



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique

Université Larbi Tébessi - Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Mathématiques et Informatique



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de *MASTER*

Domaine : Mathématiques et Informatique

Filière : Informatique

Option : Réseaux et Sécurité Informatique

Thème

**Amélioration des performances d'un Protocole de
Routage pour Les Réseaux de Capteurs Sans Fil**

Présenté Par :

Ameur *KHEMANE*

Devant le jury :

Dr Taher MEKHAZANIA *MCA* Université Larbi Tébessi Président

Mr Abdelhakim GHARBI *MAA* Université Larbi Tébessi Examineur

Mme Fatima BOUAKKAZ *MAA* Université Larbi Tébessi Encadreuse

Date de soutenance : 13/06/2020

Résumé

Les réseaux de détection sans fil (RCSFs) sont une technologie moderne utilisée dans de nombreux domaines, qu'il soit médical, militaire et de sécurité, environnemental, géologique et Internet des objets.

L'énergie est le problème principal dans RCSFs car la batterie est petite, et ces jours-ci, la recherche se concentre sur l'amélioration de la gestion de l'énergie consommée par les capteurs de réseau en examinant d'abord les algorithmes de communication et les données de routage. À cette fin, nous avons proposé d'améliorer le protocole de routage hiérarchique PEGASIS.

Afin de confirmer les améliorations apportées par l'algorithme, nous avons effectué une simulation, où les performances de notre protocole sont évaluées et comparées au protocole PEGASIS.

Les mots clés : RCSF, protocole de routage hiérarchique, minimiser la consommation d'énergie, PEGASIS, grille clustering, Master Cluster-Head, Cluster-Head supérieur.

Abstract

Wireless sensor networks (WSN) are a modern technology used in many fields, be it medical, military and security, environmental, geological and Internet of Things.

Energy is the main problem in WSN because the battery is small, and these days, research is focused on improving the management of the energy consumed by network sensors by first examining the algorithms of communication and routing data. To this end, we have proposed to improve the hierarchical routing protocol PEGASIS.

In order to confirm the improvements made by the algorithm, we carried out a simulation, where the performances of our protocol are evaluated and compared with the PEGASIS protocol.

Keywords: WSN, hierarchical routing protocol, minimizing energy consumption, PEGASIS, Grid clustering, Master Cluster-Head, Upper Cluster-Head.

ملخص

شبكات الاستشعار اللاسلكية (WSN) هي تقنية حديثة تستخدم في العديد من المجالات ، سواء كانت طبية وعسكرية وامنية وبيئية وجيولوجية وإنترنت الأشياء.

الطاقة هي الإشكال الرئيسي في WSN لأن البطارية صغيرة ، وفي هذه الأيام تركز الابحاث على تحسين إدارة الطاقة التي تستهلكها أجهزة استشعار الشبكة من خلال النظر أولاً في خوارزميات الاتصالات وتوجيه البيانات. ولتحقيق هذه الغاية، اقترحنا تحسين بروتوكول التوجيه الهرمي. PEGASIS.

من أجل تأكيد التحسينات التي أدخلتها الخوارزمية ، قمنا بإجراء محاكاة ، حيث يتم تقييم أداء بروتوكولنا ومقارنتها ببروتوكول PEGASIS.

الكلمات المفتاحية: شبكة الاستشعار اللاسلكية ، بروتوكول التوجيه الهرمي ، لتقليل تبديد الطاقة ، الشبكة ،

Master Cluster-Head , Cluster-Head supérieur

Remerciements

Nous remercions en premier lieu au DIEU pour nous avoir donné la force de réaliser ce travail.

Aussi mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail ainsi qu'à la réussite de cette formidable année académique.

Je remercie également Madame Fatima BOUAKKAZ pour sa générosité et la grande patience dont elle a fait preuve malgré ses responsabilités professionnelles.

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté à participer à l'évaluation de notre travail.

*Nous aimerons exprimer aussi à toute l'équipe pédagogique et administrative du master académique en Informatique spécialité :
Administration et sécurité des réseaux.*

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Liste des algorithmes	V
Liste des abréviations	1
Introduction Générale	2
Chapitre 1. Les Réseaux De Capteurs Sans Fil	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Capteur.....	3
1.2.1 Unité de captage	3
1.2.2 Unité de traitement	4
1.2.3 Unité de communication	4
1.2.4 Unité de contrôle d'énergie.....	4
1.2.5 Système de localisation.	4
1.2.6 Mobilisateur	4
1.3 Caractéristiques d'un RCSF	4
1.3.1 Sans infrastructure.....	5
1.3.2 Scalabilité (Passage à l'échelle).....	5
1.3.3 Interférences	5
1.3.4 Topologie dynamique.....	5
1.3.5 Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul	5
1.4 L'architecture des RCSF	5
1.4.1 Architecture de communication	6
1.4.2 Collecte d'informations	6
1.4.2.1 Collecte d'informations à la demande.....	6
1.4.2.2 Collecte d'informations à suite à un événement	7
1.4.2.3 Collecte d'informations périodique.....	7
1.4.3 Architecture protocolaire.....	8
1.4.3.1 Couche application	9
1.4.3.2 Couche transport.....	9
1.4.3.3 Couche réseau.....	9

1.4.3.4 Couche liaison de données	9
1.4.3.5 Couche physique	10
1.5 Consommation d'énergie dans les RCSFs	10
1.5.1 Energie de capture	10
1.5.2 Energie de traitement	10
1.5.3 Energie de communication.....	10
1.6 Applications des Réseaux de capteurs Sans Fil	12
1.6.1 Domaine militaire.....	13
1.6.2 Domaine civil	13
1.6.3 Domaine agricole et environnemental.....	13
1.6.4 Domaine industriel	13
1.6.5 Domaine de la santé	14
1.6.6 Applications domestiques	14
1.7 Conclusion	14
Chapitre 2. Le Routage Dans Les Réseaux De Capteurs Sans Fil.....	15
2.1 Introduction.....	15
2.2 Définition de routage	15
2.3 Objectifs du routage dans les RCSFs.....	15
2.4 Classification des protocoles de routage Selon la structure du réseau.....	16
2.4.1 La topologie plate.....	16
2.4.2 La topologie hiérarchique.....	17
2.4.3 La topologie de la localisation	18
2.5 Les protocoles hiérarchiques de routage.....	18
2.5.1 Caractéristiques d'un protocole hiérarchique.....	19
2.5.1.1 L'algorithme de clustering utilisé	19
2.5.1.2 La réélection des CHs.....	19
2.5.1.3 La nature des clusters générés	20
2.5.1.4 La communication intra-cluster.....	20
2.5.1.5 La communication inter-cluster.....	20
2.5.1.6 Le niveau d'agrégation de données.....	20
2.6 Protocoles de routage hiérarchique pour les RCSF	21
2.6.1 LEACH.....	21
2.6.2 PEGASIS.....	23
2.7 les différentes versions de protocoles PEGASIS	27
2.7.1 Energy Efficient PEGASIS Based (EPPB).....	27

2.7.2 PEGASIS-ANT Colony Optimization algorithm (ACO)	29
2.7.3 H-PEGASIS [25].....	30
2.7.4 PEGASIS with double Cluster Head (PDCH)	32
2.7.5 Improved Energy Efficient PEGASIS Based (IEEPB).....	33
2.7.6 MIEEPB	34
2.8 Conclusion	37
Chapitre 3. Contribution	38
3.1 Introduction.....	38
3.2 Amélioration proposé.....	38
3.3 Modèle de système de base.....	39
3.3.1 La phase d'initialisation.....	42
3.3.2 La phase de transmission.....	47
3.4 Description de déroulement du protocole	49
3.4.1 Phase d'initialisation.....	49
3.4.2 La phase de Sélection MCH et CHs.....	50
3.4.2 La phase de transmission.....	51
3.5 Conclusion.....	54
Chapitre 4. Simulation Et Analyse Des Performance.....	55
4.1 Introduction.....	55
4.2 Choix du langage et de l'environnement d'implémentation	55
4.3 Simulation.....	56
4.4 Résultats de simulation	59
4.4.1 Période de stabilité	59
4.4.2 L'énergie consommée.....	60
4.4.3 L'énergie consommée par round	61
4.4.4 L'énergie moyenne consommée par chaque nœud et par un round	62
4.5 Conclusions.....	63
Conclusions Générales	64
Bibliographe.....	65

Liste des figures

Figure 1.1 Composants d'un capteur .	3
Figure 1.2 Architecture de communication [].	6
Figure 1.3 Collecte d'informations à la demande.	7
Figure 1.4 Application orientée événement.	7
Figure 1.5 La collection d'information périodique.	8
Figure 1.6 Pile protocolaire dans les RCSF [7].	8
Figure 1.7 Energie de communication [2].	12
Figure 1.8 Quelques domaines d'application pour les RCSFs.	12
Figure 2.1 Routage dans les RCSF [2].	16
Figure 2.2 Topologie plate [].	17
Figure 2.3 Topologie hiérarchique [4].	17
Figure 2.4 Les Configurations pour les RCSF hiérarchique.	18
Figure 2.5 LEACH [].	21
Figure 2.6 Construction de chaînes en utilisant l'algorithme greedy [].	25
Figure 2.7 Approche de déplacement de jeton [25].	26
Figure 2.8 Les différentes versions de protocoles PEGASIS [2].	27
Figure 2.9 La chaîne formée dans EEPB [].	28
Figure 2.10 PEGASIS Ant [2].	29
Figure 2.11 H-PEGASIS [].	31
Figure 2.12 PEGASIS with double Cluster Head (PDCH) [2].	32
Figure 2.13 La chaîne formée dans IEEPB [26].	33
Figure 2.14 MIEEPB [2].	35
Figure 3.1 L'organisation des nœuds dans notre amélioration proposée.	40
Figure 3.2 Les étapes de notre amélioration proposée	40
Figure 3.3 Le schéma de fonctionnement de notre amélioration proposé.	41
Figure 3.4 Exemple de création de la grille 3*3.	42
Figure 3.5 Choix de Master CH.	43
Figure 3.6 Choix de les CHs supérieur.	44
Figure 3.7 Choix CHs dans les zones inferieure.	45
Figure 3.8 Création des chaines de transmission intra-cluster.	46

Figure 3.9 Chaines de transmission inter cluster.....	47
Figure 3.10 La table TDMA.....	48
Figure 3.11 La transmission des données.....	48
Figure 3.12 Schéma de détermination des zones.....	49
Figure 3.13 Schéma de création des Master CH.	50
Figure 3.14 Schéma de création des CHs et leurs zones.	51
Figure 3.15 Schéma de transmission de données intra cluster	52
Figure 3.16 Schéma de transmission de données inter CHs.....	53
Figure 4.1 Les paramètres de simulation.....	57
Figure 4.2 Déploiement de 100 nœuds capteurs.	58
Figure 4.3 Exemple de création de grilles carrées du 3*3.....	58
Figure 4.4 Période de stabilité	59
Figure 4.5 L'énergie consommée.....	61
Figure 4.6 L'énergie consommée par round	62
Figure 4.7 L'énergie moyenne consommée par round et par nœud.....	63

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Classifications les protocoles basée sur PEGASIS [].	36
Tableau 4.1 Les paramètres de simulation.	56

Liste des algorithmes

Algorithme 2.1 Greedy algorithme.....	25
Algorithme 3.1 Création chaine transmission (intra-cluster)	46

Liste des abréviations

- **BS:** Base Station
- **CAN :** Convertisseur Analogique-Numérique
- **CH:** Cluster Head
- **EDA:** Energy Data Aggregation
- **GPS:** Global Positioning System
- **ISO:** International Standardization Organization
- **LEACH:** Low Energy Adaptive Clustering Hierarchical
- **MCH:** Master Cluster Head
- **PEGASIS:** Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
- **QoS:** Quality of Service
- **RCSFs:** Réseaux de Capteurs Sans Fil
- **TDMA:** Time Division Multiplexed Access
- **WSN:** Wireless Sensor Network

Introduction Générale

Ces dernières années, une nouvelle technologie a promis de révolutionner l'interaction avec l'environnement physique qui nous entoure : les réseaux de capteurs sans fil. Il se compose d'un groupe de petits capteurs électroniques capables de communiquer entre eux, collecter et de fournir des informations utiles en regroupant les mesures prises dans la zone à surveiller. Les réseaux capteurs sans fil ont été utilisés dans de nombreux domaines d'application tel que, domaine médical, domaine de la sécurité militaire, contrôle environnementales et domestiques, et l'Internet des objets.

L'émergence de ce type de réseau a ouvert la voie au développement de nouveaux protocoles de routage toujours plus efficaces les uns que les autres. Mais principalement en raison de la taille miniaturisée des nœuds capteurs, plusieurs limitations se posent (contrainte énergétique, capacité réduite des nœuds, etc.). Ces limitations motivent une grande partie des problèmes de recherche dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil, en particulier la contrainte énergétique qui est un problème fondamental. En effet, de nombreux protocoles de routage se concentrent sur la conservation de l'énergie.

Notre but est l'amélioration du protocole hiérarchique chaîné le plus connue « PEGASIS » avec une combinaison de la méthode grille clustering et multi-hop transmission.

Dans ce document, un nouveau protocole « *Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol* in WSN » est proposé. Ainsi, l'accent a été mis sur l'élaboration d'une nouvelle formule déterministe d'élection des Master Cluster Head (MCH) et Cluster Heads (CHs) de chaque zone.

Organisation du mémoire

Le premier chapitre présente quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil ainsi qu'une L'architecture des RCSFs.

Le deuxième chapitre présente l'état de l'art de quelques protocoles de routage hiérarchiques dans les RCSFs et les différentes versions de protocole PEGASIS existe.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de notre amélioration proposé
« *Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol* in WSN »

Le quatrième chapitre présente les résultats de l'évaluation de performance de notre
amélioration proposée après simulation.

Nous clôturons notre document par une conclusion générale ainsi que des perspectives.

Chapitre 1. Les Réseaux De Capteurs Sans Fil

1.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fils sont constitués de nœuds (capteurs) qui possèdent des capacités particulières comme l'auto-organisation, rapidité de déploiement, tolérance aux erreurs et leur faible cout.

Nous présentons dans ce chapitre le fonctionnement des réseaux de capteurs sans fils en mettant l'accent sur les démarches et les principes permettant d'économiser l'énergie ainsi que les différents domaines applications des réseaux de capteurs sans fil dans la vie quotidienne.

1.2 Capteur

Un capteur sans fil est un petit appareil électronique compétent de mesurer une valeur environnementale physique (température, lumière, etc...) et le transmettre aux stations de base. Il est composé de quatre unités de base : l'unité de traitement, l'unité de capture, l'unité de communication et l'unité de contrôle de l'énergie [1], la Figure 1.1 montre les différents composants d'un capteur.

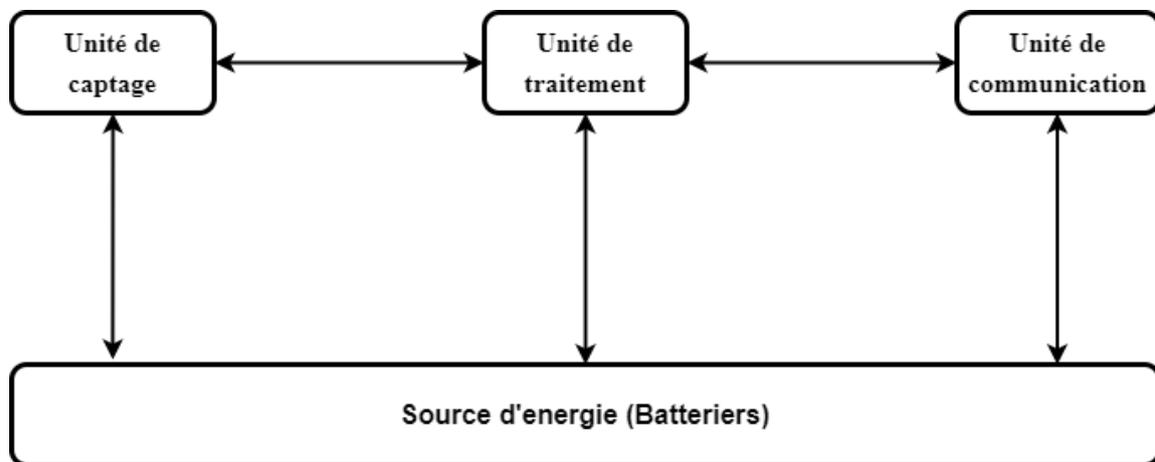


Figure 1.1 Composants d'un capteur [2].

1.2.1 Unité de captage

Généralement il comprend deux sous-unités, le capteur lui-même et le convertisseur analogique-numérique (CAN) qui transforme les signaux analogiques.

1.2.2 Unité de traitement

Il comprend un processeur avec une petite unité de stockage et mémoire, Il utilise un système d'exploitation spécialement pour les capteurs par exemple (TinyOS) [3], Il exécute aussi les protocoles de communication de nœud avec les autres nœuds du réseau. Il peut traiter les données collectées.

1.2.3 Unité de communication

Elle effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un support « sans-fil ».

1.2.4 Unité de contrôle d'énergie

Un capteur a une ressource énergétique (généralement une batterie). Grâce a sa petite taille, généralement batterie est limitée et non remplaçable. L'énergie est la ressource la plus précieuse d'un réseau de capteurs, car elle influence directement la durée de vie des capteurs et donc la durée de vie réseau.

On trouve aussi des capteurs qui possèdent d'autres composants additionnels :

1.2.5 Système de localisation.

Il fournit des informations sur la localisation requise par les techniques de routage telle que GPS (Global Position System).

1.2.6 Mobilisateur

Il est appelé si le nœud capteur doit être déplacé pour accomplir la requête à traiter.

1.3 Caractéristiques d'un RCSF

Un réseau de capteurs a des caractéristiques spéciales par rapport à d'autres réseaux sans fil. Dans cette section, nous présentons les principales caractéristiques de ce type de réseau :

1.3.1 Sans infrastructure

Les RCSF appartiennent à la famille des réseaux sans fil sans infrastructure dit adhoc de type many-to-one. Les capteurs sont généralement déployés aléatoirement dans des zones hostiles ce que nécessite qu'ils doivent s'auto- configurer et autoorganiser sans intervention humaine.

1.3.2 Scalabilité (Passage à l'échelle)

Dans les RCSF, les capteurs sont généralement déployés en grand nombre pour garantir une couverture totale de la zone d'intérêt et faire face aux pannes car les capteurs peuvent cesser de fonctionner pour différentes causes. Nous pouvons avoir des RCSF haute densité dont la taille dépasse un millier de capteurs voire un million de capteurs.

1.3.3 Interférences

Le concept d'interférence apparaît dans la plupart des réseaux sans fil, en particulier dans le RCSF où deux capteurs voisins peuvent transmettre dans le même saut de fréquence qui peut provoquer des interférences.

1.3.4 Topologie dynamique

Des capteurs sans fil peuvent être placés sur des objets en mouvement, par exemple des animaux, pour les surveiller à distance sans perturber leur comportement. Ce type de scénario génère une topologie qui n'est pas statique, appelée dynamique [4].

1.3.5 Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul

La caractéristique la plus critique du RCSF est la limite des ressources énergétiques, car la plupart des capteurs ont des batteries à énergie limitée. À cette fin, dans la plupart des travaux de recherche, un problème est traité conjointement avec les économies d'énergie.

1.4 L'architecture des RCSF

Les RCSF se caractérisent par l'absence d'une infrastructure déterminée, les nœuds capteurs la construisent tout en permettant une interaction avec l'environnement auquel ils appartiennent et en répondant aux différentes demandes émanant d'utilisateurs ou de réseaux

externes. De plus, les nœuds de capteurs comme tout autre composant de télécommunications adhèrent à une architecture de protocole spécifique.

1.4.1 Architecture de communication

Un réseau de capteurs est composé d'un grand nombre de nœuds distribué dans une zone géographique. Le nombre de capteurs déployés dans la zone de couverture et chaque nœud peut détecter et collecter informations (température, humidité, ...) et transmettre aux voisins jusqu'à Station Base [5]. La distance entre deux nœuds est estimée en fonction de la puissance de transmission via les ondes radio.

Station Base son but est de recevoir les informations qui y arrivent des autres nœuds et les transmettre à son tour à un poste de contrôle par le biais d'une transmission satellitaire ou Internet. La Figure 1.2 illustre un schéma de communication de données dans un RCSF.

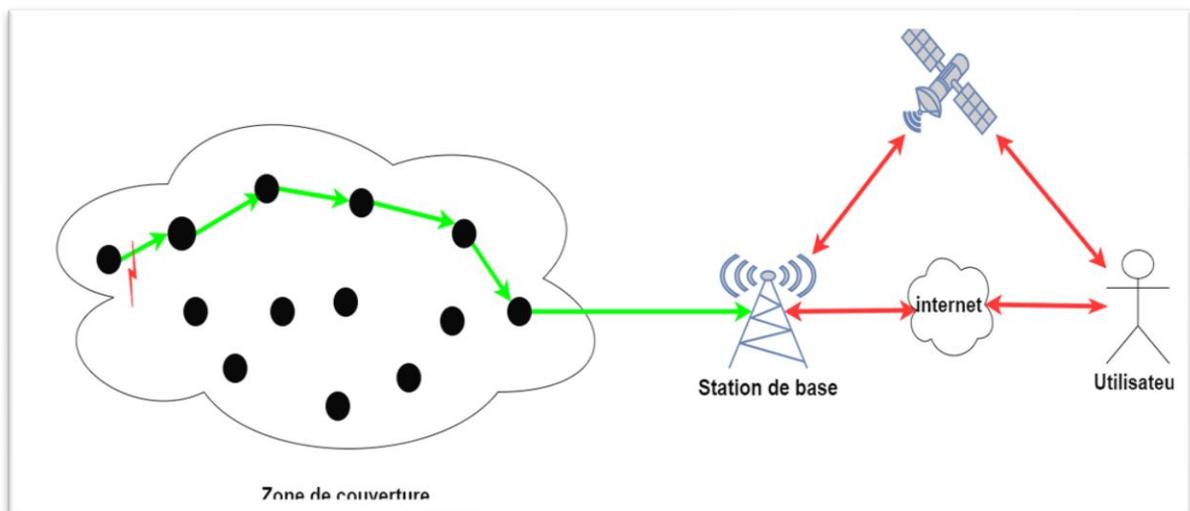


Figure 1.2 Architecture de communication [6].

