REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Évaluation du protocole de routage des données PEGASIS dans les réseaux de capteurs sans fil

---

Présentés par :

BENAIACHE Houssem Eddine

RABAH BELHAOUARI Rafik

Proposés et Dirigés par :

Mr. GUEDMANI Mohamed

Promotion2022

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous a armé de patience et de courage durant ces longues années d'étude.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre directeur de mémoire, Monsieur ***GUEDMANI Mohamed****. Nous lui remercions de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant tous nos parcours et nos recherches.

Nous remercions nos très chers parents, ont toujours été là pour nous. Nous remercions nos sœurs et frères pour leurs encouragements.

Enfin, nous tenons également à remercier nos amis qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à toutes et à tous.

Dédicaces

Je dédie ce travail en première place à mon grand-père ***SALHI Mohamed*** *qui est décidé l'année dernière et qui a laissé une grande tristesse dans mon cœur en ne pouvant pas être présent à ma dernière année d'étude et qui m'encourageait toujours et était là pour moi quand j'avais besoin de lui « Allah yerahmou w yedjaalou men ahl el djannah »*

Je le dédie à mes chers parents et ma grand-mère qui ont sacrifié leur vie

pour mon succès et leurs encouragements durant tout mon parcours scolaire,

à ma sœur et mes frère Wassim et Ayoub

à toute la famille BENAIACHE et SALHI,

sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis le primaire à ce jour,

à mes amis et à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents et qui ont sacrifié leur vie

pour mon succès et leurs encouragements durant tout mon parcours scolaire,

à mes sœur et mes frère

à toute la famille RABAH BELHAOUARI,

sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis le primaire à ce jour,

à mes amis et à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

ملخص

أدت التطورات الأخيرة في الاتصالات اللاسلكية والإلكترونيات إلى تطوير أجهزة استشعار صغيرة أقل تكلفة ومتعددة الوظائف. سمحت لنا هذه الميزات بإبراز ولادة شبكات الاستشعار اللاسلكية، وتعزيز استخدامها في العديد من التطبيقات. وكثيرا ما يتطلب ذلك الانتشار في بيئات معادية، حيث تتعرض العقد وروابط الاتصال باستمرار لتهديدات كبيرة. قد يؤدي فشل عقدة واحدة، بسبب تدفق بطاريتها عبر الشبكة، إلى قطع جزء من الشبكة عن بقية الشبكة. ويجب مراعاة هذا القيد القوي على جميع مستويات التصميم والتنفيذ. ويلزم إيلاء اهتمام خاص عند معالجة مشكلة توجيه المعلومات (الطاقة المنفقة على الاتصالات جزء هام من الإنفاق العام على الطاقة).

تتكون مساهمتنا من دراسة مقارنة بين أربعة بروتوكولات هرمية للتوجيه تستند إلى نهجين مختلفين، وهما بروتوكول "ليش" و "ليش موبايل" القائمين على المجموعات وبروتوكول "بيغازيس" و "بيغازيس موبابل" القائمين على السلاسل.

الكلمات المفتاحية

شبكة الاستشعار اللاسلكية، الاتصالات اللاسلكية، عقدة الاستشعار، المحطة الأساسية، استهلاك الطاقة، بروتوكول التوجيه.

Résumé

Les progrès récents dans les communications sans fil et le domaine de l'électronique ont permis le développement des micro-capteurs, moins coûteux et multifonctionnels. Ces caractéristiques ont permis de se projeter dans la naissance des réseaux de capteurs sans fil, et de favoriser leur utilisation dans une multitude d'applications. Celles-ci nécessitent souvent un déploiement dans des environnements hostiles, où les nœuds ainsi que les liens de communication sont continuellement exposés à des menaces importantes. La défaillance d'un nœud simple, à cause de l'écoulement de sa batterie dans le réseau, peut probablement faire couper une partie du réseau du reste de celui-ci. Cette contrainte forte doit être prise en compte à tous les niveaux de la conception et de la réalisation. Une attention toute particulière est nécessaire lorsque nous nous intéressons au problème de routage de l'information (l'énergie dépensée lors des communications est une part importante des dépenses énergétiques globales).

Notre contribution consiste en une étude comparative entre quatre protocoles de routage hiérarchique basés sur deux approches différentes à savoir, le protocole LEACH et LEACH mobile basés sur les clusters et le protocole PEGASIS et PEGASIS mobile basés sur les chaînes.

Mots clés

RCSF (Réseau de capteurs sans fils), communication sans fils, nœud capteur, station de base, consommation d'énergie, protocole de routage, LEACH, PEGASIS.

Abstract

Recent advances in wireless communications and electronics have led to the development of less costly and multifunctional micro sensors. These features have allowed us to project into the birth of wireless sensor networks, and to promote their use in a multitude of applications. These often require deployment in hostile environments, where nodes and communication links are continually exposed to significant threats. The failure of a single node, due to the flow of its battery through the network, can probably cause part of the network to be cut off from the rest of the network. This strong constraint must be taken into account at all levels of design and implementation. Special attention is needed when dealing with the problem of information routing (energy spent on communications is an important part of overall energy expenditure).

Our contribution consists of a comparative study between four hierarchical routing protocols based on two different approaches, namely, the LEACH and LEACH mobile protocol based on clusters and the PEGASIS and PEGASIS mobile protocol based on chains.

Keywords

WSN (Wireless Sensor Network), Wireless Communication, Sensor Node, Base Station, Power Consumption, Routing Protocol, LEACH, PEGASIS.

Table des matières

Introduction générale 14

CHAPITRE I Présentation des réseaux de capteurs sans fil 16

I.1 Introduction : 17

I.2 Définition : 17

I.3 Les éléments constitutifs d'un RCSF : 18

I.4 Caractéristique d'un RCSF : 19

I.4.1 Caractéristiques d'un RCSF: 19

I.4.2 Tolérance aux pannes : 20

I.4.3 Auto organisation : 20

I.4.4 Déploiement : 20

I.4.5 Densité importante des nœuds : 21

I.5 Les capteurs : 21

I.5.1 Définition : 21

I.5.2 Architecture d'un capteur : 22

I.5.3 Différents types de capteurs : 23

I.6 Domaines d'applications du RCSF : 25

I.6.1 Domaine domotique : 25

I.6.2 Domaine militaire : 26

I.6.3 Domaine médical : 27

I.6.4 Domaine sécuritaire : 28

I.6.5 Domaine environnemental et agricole : 29

I.7 Les limites des RCSFs : 29

I.8 Conclusion : 30

CHAPITRE II Routage dans les réseaux de capteurs sans fil 31

II.1 Introduction : 32

II.2 Approches dérivées des protocoles hiérarchiques : 32

II.3 Caractéristiques d'un protocole hiérarchique : 33
II.4 Le protocole de routage LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) : 34
II.4.1 Architecture de communication de LEACH : 34
II.4.2 Principe de fonctionnement de LEACH 35
II.4.3 Avantages et inconvénients de LEACH : 39
II.5 Chain-based approach (approche à chaîne) : 40
II.5.1 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) : 41
II.5.2 Approche de construction de chaîne : 41
II.5.3 Avantages et inconvénients du protocole PEGASIS : 44
II.6 Conclusion : 45
CHAPITRE III Évaluation des deux approches en fonction de la mobilité de Sink 46
III.1 Introduction : 47
III.2 Environnement de travail : 47
III.2.1 Les outils de simulation 47
III.2.2 Le simulateur Matlab : 48
III.2.3 Modèle de consommation d'énergie : 49
III.3 La mobilité dans les RCSF : 51
III.3.1 Stratégie de la mobilité du Sink pour la collecte de données 51
III.3.2 La mobilité dans le protocole LEACH : 53
III.3.3 La mobilité dans le protocole PEGASIS 53
III.4 Résultats de simulation : 57
III.4.1 Paramètres de simulation : 57
III.4.2 Analyse des résultats : 58
III.5 Conclusion : 62
Conclusion générale 63
Bibliographie 65

Liste des figures

Figure I-1: Architecture d'un RCSF. 18
Figure I-2: Représentation du mécanisme de conversion d'un capteur. 21
Figure I-3: Les composants principaux d'un capteur. 22
Figure I-4 illustre la diversité des domaines des capteurs. 23
Figure I-5: Quelques types de capteurs. 24
Figure I-6: L'évolution des capteurs. 25
Figure I-7: Exemple d'utilisation des nœuds capteurs pour une maison intelligente. 26
Figure I-8: Exemple d'un RCSF dans le domaine militaire. 27
Figure I-9: Exemple de RCSF dans le domaine médical. 28
Figure I-10: Exemple de RCSF dans le domaine environnemental et agricole. 29
Figure II-2: Configurations pour les RCSF découpés. 33
Figure II-3: Architecture de communication de LEACH. 35
Figure II-4: Les opérations de la phase d'initialisation. 37
Figure II-5: Les phases d'un cycle du protocole LEACH. 38
Figure II-6: Les phases du protocole LEACH et ses variantes dans le RCSF. 39
Figure II-7: Construction de chaîne en utilisant l'algorithme Avide. 42
Figure II-8: Approche de dépassement de jeton. 43
Figure II-9: Le protocole PEGASIS. 44
Figure III-1 suivante illustre ce modèle de consommation d'énergie : 49
Figure III-2: Modèle radio introduit par W. Heinzelman et al. 49
Figure III-3: Modèle de consommation d'énergie. 50
Figure III-4 montre les stratégies de collecte de données dans le cas d'une mobilité aléatoire du Sink 51
Figure III-5: Stratégie de collecte de données dans le cas d'une mobilité aléatoire du Sink 52
Figure III-6: Stratégie de collecte de données dans le cas d'une mobilité contrôlée du Sink 53
Figure III-7: Formation de chaînes et lieux de séjour dans le MIEEPB. 55
Figure III-9: Nombre de nœuds vivants en fonction de rounds. 59
Figure III-10: L'énergie résiduelle 60
Figure III-11: Nombre de paquets transmis au Sink. 61

Liste des tableaux

Tableau III-1: Paramètres de simulation. 58
Tableau III-3: Le premier et le dernier nœud mort de chaque protocole. 59

Liste des équations

Équation(II— 1) 36
Équation (III—1) 50
Équation (III—2) 50
Équation (III—3) 50
Équation (III—4) 50
Équation (III—5) 54
Équation (III—6) 54
Équation (III—7) 54
Équation (III—8) 56
Équation (III—9) 57
Équation (III—10) 57
Équation (III—11) 57

Liste des acronymes

ADC	Analog to Digital Converter
ADV	Advertising
BS	Base station
CDMA	Code-Division Multiple Access
CH	Cluster Head
GEAR	Geographic and Energy Aware Routing
GPS	Global Positioning System
ID	Identity
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MAC	Medium Access Control
MATLAB	MATrix LABoratory
MEMS	Microsystèmes électromécaniques
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NiCD	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-hydrure métallique
NP	Noeud proche
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
RAM	Random-Access Memory
RCSF	Réseaux de Capteurs Sans Fil
REQ	Requête
RF	Radio Frequency
RX	Réception
SINK	Synchronization
SN	Sensor node
TDMA	Time-Division Multiple Access
TOR	Tout Ou Rien
TX	Transmission
WSN	Wireless Sensor Network
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions

Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil sont qualifiés de technologie émergente qui va bouleverser notre quotidien. Ces composants électromagnétiques d'une taille très réduite et qui communiquent via un réseau sans fil omniprésent, ouvrent largement les horizons des applications construites jusqu'à maintenant.

