce qui permet de conserver plus d'énergie.

Durant la formation des clusters, les nœuds qui reçoivent un nombre de message d'annonce "INVIT" supérieur à un certain seuil changent leur statut en se déclarant gateway.

Les cluster-heads prend en compte, lors du choix des nœuds gateway auxquels ils transmettront leurs données agrégées, le niveau d'énergie de chaque nœud gateway et la distance qui le sépare de la station de base, ces deux métriques sont combinées dans une formule permettant de calculer la valeur de G.

Par conséquent les cluster-heads choisissent d'envoyer leurs données vers les nœuds gateway ayant la valeur la plus élevée de G.

- La formule déterminant la valeur de G est :

$$G (GW) = \lambda . d_i (GW , SB) + E (GW) \quad (3.3)$$

Tel que :

$d_i (GW_i , SB)$: Distance entre le nœud et la station de base.

$E (gw)$: Energie résiduelle du nœud gateway.

λ : Le paramètre de pondération que nous avons ajouté afin de recenser que le grand impact sera lié à la distance entre nœud gateway et la station de base.

La figure ci-dessous représente l'organigramme récapitulatif de la formation des clusters.

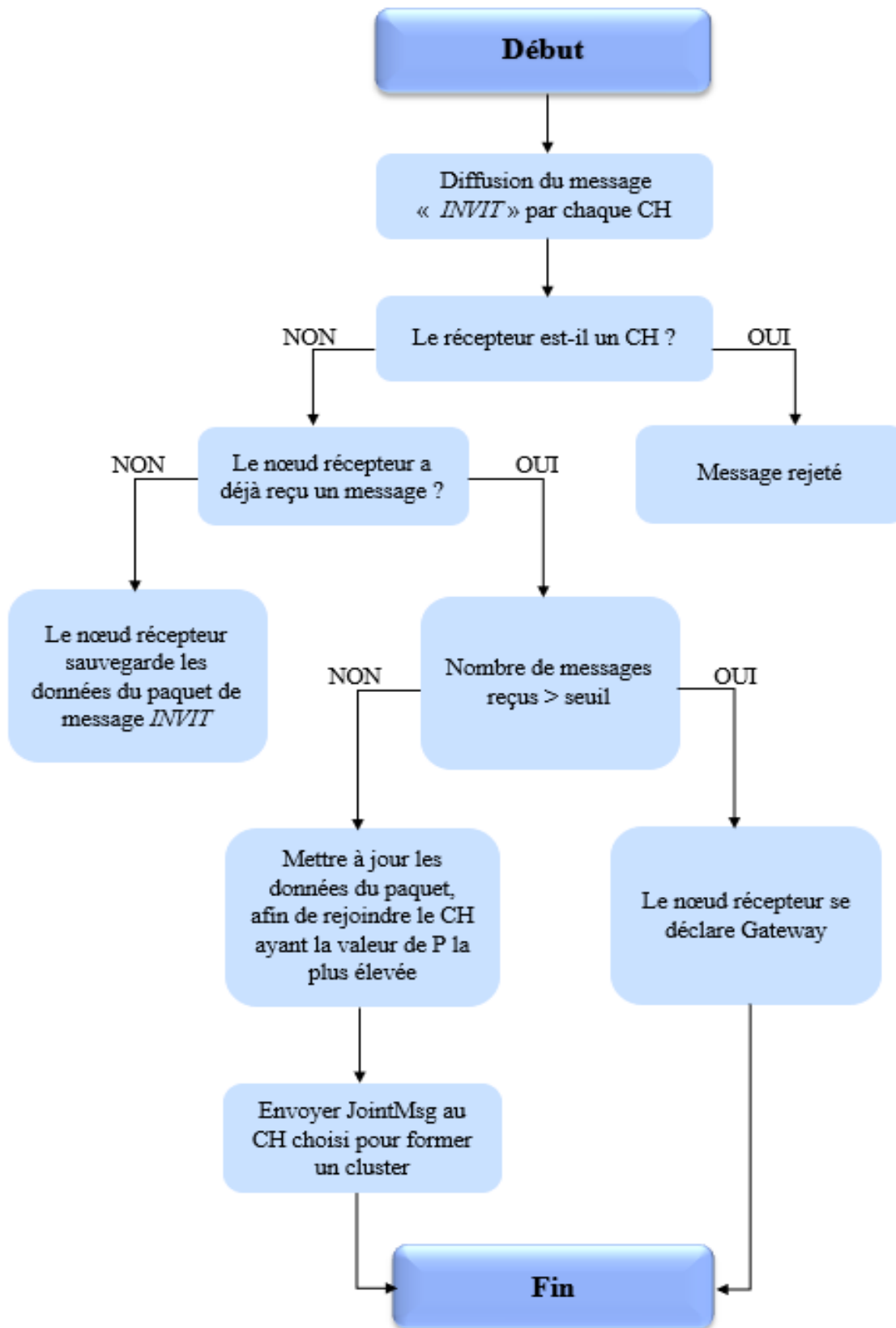


Figure 3.5 : Organigramme de la formation des clusters.