1.4.2 Collecte d'informations

Il y a trois méthodes pour collecter les informations dans un réseau de capteurs.

1.4.2.1 Collecte d'informations à la demande

Lorsque l'on souhaite connaître l'état de la zone d'intérêt à l'instant t , le nœud Sink émet une requête en broadcast vers tous les nœuds pour que ces derniers remontent leur dernier relevé vers le nœud Sink. Les informations sont alors acheminées vers la station de

base par le biais d'une communication multi-hop. La Figure 1.3 illustre ce mode de communication.

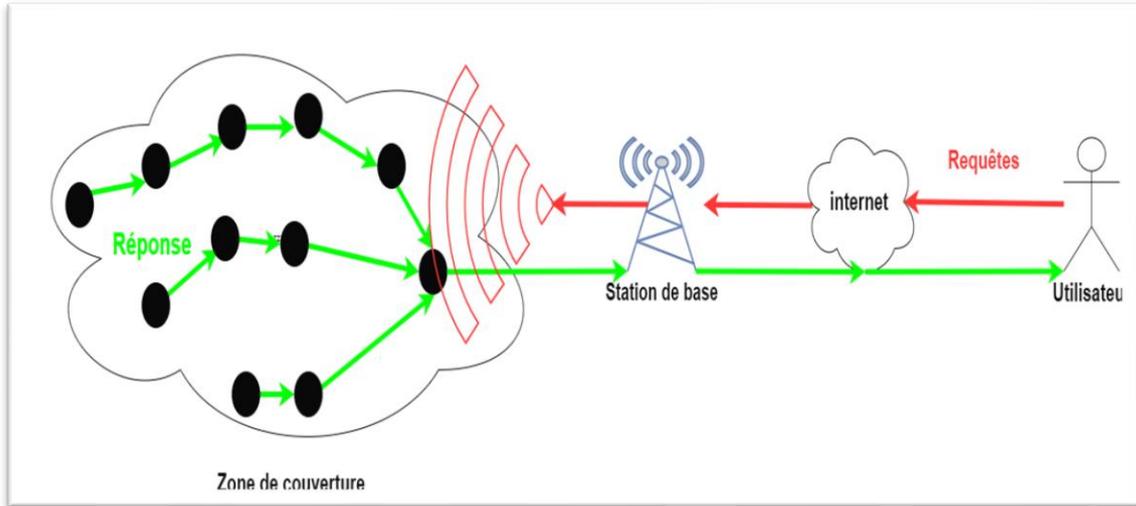


Figure 1.3 Collecte d'informations à la demande.

1.4.2.2 Collecte d'informations à suite à un événement

Un événement se produit en un point de la zone d'intérêt, les capteurs situés à proximité de ce point détecte l'évènement et le transmettent à la station de base. La Figure 1.4 shows ce type de réseau.

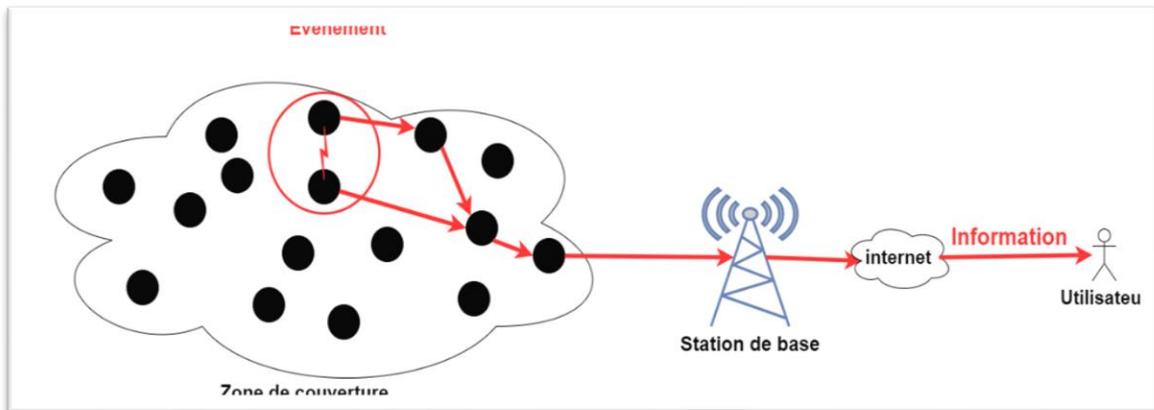


Figure 1.4 Application orientée événement.

1.4.2.3 Collecte d'informations périodique

Ce type de réseau nécessite généralement un flux de données faible, une durée de vie importante, il sert à la collecte périodique des données environnementales puis leur transmission vers la station de base.

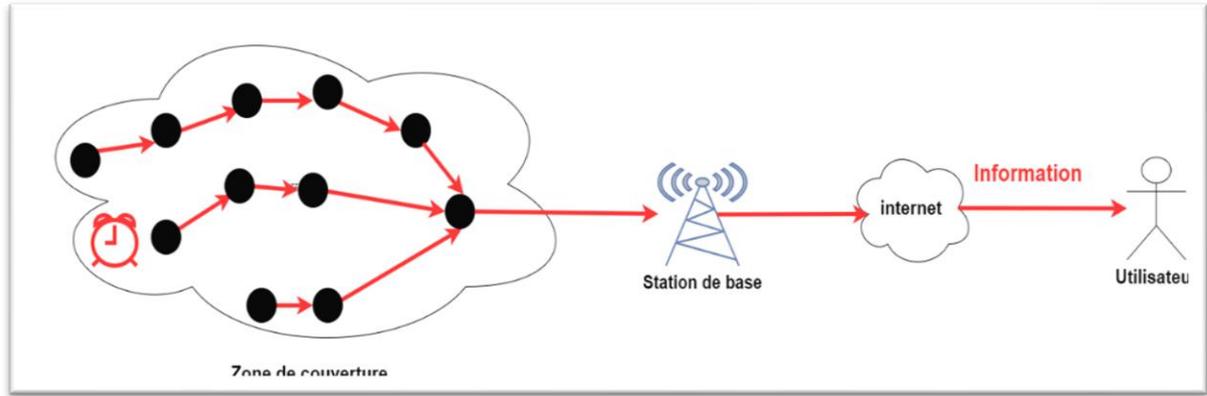


Figure 1.5 La collection d'information périodique.

1.4.3 Architecture protocolaire

Une pile de protocoles de cinq couches est utilisée par les nœuds de réseau : la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique.

De plus, cette pile a trois plans de gestion : le plan de gestion des tâches qui permet d'affecter correctement les tâches aux nœuds capteurs, le plan de gestion de la mobilité qui garde une image de l'emplacement des nœuds pendant la phase de routage et le plan de gestion de l'énergie qui préserve le maximum d'énergie [7].

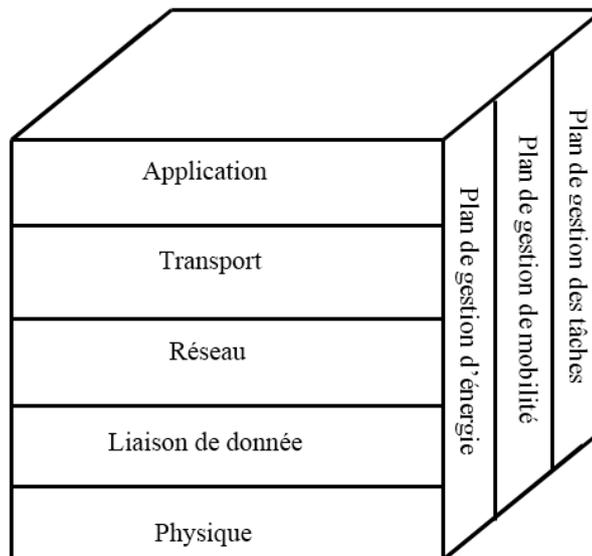


Figure 1.6 Pile protocolaire dans les RCSF [7].

1.4.3.1 Couche application

Elle assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc de la couche la plus proche des utilisateurs, gérée directement par les logiciels. Parmi les protocoles d'application, nous citons : SMP et TADAP.

1.4.3.2 Couche transport

Elle vérifie le bon acheminement des données et la qualité de la transmission. Dans les RCSF, la fiabilité de transmission n'est pas garantie. Ainsi, les erreurs et les pertes sont tolérées c'est la raison pour laquelle nous déployons les capteurs en grand nombre. Par conséquent, un protocole de transport proche du protocole UDP appelé UDP-Like est utilisé. Cependant, comme le protocole de transport TCP est universel, les RCSF doivent donc posséder, lors d'une communication avec un réseau externe, une interface TCP-splitting pour vérifier la compatibilité entre ces deux réseaux communicants.

1.4.3.3 Couche réseau

Elle s'occupe du routage de données fournies par la couche transport. Elle établit les routes entre les nœuds capteurs et le nœud puits, et sélectionne le meilleur chemin en termes d'énergie, délai de transmission, débit, etc. Les protocoles de routage conçus pour les RCSF sont différents de ceux conçus pour les réseaux ad hoc puisque les RCSF sont différents selon plusieurs critères comme :

- l'absence d'adressage fixe des nœuds tout en utilisant un adressage basé- attribut.
- l'établissement des communications multi-sauts.
- l'établissement des routes liant plusieurs sources à une seule destination pour agréger des données similaires, etc.

1.4.3.4 Couche liaison de données

Elle est responsable de l'accès au media physique, de la détection et de la correction d'erreurs intervenues sur la couche physique. De plus, elle établit une communication saut-par-saut entre les nœuds i.e. elle détermine les liens de communication entre eux dans une distance d'un seul saut.

1.4.3.5 Couche physique

Cette couche permet de moduler les données et les acheminer dans le media physique tout en choisissant les bonnes fréquences.

1.5 Consommation d'énergie dans les RCSFs

Un capteur utilise son énergie pour réaliser trois actions principales : le captage, la communication et le traitement des données.

1.5.1 Energie de capture

Les sources de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture. Cette énergie consommée n'est pas très importante, Néanmoins, elle varie en fonction du phénomène et du type de surveillance effectué.

1.5.2 Energie de traitement

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie : l'énergie de commutation et l'énergie de perte. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de perte correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie consommée pour les opérations de calcul est beaucoup plus faible que l'énergie de communication, par exemple l'énergie nécessaire pour transmettre 1 KB sur une distance de 100m est approximativement équivalente à l'énergie nécessaire pour exécuter plus de 3 millions d'instructions avec une vitesse de 100 millions d'instructions/seconde. L'énergie consommée par le traitement des données est calculée en appliquant la formule suivante : $EDA = 5nj/bit/signal$ [8].

1.5.3 Energie de communication

Les communications consomment beaucoup plus d'énergie que les autres tâches et se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de

veille. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission [2].

- Pour transmettre un message de k bits sur une distance de d mètres, l'émetteur consomme une énergie selon la formule suivante :

$$ETx(k, d) = ETx(k) + ETx_{amp}(k, d)$$

Cette formule change selon la distance d .

$$ETx(k, d) = \begin{cases} k * Eelec(k, d) + k * \epsilon_{amp} * d^2 & \text{si } d < d_{crossover} \\ k * Eelec(k, d) + k * \epsilon_{amp} * d^4 & \text{sinon} \end{cases}$$

- Pour recevoir un message de k bits, le récepteur consomme :

$$ERx(k) = k * Eelec$$

Avec :

Eelec : énergie de transmission/réception électronique

k : taille d'un message ;

d : distance entre l'émetteur et le récepteur ;

ETx_amp : énergie d'amplification ;

ϵ_{amp} : facteur d'amplification ;

d_{crossover}: distance limite pour laquelle les facteurs de transmission changent de valeur.

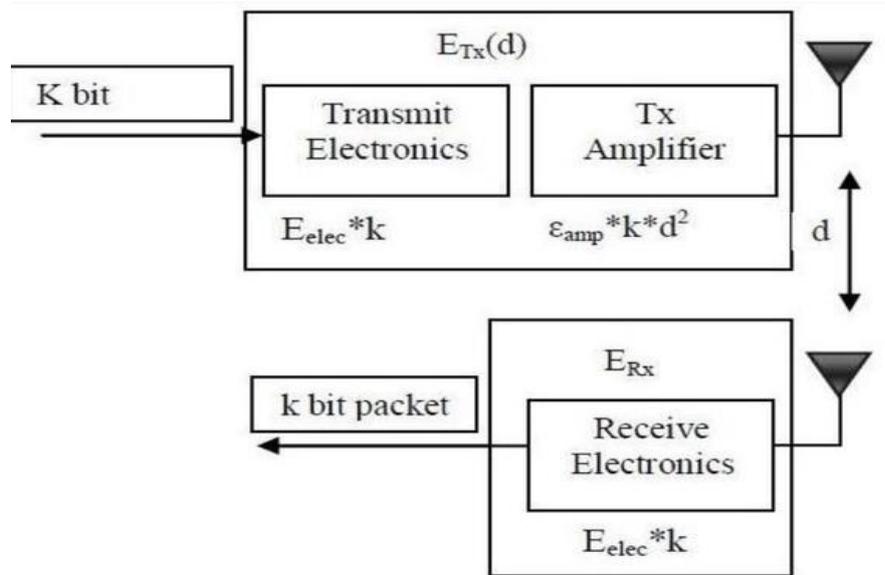


Figure 1.7 Energie de communication [2].

1.6 Applications des Réseaux de capteurs Sans Fil

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ont un champ d'application vaste et diversifié. Nous présentons dans ce qui suit les domaines les plus ciblés par les RCSF [1].

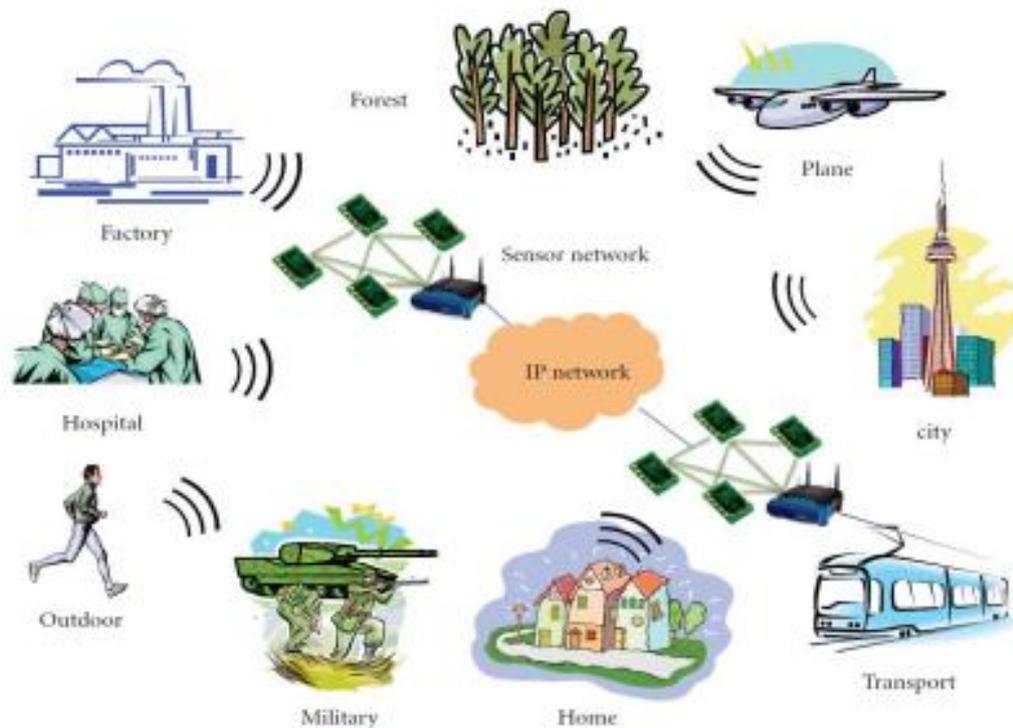


Figure 1.8 Quelques domaines d'application pour les RCSFs.

1.6.1 Domaine militaire

Les RCSF sont le résultat de recherches militaires. Ils sont utilisés dans la surveillance des champs de bataille pour connaître exactement la position, le nombre, l'armement (chimique, biologique, nucléaire... etc.), l'identité et le mouvement des soldats et ainsi empêcher leur déploiement sur des zones à risques.

Exemple d'application : le déploiement d'un réseau de capteurs sans fil sur les côtes est et ouest des États-Unis destiné à identifier des sous-marins et des navires silencieux, notamment soviétiques, s'approchant du territoire américain [9].

1.6.2 Domaine civil

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

1.6.3 Domaine agricole et environnemental

Les réseaux de capteurs sans fil sont très utiles pour protéger l'environnement. Ils peuvent être utilisés pour la détection des incendies de forêt, des inondations, la surveillance des volcans, le contrôle de la qualité de l'air en surveillant l'évolution de la densité moyenne de CO₂ [10].

Le déplacement des animaux... etc. Dans le domaine agricole, nous citons le déploiement de capteurs sur un champ agricole afin d'identifier les zones sèches et permettre leur irrigation à temps.

Exemple d'application : le projet CORI. Des capteurs en temps réel sont déployés pour recueillir des informations visant à fournir des informations objectives sur la variabilité spatiale et temporelle du cours inférieur du Columbia.

1.6.4 Domaine industriel

La surveillance des lignes de production dans une usine, la détection des dysfonctionnements des machines, le suivi du mouvement des marchandises dans les

entrepôts de données, le suivi du courrier, des colis expédiés, etc. sont, entre autres, des exemples concrets d'application de la RCSF dans le domaine industriel.

1.6.5 Domaine de la santé

Moyens très efficaces pour le domaine médical et suivi en temps réel de l'état des patients, en particulier ceux souffrant de maladies chroniques, ils permettent de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité [11] [12] [13] peut être stocké longtemps où détecter des comportements anormaux chez les personnes âgées ou handicapées telles que chutes, chocs, cris ... etc.

Exemple d'application : Utilisation de capsules multi-capteurs pour la transmission d'images de l'intérieur du corps humain sans recours à la chirurgie [14].

1.6.6 Applications domestiques

Les RCSF sont l'un des moyens les plus importants dans la lutte contre le réchauffement climatique. En effet, l'intégration de capteurs dans les murs ou au plafond des maisons permet d'économiser un maximum d'énergie en gérant de manière optimale l'éclairage et le chauffage en fonction de la localisation des personnes. De plus, les capteurs peuvent être intégrés dans des appareils électroménagers (aspirateurs, micro-ondes, climatiseurs, réfrigérateurs, etc.) et interagir entre eux et avec un réseau externe pour assurer un meilleur contrôle à distance de ces appareils par leur propriétaire. [15] . La liste des candidatures RCSF n'est pas exhaustive. Ils peuvent être utiles dans d'autres domaines tels que la sécurité alimentaire, les télécommunications, la robotique ou dans des applications traditionnelles (automobile, aéronautique, applications, commercial, etc.).

1.7 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons tenté de nous concentrer sur l'architecture des RCSF, ainsi que sur leurs caractéristiques et domaines d'application. Cette évolution nous a permis de déduire que les protocoles de routage et la dissipation d'énergie jouent un rôle déterminant et crucial dans la conception des RCSF. Cela nous a conduit à une étude des principaux protocoles de routage dans le chapitre suivant.

Chapitre 2. Le Routage Dans Les Réseaux De Capteurs Sans Fil

2.1 Introduction

Les protocoles de routage jouent un rôle principal dans la conception des RCSFs et sont influencés par un facteur déterminant, à savoir la consommation d'énergie sans perte d'efficacité.

De nombreuses stratégies de routage ont été créées pour la RCSF. Certains sont des adaptations de stratégies qui existaient pour d'autres types de réseaux (principalement pour les réseaux sans fil au sens large) tandis que d'autres ont été conçus spécifiquement pour les réseaux de capteurs sans fil.

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les principaux protocoles hiérarchiques.

2.2 Définition de routage

Le routage est une méthode pour obtenir des informations vers la bonne destination via un réseau de connexion donné. Le problème de routage consiste à déterminer un routage optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance. Le problème consiste à trouver que l'investissement de moindre coût en capacité est nominal et en réserves ce qui assure l'acheminement de l'effroi nominal de l'étage et garantit sa survie en cas de défaillance de l'arc ou du nœud.

2.3 Objectifs du routage dans les RCSFs

Les soucis majeurs du routage est la conservation d'énergie qui peut étendre considérablement la durée de vie d'un RCSF. Un bon routage doit être capable d'acheminer les informations avec les critères suivantes :

1. Une latence faible.
2. En utilisant peu d'énergie, donc en utilisant les meilleures liaisons de données.
3. En minimisant la charge de réseau, afin de maximiser la qualité totale d'informations pouvant être transmises sur le réseau dans son ensemble.
4. En étant faible, et en particulier, en étant tolérant aux pannes de nœuds du réseau.