Caractérisés par une souplesse sans équivoque, les RCSFs permettent une panoplie d'applications qui touchent et continuent à toucher tous les domaines de notre vie. Commençant par les applications militaires, qui ont conçu le berceau dans lequel ils se sont développés ; puis les applications civiles à savoir celles de la surveillance de l'environnement, des structures et du trafic de tout type ; et en arrivant aux applications médicales qui incluent la surveillance des patients à domicile ou à l'hôpital. Cette liste non exhaustive plaide le succès de cette technologie.

Nous avons réussi à partir de ce travail d'établir premièrement, dans le premier chapitre, la définition du réseau de capteur sans fils avec ses deux types d'architecture, ensuite on mentionne quelques caractéristiques et facteurs de réseaux de capteurs sans fils, après on détaille bien le nœud capteur et ses composants, et puis on se base sur les domaines d'applications de ce type de réseaux, et à la fin de chapitre, on cite des différents problématiques des réseaux.

On poursuit ce mémoire dans le deuxième chapitre en se basant sur les deux types d'architectures du réseau représentées par les deux protocoles majeurs de chaque architecture, en détaillant la méthode de travail de chaque protocole avec leurs avantages et inconvénients.

Et finalement, on finit par le dernier chapitre qui constitue le cœur de notre travail de thèse, on présente une évaluation des performances de quatre protocoles de routage après de consolider les résultats de simulation.

CHAPITRE I

Présentation des réseaux de capteurs sans fil

I.1 Introduction :

Le développement technologique au cour des dernières décennies ont permis l'émergence d'une cohabitation parfaite entre l'informatique et l'électronique.

Cette cohabitation a permis un développement fulgurant des technologies en matière de communication à travers des réseaux sans fil, mobiles et dotés de capteurs sans cesse miniaturisés.

Cette nouvelle technologie se fondait sur la collecte de l'information et sa transmission, c'est ainsi que nous avons assisté à l'émergence des capteurs sans fil.

En effet le besoin économique et stratégique incessant a induit un développement des contrôles environnementaux, médicaux et autres ce qui a permis aux RCSF de connaitre un essor important.

I.2 Définition :

Un RCSF est un acronyme pour réseau de capteurs sans fil ou WSN : Wireless Sensor Network, souvent apparenté au réseau ad-hoc de leur utilisation commune des ondes radio, ainsi que leurs architectures décentralisées, les RCSF sont aussi considérés comme leurs successeurs.

Les RCSF sont des systèmes embarqués, ils se composent d'un ensemble d 'unités de traitement embarqué appelé ''nœuds'' ou ''événements'' qui communiquent à travers des liens sans fil, le déploiement de plusieurs unités se fait dans le but de collecter ou de capter des données (de type sonores, vibrations, lumière…) et de les transmettre.

Grace aux récentes avancées technologiques le développement de très petits capteurs à faible cout et consommant peu d'énergie a pu être réalisé.

Afin de mieux cerner les réseaux de ces capteurs sans fil la figure qui suit représente leur mode de fonctionnement global.

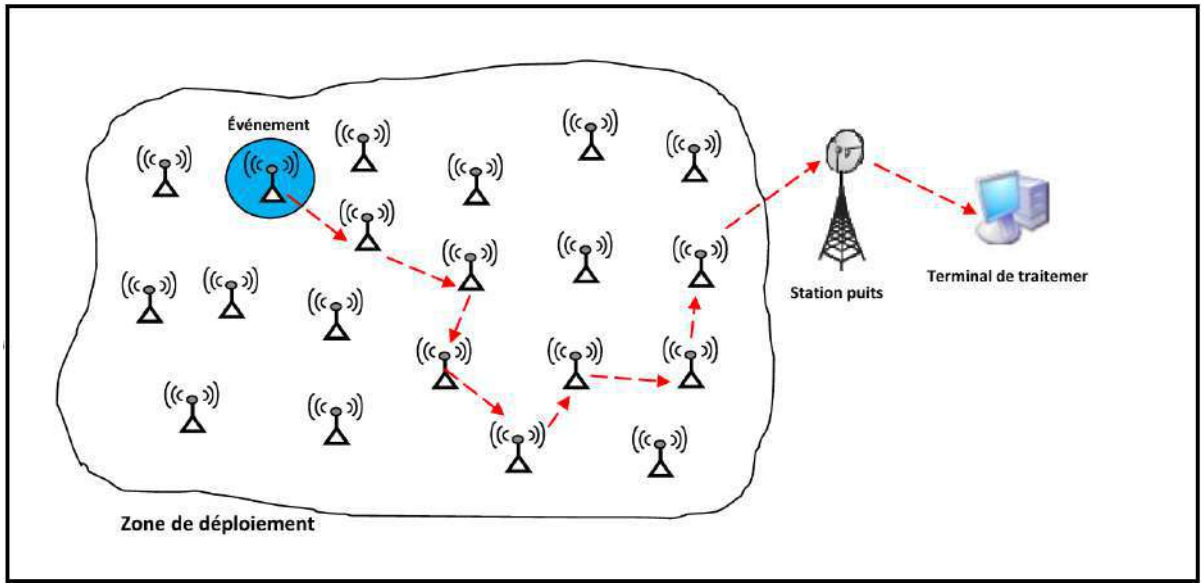


Figure I-1: Architecture d'un RCSF.

I.3 Les éléments constitutifs d'un RCSF :

Un réseau de capteurs est composé d'un nombre souvent très important de nœuds qui sont, soit posés à un endroit précis, soit dispersés aléatoirement (souvent déployés par voie aérienne à l'aide d'avions ou hélicoptères). Ce dispersement aléatoire des capteurs nécessite que le protocole utilisé pour les réseaux de capteurs possède des algorithmes d'auto organisation [1].

En plus des nombreuses contraintes que peuvent comporter certain environnement hostile, il subsiste une contrainte très importante à savoir l'économie de batterie.

En effet, un réseau de capteurs ne peut survivre si la perte de nœuds est trop importante car ceci provoque des pertes de communication dues à une trop grande distance entre les capteurs. De ce fait il est primordial que la durée de vie des batteries soit la plus longue possible (impossible de retourner changer les batteries).

Cette utilisation liée à l'autonomie des capteurs (1 année maximum pour les technologies actuelles) fait intervenir un paramètre non négligeable qui est le prix. Aucune application ne serait rentable si le rapport heures d'utilisation / prix était trop élevé. Il a donc été nécessaire d'allier technologie et low-cost [1]. Les réseaux de capteurs peuvent être programmés à un grand nombre de fins, telles que le contrôle d'intrusions, le calcul de températures, le calcul de changements climatiques, la surveillance des déplacements d'animaux (avec récepteurs GPS), surveillance de malades [1] …etc.

Un réseau de capteur sans fil se constitue principalement de plusieurs nœuds capteurs, un nœud, le Sink et un centre de traitement de données.

- **Nœuds** : ce sont des capteurs, qui répondent aux exigences de l'application pour laquelle ils ont été conçus du point de vue de leurs architectures, et de leur dispersion géographique.
- **Sink ou Puits** : c'est un nœud important du réseau. Son rôle diffère de celui des autres nœuds du réseau car sa tâche est de collecter les données qui proviennent des autres nœuds du réseau c'est pour cela qu'il doit être toujours actif car la réception des données se fait de manière aléatoire, et pour se fait son énergie doit être illimité.
- **Centre de traitement des données :** Toutes les données collectées par le Sink seront envoyées, ce centre va regrouper toutes les informations et les triées afin de relever celles qui seront exploitables.

I.4 Caractéristique d'un RCSF :

Il existe plusieurs caractéristiques qui distinguent les WSN des autres réseaux sans fil dont les plus importantes sont citées comme suit [2, 3] :

I.4.1 Caractéristiques d'un RCSF:

La dynamique de la topologie est l'un des aspects les plus originaux WSN [4], car le changement topologique du réseau peut engendrer des problèmes de connectivité du réseau et donc son inaccessibilité. Cette topologie dynamique peut être due soit à :

• La mobilité des nœuds : les nœuds capteurs sont mobiles (cas des nœuds capteurs robots) ou ils sont fixés sur des entités mobiles ou encore lorsque les nœuds capteurs bougent sous l'effet de facteurs externes tel que le vent par exemple.

• L'épuisement de la réserve énergétique du nœud : à cause de l'autonomie énergétique limitée des nœuds ou même à cause d'une défaillance, ces derniers peuvent devenir hors service donc du point de vue logique supprimés et ainsi changent la topologie du réseau.

• L'ajout de nouveaux nœuds : en effet, l'ajout de nouveaux nœuds au réseau peut aussi remettre en cause la topologie du réseau. Il suffit juste que le nœud ajouté soit dans la zone de couverture d'au moins un nœud capteur du réseau pour qu'il modifie la topologie du réseau. [4]

I.4.2 Tolérance aux pannes :

Certains nœuds capteurs peuvent tomber en panne ou être bloqués par le manque d'énergie, ou subir des dommages physiques ou des interférences environnementales. La défaillance des nœuds capteurs ne devrait pas affecter la tâche globale du réseau de capteurs. C'est le problème de fiabilité ou de tolérance de pannes. La tolérance aux pannes est la capacité de maintenir les propriétés du réseau de capteurs sans interruption en raison d'une défaillance du nœud du capteur. [5, 6]

I.4.3 Auto organisation :

Dans le cas où un réseau comporte un grand nombre de nœuds placés dans des endroits hostiles où la configuration manuelle n'est pas faisable il doit être capable de s'auto organiser. Si un nœud est retiré à cause d'un manque d'énergie ou de destruction physique ou inséré, ainsi le réseau doit être capable de se reconfigurer pour continuer sa fonction.