- **Rotation des clusters head :**

Lorsque l'énergie du cluster head approche de l'épuisement et arrive à atteindre un seuil indiqué de son énergie initiale, ce dernier envoie un message "prepar" à l'ensemble des nœuds de même cluster pour les tenir au courant de son état afin de lancer une élection du CH à nouveau, ceci permet d'éviter la perte des données du cluster

L'algorithme suivant présente le principe de cette rotation :

Algorithme de rotation des clusters head

i, j : les nœuds membres

E_{ch} : énergie résiduelle du cluster-head

Poids : le poids de chaque nœuds (i, j)

Seuil : paramètre dépendant de l'environnement d'application.

Début

1 : **Si** E_{CH} ≤ "seuil" **alors**

2 : Envoyer un message "prepar" à l'ensemble des nœuds de même cluster

3 : A la réception du message, chaque nœud calcule son poids pour devenir un nouveau CH

4 :
$$\text{Poids}(i) = \alpha \cdot \frac{E_i}{E_{\text{totale}}} + \beta \cdot \frac{D_i}{D_{\text{max}}}$$

5 : **Si** Poids(i) = Poids(j) , **alors**

6 : Le choix du CH = poids (i) le plus élevé avec l'identificateur le plus petit

8 : **Sinon**

9 : Le choix se porte sur le nœud ayant le poids le plus élevé

10 : **Fin sinon**

11 : **Fin si**

12 : **Fin si**

Fin

- **Maintenance des clusters**

A chaque laps de temps le cluster head envoie un message "Check" de vérification aux nœuds de son cluster afin d'indiquer les nœuds défaillants et de détecter la perte de lien. Si le CH ne reçoit aucune réponse de la part d'un des nœuds pendant une période multiple à celle d'envoi du message, le lien entre eux soit pris comme rompu, à la suite de l'enlèvement de ce nœud de la liste du cluster.

3.4.2 Phase de routage des données

Dans cette phase, nous distinguons deux types de communication, communication intra cluster et inter cluster.

- **Communication intra cluster**

Cette étape assure la transmission des données dans chaque cluster , où les nœuds membres transmettent les données captées vers leurs cluster-head respectifs dans un slot de temps réservé, alloué par leurs cluster-head avec le modèle de transmission TDMA (*Time Division Multiple Access*) permettant de transmettre plusieurs signaux sur un seul canal.

Pour être plus expressif, chaque cluster head établit et diffuse un ordonnancement affectant à chaque membre de son cluster un temps durant lequel il peut communiquer les données captées avec ce dernier. Une fois l'ordonnancement est connu par tous les nœuds du même cluster, chacun d'eux utilise le temps qui lui a été consacré pour transmettre à son CH les données captées, ainsi les nœuds éteignent leurs interfaces de communication en dehors de ce slot ce qui permet d'éviter les collisions et d'économiser l'énergie.

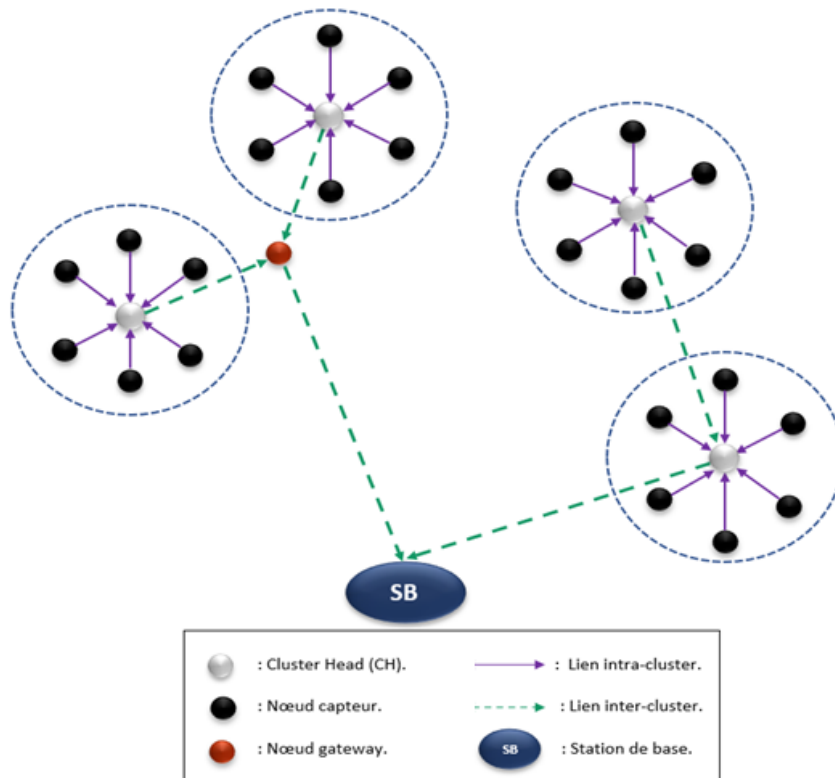
Le CH sauvegarde les données reçues et applique par la suite un processus d'agrégation afin d'éviter la redondance de données et la surconsommation d'énergie, puis les envoyer aux prochaines destinations.

- **Communication inter cluster**

Souvent les cluster-heads transmettent les données agrégées directement à la SB, ce qui engendre une consommation énergétique très élevée et par conséquent, une diminution de la durée de vie du réseau.

Pour remédier à ce problème, une communication en plusieurs sauts, de petites distances, est utilisée dans cette phase, où chaque CH crée un nouveau paquet de données et insèrent la donnée agrégée pour l'envoyer au plus proche nœud gateway de son niveau ou celui de niveau voisin inférieur et proche de la station de base jusqu'à l'aboutissement de cette dernière, quant aux cluster heads qui se trouvent dans le premier niveau envoient directement les données agrégées à la station de base.