2.4 Classification des protocoles de routage Selon la structure du réseau

Le routage dans les réseaux de capteurs sans fil se classe généralement en [16] [17] :

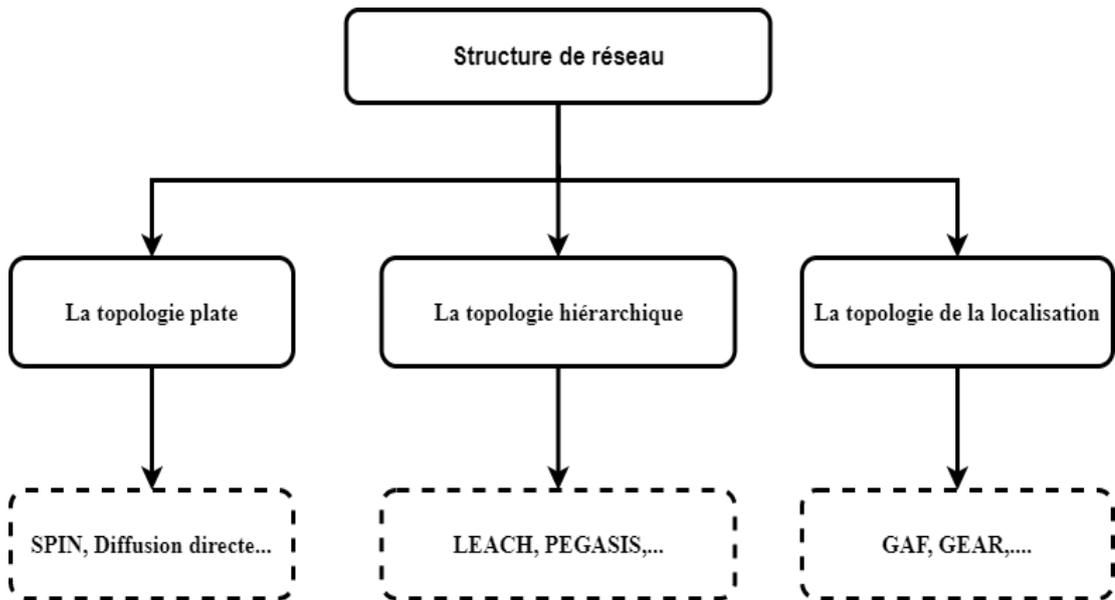


Figure 2.1 Routage dans les RCSF [2].

2.4.1 La topologie plate

Dans une topologie plate, tous les nœuds de capteurs possèdent le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. Les réseaux plats sont caractérisés par la simplicité des protocoles de routage, un coût de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes ainsi qu'une habileté pour construire de nouveaux chemins suite aux changements de topologie. Cependant, les nœuds proches du puits participent plus que les autres aux tâches de routages. De plus, ces réseaux présentent une faible scalabilité dû au fonctionnement identique des nœuds. La Figure 2.2 suivante illustre l'organisation des capteurs dans une topologie plate :

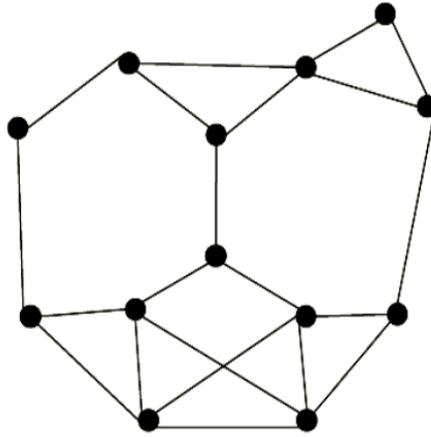


Figure 2.2 Topologie plate [18].

2.4.2 La topologie hiérarchique

Le routage hiérarchique est considéré comme étant l'approche la plus favorable en termes d'efficacité énergétique.

Les protocoles hiérarchiques restructurent le réseau global en groupes dits CHs, chacun d'eux est constitué d'un chef appelé CH et de ses membres. Suivant l'application, les membres peuvent être des voisins directs du chef ou pas dont ils acheminent leurs messages à leur chef, lequel les achemine ensuite dans le réseau tout entier via d'autres CHs jusqu'à la BS. Un exemple de cette topologie est donné dans la Figure 2.3 ci-dessous.

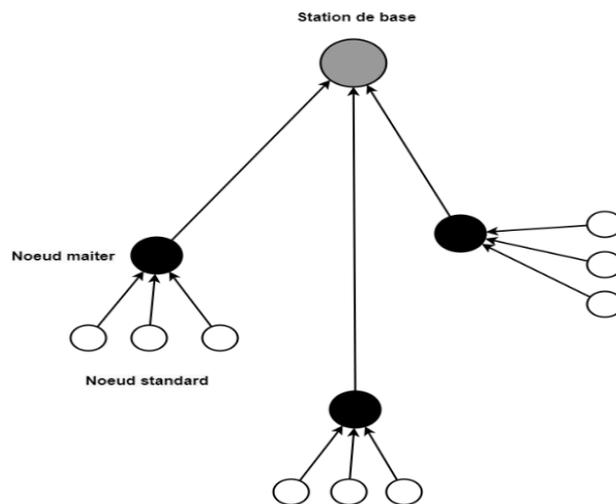


Figure 2.3 Topologie hiérarchique [4].

2.4.3 La topologie de la localisation

L'identification des emplacements géographiques des nœuds capteurs sur la zone de captage est d'une importance capitale pour les mécanismes de routage de données dans les RCSFs. Ces informations de localisation permettent le calcul des positions des capteurs et les distances qui les séparent afin de construire les chemins les plus courts entre un nœud source et sa destination. Cette approche de routage est plus économe en énergie car elle dispense les nœuds capteurs d'employer les méthodes aléatoires ou probabilistes pour rechercher les routes. L'inconvénient est la nécessité d'équiper les nœuds capteurs avec un système de localisation par satellite comme le GPS qui consomment énormément d'énergie.

2.5 Les protocoles hiérarchiques de routage

Dans les réseaux hiérarchiques, des nœuds capteurs sont construits et gérés par les nœuds maîtres appelés CHs. Il existe deux configurations possibles pour ces ensembles construits. Dans la première configuration, les membres d'un ensemble ne communiquent qu'avec leurs CH, en obtenant ainsi un modèle basé sur les groupes. Dans la seconde, ils construisent des listes et les membres d'un ensemble utilisent d'autres nœuds comme passerelles appelés leaders pour transmettre leurs données à leurs chefs en obtenant ainsi un modèle basé sur les chaînes comme le montre la Figure 2.4.

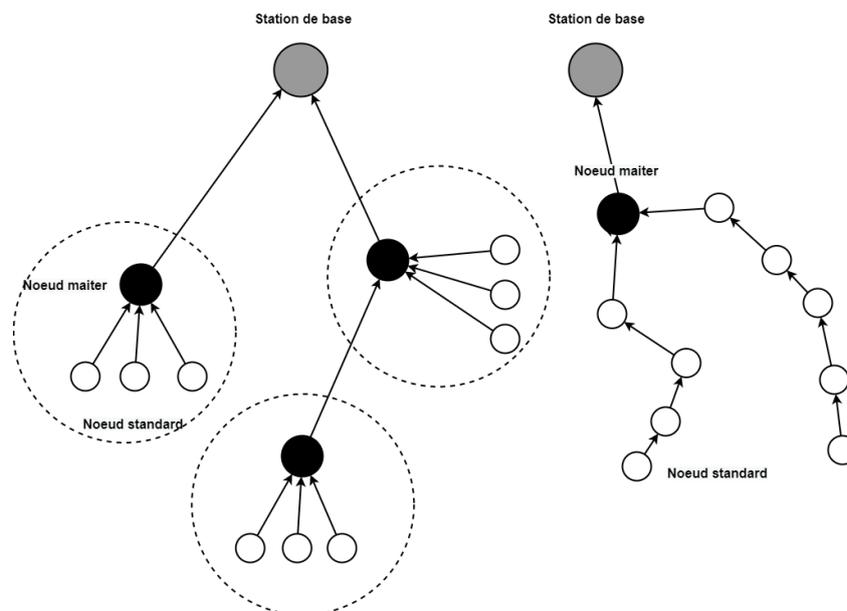


Figure 2.4 Les Configurations pour les RCSF hiérarchique.

2.5.1 Caractéristiques d'un protocole hiérarchique

Un protocole de routage hiérarchique doit spécifier plusieurs tâches que nous pouvons classer selon :

2.5.1.1 L'algorithme de clustering utilisé

Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, un classement en trois types de ces algorithmes est proposé dans [19] en se basant sur le type d'algorithme de contrôle exécuté :

- **Centralisé** : l'algorithme est exécuté sur le nœud qui a une vue globale du réseau, généralement, au niveau du Sink. Ce type d'algorithme est peu utilisé à cause de l'overhead c'est-à-dire, le surcoût, généré suite aux transmissions exécutées pour pouvoir garder la vue globale du réseau et la dynamique de la topologie qui fait que cette vue soit très variable. La vue obtenue par un nœud peut ne plus être valide à l'instant où le nœud la récupère à cause de pannes et des imprévisibles déconnexions.

- **Distribué** : l'algorithme est exécuté en coopération au niveau de chaque nœud du réseau. La synchronisation des tâches de contrôle est obtenue en échangeant des messages de contrôle. Ce type d'algorithme minimise la communication relative à la sauvegarde de la vue globale du réseau, car chaque nœud décide, indépendamment des autres, son rôle et fait connaître sa décision par l'envoi de message. Cependant, l'efficacité de ces algorithmes dépend de la taille et du nombre de ces messages de synchronisation.

- **Géographique** : l'algorithme de la tâche de contrôle à exécuter par un nœud dépend de sa position géographique.

2.5.1.2 La réélection des CHs

Par sa fonction, le nœud CH consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds du réseau. Le CH coordonne le fonctionnement des nœuds membres de son cluster et agrège leurs données, de ce fait, il dissipe plus d'énergie créant un déséquilibre de la distribution de l'énergie sur le réseau. Pour pallier à ce problème, une rotation de ce rôle de CH est organisée au sein du cluster ou bien au sein du réseau entier. La rotation est effectuée périodiquement ou bien en fonction de la consommation de l'énergie du nœud CH [19].

2.5.1.3 La nature des clusters générés

Les algorithmes de Clustering utilisés peuvent générer deux types de cluster : des clusters disjoints et des clusters interconnectés. Dans le premier type, un nœud ne peut appartenir qu'à un et un seul cluster à la fois (le cas le plus fréquent); sauf que pour des applications spécifiques telles que le routage inter-cluster, la localisation et la synchronisation des nœuds; les clusters interconnectés sont utilisés. Ce type de clustering permet aux nœuds d'appartenir à un ou plusieurs clusters à la fois.

2.5.1.4 La communication intra-cluster

La communication entre nœuds Cluster Head et les autres nœuds membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut soit, en plusieurs sauts [20].

2.5.1.5 La communication inter-cluster

Les CHs communiquent avec la (les) station(s) de base soit directement, soit en deux ou plusieurs sauts via des nœuds appelés généralement des nœuds Gateway. Ces nœuds peuvent être des CHs ou bien des nœuds membres d'un cluster. L'utilisation de la communication en multi-sauts permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la scalabilité du réseau.

2.5.1.6 Le niveau d'agrégation de données

Selon le type des capteurs utilisés, l'agrégation de données peut se faire à chaque nœud du réseau ou bien uniquement au niveau des CHs. L'agrégation des données permet de réduire la taille des données échangées entre les nœuds, et par conséquent réduire l'énergie dépensée. Plusieurs techniques d'agrégation sont utilisées à savoir des fonctions élémentaires comme la somme, la moyenne, l'écart type, etc. ou bien des fonctions plus complexes spécifiques aux applications utilisées.

2.6 Protocoles de routage hiérarchique pour les RCSF

2.6.1 LEACH

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) est un protocole de routage hiérarchique introduit par Heinzelman et al., C'est le protocole le plus populaires pour les réseaux de capteurs sans fil. Son principe est de former des zones communes de calcul et de traitements en se basant sur la puissance du signal et le niveau d'énergie des nœuds capteurs. Chaque zone est dirigée par un chef de zone, jouant le rôle d'agrégateur et de routeur, en effectuant des traitements sur les données reçues de son cluster et leur expédition vers la prochaine destination. Ce rôle de chef de zone est échangé entre les nœuds d'un cluster afin de répartir équitablement consommation d'énergie entre eux [21] [22].

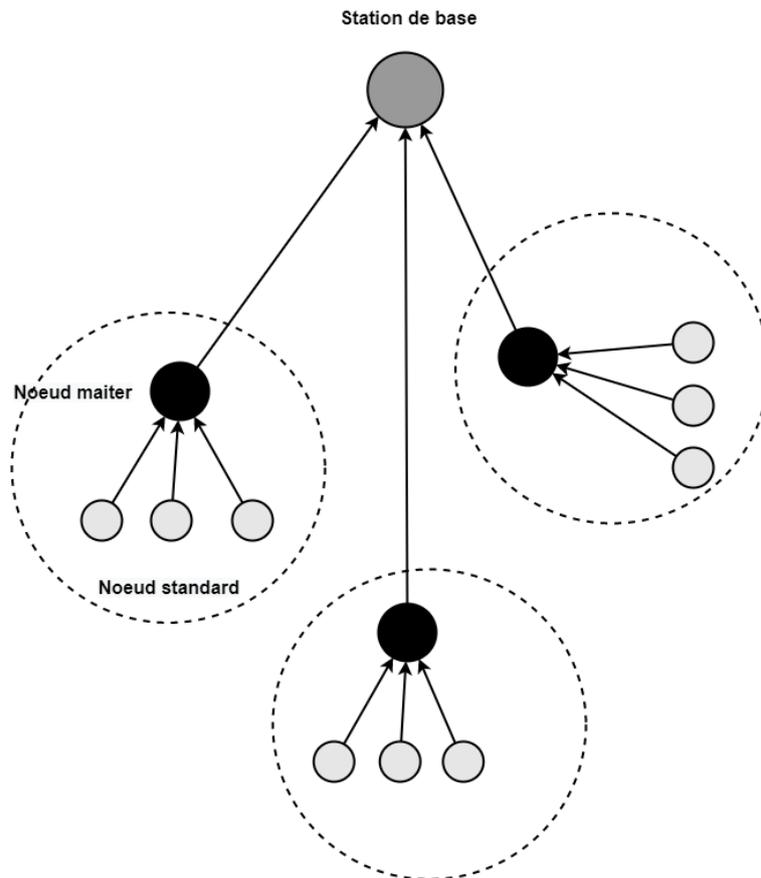


Figure 2.5 LEACH [23].

Fonctionnement

Le protocole LEACH se déroule en rounds. Chaque round se compose de deux phases : Phase de construction et phase de communication. La phase de construction consiste à définir les clusters et élire les Clusters Head (CHs), la phase de communication est responsable de la transmission des données captées. Les deux phases doivent être exécutées en même temps par les nœuds du réseau afin de garantir un meilleur fonctionnement du protocole. Après une période de temps passée, une requête est diffusée sur le réseau par la station de base afin d'évaluer les performances des nœuds chefs de zones en termes d'énergie et procéder, le cas échéant, à son remplacement.

Le protocole LEACH est conçu pour des applications Time-Driven. Son utilisation dans des applications Event-Driven est inapproprié car il emploie le Schedule TDMA et par conséquent un mode de transmission proactif [21] [22].

Avantages et inconvénients de LEACH

(+) **Algorithme distribué** : l'auto-configuration des clusters se fait indépendamment de la BS.

(+) **Rotation des rôles de chefs de groupes** : les CHs sont choisis de façon aléatoire et périodique parmi les nœuds formant le cluster ce qui empêche la forte consommation d'énergie pour la transmission des données.

(+) **Faible énergie pour l'accès au média** : Le mécanisme de groupes permet aux nœuds d'effectuer des communications sur des petites distances avec leurs CHs afin d'optimiser l'utilisation du média de communication en la faisant gérer localement par un CH pour minimiser les interférences et les collisions.

(+) **Agrégations des données** : Les CHs compressent les données arrivant de leurs membres, et envoient un paquet d'agrégation au nœud puits afin de réduire la quantité d'informations qui doit lui être transmise. Cela permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, de simplifier la gestion du réseau, d'optimiser les dépenses d'énergie et enfin de rendre le réseau plus évolutif.

(-) **Absence des CHs** : On pourra ne pas avoir des CHs durant un round si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité $P_i(t)$.

(-) **La distance entre le CH et les autres nœuds** : Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport aux plus proches.

(-) **Diminution de l'énergie des nœuds** : cette diminution est due à l'utilisation d'une communication à un seul saut au lieu d'une communication multi-hop.

(-) **La rotation des CHs** : c'est une méthode qui n'est pas efficace pour de grandes structures de réseaux à cause de la surcharge d'annonces engendrées par le changement des CHs, et qui réduit le gain d'énergie initial.

(-) **La sécurisation** : le protocole LEACH n'est pas sécurisé. Aucun mécanisme de sécurité n'est intégré dans ce protocole. Ainsi, il est très vulnérable même aux simples attaques. Donc, un attaquant peut facilement monopoliser le réseau et induit à son dysfonctionnement.

2.6.2 PEGASIS

PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) est une version améliorée du protocole LEACH. Pour ce protocole, le réseau est vu comme un arbre, les nœuds forment des chaînes plutôt que des clusters. Un nœud transmet et reçoit uniquement les données de son voisin. Chaque nœud est considéré comme un nœud agrégateur, ses données reçues sont traitées et envoyées au prochain nœud de la chaîne. Ainsi, toutes les données capturées sont fusionnées et transmises par un seul nœud désigné pour communiquer avec la station de base. Les nœuds qui transmettent à la station de base sont choisis, pour un intervalle de temps bien défini, selon la politique de remplacement Round [24].

Fonctionnement

Le principe est d'organiser le réseau sous forme d'arbre hiérarchique où les nœuds collecteurs sont considérés comme des feuilles et la station de base comme la racine. Les données captées transitent d'une feuille à la racine par des nœuds intermédiaires formant une chaîne. A la réception d'un paquet de données, le nœud intermédiaire procède à son

traitement avant son expédition vers son voisin direct de la chaîne. Le dernier nœud de la chaîne (appelé leader) transmet les données fusionnées à la station de base.

La construction des chaînes

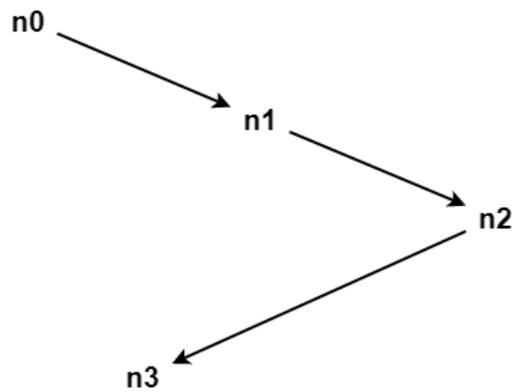
Les nœuds vont être organisés de sorte qu'ils forment une chaîne, qui peut être soit calculée d'une façon centralisée par la BS et émise à tous les nœuds, ou accomplie par les nœuds capteurs eux-mêmes en employant un algorithme avide (greedy algorithm). Si la chaîne est calculée par les nœuds capteurs, ils peuvent d'abord obtenir toutes les données sur l'emplacement des nœuds capteurs et calculent localement la chaîne en utilisant le même algorithme avide. Puisque tous les nœuds ont les mêmes données d'emplacement et exécutent le même algorithme, ils vont tous produire le même résultat.

Pour construire la chaîne, PEGASIS commence avec le nœud le plus distant de la BS. Le voisin le plus proche de ce nœud sera le nœud suivant dans la chaîne. Les voisins successifs sont sélectionnés de cette manière parmi les nœuds non visités afin de former la chaîne de nœuds.

L'algorithme commence par le nœud le plus lointain pour s'assurer que les nœuds les plus loin de la BS ont des voisins proches à mesure que, dans l'algorithme avide, les distances voisines augmenteront graduellement puisque des nœuds déjà présents sur la chaîne ne peuvent pas être revisités.

La Figure 2.6 montre la construction de chaîne en utilisant l'algorithme greedy où le nœud n_0 se joint au nœud n_1 qui se joint à son tour au nœud n_2 , et le nœud n_2 se joint au nœud n_3 .

Quand un nœud meurt, la chaîne est reconstruite de la même manière pour dévier le nœud mort.



Sink

Figure 2.6 Construction de chaînes en utilisant l'algorithme greedy [25].

```

procedure GreedyAlgorithm()
1.  $S \leftarrow \emptyset$ ;
2. Evaluate the incremental cost of each element  $e \in E$ ;
3. while  $S$  is not a complete feasible solution do
4.   Select the element  $s \in E$  with the smallest incremental cost;
5.    $S \leftarrow S \cup \{s\}$ ;
6.   Update the incremental cost of each element  $e \in E \setminus S$ ;
7. end_while;
8. return  $S$ ;
end.
  
```

Algorithme 2.1 Greedy algorithme

Pour la collecte des données, chaque nœud reçoit les données d'un voisin, fusionne ses propres données et les transmet au nœud suivant de la chaîne. Dans un tour donné, une approche de passage de jeton simple est initiée par le leader pour démarrer la transmission de données à partir des extrémités de la chaîne. Ici, le coût est très inférieur car la taille du jeton est très faible. La Figure 2.7, montre le nœud n2 comme le leader. Il passe le jeton à n0. n0 envoie ses données à n1. n1 fusionne ses propres données avec les données de n0 et les envoie au leader n2. n2 transmet alors le jeton à n4. n4 envoie ses données à n3. n3 fusionne ses données avec les données de n4 puis les transmet au leader n2. n2 attend pour

recevoir les données des deux voisins, puis il fusionne ses données avec les données du voisin. Le leader transmet alors un seul message à la BS [25].

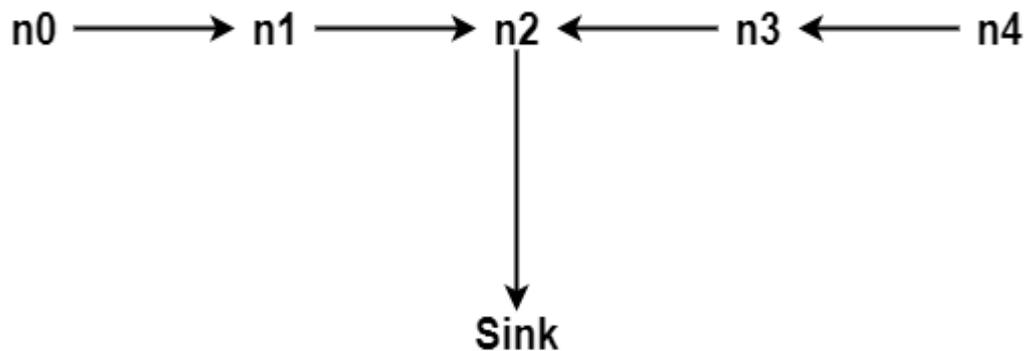


Figure 2.7 Approche de déplacement de jeton [25].