I.4.4 Déploiement :

Les nœuds capteurs peuvent être déployés d'une manière aléatoire ou déterministe.

• **Méthode aléatoire :** est généralement utilisée pour le déploiement de nœuds capteurs dans des zones inconnues, difficiles d'accès ou inaccessibles (zone de bataille, montagne, atmosphère, etc.).

Dans ce cas, les nœuds peuvent être déployés à l'aide de divers moyens, par exemple via des avions, des bateaux, etc.

• **Méthode déterministe :** dans le cas où l'environnement de déploiement des capteurs est accessible ou connu. Dans ce cas, les nœuds peuvent être placés à des positions fixes et connues en utilisant un système de coordonnées 2D ou 3D.

De préférence un schéma général pour le déploiement initial doit être conçu pour permettre de réduire les coûts d'installation, d'augmenter la flexibilité d'arrangement des nœuds et faciliter l'auto organisation des nœuds et leur tolérance aux pannes. [4]

I.4.5 Densité importante des nœuds :

Généralement, le type de l'application envisagée influe sur le choix de la densité à prendre [4]. Et pour obtenir des résultats de mesure de bonne qualité, on privilégie souvent le facteur nombre de nœuds plutôt que le facteur qualité des nœuds capteurs. On cherche donc à avoir des réseaux de nœuds capteurs denses. Tel que de plus que cette densité augmente, la gestion soigneuse de la maintenance de la topologie doit être plus forte.

I.5 Les capteurs :

I.5.1 Définition :

Les capteurs sont des dispositifs miniaturisés possédants des ressources énergétiques limités et autonomes, capables de transformer une grandeur physique observée (comme la température, la pression, l'humidité, etc.) en une grandeur utilisable (comme l'intensité électrique, la position d'un flotteur, etc.)

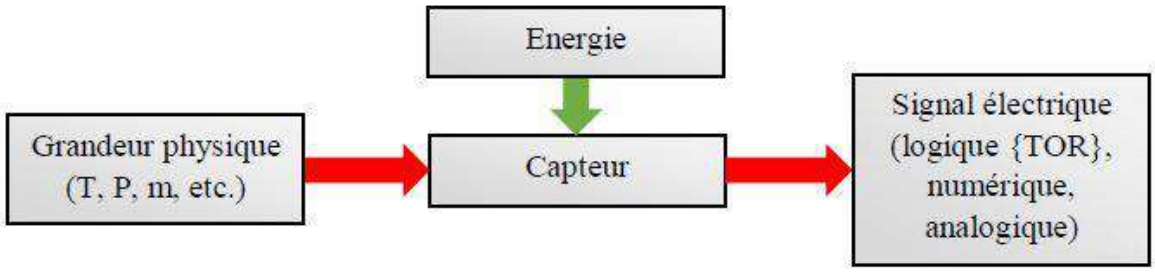


Figure I-2: Représentation du mécanisme de conversion d'un capteur.

On peut alors classer les capteurs en deux catégories, les capteurs à contact qui nécessitent un contact direct avec l'objet à détecter et les capteurs de proximité. Chaque catégorie peut être subdivisée en trois catégories de capteurs: les capteurs mécaniques, électriques, pneumatiques [7]. En fin nous dirons qu'un capteur permet l'analyse de l'environnement dans lequel il se trouve (car il effectue des relevés de mesures), cette analyse se fait quand le capteur transmet des informations aux autres capteurs se situant dans sa zone de couverture. L'information va alors circuler en se propageant de capteur en capteur traversant ainsi plusieurs zones du réseau permettant d'assurer la couverture de ce dernier.

I.5.2 Architecture d'un capteur :

Un nœud de capteur contient quatre unités de base : l'unité de détection, l'unité de traitement, l'unité de transmission et l'unité de commande de puissance (l'unité d'énergie).

Selon l'application, il peut également y avoir d'autres composants supplémentaires tels qu'un système de positionnement (GPS) ou un système de génération d'énergie (cellule solaire) ou même un système de mobilisation chargé afin de déplacer le nœud capteur si nécessaire.

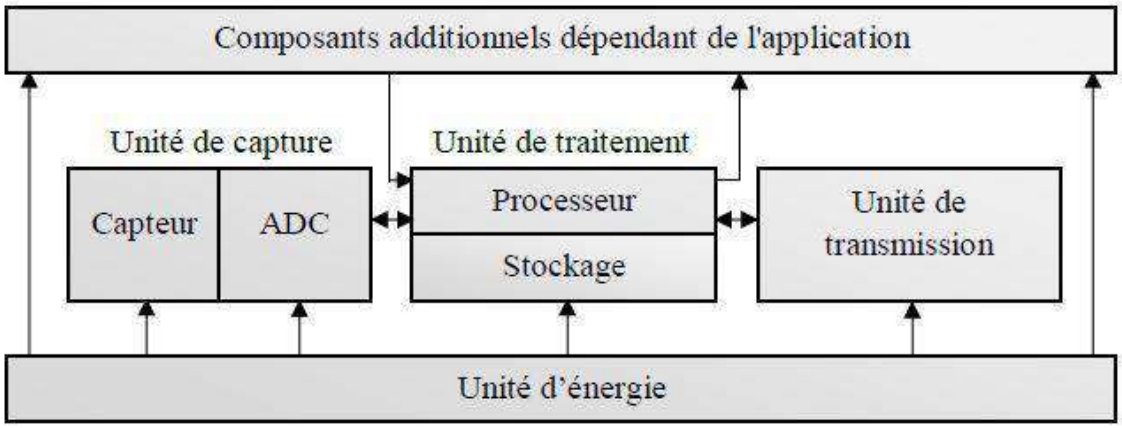


Figure I-3: Les composants principaux d'un capteur.

Comme il est déjà mentionné ci-dessus, plusieurs entités composent chaque nœud d'un RCSF, ce point sera détaillé :

- **Unité de capture :** elle est composée de deux sous unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information (donnée physique) de l'environnement local donc il fournit des signaux analogiques, ce dernier est ensuite transformé en donnée numérique à travers un convertisseur analogique/numérique (ADC)

- **Unité de traitement :** c'est le noyau (l'unité principale) du capteur sans fil, habituellement composé d'un microprocesseur avec une quantité limitée de mémoire. Les données captées sont communiquées au microprocesseur ou stockées dans la mémoire.

- **Unité de communication :** les données reçues par l'unité de capture sont traitées et éventuellement transmises par la suite par l'unité de communication qui se charge d'effectuer

toutes les émissions et les réceptions de données sur un médium sans fil, cette unité est généralement capable d'effectuer des communications bidirectionnelles.

- **Unité d'énergie :** c'est un élément clé au sein de l'architecture d'un nœud capteur. Cette dernière est sa ressource énergétique, elle est donc responsable de l'approvisionnement en puissance électrique requise par les autres unités du système. Une batterie est effectivement utilisée à cet effet, elle n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les réseaux de capteurs.

I.5.3 Différents types de capteurs :

Actuellement il existe différents types de capteurs circulant dans le marché, comportant des caractéristiques et des fonctionnalités diverses et variées. Sachant que la plus grande majorité des capteurs sont conçus selon l'application pour laquelle ils sont utilisés cela nous donne une grande variété de capteurs.

La Figure I-4 illustre la diversité des domaines des capteurs.

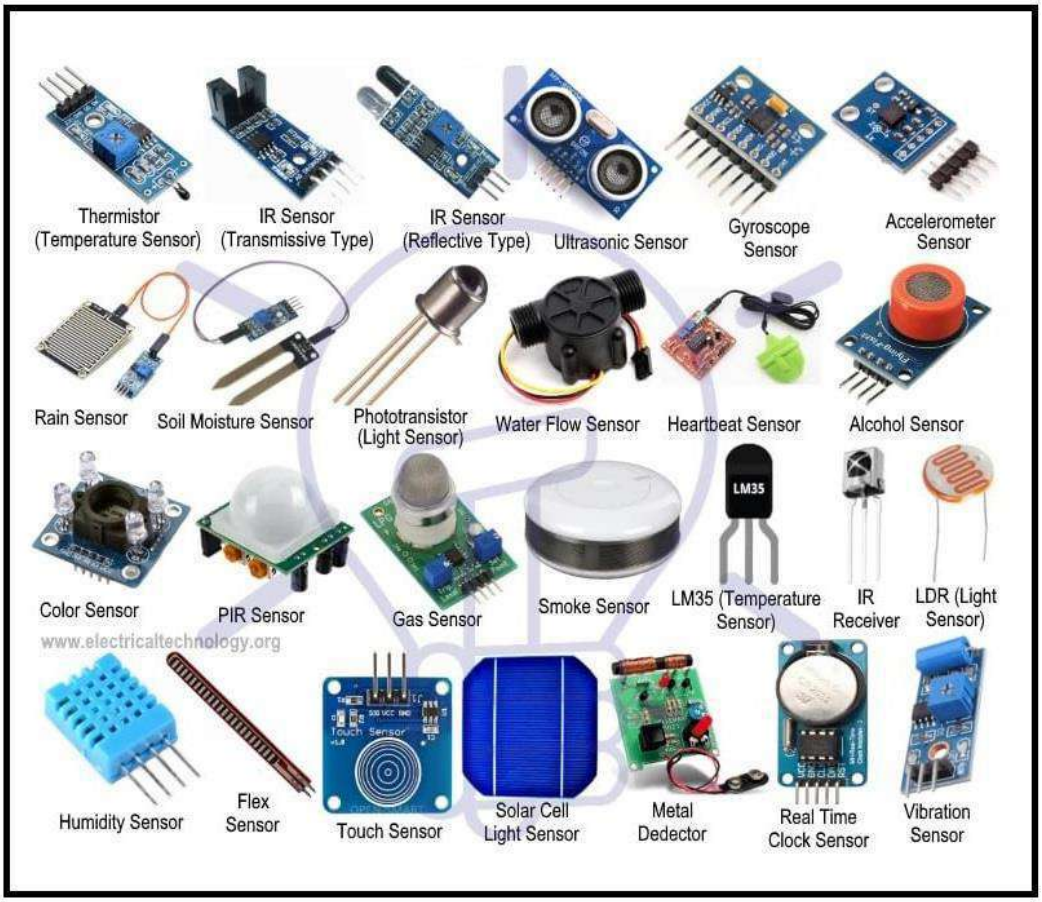


Figure I-5: Quelques types de capteurs. [38]

Les capteurs ont connu une évolution fulgurante au cours du temps, il est intéressant de voir cette évolution tout au long de ces vingt dernières années. Nous constatons qu'une entreprise est privilégiée et se distingue des autres c'est Xbow aussi appelé Crossbow. C'est une entreprise incontournable dans la fabrication de capteurs, cette dernière a vu le jour au sein d'une prestigieuse université californienne à s'avoir l'université de Berkeley qui enregistre les travaux de recherche parmi les plus important au monde. Les capteurs fabriqués par Xbow au cours des dix dernières années (Famille de capteurs Mica et Telos entre autre) sont sans aucun doute les plus utilisés dans les expériences et travaux de recherches. Ces capteurs sont capables de mesurer plusieurs métriques (température, humidité, etc.…) et s'articulent pour la plupart d'entre eux autour de Chipcon CC2420 qui est devenu le standard au niveau des modules de transmission utilisant le protocole de communication IEEE 802.15.4 [8].