Le mécanisme de la communication inter clusters est illustré sur la figure suivante :



La figure 3.6 : Phase de transmission des données.

3.5 Discussion sur l'efficacité du protocole

- **Fonction pondérée d'élection des cluster-heads**

Notre protocole prend en compte le niveau d'énergie des nœuds et leur degré de connectivité. En effet, la fonction proposée pour l'élection des cluster-heads évite d'avoir recours à des probabilités. La fonction est pondérée selon l'importance des métriques.

- **Routing multi-sauts au niveau des cluster-heads**

Dans les protocoles hiérarchiques qui se basent sur un routage à un seul saut entre les cluster-heads et la station de base, les CHs s'épuisent rapidement car ils peuvent être éloignés de la station de base. Dans notre approche, un schéma de routage multi-sauts est adopté, où les chemins optimaux pour l'acheminement des paquets de données sont choisis selon une probabilité minimisant la dissipation d'énergie. Nous avons également introduit des passerelles entre les CHs qui assurent le rôle de relais.

- **Elimination de problème des zones isolées**

L'élection des cluster head et la formation des clusters dans notre approche assurent la connectivité maximale de tous les nœuds contrairement aux autres protocoles hiérarchiques qui

choisissent la liste des cluster-heads aléatoirement, où les CH peuvent se regrouper dans un même endroit.

❖ Annexe des messages

Ce tableau résume l'ensemble des interactions entre les nœuds du réseau utilisées par notre protocole

Type de paquet	Fonction de paquet
<i>Hello</i>	Message envoyé par la station de base vers tous les autres nœuds, dans le but de former des différents niveaux
<i>Hello voisins</i>	Paquet envoyé par tous les nœuds pour découvrir leurs voisins
<i>Weight Update</i>	Paquet envoyé par tous les nœuds pour diffuser leur poids.
<i>INVIT</i>	Message d'annonce envoyé par les CH pour informer les autres nœuds de son statut et former son cluster.
<i>JointMsg</i>	Message envoyé par les nœuds vers le CH pour l'informer qu'ils désirent rejoindre son cluster.
<i>Prepar</i>	Message envoyé par les cluster-heads pour prévenir les nœuds de son cluster qu'une nouvelle élection des CH sera lancé.
<i>Check</i>	Message de vérification, diffusé par les cluster-heads périodiquement afin de détecter les nœuds défaillant.

Tableau 3.1 : Type de messages échangés.

3.6 Validation de la proposition

Les réseaux de capteurs trouvent leur utilité sur des terrains difficiles d'accès, ce qui fait de leur mise en place une tâche complexe et onéreuse. Il n'est donc pas envisageable, ou du moins extrêmement délicat d'effectuer des modifications sur le réseau. C'est pourquoi une simulation sous *Matlab* se voit imposée.

A des fins de validation de notre proposition en termes de durée de vie et d'équilibrage d'énergie, nous exécutons un ensemble de simulation où les résultats obtenus dans le cas de notre protocole EECRMH sont comparés à ceux de protocoles ECBDA (*Energy-Efficient Cluster Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks*) [51].

3.6.1 Environnement de simulation

Matlab (*MATrix LABoratory*) est un environnement de manipulation numérique, de calcul scientifique et de visualisation graphique, développé par la société *The MathWorks*. Il permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes et de créer des interfaces utilisateurs. Les utilisateurs de Matlab sont de milieux très différents allant de l'ingénierie à l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. Matlab peut s'utiliser à l'aide d'une boîte à outils (*toolboxes*) [4].

3.6.2 Paramètres de simulation

Les paramètres utilisés dans notre système sont indiqués dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
<i>Nombre de station de base</i>	1
<i>Nombre de nœuds</i>	200
<i>Surface de simulation</i>	500 m ²
<i>Portée de transmission</i>	90 m
<i>Energie initiale (E_i)</i>	0.8 joule
<i>Energie de transmission (E_T)</i>	0.000005 joule
<i>Energie de réception (E_R)</i>	0.000005 joule
<i>Energie d'agrégation (E_{agg})</i>	0.0000005 joule
<i>Alpha</i>	0.001
<i>Beta</i>	0.01
<i>Sigma</i>	0.4
<i>Gama</i>	4

Tableau 3.2 : Paramètres de simulation..

- Les nœuds capteurs possèdent la même quantité d'énergie initiale, les mêmes capacités de calcul et la même mémoire.
- Tous les nœuds ont la même portée de transmission qui vaut 90m.
- L'énergie de la station de base est illimitée.
- Ces capteurs sont déployés dans une zone carrée de taille 500*500 m contenant 200 nœuds capteurs déployés aléatoirement.
- Les résultats de simulation obtenus sont la moyenne de plusieurs itérations simulées.

3.7 Métriques de performance

Dans l'optique d'évaluer notre contribution et en vue de comparer les performances de cette dernière avec le protocole ECBDA, nous sommes intéressés à la quantité d'énergie et à la durée de vie des nœuds.

▪ Quantité d'énergie des nœuds :

L'énergie est une des préoccupations essentielles dans les RCSF de grande taille et surtout à application extérieure. Certains scénarios font qu'il est impossible ou irréalisable de remplacer périodiquement les batteries des nœuds.