Avantages et inconvénients du protocole PEGASIS

Bien que le protocole PEGASIS engendre beaucoup d'avantages en ce qu'il offre comme bonne manipulation de ressources du réseau en respectant plusieurs contraintes telle que la consommation d'énergie, un nombre d'inconvénients restent plus ou moins apparents.

Dans la suite, nous mentionnons quelques avantages et inconvénients de ce protocole.

(+) Agrégation des données : l'avantage réside dans le fait que les données du cluster entier peuvent être combinées par le cluster-head et envoyées vers la destination.

(+) Elimination de la phase de la construction des clusters pour chaque round qui génère une surconsommation d'énergie importante.

(-) Les cluster-head consomment plus d'énergies que les autres nœuds, s'ils restent les mêmes pour longtemps, le réseau risquera de se découper, ainsi les nœuds capteurs.

(-) Ne pourront pas communiquer avec la station de base, et les informations de capture n'y seront pas transmises.

2.7 les différentes versions de protocoles PEGASIS

Bien que le protocole PEGASIS ait ses avantages par rapport au protocole LEACH, il présentait néanmoins certaines lacunes. Les protocoles décrits ci-dessous sont différentes versions de PEGASIS conçues pour surmonter ces lacunes. Chaque protocole prend en compte des facteurs uniques et propose sa version différente.

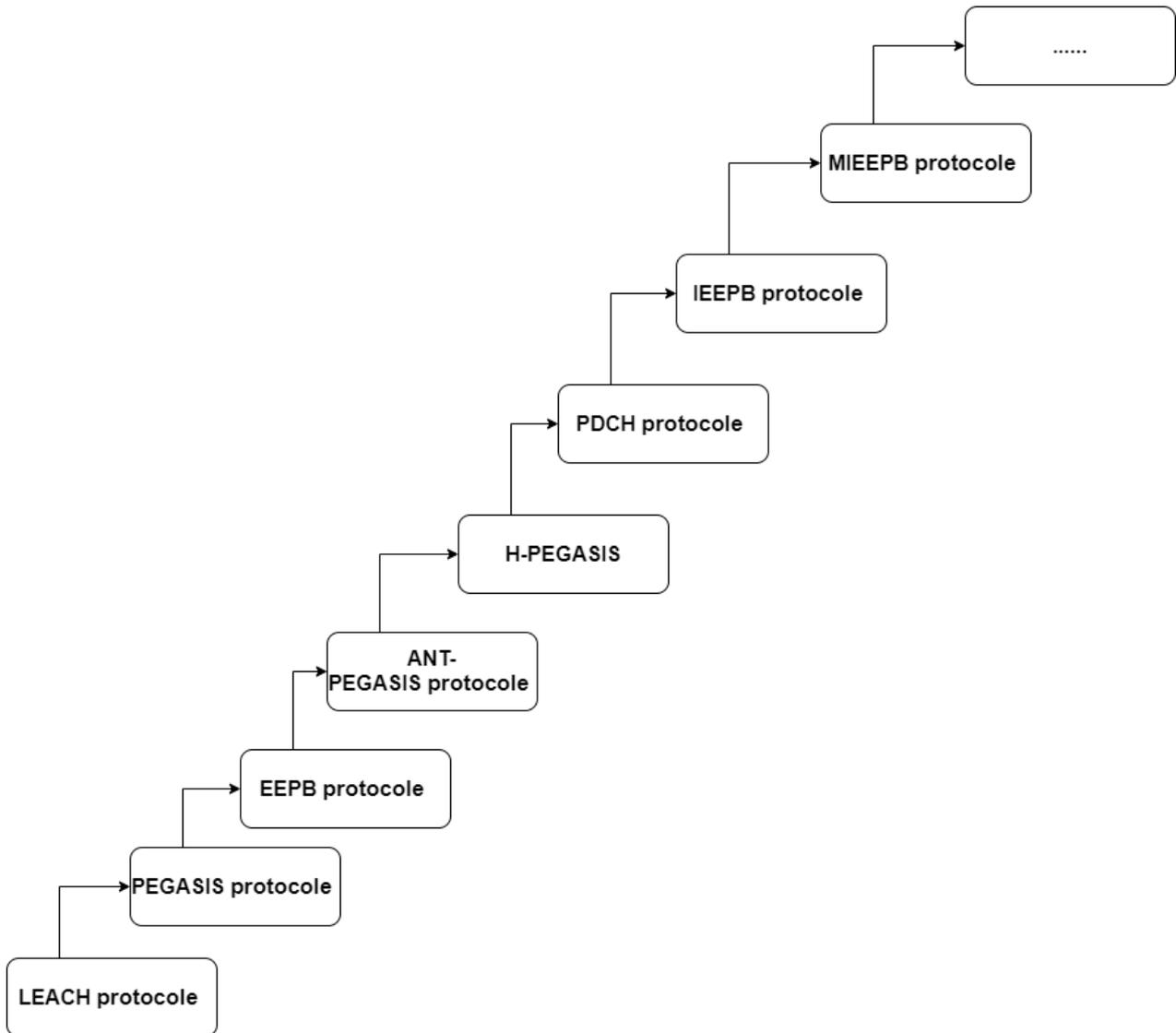


Figure 2.8 Les différentes versions de protocoles PEGASIS [2].

2.7.1 Energy Efficient PEGASIS Based (EEPB)

Est une amélioration de protocole PEGASIS. Comme dans l'algorithme greedy de PEGASIS est utilisé pour former la chaîne de données, il peut en résulter une distance de

communication entre deux capteurs trop longs. Ainsi, les capteurs consomment plus d'énergie pour transmettre les données et meurent tôt. Dans le processus de chaînage, un nœud considérera la distance moyenne dont la chaîne est formée. Cette distance est appelée « threshold distance ». Si la distance entre le nœud le plus proche et le nœud en amont est supérieure à la distance minimale, le nœud le plus proche est le « nœud éloigné ». Si le nœud le plus proche rejoint la chaîne, il deviendra une "longue chaîne". EB-PEGASIS évite ce phénomène en utilisant le « threshold » de distance. Il permet non seulement d'économiser de l'énergie sur le « threshold », mais équilibre également la consommation d'énergie de tous les nœuds de capteur [25].

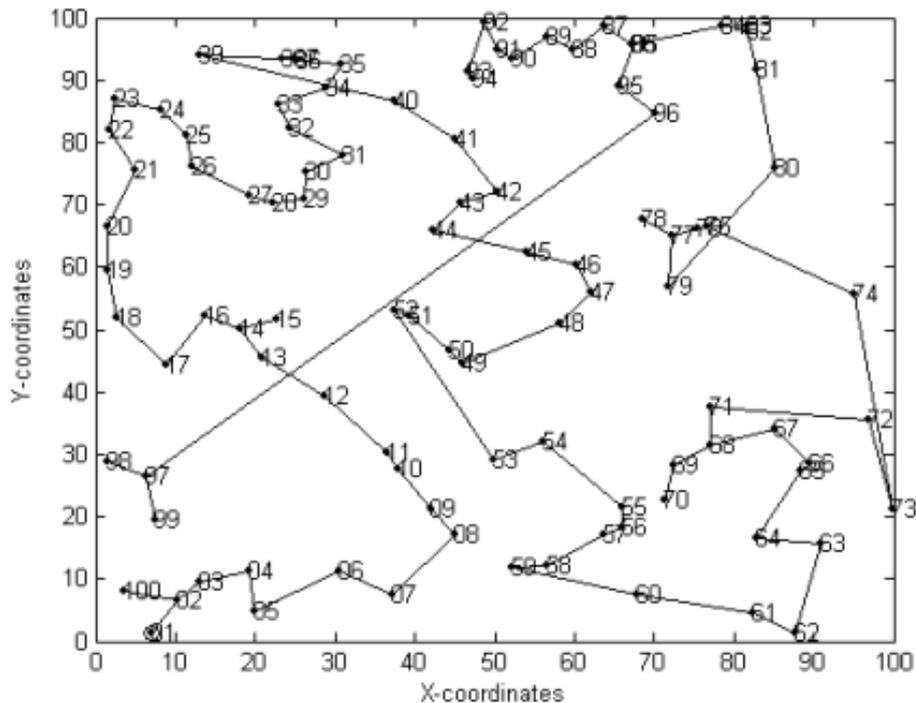


Figure 2.9 La chaîne formée dans EEPB [26].

Avantages et inconvénients du protocole

(+) Version améliorée du protocole PEGASIS.

(+) EEPB a proposé une nouvelle technique pour éviter une longue chaîne entre les nœuds en fonction du seuil de distance.

(+) EEPB réduit la formation d'un lien long entre les nœuds voisins.

(+) EEPB non seulement équilibre la consommation d'énergie des nœuds mais conserve également l'énergie des capteurs.

(-) Le seuil utilisé par EEPB lors de la formation d'une chaîne n'est pas certain et compliqué pour déterminer ce qui provoquera une inévitable si évalué de manière inappropriée.

(-) Lorsque EEPB sélectionne le leader, il ignore la proportion appropriée de nœuds d'énergie, la distance entre nœuds et station de base.

(-) Aucune méthode n'est proposée pour trouver la distance seuil.

2.7.2 PEGASIS-ANT Colony Optimization algorithm (ACO)

Le protocole utilise l'algorithme de colonie ANT plutôt que l'algorithme gourmand pour construire la chaîne de données. Cela permet de réaliser une optimisation globale. Il forme la chaîne qui rend le chemin plus uniformément réparti et réduit la distance de transmission. Il équilibre également la consommation d'énergie entre les nœuds. Dans chaque cycle de transmission, sur la base de l'énergie actuelle de chaque nœud, le leader est sélectionné qui communique directement avec la BS. Cet algorithme a prolongé la durée de vie du réseau [25].

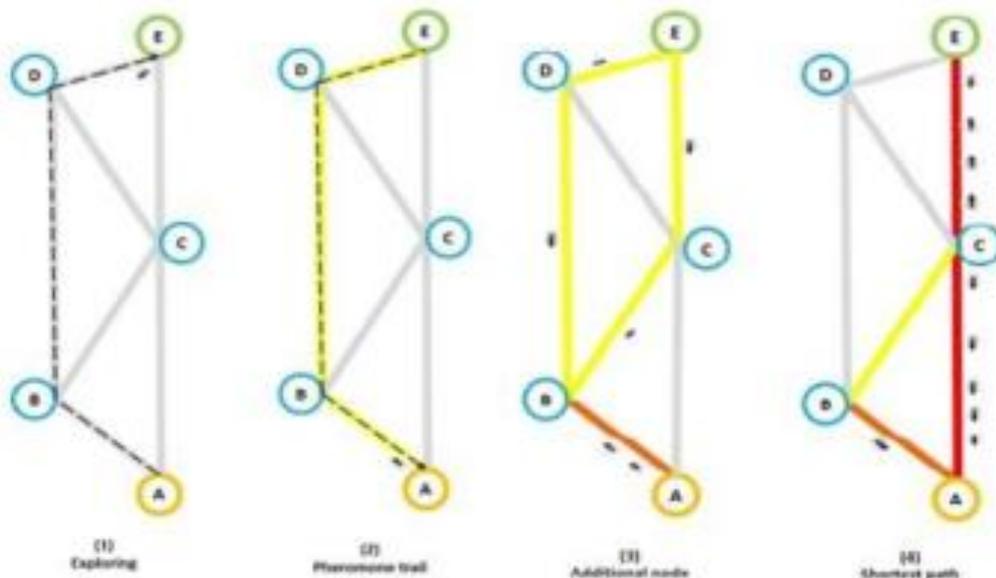


Figure 2.10 PEGASIS Ant [2].

Avantages et inconvénients du protocole

(+) Il constitue la chaîne qui réduit la distance de transmission et rend le chemin plus distribué.

(+) Une approche gourmande la distance entre les nœuds augmente progressivement à mesure que la chaîne est construite. Cependant ACO s'assure que les distances ne deviennent pas extrêmement grandes.

(+) Il équilibre également la consommation d'énergie entre les nœuds.

(+) Cet algorithme a prolongé la durée de vie du réseau.

(-) Le fonctionnement de la solution repose sur le fait que le BS reçoit des informations sur la position des nœuds et leur énergie restante en temps opportun.

(-) Une mémoire adéquate est nécessaire pour stocker toutes les informations entre les sauts.

2.7.3 H-PEGASIS [25]

Est une version étendue du protocole PEGASIS, introduite dans le but de réduire le délai de transmission des paquets vers la BS. Il propose une solution aux problèmes de collecte de données en considérant les métriques de retard de l'énergie X. Afin de réduire le retard, des messages de données simultanés sont transmis. Pour éviter les collisions, le codage du signal est mis en œuvre, par exemple CDMA pour éviter les interférences de signal, seuls les nœuds séparés dans l'espace sont autorisés à transmettre des données en même temps. Avec les nœuds compatibles CDMA, la chaîne forme la hiérarchie arborescente et chaque nœud sélectionné transmet les données au nœud de la hiérarchie supérieure. Cela garantit une transmission parallèle des données et réduit considérablement le retard.

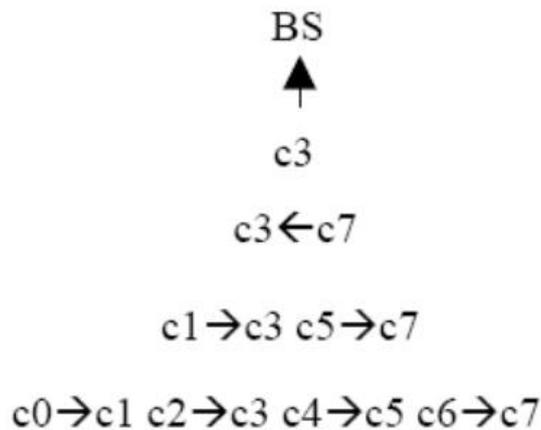


Figure 2.11 H-PEGASIS [27].

Avantages et inconvénients du protocole

(+) H-PEGASIS propose une solution au problème de collecte de données en considérant la métrique du retard énergétique.

(+) Cela garantit une transmission parallèle et réduit considérablement le retard.

(+) Afin de réduire le retard dans PEGASIS, les transmissions du message de données se poursuivent simultanément.

(-) Par rapport à LEACH, H-PEGASIS réduisent la charge de création de cluster, mais ne conviennent pas pour un réseau lourd.

Parce qu'ils choisissent un chemin de routage, ils ne prennent pas en compte la condition énergétique du prochain saut.

(-) Ils ne conviennent pas au réseau de capteurs où la connaissance globale n'est pas facile à obtenir.

(-) Dans RCSF il y a un certain nombre de nœuds, le retard dans la transmission des données est très évident. Ainsi, dans ce cas, H-PEGASIS ne se mettent pas bien à l'échelle.

2.7.4 PEGASIS with double Cluster Head (PDCH)

Équilibre la charge de chaque nœud et augmente la durée de vie du réseau. Généralement, le protocole PEGASIS utilise un CH qui communique avec la BS. Ici, au lieu d'un double CH, ils sont utilisés dans une seule chaîne et reçoivent une structure hiérarchique afin d'éviter un long enchaînement. PDCH surpasse PEGASIS en éliminant la formation de grappes dynamiques, en réduisant la distance entre les nœuds, en réduisant le nombre de messages envoyés vers et depuis d'autres nœuds et en utilisant une seule transmission à BS par tour. À mesure que la charge d'énergie est répartie entre les nœuds, la durée de vie du réseau augmente, tout comme la qualité du réseau [25].

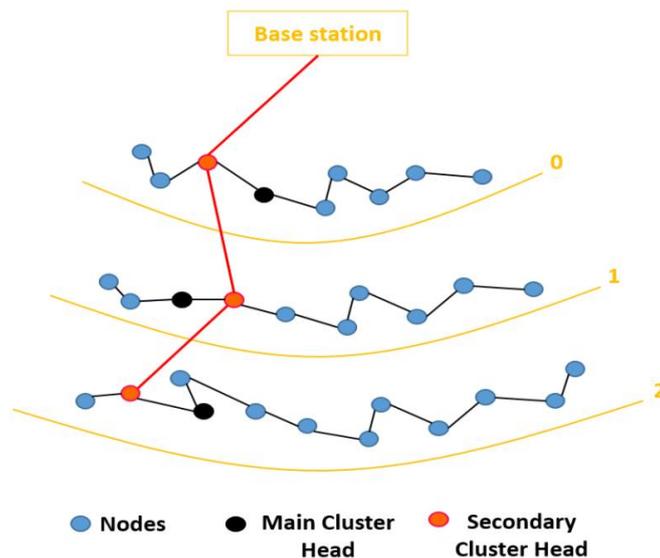


Figure 2.12 PEGASIS with double Cluster Head (PDCH) [2].

Avantages et inconvénients du protocole

(+) PDCH équilibre la charge de chaque nœud et augmente la durée de vie du réseau

(+) Il surpasse le protocole PEGASIS en éliminant la surcharge de la formation de grappes dynamiques.

(+) Il préserve la robustesse du réseau de capteurs.

(+) Comme la charge d'énergie est répartie entre les nœuds, la durée de vie du réseau augmente et donc la qualité du réseau.

(-) La sélection de deux têtes de cluster peut augmenter la surcharge du réseau en termes de retard.

(-) Les nœuds de la chaîne secondaire n'ont pas la possibilité de participer à la sélection de la tête de cluster principale.

2.7.5 Improved Energy Efficient PEGASIS Based (IEEPB)

IEEPB surmonte les lacunes de l'EEPB. Lorsque l'EEPB construit une chaîne, le « threshold » adopté est incertain et complexe à déterminer. Il en résulte la formation d'une « longue chaîne ». De plus, lorsque l'EEPB sélectionne le cluster-head, il ignore l'énergie du nœud et la distance entre la BS et le nœud qui optimise la sélection du leader. Sur cette base, IEEPB compare deux fois la distance entre deux nœuds et trouve le plus court chemin pour relier deux nœuds adjacents. La construction de la chaîne est simplifiée de manière à éviter la formation d'une "longue chaîne". Également lors de la sélection du cluster-head, IEEPB considère l'énergie du nœud, la distance entre le BS et le nœud, normalise ces deux facteurs et leur attribue différents coefficients de pondération. Enfin, le nœud avec le poids minimum devient le leader. IEEPB a une efficacité énergétique plus élevée et donc une plus longue durée de vie du réseau [25].

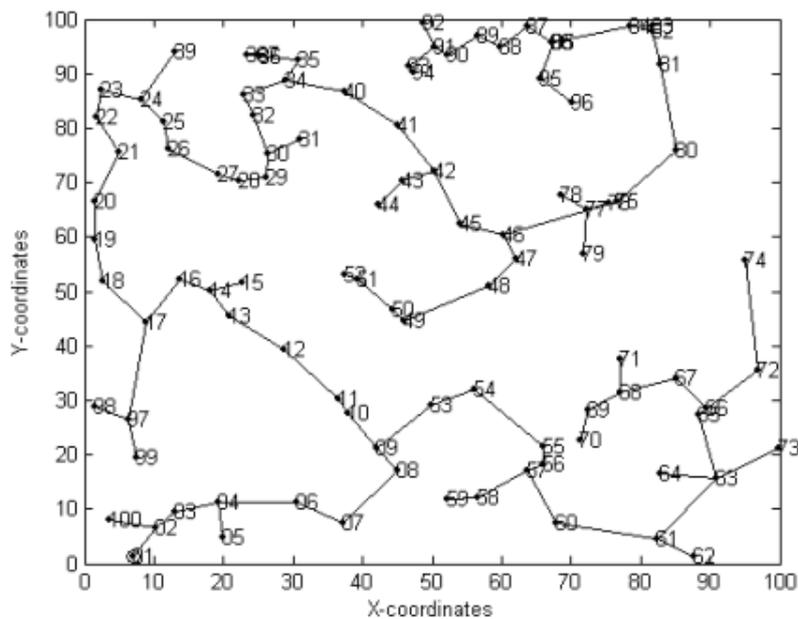


Figure 2.13 La chaîne formée dans IEEPB [26]

Avantages et inconvénients du protocole

(+) Cette méthode de construction de chaîne évite efficacement la formation d'un lien long entre les nœuds voisins.

(+) Il trouve le chemin le plus court pour relier les deux nœuds adjacents.

(+) Dans la phase de sélection de leader, IEEPB considère l'énergie des nœuds, la distance entre les nœuds et la station de base.

(-) IEEPB surpasse l'EEPB, mais l'article ne compare pas les deux protocoles en termes de paramètres QOS.

2.7.6 MIEEPB

MIEEPB (Mobile sink improved energy-efficient PEGASIS-based routing protocol) est un modèle à chaînes multiples intégrant la mobilité de l'évier, ce qui permet d'obtenir des chaînes plus petites et des charges réduites sur les nœuds de tête. Un récepteur mobile minimise la consommation d'énergie des nœuds de capteur et contribue également à réduire le délai de livraison des données pour tous les nœuds. Le concept multi-chaîne réduit la distance entre les nœuds connectés. Cela diminue la surcharge du réseau car il n'y a que moins.