Figure I-6: L'évolution des capteurs. [39]

I.6 Domaines d'applications du RCSF :

La recherche dans le domaine des capteurs est en train de vivre une révolution importante grâce aux évolutions techniques que connaissent les domaines de l´électronique et des télécommunications. Et les réseaux de capteurs sans fil ont été classés parmi les 21 technologies les plus importantes du 21éme siècle. [9]

Les réseaux de capteurs peuvent être constitués de nombreux types de capteurs tels que sismique, faible taux d'échantillonnage magnétique, thermique, visuel, infrarouge, acoustique et radar, ils sont capables de surveiller une grande variété de conditions ambiantes ils permettent aux réseaux de capteurs d'envahir plusieurs domaines d'applications, ce qui est détaillé ensuite:

I.6.1 Domaine domotique :

Avec le développement technologique, les capteurs peuvent être embarqués dans des appareils, tels que les aspirateurs, les fours à micro-ondes, les réfrigérateurs, les magnétoscopes, etc. Ces capteurs embarqués peuvent interagir entre eux et avec un réseau externe via Internet pour permettre à un utilisateur de contrôler les appareils domestiques localement ou à distance.

Le déploiement des capteurs de mouvement et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que : la lumière s'éteint et la musique s'arrête quand la chambre est vide, la climatisation et le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, l'alarme est déclenchée par le capteur anti-intrusion quand un étranger veut pénétrer dans la maison. [10]



Figure I-7: Exemple d'utilisation des nœuds capteurs pour une maison intelligente. [40]

I.6.2 Domaine militaire :

Les applications des WSN dans le milieu militaire dépendent non seulement sur les technologies de communication sans fil, mais également sur les capacités des nœuds capteurs. Les nœuds capteurs peuvent mesurer des divers phénomènes physiques qui sont requis dans les applications militaires, comme les ondes électromagnétiques, la lumière, la pression et le son,

qui résultent des coups de feu et des explosions. Les nœuds capteurs peuvent détecter et aussi mesurer les vapeurs chimiques, biologiques et explosives, ainsi que la présence de personnes ou d'objets [11]. Comme par exemple des sites ou bâtiments militaires, des capteurs acoustiques et sismiques sont déployés sans surveillance pour assurer la protection des points spécifiques en détectant les mouvements de chaque soldat ennemi. [12]

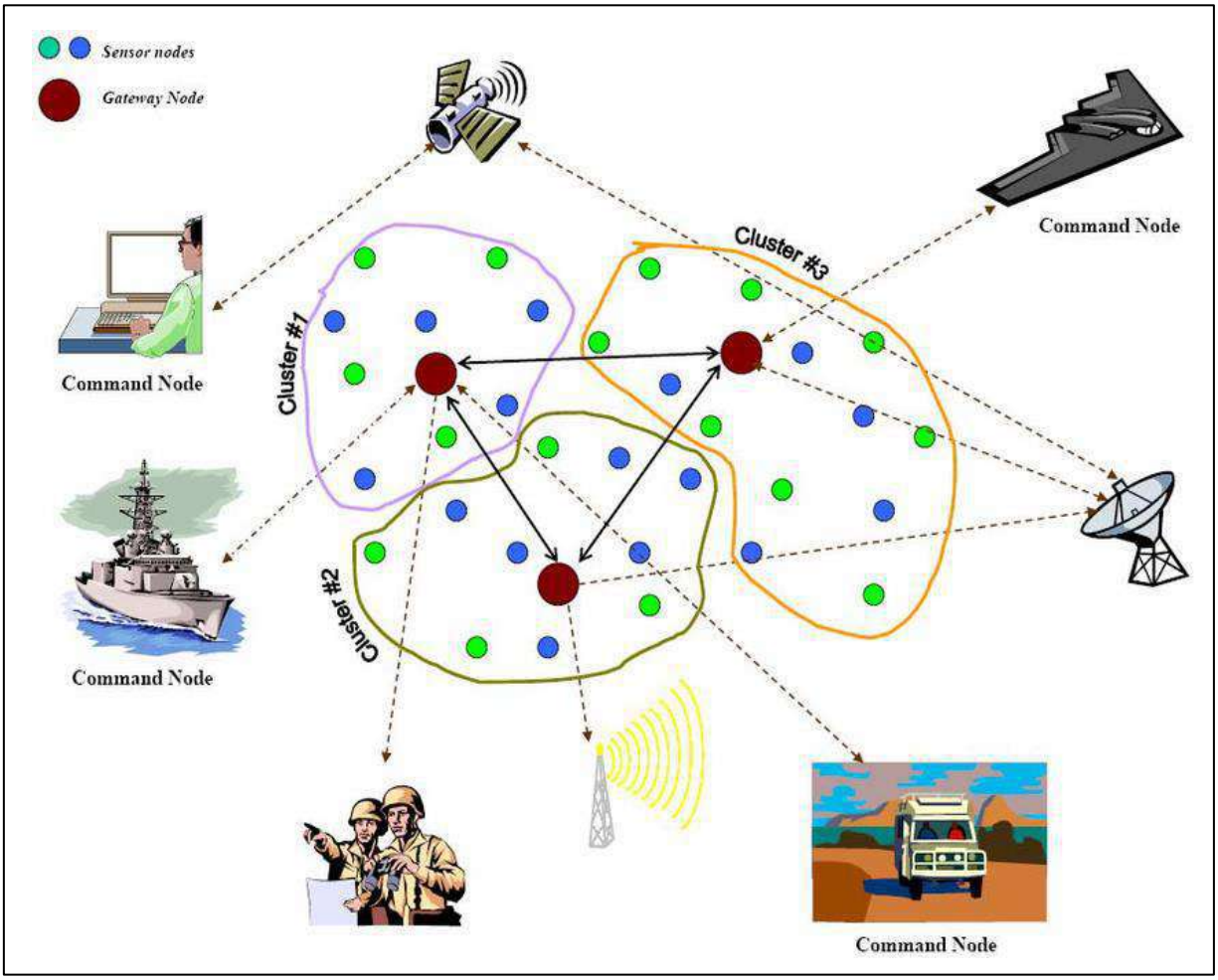


Figure I-8: Exemple d'un RCSF dans le domaine militaire. [41]

I.6.3 Domaine médical :

Dans le domaine de la médecine, les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer une surveillance permanente des organes vitaux de l'être humain grâce à des micro-capteurs qui pourront être avalés ou implantés sous la peau (détection de cancers, etc.) [10], Par exemple avec l'implantation de mini capteurs vidéo sous la peau, on peut recevoir des images en temps

réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie pendant environ 24h. la surveillance de la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle est possible aussi [1]. Le médecin peut donc suivre ses patients à distance et sans rendez-vous, les statistiques de la glycémie par exemple ou des autres données sont envoyées au médecin ou à l'infirmier, donc l'identification des cas urgents pour eux va être plus facile et plus rapide, les malades vont avoir aussi plus d'indépendance dans ses vies.

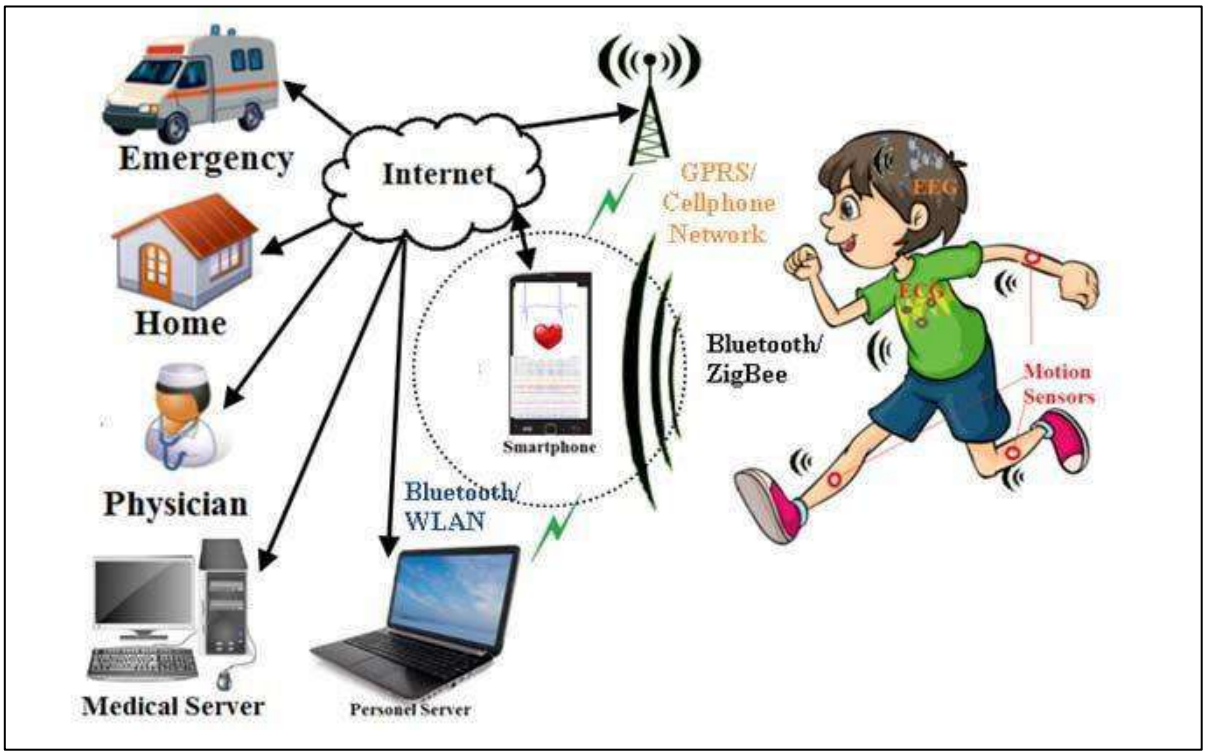


Figure I-9: Exemple de RCSF dans le domaine médical. [42]