La quantité d'énergie mesure, d'une part, l'énergie résiduelle moyenne en joule de chaque nœud et, d'autre part, l'énergie moyenne consommée par tout le réseau.

▪ Durée de vie du réseau :

La durée de vie du réseau est définie comme étant le temps écoulé entre l'instant où le réseau commence son fonctionnement et l'instant où il n'est plus connecté à cause de la défaillance d'un ou de plusieurs capteurs. En effet, Si un nœud épuise son énergie, il sera considéré comme mort, car il ne peut pas assurer ses fonctionnalités dans le réseau. Ainsi, la mort d'un ou plusieurs nœuds peut provoquer une interruption partielle ou complète de la communication dans le réseau. Dans ce cas-là, le réseau sera mort.

3.8 Résultats de simulation

3.8.1 Formation des niveaux

La structure de notre protocole consiste à repartitionner la zone de captage en différents niveaux; la figure ci-dessous représente les niveaux formés lors de la simulation, dans laquelle chaque couleur symbolise un niveau, et la station de base est illustrée par le triangle en noir.

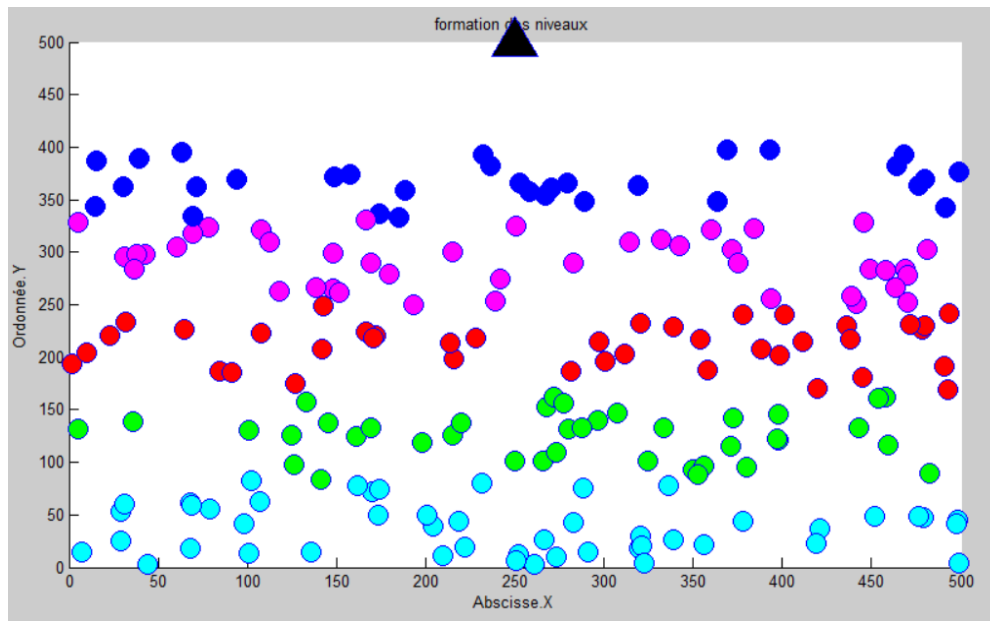


Figure 3.7 : Visualisation du réseau après la formation des niveaux.

3.8.2 Election des cluster-heads

La figure suivante illustre les résultats de la procédure d’élection des cluster-heads dans chaque niveau, où les CH sont représentés par une étoile de couleur jaune.

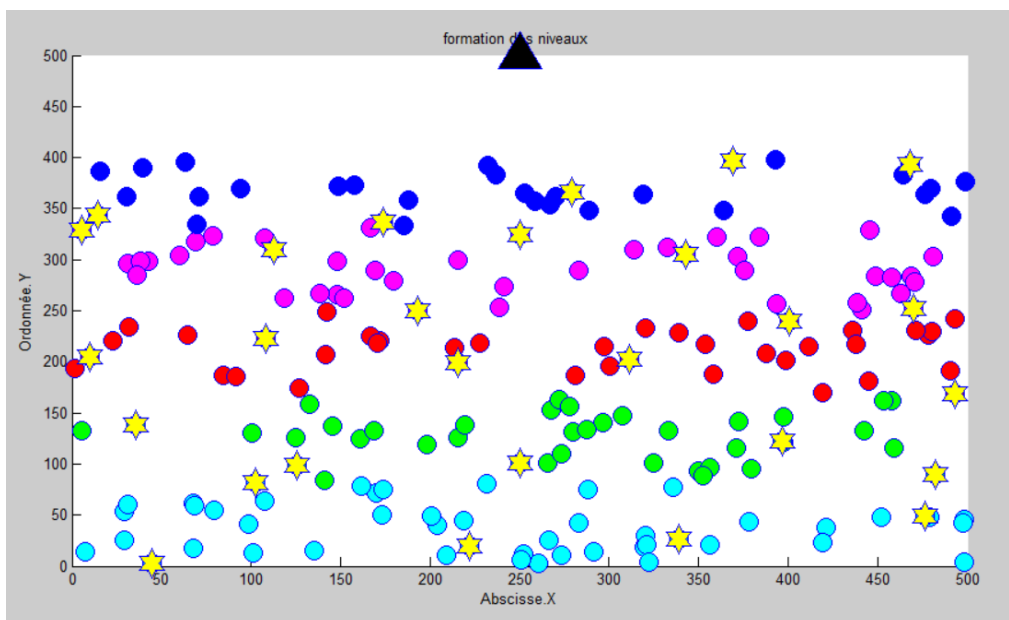


Figure 3.8 : Visualisation du réseau après l’élection des cluster-heads.