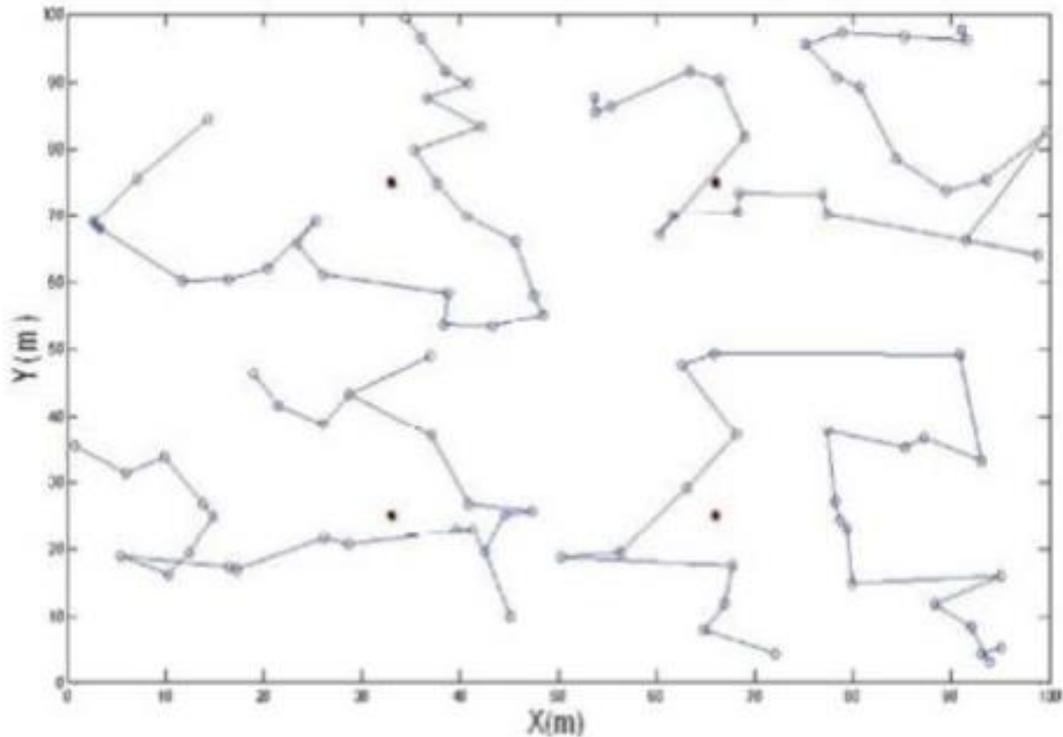


Figure 2.14 MIEEPB [2]

Avantages et inconvénients du protocole

- (+) Le concept multicanal réduit la surcharge du réseau.
- (+) L'utilisation du concept multi-chaîne réduit la distance entre les nœuds.
- (+) La mobilité de l'évier utilise la technique de la chaîne secondaire. En conséquence, cela atténuera les charges sur les nœuds les plus proches du nœud récepteur
- (+) Le concept multicanal diminue le délai de livraison des données.
- (+) Le concept à chaînes multiples diminue la charge sur le nœud principal dans une chaîne unique comme dans IEEPB
- (-) La mobilité du récepteur n'est pas appropriée pour les nœuds aléatoires avec lesquels le mouvement dans le réseau communique, cela augmentera le délai, l'encombrement et la surcharge.

De nos jours, le routage chaîne « multi-hop » est largement considéré comme une approche prometteuse pour faire face aux limitations des RCSFs et améliorer les exigences de performance de différentes applications. Cependant, si le routage « multi-hop » est utilisé pour améliorer certains paramètres de performance de l'application, il peut, par contre agir négativement sur d'autres paramètres. Par exemple, La longueur de la chaîne et la sélection d'un CH éloigné réduit également la capacité des nœuds et la durée de vie du réseau.

Par conséquent, le choix de l'approche chaîne « multi-hop » avec l'architecture hiérarchique dépend fortement de l'application et nécessite un compromis entre plusieurs paramètres de performance. Le Tableau 2.1 donne une classification des protocoles de routage inspiré de protocole PEGASIS que nous avons présenté selon différentes caractéristiques.

Paramètre	PEGASIS	EEPB	IEEPB	PDHC	PEG-ANT
Évitement de Liens longs	Aucun	Aucun	Bien	Aucun	Bien
Nombre de transactions	1	1	1	Une chaîne à tous les niveaux	1
Nombre de CH par chaîne	1	1	1	2	1
Transfert de données vers BS	Le CH du round	Le CH du round	Le CH du round	Secondaire CH	Le CH du round
Sélection du nœud de chaîne suivant (Formation de chaîne)	La plus proche Intensité du signal voisin	Seuil de distance avec alpha constant spécifié par l'utilisateur	Version basée sur la distance la plus proche	Établi sur EEPB	La force de liaison du lien voisin, la force consommée d, la quantité de phéromones
Sélection de CH	Basé sur la distance BS	Énergie résiduelle de liaison et d'espace de la station de base	Établi sur le poids de calcul en utilisant l'énergie résiduelle et la distance BS	Degré de nœud et Énergie	Énergie du nœud
Énergie Efficacité	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Équilibrage des charges	Plus faible	Plus faible	Moyenne	Moyenne	Large
Algorithmique Approche	Voisine	Voisine	Voisine	Proche	ACO
Transmission de données en chaîne	Basé sur des jetons	Basé sur des jetons	Basé sur des jetons	Basé sur des jetons	Basé sur des jetons

Tableau 2.1 Classifications les protocoles basée sur PEGASIS [28].

2.8 Conclusion

Généralement les protocoles de routages dans WSN se focalisent sur le maintien de la couverture totale tout en minimisant le nombre de nœuds actifs, cela en déterminant les nœuds qui doivent être passifs afin d'économiser leur l'énergie.

Cette analyse nous a permis de proposer notre protocole de routage dont l'objectif principal est le prolongement de la durée de vie du réseau ainsi que la gestion efficace de la consommation énergétique.

Dans ce chapitre, on a décrit aussi des différentes versions de PEGASIS conçues pour surmonter leur désavantage. Chaque protocole prend en compte des facteurs uniques et propose sa version différente.

Le concept de base ainsi que l'architecture de fonctionnement de ce dernier vont être présentés dans le chapitre qui suit.

Chapitre 3. Contribution

3.1 Introduction

Après avoir étudié les réseaux de capteurs (RC), 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 basé sur PEGASSIS qui garantit une optimisation de la consommation de l'énergie avec une meilleure distribution de cette consommation à travers l'ensemble du réseau.

Afin d'implémenter notre amélioration proposée, nous avons utilisé le code d'implémentation du protocole PEGASSIS, et effectué certaines modifications à plusieurs niveaux.

3.2 Amélioration proposée

Notre protocole basé sur l'organisation des nœuds capteurs dans une grille virtuelle. Notre idée c'est la combinaison de l'approche clustering grille et l'approche de transmission chaîne « multi hop » pour résoudre les limites du protocole PEGASSIS.

L'approche de cluster à base de grille donne une importante efficacité par rapport à d'autres approches de clustering, en termes de consommation de l'énergie, la durée de vie du réseau.

On a vu dans PEGASSIS que l'utilisation d'un seul CH donne une longue chaîne. Ce qui épuise rapidement l'énergie de CH et consomme plus de bande passante. De plus, la plupart de CH distante de la base meurt rapidement par rapport aux autres nœuds.

Ce protocole avec « multi-hop » réduit la distance entre le CH éloigné et station de base, ce qui permet de réduire la valeur de distance « d » introduit dans l'équation d'énergie précédente vu dans le chapitre 1.

3.3 Modèle de système de base

Dans l'amélioration proposé, l'objectif principal de notre contribution est de fournir une amélioration de protocole PEGASIS pour les réseaux de capteurs sans fil. Le modèle de réseau utilisé dans ce schéma est basé sur certaines hypothèses qui sont énumérées ci-dessous.

- N sont des nœuds sont distribués au hasard dans une zone carrée de $M \times M$.
- Les nœuds sont équipés d'un module GPS ou utilisent un mécanisme de localisation pour trouver l'emplacement.
- La même énergie initiale est équipée pour tous les nœuds du capteur.
- Un ID unique est attribué pour chaque nœud.
- La SB possède une réserve d'énergie illimitée et une puissance d'émission conséquente. De ce fait, tous les nœuds capteurs sont à portée de la SB et l'exécution de programme dans le SB « Système centralisé ».
- Les nœuds peuvent utiliser si besoin y est, le contrôle de puissance afin de réguler la puissance d'émission en fonction de la distance de transmission. Ainsi, un CH peut directement effectuer une transmission vers la SB.
- Les Une fois déployés, les nœuds capteurs et la SB sont stationnaires.
- Les nœuds capteurs disposent d'une mémoire suffisante afin d'éviter toute congestion.

La Figure 3.1 présentes l'idée de base de l'organisation des nœuds et emplacement de station de base dans notre amélioration proposée.

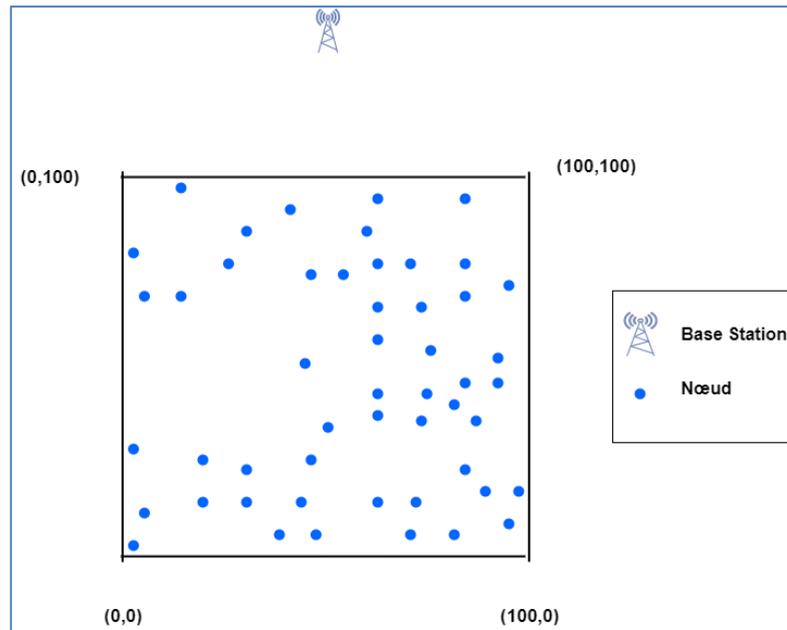


Figure 3.1 L'organisation des nœuds dans notre amélioration proposée.

La Figure 3.2 donne les étapes de protocole proposé.

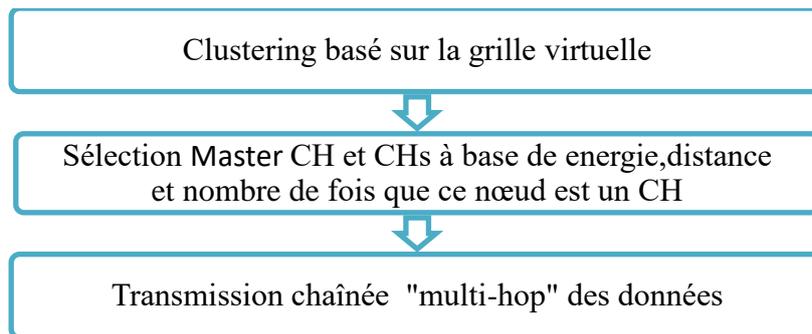


Figure 3.2 Les étapes de notre amélioration proposée

Cette section présente la configuration de notre amélioration nommé « Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN » qui constitue trois phases : phase d'initialisation, phase de sélection de Master CH et CHs et la phase de transmission.

Dans la première phase, la zone de réseau est divisée en plusieurs grilles carrées, après le processus d'élection des Master CH et CHs est effectué dans cette phase. Suivie par la phase de transmission.

La Figure 3.3 ci-dessous illustre le flow chart de fonctionnement de notre amélioration proposé.

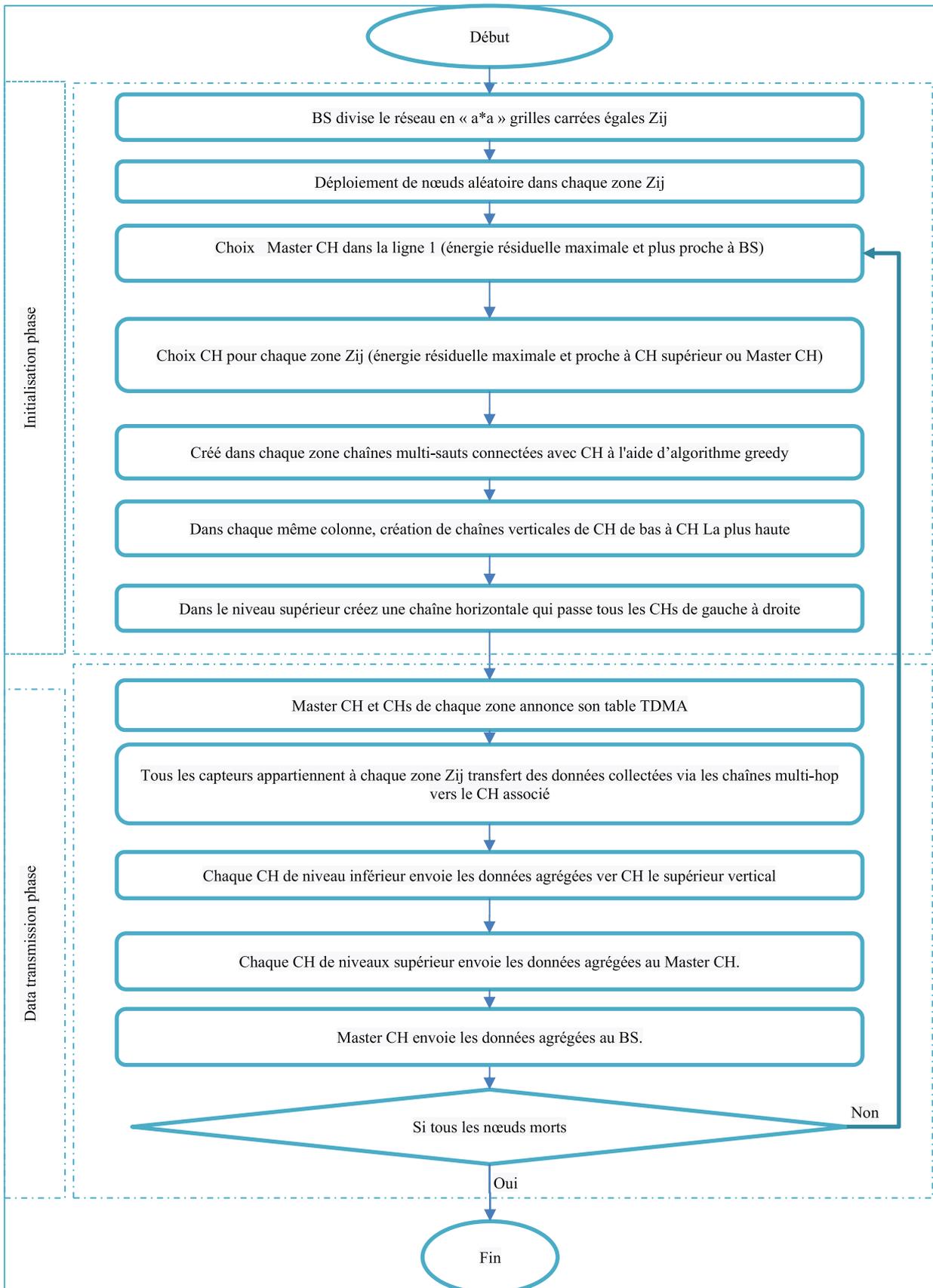


Figure 3.3 Le schéma de fonctionnement de notre amélioration proposé.

3.3.1 La phase d'initialisation

Etape 1 : création les Zones

Dans cette étape la station de base divise l'ensemble du réseau en grilles virtuelles également espace, Chaque zone carrée a son unique d'identification (Zij). La Figure 3.4 suivante montre un exemple de création de grille carrée de 3*3.

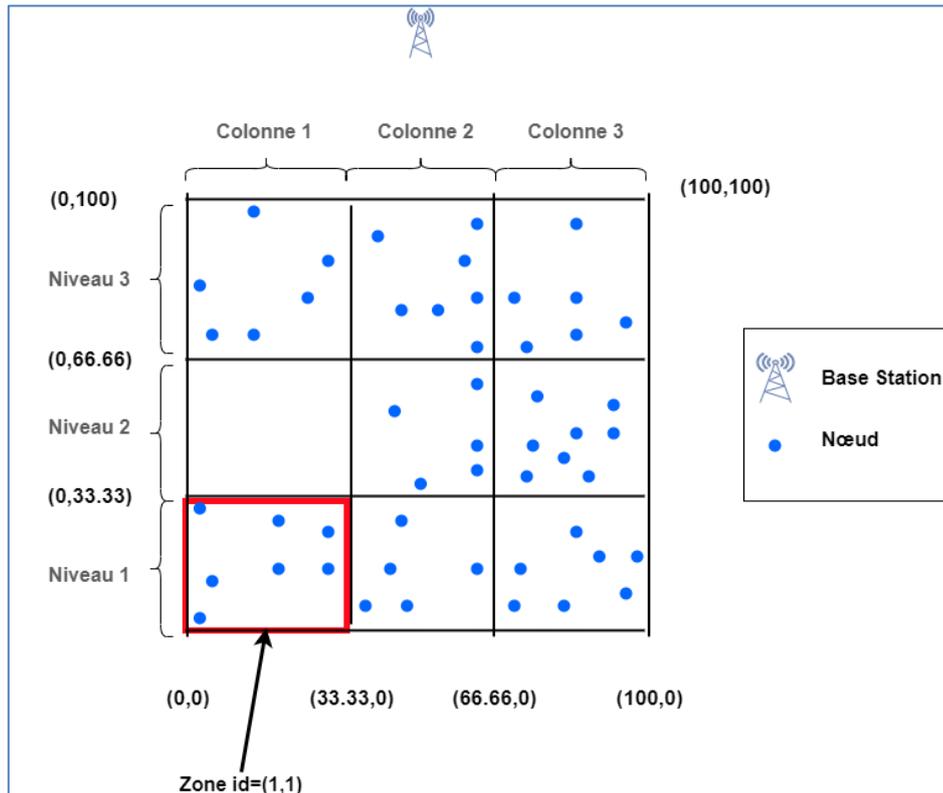


Figure 3.4 Exemple de création de la grille 3*3.

Etape 2: Choix Cluster-Head Master (MCH)

Une fois la grille virtuelle sont déterminés, et identifié chaque nœud et ça zone « zone id », l'étape suivent et la sélection de Master CH.

La sélection de Master CH parmi les nœuds de niveau supérieur de la grille, la sélection de Master CH est basée sur la formule propose suivent :

$$F(n) = \frac{E}{d^{(CH_n + CHM_m + 1)}}$$

Avec :

- E= l'énergie de nœud.
- d= distance entre nœud et CH supérieur ou BS.
- CH_n = nombre de fois que ce nœud est un CH.
- CHM_m = nombre de fois que ce nœud est un CH-Master.

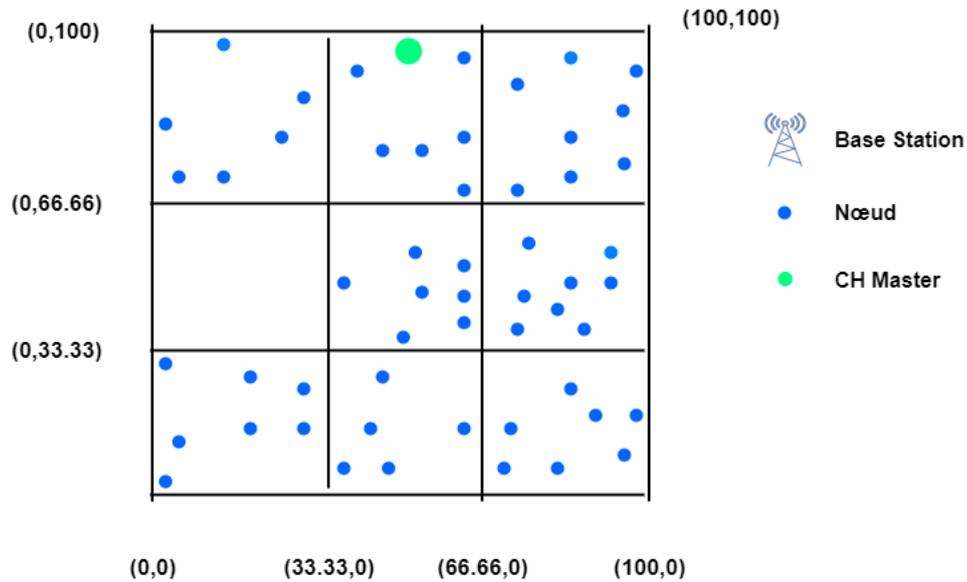


Figure 3.5 Choix de Master CH.

Etape 3 : Choix Cluster-Heads (CHs) de niveau supérieur

La troisième étape est le choisi de des clusters-Head dans les zones du niveau supérieur, selon les critères de l'énergie résiduelle de nœud et la distance entre nœud et Master CH.

$$F(n) = \frac{E}{d^{(CHn + 1)}}$$

Avec :

- E= l'énergie de nœud.
- d= distance entre nœud et Master CH.
- CHn= nombre de fois que ce nœud est un CH.