I.6.4 Domaine sécuritaire :

Les WSN peuvent être utilisés dans de nombreuses applications de sécurité et de surveillance. Par exemple, des capteurs acoustiques et celles de vidéos sont déployés dans les immeubles, les aéroports, les métros, les ponts, les bâtiments et les autres infrastructures essentielles, tels que les centrales nucléaires et les centres de communication pour identifier et suivre les intrus, fournissant en temps opportun des alarmes et prévenant ainsi des attaques potentielles. [13]

I.6.5 Domaine environnemental et agricole :

Le contrôle des paramètres environnementaux par les réseaux de capteurs peut donner naissance à plusieurs applications. Par exemple, le déploiement des thermo-capteurs dans une forêt peut aider à détecter un éventuel début de feu et par suite faciliter la lutte contre les feux de forêt avant leur propagation. Le déploiement des capteurs chimiques dans les milieux urbains peut aider à détecter la pollution et analyser la qualité d'air. De même leur déploiement dans les sites industriels empêche les risques industriels tels que la fuite de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.). [13]

Dans le domaine de l'agriculture, les capteurs peuvent être utilisés pour réagir convenablement aux changements climatiques par exemple le processus d'irrigation lors de la détection de zones sèches dans un champ agricole. [10]

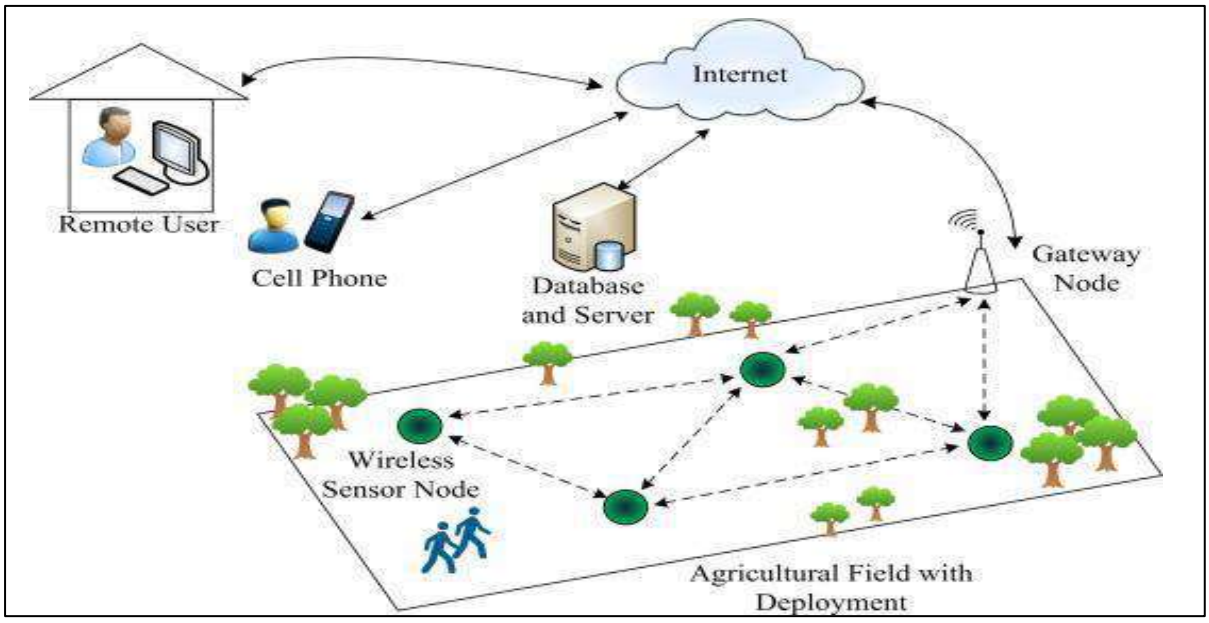


Figure I-10: Exemple de RCSF dans le domaine environnemental et agricole. [43]

I.7 Les limites des RCSFs :

La localisation dans les réseaux de capteurs comporte certaines limites et ceci causés par l'absence de dispositif d'auto positionnement. Les contraintes de conception étant nombreuses nous citerons les principales telles que reprisent par les grandes théories :

- Assurer une continuité du réseau sans disfonctionnement.
- Une mémoire capable de stoker toutes les informations reçues.

- Maitrise des couts de production.
- Surmonter les défaillances liées à l'environnement.
- Un déploiement topologique grâce à une maintenance assidue.
- Cernèrent du facteur matériel telles que la taille des capteurs le gain d'énergie, l'adaptation aux milieux et sa résistance.
- Mise en place d'une norme de transmission telle que l'infrarouge, le Bluetooth et les communications radio ZigBee.
- Une adéquation entre l'utilisation et la consommation de l'énergie capable d'assurer une longévité du réseau.

I.8 Conclusion :

Le faible prix et le large éventail d'utilisations possibles des réseaux de capteurs sans fil permettent d'accorder une grande importance à cette technologie et de penser et mener des recherches et des projets dans ce domaine.

Dans ce chapitre, nous avons fourni des définitions et quelques concepts de base liés aux réseaux de capteurs sans fil, car nous avons constaté que les RCSF sont caractérisés par une capacité de puissance limitée, ce qui rend l'optimisation de la consommation d'énergie dans de tels réseaux une tâche très difficile afin d'étendre la durée de vie du réseau.

On s'intéresse dans le chapitre 2 de ce projet à la présentation des différents protocoles de routage qui assure le routage des données et la gestion de l'énergie afin de prolonger la durée de vie d'un RCSF, en basant sur le protocole LEACH et le protocole PEGASIS.

CHAPITRE II

Routage dans les réseaux de capteurs sans fil

II.1 Introduction :

Les protocoles du routage hiérarchiques utilisent la méthode de clustering en se chargeant généralement d'établir des CHs et de définir la manière dans laquelle les nœuds décident lequel CH est joindre. Le but principal de routage hiérarchique est de maintenir l'efficacité de consommation d'énergie des nœuds capteurs en les impliquant dans la communication multi-sauts avec un cluster particulier et en performant l'agrégation de données afin de diminuer le nombre de messages transmis à la destination. La formation des clusters est typiquement basée sur l'énergie réservée dans les nœuds capteurs et de la proximité de ceux-ci au CH [14]. Dans ce chapitre, nous nous intéressons particulièrement à la classe des protocoles hiérarchiques en présentant les deux grandes approches qui sont dérivées de ce type de protocoles, les différentes caractéristiques de ces derniers et enfin, nous exposons le protocole LEACH qui construit les clusters de manière complètement distribuée et le protocole PEGASIS, une version améliorée du protocole LEACH dont il forme une chaîne entre les nœuds de sorte que les nœuds reçoivent et communiquent juste des données des nœuds voisins.

II.2 Approches dérivées des protocoles hiérarchiques :

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 II-1. [15]

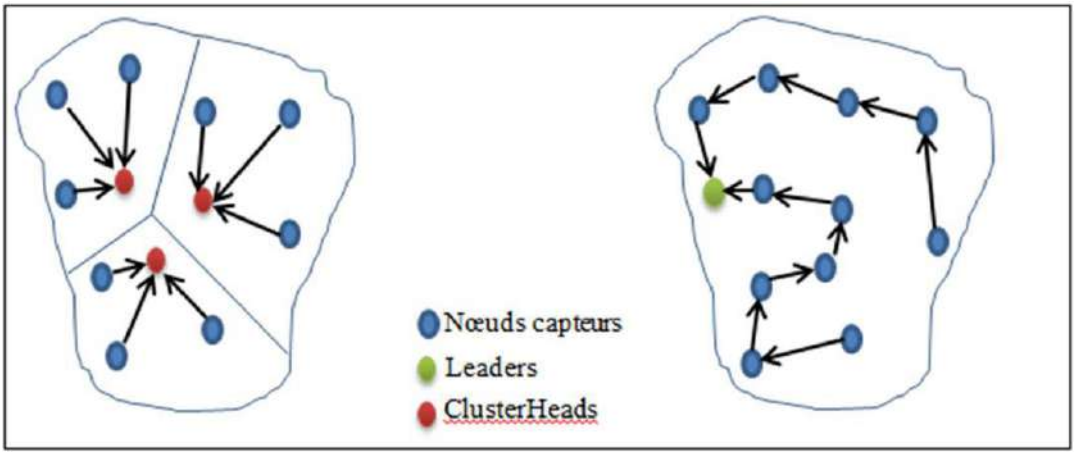


Figure II-2: Configurations pour les RCSF découpés.

II.3 Caractéristiques d'un protocole hiérarchique :

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

L'algorithme de clustering utilisé Plusieurs algorithmes sont proposés dans la littérature, un classement en trois types de ces algorithmes est proposé dans [16] 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.

II.4 Le protocole de routage LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) :

[17] LEACH est considéré comme étant le premier protocole de routage hiérarchique basé sur les clusters qui était proposé par Heinzelman et al. Comme étant l'un des algorithmes de routage hiérarchique le plus populaire pour les réseaux de capteurs sans fil. L'idée est de former des clusters de nœuds capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu, puis utiliser des CHs locaux pour atteindre la destination en optimisant la consommation d'énergie.

II.4.1 Architecture de communication de LEACH :

L'architecture de communication de LEACH consiste, de façon similaire aux réseaux cellulaires, à former des cellules basées sur l'amplitude du signal, et utiliser les têtes de cellules comme routeurs vers le nœud puits. Ces cellules sont appelées clusters, quant aux têtes, Les CHs sont choisis de façon aléatoire et périodique parmi les nœuds formant le cluster, en fonction de l'état de sa batterie. Puis, ils sont utilisés comme relais pour atteindre le puits suivant un algorithme qui utilise la rotation randomisée des têtes de groupe pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds de réseau [18]. Un nœud capteur décide quel cluster rejoindre en se basant sur la puissance des signaux reçus. A la formation des groupes. Comme montre la figure 11, tous les nœuds ordinaires transmettent leurs données à leur CH qui les agrègent et transmettent, à leur tour, à la BS selon une communication unicast (à un seul saut).