3.8.3 Formation des clusters

La figure ci-dessous, quant à elle, représente la formation des clusters. Chaque forme spécifique dans un niveau est un cluster, à savoir, cinq clusters par niveau.

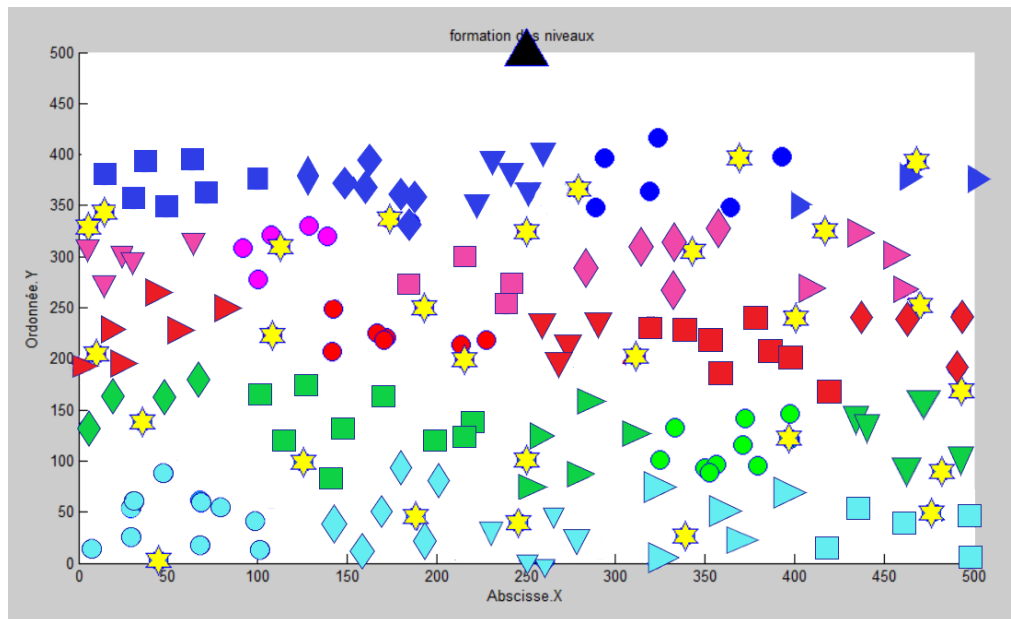


Figure 3.9 : Formation des clusters.

3.9 Interprétation et discussion des résultats

Les résultats obtenus par cette simulation sont présentés par les figures ci-après, suivis de leurs interprétations :

- *Le cas de protocole EECRMH*

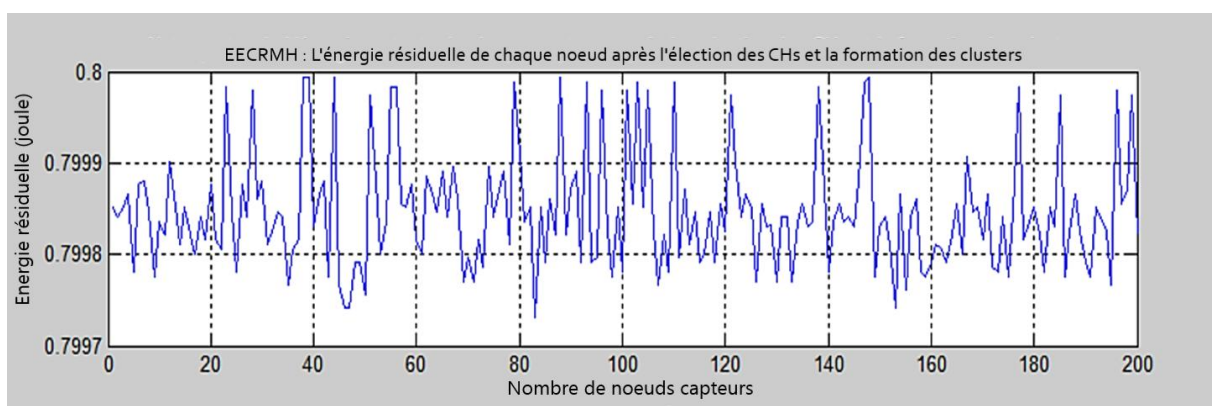


Figure 3.10 : L'énergie résiduelle de chaque nœud dans EECRMH.

Le graphe de la figure ci-dessus montre les résultats de notre protocole du point de vue de l'énergie restante de chaque nœud, après la phase d'élection des cluster-heads ainsi que la formation des clusters en fonction du nombre de nœuds du réseau.

Nous pouvons remarquer sur ce graphe que l'énergie restante de tous les nœuds dans notre protocole est entre 0.799j et 0.800j ; Plus précisément pour la majorité des nœuds, leur énergie se trouve entre 0.7998j et 0.7999j. Ceci est dû au nombre important des messages échangés entre ces nœuds durant la phase de la formation des clusters.