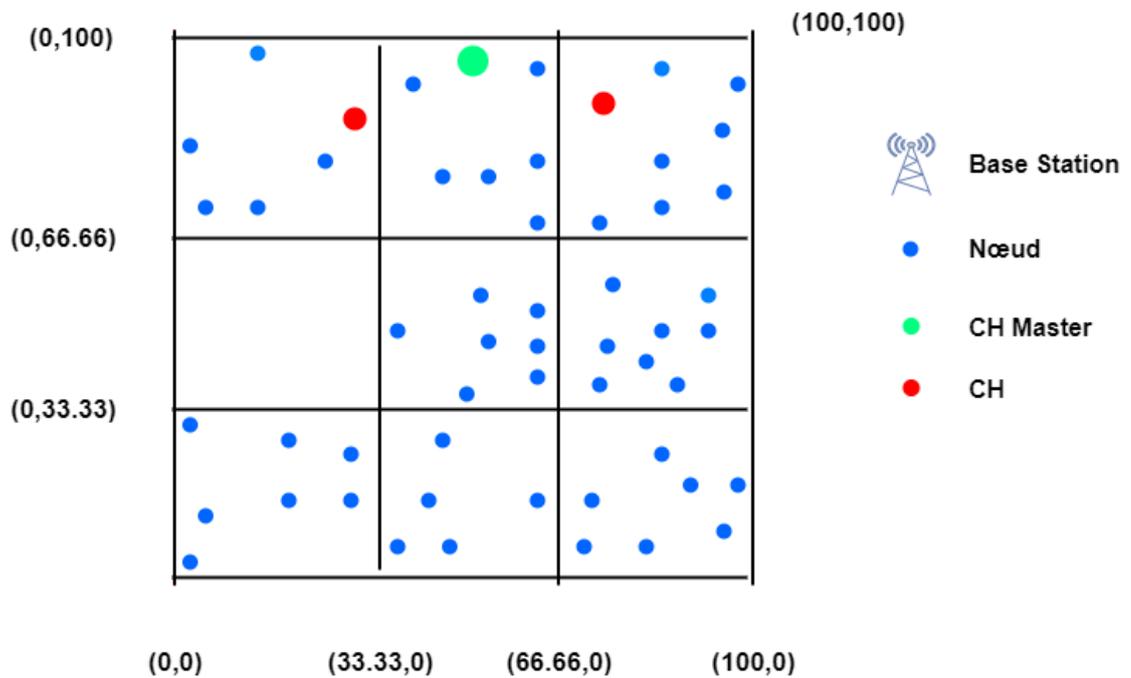


Figure 3.6 Choix de les CHs supérieure.

Etape 4 : Choix Cluster-Heads (CHs) inférieure

La quatrième étape est le choisi de des clusters-Head dans les zones du niveau inférieure, selon les critères selon les critères de l'énergie résiduelle de nœud et la distance entre nœud et CH de zone supérieur ou Master CH si n'existe pas un CH supérieur.

$$F(n) = \frac{E}{d^{(CHn + 1)}}$$

Avec :

- E= l'énergie de nœud,
- d= distance entre nœud et CH supérieur si existé CH supérieur.
- d= distance entre nœud et MCH si n'existe pas de CH supérieur
- CHn= nombre de fois que ce nœud est un CH.

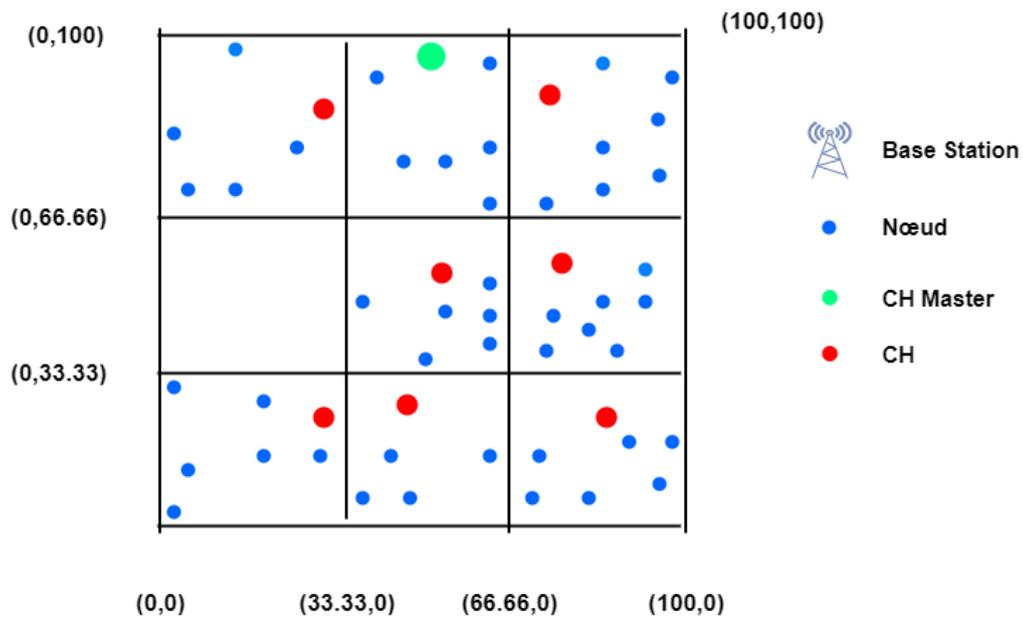


Figure 3.7 Choix CHs dans les zones inferieure.

Etape 05 : Création chaine transmission dans chaque zone (intra-cluster)

Une fois la sélection de tous les Master CH et CHs sont déterminés, et identifié chaque nœud et ça zone « zone id », l'étape suivent et de création de chaine dans chaque zone on adopte la même approche utilisée dans PEGASIS « l'aide d'algorithme greedy ».

Algorithm 1 Création chaine transmission dans chaque zone

Calcule la distance entre chaque nœud et le CH supérieur
 Crée le tableau A triés descendant contenant la distance entre chaque nœud et le CH supérieur
 Créer une matrice 2D avec les distances entre deux nœuds
 sélectionné le nœud le plus éloigné pour démarrer la chaîne "Start"
 $Start.Selectionne \leftarrow vraie$
 $Start.Position \leftarrow 1$
while Toute les noeud non sélectionné **do**
 Sélectionné le nœud "N" le plus proche à "Start"
 $Start.Suivent \leftarrow N$
 $N.Precedente \leftarrow Start$
 $Start.Distance \leftarrow Distance (start,N)$
 $Start \leftarrow N$
 $N.Selectionne \leftarrow vraie$
 $N.Position \leftarrow 0$
end while
 $N.Position \leftarrow 2$

Algorithme 3.1 Création chaine transmission (intra-cluster)

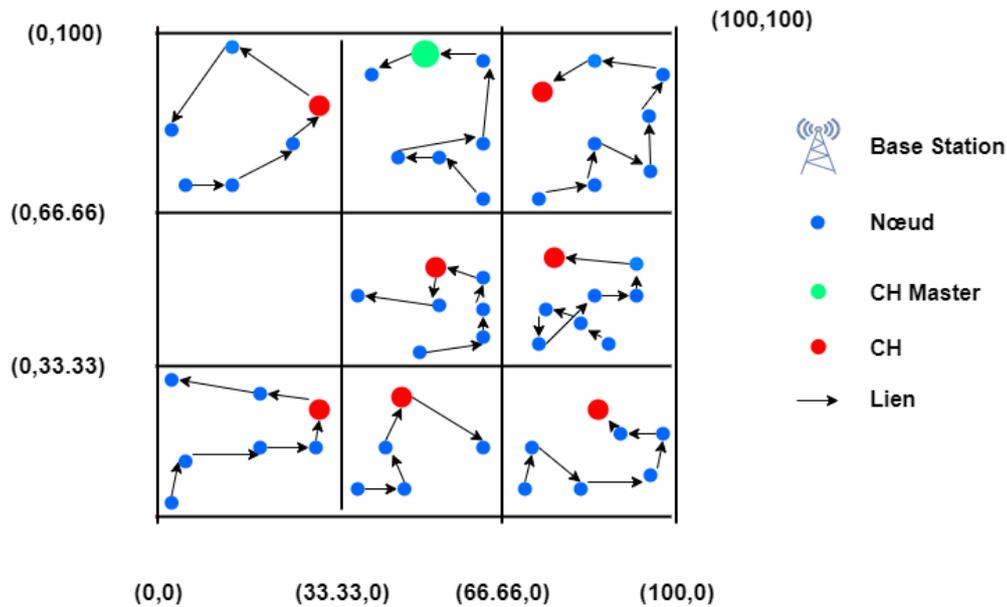


Figure 3.8 Création des chaines de transmission intra-cluster.

Etape 6 : Création chaînes verticaux et une chaîne horizontale entre les CHs (inter-cluster)

Dans chaque colonne, il crée une chaîne entre les clusters-Head du bas vers le CH supérieur, en passant par tous les niveaux active.

Et une autre chaîne horizontale passant le CHs active du niveau supérieur.

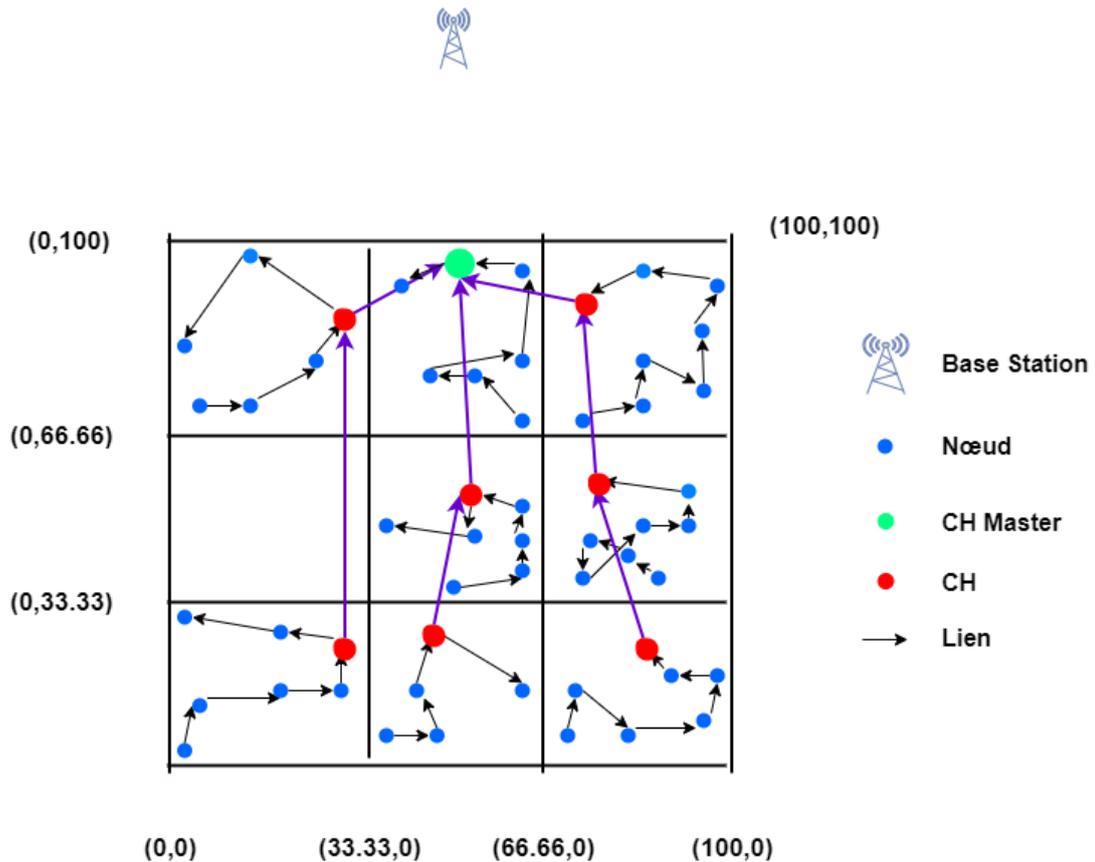


Figure 3.9 Chaînes de transmission inter cluster

3.3.2 La phase de transmission

La phase de transmission est divisée en plusieurs itérations dans lesquelles les nœuds vont transmettre leurs données collectées aux clusters-Head par des nœuds intermédiaires formant une chaîne. Dans chaque itération, un nœud transmet au moins un paquet de données durant son slot de temps alloué précédemment par son cluster-Head, Sachant que le slot de temps alloué à chaque nœud est constant, le temps de chaque itération de transmission va dépendre évidemment du nombre de nœuds existants dans chaque zone. L'utilisation des

TDMA va permettre aux nœuds de pouvoir éteindre leurs antennes radio jusqu'à le moment de transmission alloué.

Lorsque toutes les données ont été reçues, le cluster-Head exécute les fonctions du traitement du signal pour le compresser en un signal unique, ce dernier va être envoyé au Cluster-Head de niveau supérieur, dans le dernier niveau les clusters-Head à transmettre le paquet à cluster-Head Master, à son tour va l'envoyer à la station de base. Sachant que les cluster-Head Master ont les mêmes fonctionnalités que les clusters-Head.

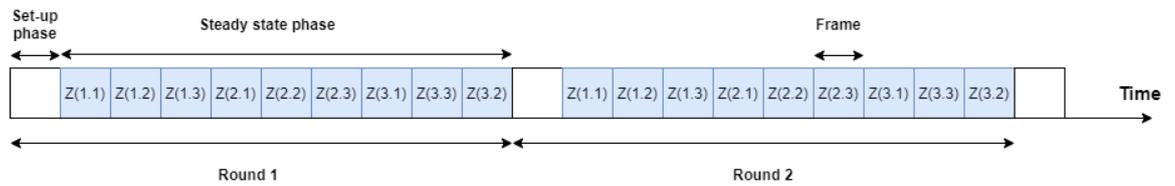


Figure 3.10 La table TDMA.

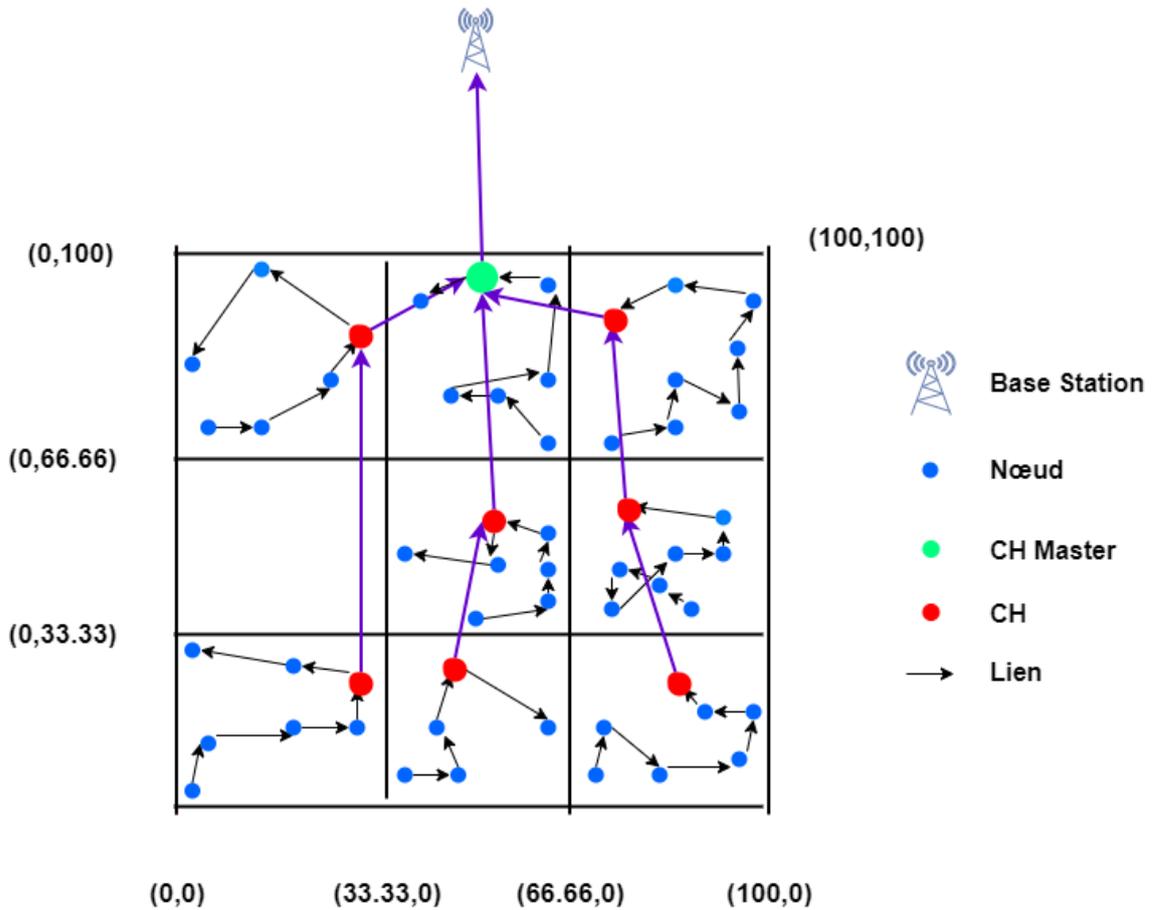


Figure 3.11 La transmission des données.

3.4 Description de déroulement du protocole

3.4.1 Phase d'initialisation

La phase d'initialisation est la première phase de notre protocole, elle consiste au premier lieu à construire la grille selon l'organigramme suivant :

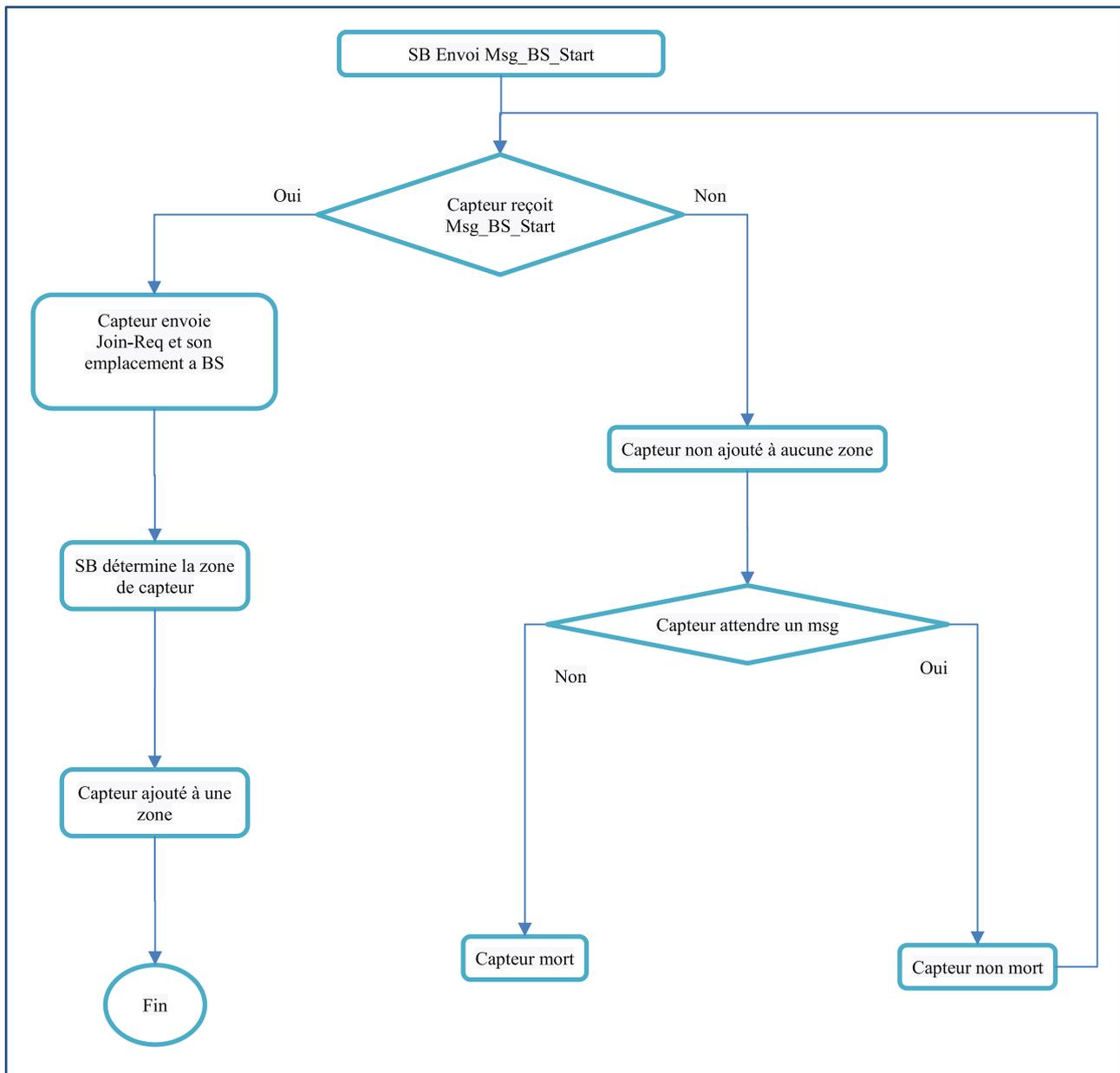


Figure 3.12 Schéma de détermination des zones.