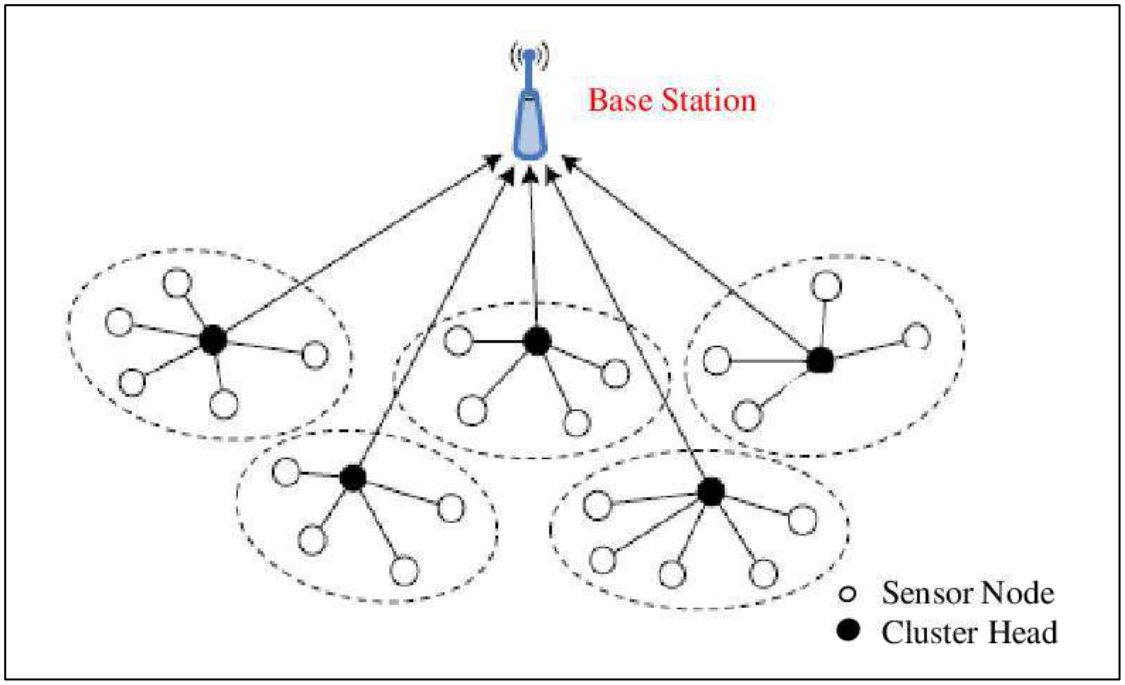


Figure II-3: Architecture de communication de LEACH. [45]

II.4.2 Principe de fonctionnement de LEACH : [15]

Le protocole LEACH prend pour hypothèse l'égalité des énergies résiduelles des capteurs lors du démarrage de fonctionnement du réseau. La vie du réseau est alors segmentée en rounds caractérisées par un choix de CH. Or, Chaque round est constitué de deux phases : la phase set-up qui est une phase d'initialisation et la phase steady-state, une phase de transmission.

II.4.2.1 Phase d'initialisation: [15]

La phase d'initialisation est composée de 3 sous phases : d'annonce, d'organisation des groupes et enfin d'ordonnancement :

II.4.2.1.1 Phase d'annonce: [15]

Initialement, lorsque les groupes sont créés, chaque nœud décide ou non de devenir un CH pour le tour courant. Cette décision est basée sur le suggéré pourcentage de CHs pour le réseau et le nombre de fois que le nœud a été un CH jusqu'ici. Cette décision est faite par le nœud en choisissant un nombre aléatoire entre 0 et 1.

Si le nombre est inférieur à un seuil T(n) le nœud devient un CH pour le cycle actuel. Le seuil est déni comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \dfrac{P}{1 - P \times \left(r \bmod \dfrac{1}{P}\right)} & Si\ n \in G \\ 0 & Si\ non \end{cases} \qquad \text{(II— 1)}$$

P : est le pourcentage souhaité de CH, c'est-à-dire choisi comme **P** = 0,05 pour une condition optimale.

R : est le tour courant.

G : est l'ensemble des nœuds qui n'ont pas été CHs lors des (1/P) tours précédents.

Chaque nœud est donné une probabilité égale de (1/P) de devenir CH afin de partager la charge de l'énergie. Ainsi, lors du commencement d'un tour, chaque nœud a une probabilité égale de devenir un CH.

Les nœuds qui étaient CHs doivent attendre jusqu'à (1/p) tours, donc augmenter la probabilité contribue à augmenter la chance pour les non CH de devenir CH. Les nœuds sont de nouveau admissibles à devenir CHs si et seulement si tous les nœuds ont obtenu une fois la qualité de CH.

Tout nœud après ((1/P) -1) tours sera de nouveau élu CH en supposant que chaque nœud possède et dissipe une quantité égale d'énergie à des fins de transmission.

Chaque nœud qui se sera désigné CH pour le tour courant diffuse un message d'initialisation vers le reste des nœuds l'entourant. Lors de cette phase d'initialisation, les CHs utilisent le protocole MAC (Media Access Control) CSMA (Carrier Sense Multiple Access). En utilisant le même niveau d'énergie, tous les CHs diffusent leur message d'initialisation qui contient l'ID du nœud et un entête distinguable. Les autres nœuds doivent maintenir leurs récepteurs à l'écoute afin d'entendre les messages diffusés par les CHs, et chacun de ces nœuds décide quel groupe rejoindre pour le tour courant en se basant sur la puissance des messages reçus de la part des CHs. Plus un nœud est proche du CH, plus le signal reçu sera puissant, indiquant à celui-ci qu'il aura besoin de moins d'énergie pour transmettre ses données vers le CH. Si deux signaux reçus ont la même puissance, alors le CH à rejoindre est choisi aléatoirement.

II.4.2.1.2 Phase d'organisation des groupes : [15]

Après que chaque nœud ait choisi quel groupe rejoindre, le CH doit être informé des nœuds composant son groupe. Chaque nœud non-CH transmet une requête de ralliement vers le CH

choisi en utilisant également un protocole CSMA MAC. Ce message ou requête de ralliement se compose de l'ID du nœud, de l'ID du CH et d'un entête. Durant cette phase, tous les CHs doivent maintenir leurs récepteurs allumés.

II.4.2.1.3 Phase d'ordonnancement : [15]

Après avoir reçu les requêtes de tous les nœuds l'ayant rejoint, le CH leur alloue chacun un tour dans un ordonnancement TDMA (Time Division Multiple Access) en se basant sur le nombre de nœuds. Et ce n'est que pendant le temps qui leur est alloué que les nœuds peuvent transmettre leurs données vers le CH.

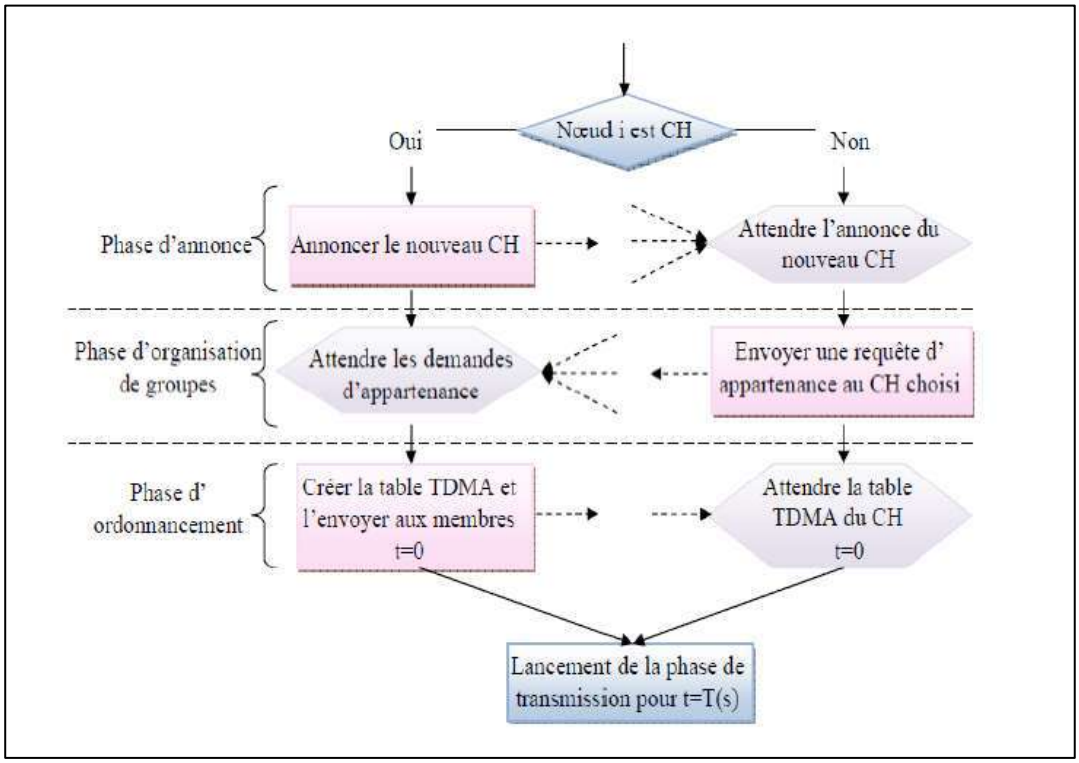


Figure II-4: Les opérations de la phase d'initialisation. [44]

II.4.2.2 Phase de transmission (Steady phase) : [15]

Une fois que les groupes se sont organisés et le programme TDMA mis en place, la transmission de données commence avec l'hypothèse que les nœuds ont toujours des données à transmettre, mais ces données ne sont envoyées à la station de base que pendant l'intervalle de temps alloué au nœud. Ce type de transmission requiert une énergie minimale pour la

transmission. Les autres nœuds membres du groupe, dont ce n'est pas le tour, doivent éteindre leurs transmetteurs afin d'éviter la dissipation inutile d'énergie. Mais le CH doit garder son récepteur allumé durant le tour courant pour recevoir toutes les données envoyées par les nœuds membres, après quoi il exécute les fonctions de traitement du signal afin de former un signal unique à transmettre. Cette agrégation de données est alors envoyée à destination de la station de base. Le coût en énergie pour le CH est toujours supérieur à celui des membres à cause des différentes actions qu'il doit entreprendre et à cause de l'énergie nécessaire pour transmettre vers la station de base qui se trouve plus loin que la distance qui le sépare des nœuds membres. Cela donne la phase d'état stable. Après que la transmission des données soit terminée, le prochain tour de sélection des CHs commence pour ce cycle là comme expliqué dans la phase d'initialisation.