Ainsi nous observons qu'un nombre infime des nœuds aient la plus basse valeur, qui est supérieure à 0.7997j, ces nœuds sont les cluster-heads du réseau, ils sont sensés à consommer plus d'énergie par rapport aux nœuds ordinaires, puisque ils se chargent d'assurer plus de tâches telle que la formation des clusters. Tandis qu'il existe un nombre éminent des nœuds avec une valeur égale à environ 0.8j.

▪ Le cas de protocole ECBDA

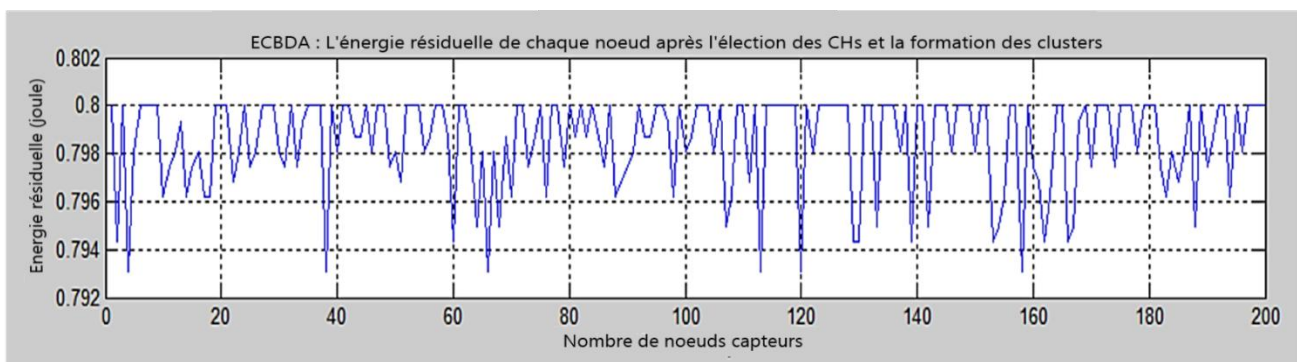


Figure 3.11 : L'énergie résiduelle de chaque nœud dans ECBDA.

la figure ci-dessus, quant à elle, représente les résultats obtenus dans le cas de ECBDA, nous remarquons une différence par rapport au graphe de notre protocole, où les valeurs d'énergie restante de chaque nœud sont entre 0.794j et 0.8j.

Dans ce protocole la majorité des nœuds ont une valeur inférieure à 0.798j, nous observons également que la valeur d'énergie restante la plus basse est en dessous de 0.794j.

• Validation de l'efficacité des résultats

Cette étude comparative a pour objet de mettre en avant les différences et l'efficacité de chacun des deux protocoles , à savoir , l'énergie résiduelle de chaque nœud.

La valeur d'énergie restante de tous les nœuds de EECRMH varie à peine entre 0.799j et 0.8j, c'est-à-dire qu'ils dissipent leur énergie équitablement. Or que la valeur d'énergie restante la plus basse dans ECBDA est inférieure à 0.794j.

Pour être plus explicatif , étant donné que la moyenne d'énergie restante des nœuds dans notre protocole est plus élevée. Ainsi nous pouvons déduire que durant la phase d'élection des

cluster-heads et la formation des clusters les nœuds consomment moins d'énergie. Il est à noter que dans ECBDA, l'impact des nœuds ayant conservé leur énergie initiale est négligeable face à la performance que donne notre protocole.

- ❖ Le tableau suivant montre les valeurs résultantes de la comparaison des deux protocoles lors de la simulation :

Protocoles	Moyenne d'énergie restante de tous les nœuds	Energie consommée par tous les nœuds
<i>EERCMMH</i>	0,79984637 joule	0,030726 joule
<i>ECBDA</i>	0,79893114 joule	0,213773 joule

Tableau 3.3 : Quantité d'énergie des nœuds du réseau.

Suite aux résultats de cette étude, on constate que l'approche d'élection des cluster-heads adoptée dans notre protocole a prouvé son efficacité pour la conservation d'énergie des nœuds et a permis de dissiper de façon équilibrée l'énergie totale de réseau, ceci permet donc de prolonger la durée de vie du réseau.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, en premier lieu, notre protocole proposé qui vise à prolonger la durée de vie du réseau, notre solution est inspirée des autres protocoles tout en présentant un fonctionnement différent et des améliorations au niveau de la consommation d'énergie.

Ensuite, pour évaluer les performances dérivées de notre approche proposée, nous nous sommes intéressés à comparer les résultats obtenus lors de la simulation des deux protocoles EECRMH et ECBDA, nous avons donc pu mettre en évidence l'efficacité de notre protocole proposé en termes de prolongation de durée de vie du réseau.

CONCLUSION GENARALE

La minimisation de la consommation d'énergie des capteurs et la prolongation de la durée de vie du réseau étaient les objectifs principaux de ce travail. En vue de réaliser ceci, nous avons développé un nouveau protocole de routage hiérarchique qui prend en considération les limitations des autres protocoles de routage sur lesquels nous nous sommes basés.