3.4.2 La phase de Sélection MCH et CHs

Une fois la détermination la grille est achevée, la sélection de MCH commence à niveaux supérieur du la grille selon l'organigramme suivant :

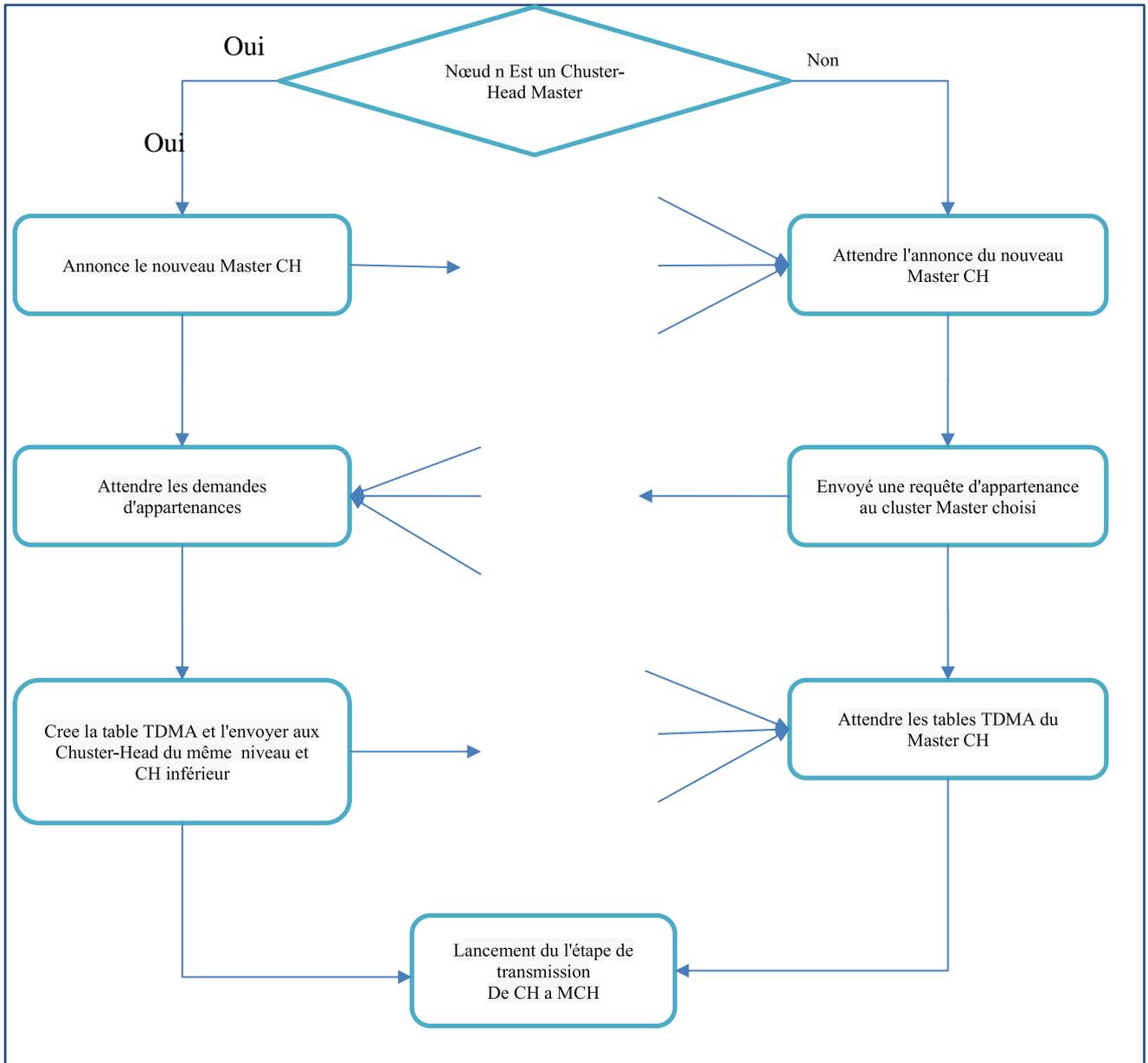


Figure 3.13 Schéma de création des Master CH.

La création des MCH a est terminée, l'étape suivent de création des CHs commence sur le même principe que les MCH, selon l'organigramme suivant :

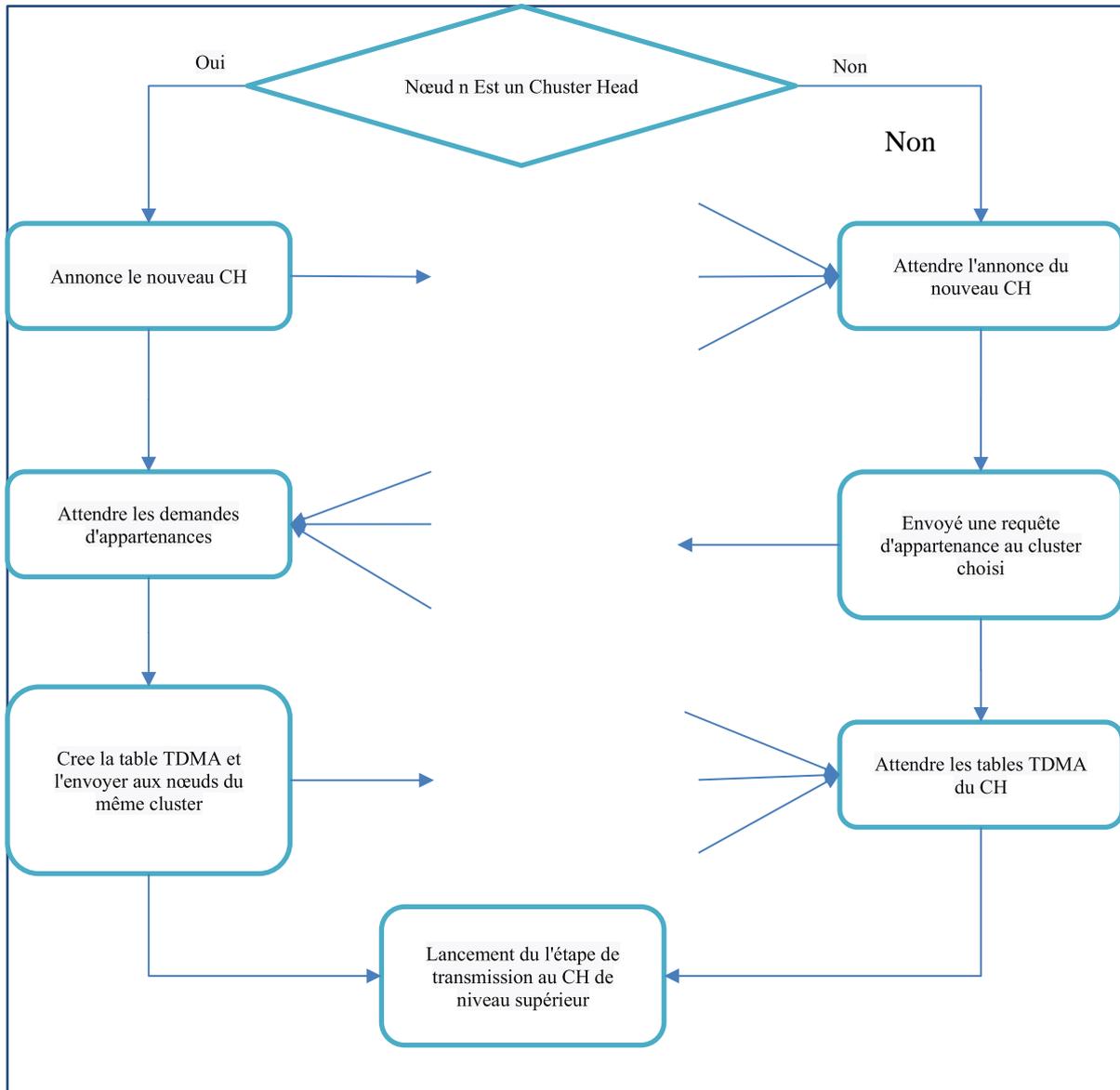


Figure 3.14 Schéma de création des CHs et leurs zones.

Une fois la création des tous les CHs est terminer, la phase de transmission commence.

3.4.2 La phase de transmission

Dans chaque zone Consiste de transmettre les données collectées par des nœuds à son clusters-head, ensuite de les CHs transmettre à son clusters-head supérieur, les CHs

supérieure transmettre à clusters-head Master, en fine clusters-head Master transmettent les données à la station de base selon l'organigramme suivant :

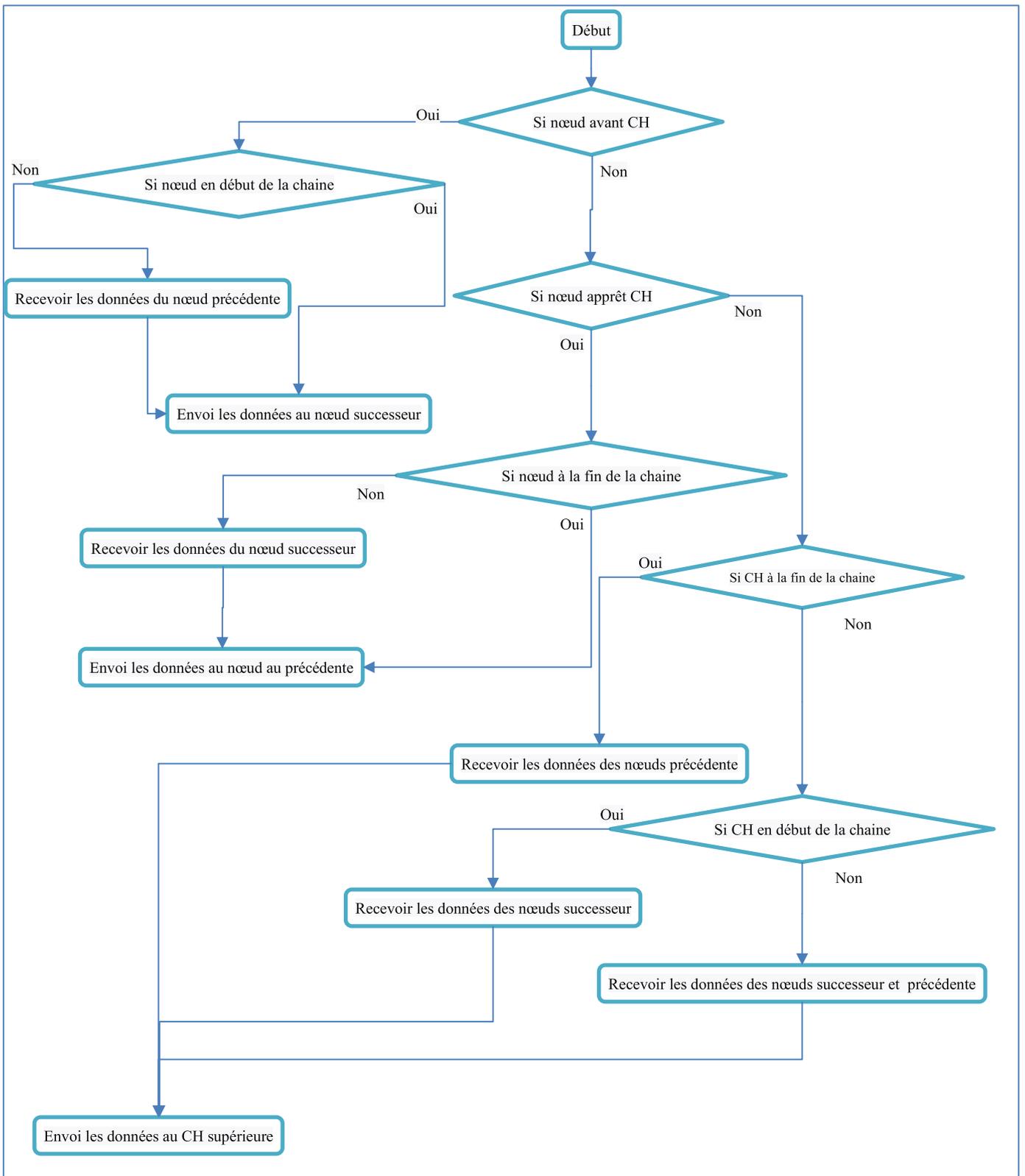


Figure 3.15 Schéma de transmission de données intra cluster

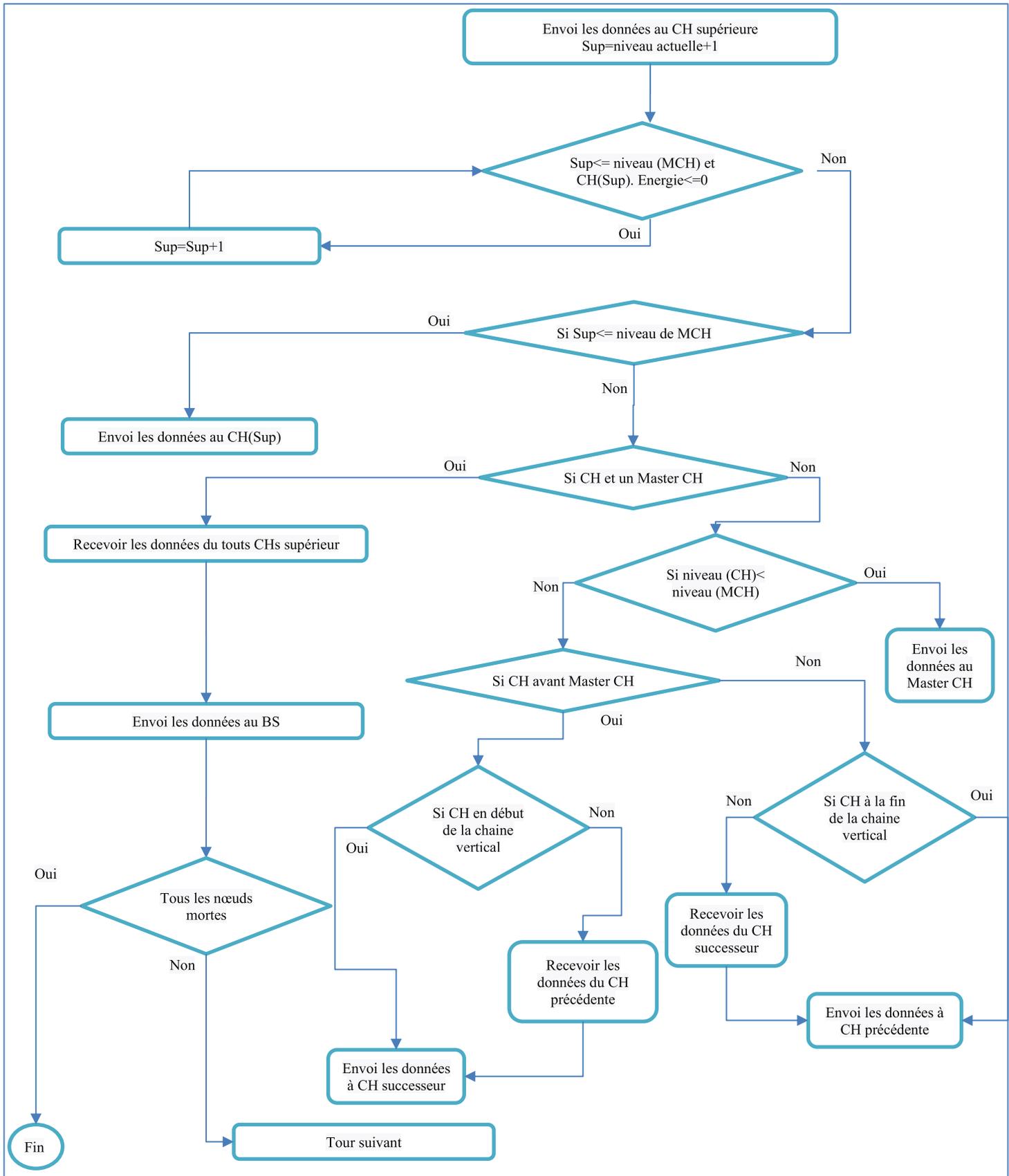


Figure 3.16 Schéma de transmission de données inter CHs.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un nouveau protocole de routage hiérarchique dans les réseaux de capteurs sans fil a été proposé. Ce protocole est basé sur une méthode qui divise la zone en grille de carrés et une méthode pour choisir les CHs.

Contrairement aux protocoles basés sur le clustering qui exigent généralement plus de ressources matérielles pour certains nœuds (comme les CHs), nous n'imposons pas cette contrainte pour l'utilisation de notre protocole de routage.

Dans le chapitre suivant, on évaluera le protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN que précédemment proposé.

Chapitre 4. Simulation Et Analyse Des Performance

4.1 Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats des simulations de notre amélioration proposé Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN, Les simulations effectuées permettent d'évaluer les performances de la solution et consolider nos affirmations.

4.2 Choix du langage et de l'environnement d'implémentation

Les simulations ont été réalisées sur PC avec processeur Intel I7-3770 3.40 GHz et 8 Go RAM, système d'exploitation Windows 10.

Il existe plusieurs simulateurs, parmi lesquels on retrouve :

- **NS-3 (Network Simulator)** : NS-3 [29] est un simulateur réseau open source à événements discrets. Son noyau et ses modèles sont implémentés en C++, mais avec une interface de script Python. L'objectif de NS-3 est de développer un environnement de simulation ouvert pratique pour la recherche dans les réseaux. Les outils nam, ns3-viz associés au simulateur NS permettent la visualisation des animations issues de la simulation tel que le transfert et la taille des paquets échangés, l'état des files d'attentes, etc....

- **OMNeT++** : tout comme NS-3, OMNeT++ [30] est un simulateur réseau à événements discrets programmé en C++. Il peut être utilisé dans les deux types de réseaux filaires et sans fil.

- **AVRORA** : AVRORA est [31] un simulateur spécialement conçu pour les RCSFs sous Java. Il offre une vaste gamme d'outils qui peuvent être utilisés dans la simulation des RCSFs. Cependant, ce dernier n'offre pas d'interface graphique.

Choix de Matlab

Développé par la société MathWorks, MATLAB [32] est optimisé pour résoudre les problèmes scientifiques et techniques. C'est un langage basé sur les matrices, il allie mathématique, modélisation graphique et programmation.

MATLAB dispose d'une large bibliothèque de fonctions intégrées et pré-écrites avec des notations simples et puissantes pour de nombreuses tâches de calculs communes. Ces fonctions peuvent être construites dans tous les langages de programmation, MATLAB permet de les retrouver dans un seul endroit.

La simulation de l'amélioration proposé requiert l'utilisation et la manipulation de vecteurs, de tableaux et de matrices. Le côté évaluation des performances quant à lui, requiert la génération de graphes, et donc l'utilisation des outils de traçage qu'offre MATLAB.

Dans la simulation on utilisera la version R2009a (7.8.0.347) de MATLAB.

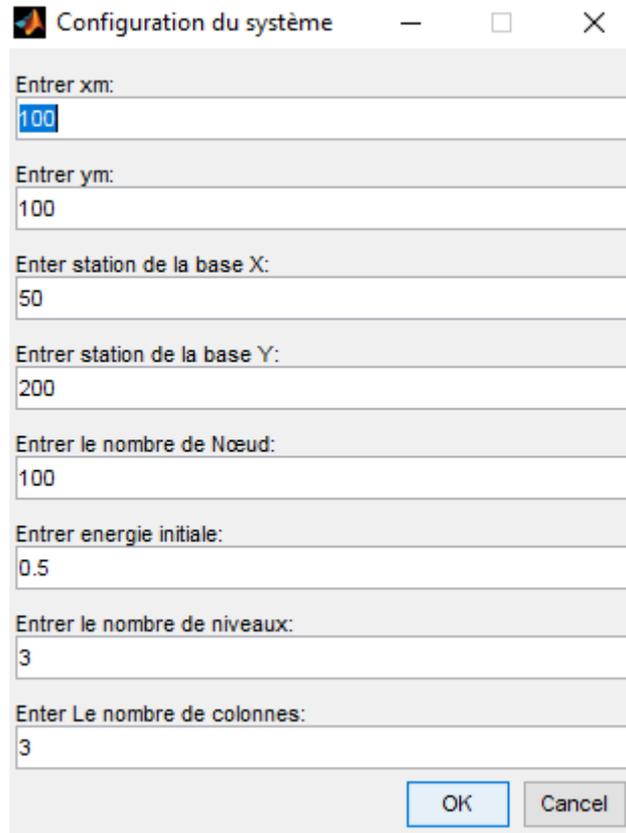
4.3 Simulation

Déploiement des nœuds capteurs

A titre d'exemple, 100 nœuds capteurs sont aléatoirement déployés sur une zone d'intérêt de 100m² de surface. La SB est positionnée aux coordonnées (50m, 200m). Initialement, il n'y a pas de CH, alors les nœuds sont tous de type normal la Figure 4.2.

Tableau 4.1 Les paramètres de simulation.

Paramètre	Valeur conf 1
La taille du réseau Xm*Ym.	100m x 100m
La localisation de la station de la base.	(50,200)
Le nombre des nœuds	100 N
L'énergie initiale des nœuds	0.5 J
Grille de nb_niveaux * nb_colonnes	3*3



Configuration du système

Entrer xm:
100

Entrer ym:
100

Enter station de la base X:
50

Enter station de la base Y:
200

Entrer le nombre de Nœud:
100

Entrer energie initiale:
0.5

Entrer le nombre de niveaux:
3

Enter Le nombre de colonnes:
3

OK Cancel

Figure 4.1 Les paramètres de simulation.

Chaque nœud dans le réseau va consommer de l'énergie dans le cas où il va transmettre des paquets de données ainsi que dans le cas où il reçoit des paquets de données sans oublier aussi le cas où il exécute des opérations de traitement de données (collecte et agrégation de données). On néglige l'énergie consommée lors des calculs simples et les mises à jour.

Tous les nœuds du réseau commencent la simulation par énergie initiale égale à 0.5 J et une quantité de données illimitées à transmettre à la station de base, l'énergie de la station de base est illimitée. Chaque nœud consomme sa réserve d'énergie est considéré comme mort, il ne peut ni transmettre ni recevoir des données.

On suppose que la probabilité de collision de signal et d'interférence dans le canal est ignorante et l'émetteur radio, l'amplificateur radio et l'unité de fusion de données sont les principaux consommateurs d'énergie d'un nœud capteur.