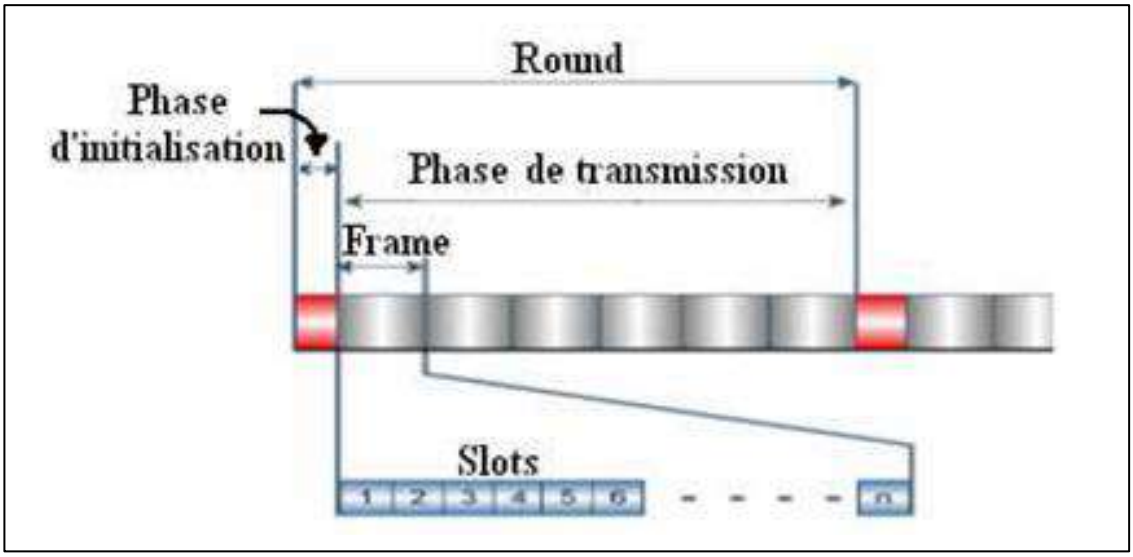


Figure II-5: Les phases d'un cycle du protocole LEACH. [44]

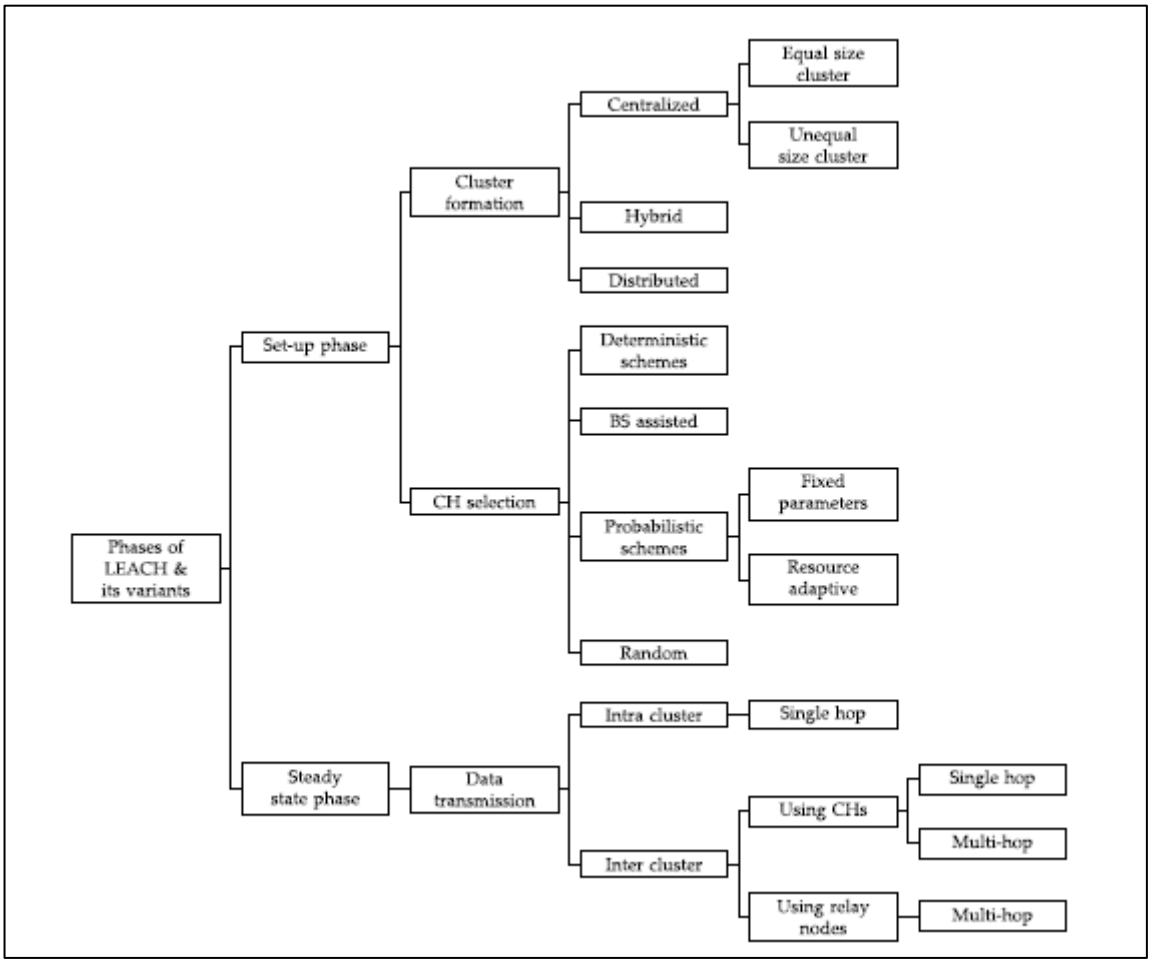


Figure II-6: Les phases du protocole LEACH et ses variantes dans le RCSF. [14]

II.4.3 Avantages et inconvénients de LEACH :

Bien que LEACH puisse augmenter la durée de vie du réseau en manipulant ses ressources tout en respectant plusieurs contraintes telle que la consommation d'énergie, il présente certaines limitations. Dans ce qui suit, nous citons quelques avantages et inconvénients du protocole LEACH.

II.4.3.1 Avantages :

Parmi les avantages du protocole LEACH [19,20] :

- Il fournit la scalabilité (évolutivité) dans le réseau en limitant la plupart des communications à l'intérieur des différents groupes (clusters) du réseau.

- Les cluster-heads agrègent ou fusionnent les informations rassemblées par les nœuds capteurs, ce qui aide à limiter le trafic produit dans le réseau. Ainsi, un réseau à grande échelle sans surcharge de trafic peut être déployé et une meilleure topologie préservant l'énergie peut être réalisée en comparaison à la topologie plate.
- La propriété de distributivité du rôle de CH entre les membres d'un cluster.
- Il ne requiert pas d'information sur la localisation des nœuds capteurs dans le réseau afin de former les groupes.

II.4.3.2 Inconvénients :

Le protocole LEACH présente les inconvénients suivants [21, 22] :

- Il s'appuie significativement sur les CHs plutôt que sur les nœuds membres du cluster pour communiquer avec la station de base. De ce fait, il encourt des problèmes de robustesse comme la défaillance des CHs.
- Les CHs ne sont pas uniformément distribués dans le cluster, ce qui signifie que les CHs peuvent se situer sur les bords du cluster. Par conséquent, certains nœuds n'auront pas de CH dans leurs voisinages.
- Il n'y a pas de communication intergroupe dans le réseau car les CHs communiquent directement avec la station de base. Ce processus nécessite une grande gamme de puissance de transmission dans le réseau. C'est pour cela que LEACH n'est pas le mieux adapté pour les réseaux de grande envergure qui requièrent une communication à un seul saut avec la station de base.
- Les CHs les plus éloignés de la station de base meurent rapidement par rapport à ceux qui sont proches de la station.
- 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 T(n).

II.5 Chain-based approach (approche à chaîne) :

Dans cette approche [23], le principe de clustering est abandonné, les nœuds du réseau sont organisés de façon à former une grande chaîne de proches voisins, où un seul nœud est sélectionné pour transmettre au sink. En fait, l'idée de formation de chaîne a été proposée pour la première fois dans l'algorithme PEGASIS [24, 25] (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems).

II.5.1 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) :

[18] Un perfectionnement meilleur que celui du protocole LEACH a été proposé. Le protocole PEGASIS est un protocole qui est basé sur des chaînes, proche de l'optimal. L'idée de base du protocole est que, dans le but de prolonger la durée de vie du réseau, les nœuds vont être organisés de telle sorte à ce qu'ils forment une chaîne, n'auront ainsi besoin de communiquer qu'avec seulement leurs voisins les plus proches et se relaient dans la communication avec la station de base. Quand le cycle de tous les nœuds communiquant avec la station de base aura fini, un nouveau cycle commence et ainsi de suite. Ceci réduit l'énergie exigée pour transmettre des données par cycle du moment que la dissipation d'énergie est diffusée uniformément au-dessus de tous les nœuds. Par conséquent, PEGASIS a deux principaux objectifs. D'abord, augmenter la durée de vie de chaque nœud en employant des techniques de collaboration et augmenter par conséquent la durée de vie du réseau. En second lieu, permettre seulement la coordination locale entre les nœuds voisins de sorte que la largeur de bande consommée dans la communication soit réduite. A la différence de LEACH, PEGASIS évite la formation de grappes et n'utilise qu'un seul nœud dans une chaîne afin de transmettre à la BS, au lieu d'en utiliser plusieurs.

Dans PEGASIS, pour localiser le voisin le plus proche, chaque nœud utilise la force du signal pour mesurer la distance vers tous les nœuds voisins, et ajuster par la suite la force du signal de telle sorte que seul un nœud peut être entendu. La forme agrée des données sera envoyée à la station de base par n'importe quel nœud dans la chaîne et les nœuds dans cette dernière vont se prendre en relais dans la transmission à la station de base.