Le nouveau protocole nommé EECRMH (Energy Efficient based on Clustering with Routing Multi-Hop), prend en considération les contraintes imposées par les capteurs telles que la basse capacité de stockage et durée de vie limitée, en permettant une gestion plus efficace de la ressource énergétique lors de la communication des données dans le réseau. Par ailleurs, notre protocole assure un équilibre de la dissipation d'énergie lors de la formation des clusters. La prise en compte des capacités énergétiques des nœuds cluster-heads et de leur degré de connectivité permet d'optimiser leurs ressources énergétiques, et de mieux distribuer les CHs dans le champ de captage. L'intégration de notion de passerelles sert à la réduction des charges des nœuds CHs et donc, au prolongement de leurs durées de vie.

L'évaluation des performances dérivées de notre protocole a été réalisée par simulation, en utilisant l'environnement MATLAB. L'étude comparative des résultats obtenus lors de la simulation effectuée sur notre protocole EECRMH et le protocole ECBDA, et selon différentes métriques ont prouvé l'efficacité du EECRMH en termes de conservation de l'énergie des capteurs ce qui a permis d'étendre la durée de vie du réseau.

Comme perspectives futures, le travail présenté ouvre des voies d'améliorations que l'on peut donner comme suit :

- l'implémentation de notre solution dans des simulateurs dédiés aux réseaux de capteurs sans fil tels que NS2, OPNET et OMNeT++.
- L'analyse et la comparaison de notre protocole avec d'autres protocoles qui prennent en charge la contrainte d'énergie.

- [1]. K. Ferial, H. LATROCHE, *Protocole de routage multi-chemins EAOMDV avec consommation d'énergie dans les réseaux sans fil Ad Hoc*, Mémoire de Master en Ingénierie des Systèmes d'information, Université de Mostaganem, 2013.
- [2]. A. DJIBRILLA INCHA, *Réseaux de collecte de données pour les zones blanches étendues*, Thèse de doctorat en Réseaux, Information et Communications, Université de Paris-Saclay, France, 2019.
- [3]. A. KUMAR, H.Y. SHWE, K.J. WONG, P.H.J CHONG, *Location-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey*. *Wireless Sensor Network*, 9, 25-72, 2017.
- [4]. Z. KHALILI, M. BOUCHRA, *Une technique d'optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire de Master en Informatique, option : Systèmes Intelligents, Université d'Adrar, 2019.
- [5]. F. AMOKRANE, *Routage avec optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire de Master en Informatique, option : Administration et Sécurité des Réseaux, Université de Bejaia, 2016.
- [6]. M. GAYE, *Etat de l'art sur les WSN (Wireless Sensor Network)*, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Juin 2014.
- [7]. A. FARES, *Développement d'une bibliothèque de capteurs*, Rapport de Master en Informatique, option : Informatique Professionnelle et Recherche en Informatique, Université Montpellier , février 2008.
- [8]. A. LOUAZANI, *sécurisation d'un protocole inter-couches pour les réseaux LR-WPAN*, Thèse de doctorat en Informatique, option : Réseaux, Université d'Oran, 2015.
- [9]. Y. YASSER, *Routage pour la gestion de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010.
- [10]. A. HADJADJ, B. ARIBI, M. Amad, "*Energy-Efficient and Degree-Distance Clustering Based Hierarchical Routing Protocol for WSNs*", *Recent Advances in Computer Science and Communications*, 14(6), 2019.
- [11]. H. MESSABIH, *Contribution des réseaux de capteurs à la conscience des contextes des systèmes*, Mémoire de Magister en Informatique, Université de Batna, 2015.
- [12]. J. BELLAL, A. MOUSSAOUI, *Routage hiérarchique avec optimisation de consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire de Master en Informatique, option : Administration et Sécurité des Réseaux, Université de Bejaia, 2016.

- [13]. F.Z. REMMAS, *Evaluation de LEACH dans un environnement fortement bruité*, Mémoire de Master en Informatique, option: Réseaux et Systèmes Distribués, Université de Tlemcen, 2015.
- [14]. S. MOAD, *Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire de Master en Informatique, Université IFSIC-Rennes1, 2008.
- [15]. A. BENDJEDDOU, *Prolongation de la Durée de Vie des Batteries dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil (RCSF)*, Thèse de doctorat en Réseaux et Sécurité Informatique, Université de Annaba, 2015.
- [16]. K. FELLAH, *Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat en Informatique, Université d'Oran, 2018.
- [17]. S. MESSAI, *Gestion de la Mobilité dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil*, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Sétif 1 et Université Claude Bernard Lyon1, 2019.
- [18]. Y. CHALLAL, *Réseaux de capteurs sans fil*, Cours: *systèmes intelligents pour le transport*, Université de Technologie de Compiègne, Hauts-de-France, Novembre 2008.
- [19]. Y. BENABBASSI, *application de la redondance pour la surveillance par réseau de capteur sans fil : cas du réseau de capteur image sans fil*, Thèse de doctorat en Informatique, université d'Oran, 2014.
- [20]. M. LEHSAINI, *Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs: application à la domotique*, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Tlemcen et Université de Franche-Comté, France, 2009.
- [21]. <http://wapreview.mobi/different-types-of-wireless-sensor-networks>, consulté le 20 juillet 2021
- [22]. I. 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 en Réseaux, Télécoms, Systèmes et Architecture, Université de Toulouse, France, 2014.
- [23]. <https://interstices.info/senslab-une-plateforme-dexperimentation-pour-les-reseaux-de-capteurs/>, consulté le 22 juillet 2021.
- [24]. A. CHEFI, *Conception d'un micro-capteur d'image CMOS à faible consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat en Nano-électronique et nano-technologies, Université Grenoble, 2014.