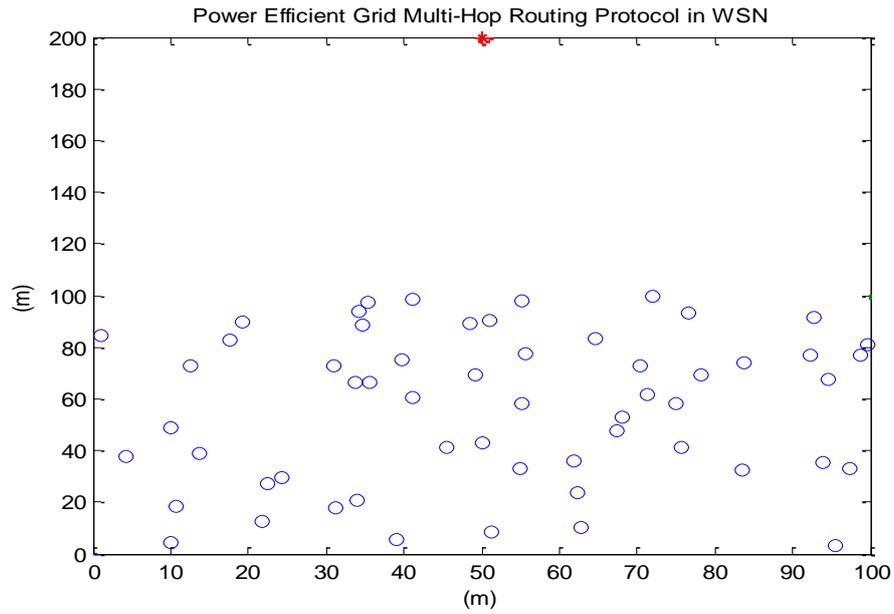


Figure 4.2 Déploiement de 100 nœuds capteurs.

Création de grilles carrées

```

1. for i=1:nbniv
2.     plot([0 xm], [(ym/nbniv)*i (ym/nbniv)*i], 'k');
3. end
4. for i=1:nbcol
5.     plot([xm/nbcol*i xm/nbcol*i], [0 ym], 'k');
6. end
    
```

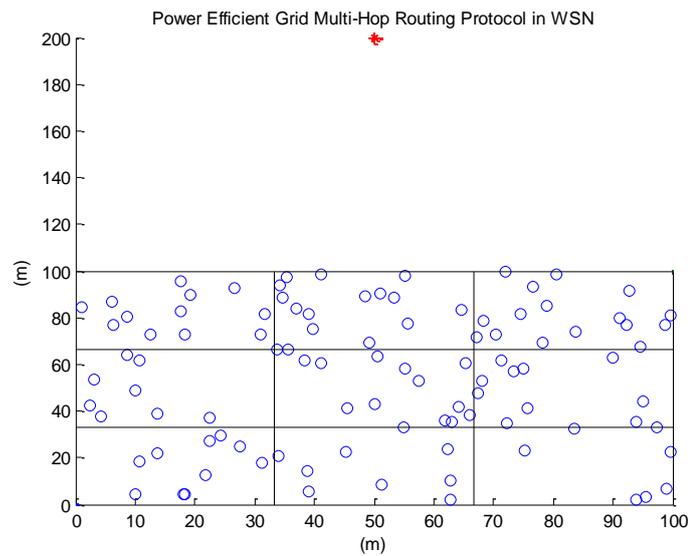


Figure 4.3 Exemple de création de grilles carrées du 3*3.

Définir chaque nœud et leur zone

```

1. for i=1:n
2.     SN(i).chainIdRow=fix( SN(i).y/(ym/nbniv))+1;
3.     SN(i).chainIdCol=fix( SN(i).x/(xm/nbcol))+1;
4. end
    
```

4.4 Résultats de simulation

Après la simulation du protocole PEGASIS et le protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN, nous comparons les performances des protocoles par certaines métriques :

4.4.1 Période de stabilité

Nous définissons la période de stabilité comme étant l'intervalle de temps entre le démarrage du protocole et la mort du premier nœud capteur dans le réseau.

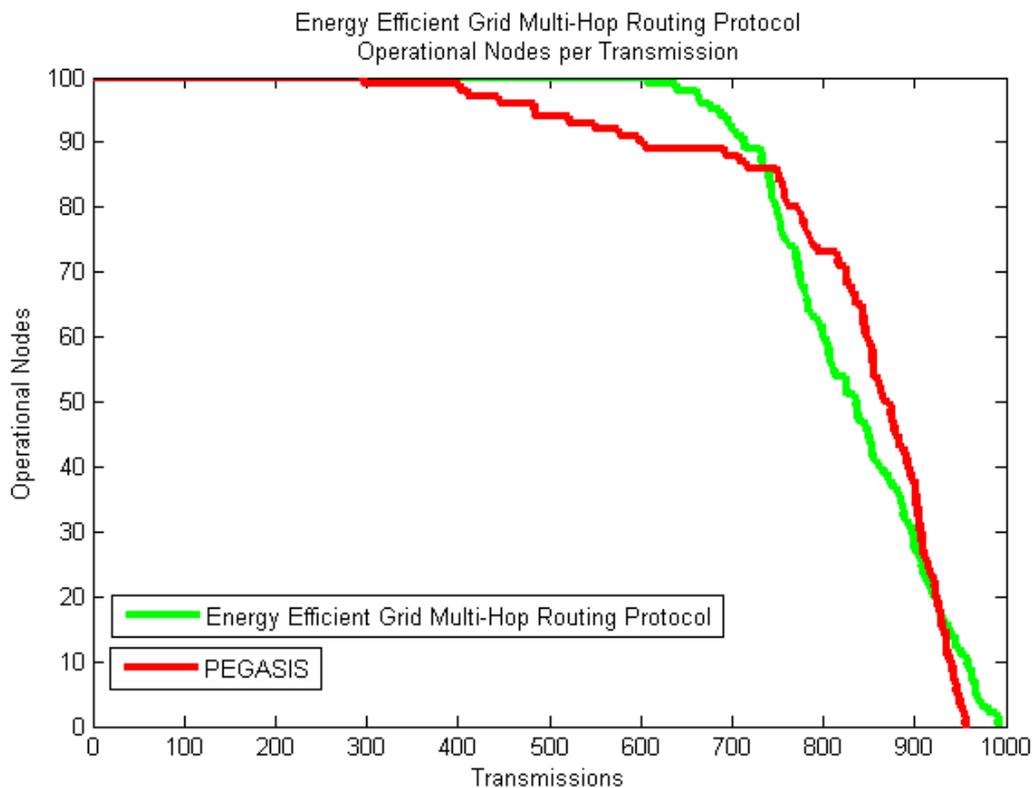


Figure 4.4 Période de stabilité

D'après les résultats obtenus et illustrés dans la Figure 4.4, dans PEGASIS, la mort du premier nœud survient en 295-ème rounds. Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN surpasse le score du PEGASIS, il permet de maintenir la totalité du réseau en vie pendant 605 rounds soit 310 rounds de plus que PEGASIS.

On constate clairement l'ascendant de l'amélioration proposé. En effet, Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN multiplie en moyenne par **2.05** de la durée de la période stable de PEGASIS.

4.4.2 L'énergie consommée

la Figure 4.5 ci-dessous représente la consommation de l'énergie dans le protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN et dans PEGASIS en fonction des rondes. On constate que le protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN présente une augmentation lente dans la consommation d'énergie, par contre dans PEGASIS on remarque une augmentation rapide dans la consommation d'énergie, où le protocole PEGASIS déjà consommé ces énergies à la 956 -ème rounds, par contre Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN présente une énergie totale consommé à la 992 -ème rounds soit 36 rounds de plus que PEGASIS.

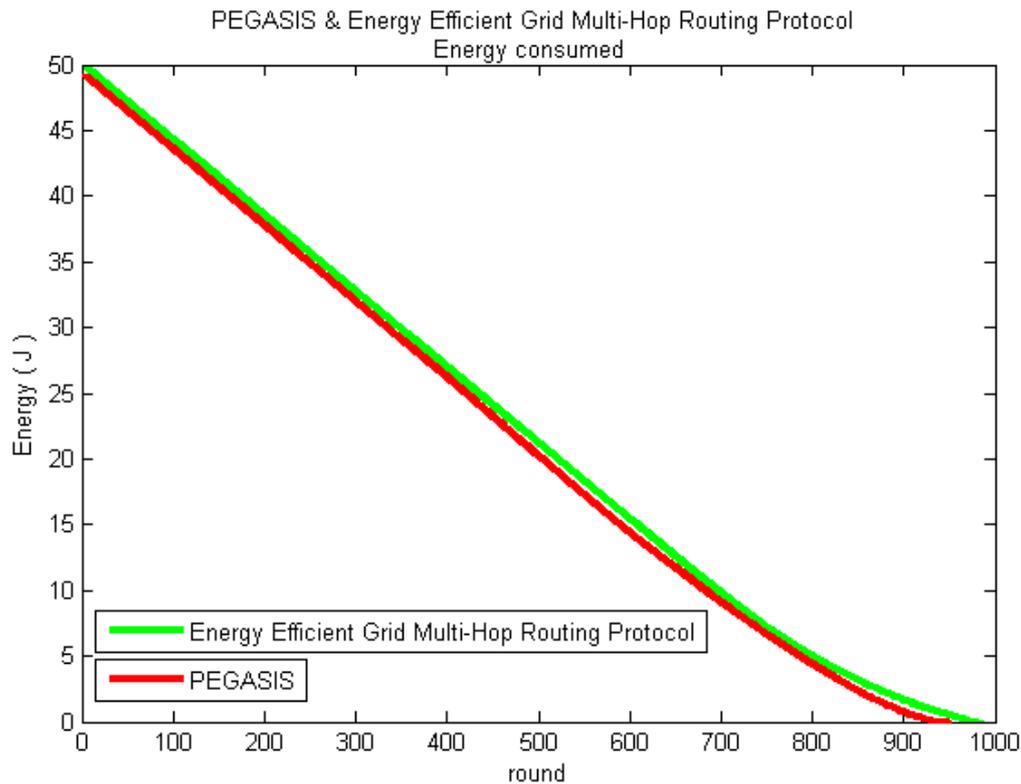


Figure 4.5 L'énergie consommée

4.4.3 L'énergie consommée par round

La Figure 4.6 ci-dessous représente l'énergie consommée dans le protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN et dans PEGASIS en fonction un Energie Consommée/round dans la période de stabilité. On constate que l'énergie maximal consommé par le protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN dans un round et 0.0611 joule, et moins l'énergie maximal consommé par le protocole PEGASIS et 0.6632 joule.

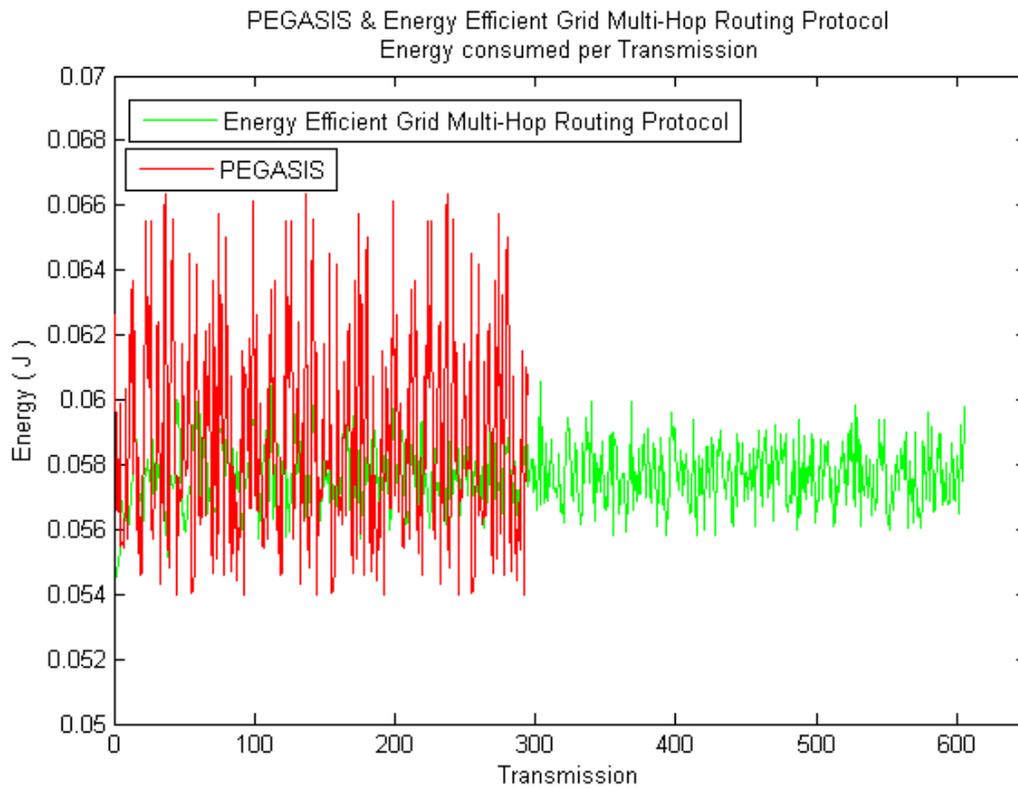


Figure 4.6 L'énergie consommée par round

4.4.4 L'énergie moyenne consommée par chaque nœud et par un round

La Figure 4.7 ci-dessous représente la moyenne de l'énergie consommée par round et par nœud dans le protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN et dans PEGASIS en Fonction un round dans la période de stabilité. On constate que le protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN moins de consommation d'énergie juste ($5.7698e-004$ joule), par contre dans PEGASIS on remarque Plus de consommation d'énergie ($5.883e-004$ joule).

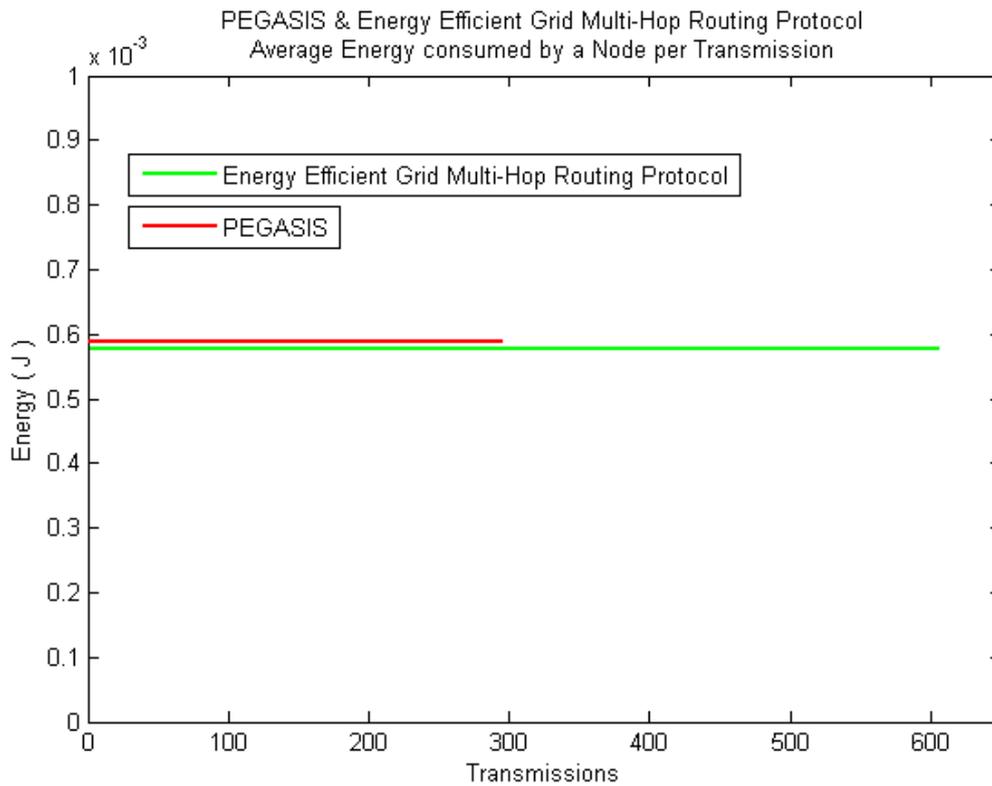


Figure 4.7 L'énergie moyenne consommée par round et par nœud.

4.5 Conclusions

Les résultats de simulation prouvent que le protocole Energy Efficient Grid Multi Hop Routing Protocol in WSN est capable de prolonger la durée de vie du réseau et améliore l'efficacité énergétique, ce qui augmente le taux de survie des nœuds et ses performances dépassent celles de PEGASIS en termes de quantité de données transmises à la station de base et la durée de vie de réseaux

Conclusions Générales

Dans ce travail, nous avons étudié les protocoles de routage hiérarchique et comprendre bien le fonctionnement de protocole PEGASIS qui optimisé le clustering pour un routage efficace en énergie dans les réseaux de capteurs sans fil.

Nous avons simulé le fonctionnement du protocole Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN et le compare avec le protocole PEGASIS. La simulation montre que Energy Efficient Grid Multi-Hop Routing Protocol in WSN réalisé des bons résultats dans la plupart des cas, une consommation énergétique très réduite, et par conséquent une prolongation la durée de vie de réseau.

Enfin, comme perspectives nous envisageons d'améliorer les performances de notre protocole de routage on ajoute

- La phase de maintenance qui sera une de redivisions de la grille (après diminution d'énergie de niveau supérieur de la grille) ou au niveau de l'algorithme de construction de chaînes (prendre en considération les réserves d'énergie des nœuds dans la construction des chaînes).
- On continuera l'amélioration de la fonction de choix de CH pour obtenir des meilleurs résultats et comparer notre protocole avec des autre protocoles
- Réaliser une application de control d'environnement on utiliser ce protocole

Bibliographe

[1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey". *Computer Networks* (Elsevier), vol. 38, Pp. 393-422, March 2002.

[2] A. Hussein and R. Khalid," Improvements of PEGASIS Routing Protocol in WSN", *International Advance Journal of Engineering Research (IAJER)*, Vol. 2, Pp. 01-14, 2019.

[3] I.F. Akyildiz, T. Melodia and K.R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks", *Computer Networks*, Vol. 51, Pp. 921-960, 2007.

[4] K. BEYDOUN, "Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs", Thèse de Doctorat, U.F.R des Sciences et Techniques de l'université de Franche-Comté, Décembre 2009.

[5] G. CHALHOUB, "Les réseaux de capteurs sans fil", Conférence, Université de Clermont-Ferrand, 2010.

[6] B. Djallel Eddine, « Protocole de routage pour les réseaux de capteur sans fil », Mémoire pour l'obtention du grade de magistère, Université de Hadj Lakhdar-Batna, Promotion 2007/2008

[7] S. ATHMANI, « Protocole de sécurité Pour les Réseaux de capteurs Sans Fil », Pour l'obtention du Magistère en Informatique, 2010.

[8] H. Chinh and Y. Tan," Smart wireless sensor networks", Rijeka, Croatia: InTech, pp. 182, 2010.

[9] C. Chong and Y. Kumar, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, 2003.

[10] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. I. Cayirci, "A survey on sensor networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40 (8). Pp. 102-116, 2002

- [11] D.C Andrews and P. Johnson, “Remote continuous monitoring in the home”, *Telemedicine and Telecare*, Vol. 2, Pp. 107-113. 2006.
- [12] H. Baldus, K. Klabunde and G. Muesch, “Reliable set-up of medical body-sensor networks”, in *EWSN 2004*, 2004.
- [13] R. Mehmet, Yuce, Ng. Peng Choong and Y.J. Khan, “Monitoring of physiological parameters from multiple patients using wireless sensor network”, *J. Medical Systems*, Vol. 32(5), Pp. 433-441, 2008
- [14] D. Davenport, B. Deb and F. Ross, “Wireless propagation and coexistence of medical body sensor networks for ambulatory patient monitoring”, In *Sixth International Workshop on Wearable and Im-plantable Body Sensor Networks*, Pp. 41-45, 2009.
- [15] E.M. Petriu, N.D. Georganas, D.C. Petriu, D. Makrakis and V.Z. Groza. “Sensor-based information appliances”, *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*. Vol. 3 (4), Pp. 31-35, 2000.
- [16] K. Akkaya and M. Younis, « A Survey on Routing Protocoles for Wirless Sensor networks », Department of computer Science and Electrical Engineering University of Maryland, Baltimore Conty, 2003.
- [17] R. M. Perianu, « Wirless Sensor Network in Motion: Clustering Algorithms for Service Discovery and Provisioning », these de doctoral, University of Twente, 2008.
- [18] Q. Mamun,” A Qualitative Comparison of Different Logical Topologies for Wireless Sensor Networks”, *Sensors (Basel)*, Pp. 14887–14913, 2012.
- [19] L. VILLALBA and A. Sandoval OROZCO and A. CABRERA, « Routing Protocols in Wireless Sensor Networks», *Sensors* 2009, Pp. 8399-8421, 2009.
- [20] F. AKYILDIZ and M. VURAN, «Wireless Sensor Networks», John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [21] W. R. Heinzelman and H. Balakrishnan, « Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks », Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences – 2000*.

[22] W. B. Heinzelman and H. Balakrishnan, « An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, Member », IEEE transactions on wireless communications, Vol. 1, no. 4, October 2002.

[23] B. Parmar, J. Munjani, J. Meisuria and A. Singh, "A Survey of routing protocol LEACH for WSN", International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 4, 2014

[24] F. Zhao, Y. Xu, and R. Li, "Improved LEACH Routing Communication Protocol for a Wireless Sensor Network", Department of Computer Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China, International Journal of Distributed Sensor Networks Vol. 2012, 2012.

[25] H. Rana, S. Vhatkar and M. Atique, "Comparative Study of PEGASIS Protocols in Wireless Sensor Network", IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE), Vol. 16, Pp. 25-30, Sep - Oct. 2014

[26] F. Sen, Q Bing, T. Liangrui, "An Improved Energy-Efficient PEGASIS-Based Protocol in Wireless Sensor Networks", Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2011.

[27] S. Waware, N. Sarwade, P Gangurde, "A Review of Power Efficient Hierarchical Routing Protocols in Wireless Sensor Networks", International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 2, Pp. 1096-1102, 2012

[28] K. Arun Kumar and J. Karthikeyan, "Wireless Sensor Networks of PEGASIS-Based Communication Protocol Classification in Environmental Monitoring", International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), Vol. 9, 2019

[29] Ns-3. <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>. Consulté le : 15-05-2020

[30] Omnet++. <https://omnetpp.org/>. Consulté le : 15-05-2020.

[31] Avrora. <http://compilers.cs.ucla.edu/avrora/>. Consulté le : 15-05-2020.

[32] Matlab. <http://fr.mathworks.com/products/matlab/>. Consulté le : 15-05-2020.