- [25]. L.A. ALDULAIMI, R. BADLSHAH AHMAD, L.A. HASSNAWI, I.S. AHMED, *Performance Comparison of Different MAC Protocols over Wireless Body Area Networks (WBAN)*, Aust. J. Basic & Appl. Sci, 11(2), 2017.
- [26]. N. MERATNIA, B.J. DER ZWAAG, H.W. VAN DIJK, D.J.A. BIJWAARD, P.J. HAVINGA, *Sensor Networks in the Lowlands : Sensors*, vol (10), 2010.
- [27]. M. BENAZZOUZ, *Surveillance de tout point d'une zone d'intérêt à l'aide d'un réseau de capteur multimédia sans fil*, Mémoire de Magistère IRM, Ecole nationale supérieure d'informatique Oued-Smar, 2013.
- [28]. <https://stylistme.com/comparatif-objets-connectes/zigbee-ou-z-wave-lequel-choisir> , consulté le 24 juillet 2021.
- [29]. S. CHELLOUG, *Optimisation d'énergie dans les algorithmes de routage pour réseaux mobile*, thèse de doctorat en Sciences, Université de Constantine 2, 2013.
- [30]. A. BOUDRIES, *Maintien de la connectivité dans les réseaux Ad hoc sans fil*, Thèse de doctorat en Sciences , Réseaux et Systèmes Distribués, Université de Sétif, 2014.
- [31]. A. CHOUHA, *Traitement et Transfert d'images Par Réseau de Capteurs sans Fil*, Mémoire de Magistère en Informatique , option : Ingénierie des Systèmes d'Informatiques, Université de Batna, 2011.
- [32]. L. SADOUDI , *Etude et développement d'une plateforme de communication pour les réseaux de capteurs acoustiques sans fil*, Thèse de doctorat en Electronique, Université de Valenciennes, 2016.
- [33]. M. HADADJ et M. KHENFER , *Etude comparative entre les protocoles de Routage RCSF*, Mémoire de Master en informatique, option : réseaux convergence et sécurité, Université de Ouargla, 2017.
- [34]. D. DIONGUE, *Optimisation distribuée de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat en Informatique , Université de Saint Louis, 2014.
- [35]. D. NGOM, *Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité*, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Haute Alsace et Université Cheikh Anta Diop de Dakar , Sénégal, 2016.
- [36]. F. BERZIGA, *Etude comparative de protocoles de routage dans les RCSFs*, Mémoire de Master en Informatique, option : Ingénierie des Systèmes d'information, Université de Tizi-Ouzou, 2013.

- [37]. R. KACIMI, *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2009.
- [38]. B. SAHRAOUI, *Etude d'un protocole de routage basé sur les colonies de Fourmis dans les réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire de Master en Informatique, option : Modèle Intelligent et Décision, Université de Tlemcen, 2013.
- [39]. F. BERKANI, L. HAMMOUI, *Le routage hiérarchique sous contrainte d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire de Master en Informatique, option : Réseaux et Systèmes Distribués, Université de Béjaia, 2014.
- [40]. K. BEYDOUN, *Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs*, Thèse de doctorat en Informatique, Université de Franche-Comté, France, 2009.
- [41]. Y. DERDOUR, *Conception et développement d'un système d'exploration basé sur les réseaux de capteurs sans fil avec sink mobile*, Thèse de doctorat en Informatique, Université d'Oran, 2015.
- [42]. D. ALLOUACHE, K. AZAMOUM, *Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Mémoire de Master en Informatique, option : Réseaux & Systèmes Distribués, Université de Bejaia, 2014.
- [43]. S. MERABET, D. ZIANI, *Etude et simulation des techniques de minimisation de la consommation d'énergie dans les RCSFs*, Mémoire de Master en Télécommunication, Option: Réseaux et Systèmes de Télécommunications, Université de Tlemcen, 2013.
- [44]. M. BOUKHDIMI, D. MEZIANE, *Étude comparative des protocoles de routage hiérarchiques LEACH et SEP dans RCSF*, Mémoire de Master en Science Technologie, option : Réseau et Télécommunication, Université de Ain-Temouchent, 2018.
- [45]. C. INTANAGONWIWAT, R. GOVINDAN, D. ESTRIN, *Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks*, Proceedings acm mobicom, pp. 56-67, Boston, MA, 2000.
- [46]. O. Younis, S. Fahmy, *HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks*, Department of Computer Sciences, Université de PURDUE, Etats-Unis, 2004.
- [47]. M. BOUALLEGUE, *Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat en Réseaux et Télécommunications, Université du Maine, France, 2016.

- [48]. Y. Xu, J. HEIDEMANN, D. ESTRIN, *Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing*, In Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp 70-84, 2001.
- [49]. C.E. PERKINS, E.M. ROYER, S. R. DAS. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing. In IETF, Internet Draft, draft-ietf-manet-aodv-05.txt. [En ligne] 2000.
- [50]. R. C. Shah, J. M. Rabaey, "*Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks*", IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record, pp. 350-355 vol(1), 2002.
- [51]. S. Siva Ranjani, S. Radha Krishnan, C. Thangaraj, *Energy-efficient Cluster Based Data Aggregation for Wireless Sensor Networks*, International Conference on Recent Advances in Computing and Software Systems, pp. 174-179, 2012.