II.5.2 Approche de construction de chaîne :

[18] 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 algorithme). 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 éloigné de la BS (choisir un nœud aléatoirement s'il y a une cravate). 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 (avec une cravate brisée arbitrairement) 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 14 montre le nœud c0 se reliant au nœud c1, le nœud c1 se reliant au nœud c2, et le nœud c2 se reliant au nœud c3, dans cet ordre. Quand un nœud meure, la chaîne est reconstruite de la même manière pour dévier le nœud mort.

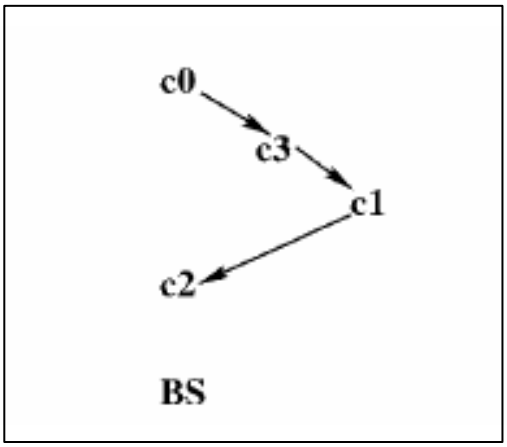


Figure II-7: Construction de chaîne en utilisant l'algorithme Avide. [15]

Pour collecter des données des nœuds capteurs dans chaque cycle, chaque nœud reçoit les données d'un voisin, les fusionne avec les siennes, et transmet à un autre voisin dans la chaîne. Il faut noter que ce nœud i serait à une certaine position aléatoire j sur la chaîne.

Les nœuds se relient dans la transmission à la BS et PEGASIS va utiliser le « mod N » du numéro de nœud i (N représente le nombre de nœuds) afin de transmettre à la BS dans le cycle i. Ainsi, le leader dans chaque cycle de communication sera à une position aléatoire sur la chaîne.

Chaque cycle de collecte de données peut être lancé par la BS avec un signal de balise qui synchronisera tous les nœuds capteurs. Puisque tous les nœuds connaissent leurs positions sur la chaîne, PEGASIS peut employer une approche de slot de temps (TDMA) pour la transmission des données. Dans le **i** ème cycle de collecte de données, le nœud (i-1) sera leader.

Le nœud c_0 de fin transmettra ses données au nœud c_1 dans le premier slot, c_1 fusionne et transmet les données dans le deuxième slot, et ainsi de suite jusqu'à ce que le nœud leader soit atteint. Dans les slots suivants, les transmissions de données ont lieu depuis le nœud $c_{(n-1)}$ et se déplacent vers le nœud leader de la bonne extrémité de la chaîne. Finalement, dans le n ième slot, le leader transmet les données à la BS.

Alternativement, dans un cycle donné, PEGASIS peut utiliser une approche de déplacement de jeton à contrôle simple lancée par le leader pour commencer la transmission des données des extrémités de la chaîne. Le coût est très petit du fait que la taille du jeton est très petite.

Dans la figure suivante, le nœud c_2 est le leader et va passer le jeton le long de la chaîne commençant au nœud c_0. Le nœud c_0 passera ses données au nœud c_2. Après que le nœud c_2 ait reçu les données du nœud c_1, il passera le jeton au nœud c_4, et le nœud c_4 passera ses données au nœud c_2 avec fusion des données le long de la chaîne.

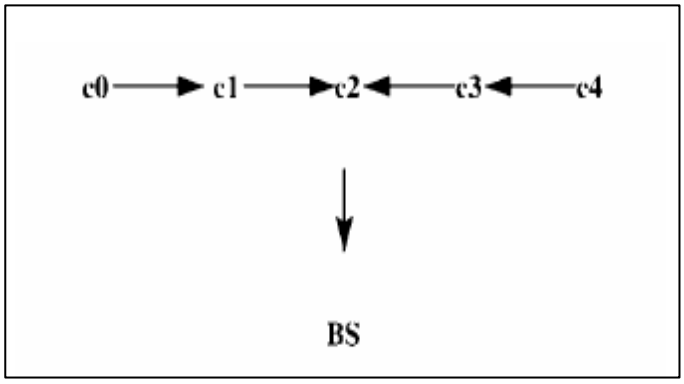


Figure II-8: Approche de dépassement de jeton. [15]

PEGASIS exécute la fusion de données à chaque nœud excepté les nœuds de fin de chaîne. Chaque nœud va fusionner les données de ses voisins avec les siennes afin de générer un paquet simple et les transmet par la suite à son autre voisin (S'il en a deux). Dans l'exemple précédent, le nœud c_0 va transmettre ses données au nœud c_1. C_1 fusionne les données de c_0 avec les siennes et transmet ensuite au leader. Après que c_2 ait passé le jeton à c_4, le nœud c_4 transmet ses données à c_3. Le nœud c_3 fusionne ses données avec celles de c_4 et les transmet ensuite au leader. Le nœud c_2 attend de recevoir les données de ses deux voisins et fusionne alors ses données avec les leurs. Finalement, le nœud c_2 transmet un message à la BS. Ainsi, dans PEGASIS, chaque nœud va recevoir et transmettre un paquet de données dans chaque cycle et sera le leader une

fois chaque N cycles. En addition, les nœuds reçoivent et transmettent des paquets de contrôle de jeton très petits.

Dans la formation de la chaîne, il est possible que certains nœuds puissent relativement avoir des voisins distants le long de cette dernière. De tels nœuds vont dissiper plus d'énergie dans chaque cycle, comparé à d'autre capteurs. L'auteur a amélioré la performance de PEGASIS en ne permettant pas à de tels nœuds de devenir leaders. L'auteur a accompli ceci en plaçant un seuil sur la distance voisine pour être leaders. Il peut être capable d'améliorer légèrement la performance de PEGASIS en appliquant un seuil adaptatif au niveau d'énergie restante dans les nœuds. Chaque fois qu'un nœud meurt, la chaîne sera reconstruite et le seuil peut être changé afin de déterminer quel nœud peut être leader.

Le protocole PEGASIS s'améliore par rapport à LEACH par l'économie énergie dans plusieurs étapes. En premier lieu, dans la collecte locale, les distances que la plupart des nœuds transmettent sont beaucoup moins par rapport à la transmission au leader dans LEACH. En second lieu, la quantité de données à recevoir par le leader est deux messages au plus au lieu de 20 (20 nœuds par grappe dans LEACH pour un réseau de 100 nœuds). Finalement, seul un nœud transmet à la BS dans chaque cycle de communication.

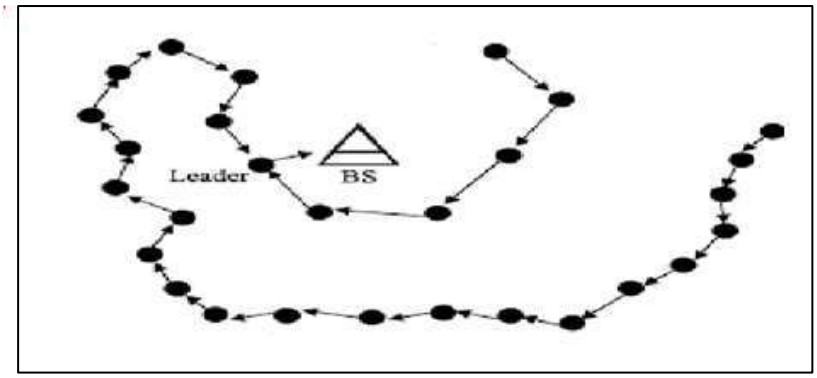


Figure II-9: Le protocole PEGASIS. [44]

II.5.3 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. Et voici quelques avantages et inconvénients de ce protocole.

II.5.3.1 Avantages :

- Utilisation d'agrégation des données qui minimise le nombre des transmissions et qui conserve l'énergie.
- Elimination de la phase de la construction des clusters pour chaque round qui génère une surconsommation d'énergie importante.

II.5.3.2 Inconvénients :

- Bien que l'Overhead du clustering soit évité, PEGASIS exige toujours un ajustement dynamique de la topologie puisqu'un nœud devrait connaître le niveau d'énergie de ses voisins avant de relayer ses données.
- Ce protocole atteint rapidement ses limites de fonctionnement dans le cadre des réseaux fortement denses.
- Le délai de livraison des données est très important lorsque la chaine formée est très longue. Et, le nœud qui transmet les données vers le puits peut devenir un point de congestion du réseau [26].

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a parlé du routage hiérarchique, qui vise à rendre les protocoles plus évolutifs tout en restant plus économes en énergie. Et cela afin de couvrir une plus grande zone de captage.
Ainsi, nous avons identifié le protocole LEACH qui suit une approche par groupe, et le protocole PEGASIS, qui est un protocole par chaîne.
Ceci nous permet de passer au dernier chapitre, qui est le cœur de notre évaluation, la simulation de deux catégories de protocoles, l'un basé sur les groupes, à savoir LEACH, et l'autre basé sur les chaînes, à savoir PEGASIS essaie de comparer les résultats en termes de consommation d'énergie et de durée de vie du réseau.

CHAPITRE III

Évaluation des deux approches en fonction de la mobilité de Sink

III.1 Introduction :

Prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs sans fil est devenu un véritable challenge car les capteurs sont équipés de batteries à capacité limitée. De plus, la recharge ou le remplacement reste impossible lorsque les capteurs sont déployés dans des environnements difficiles et inaccessibles. De ce fait, la durée de vie du réseau dépend de la durée de vie de la batterie. C'est-à-dire qu'elle est étroitement liée à la façon dont l'énergie est consommée.

Dans ce chapitre nous présenterons et analyserons les résultats de simulations et d'expérimentations obtenus lors de la mise en place des protocoles LEACH et PEGASIS, on va comparer par simulation sur Matlab ces deux protocoles en ajoutant le facteur de mobilité de la station de base (le Sink) dans les deux protocoles (LEACH mobile et PEGASIS mobile), donc nous allons faire une comparaison entre quatre types de protocole LEACH, LEACH mobile, PEGASIS et PEGASIS mobile.

Nous commencerons par argumenter le choix du simulateur qui sera utilisé, ensuite, nous parlerons du modèle d'énergie utilisé pour la simulation des protocoles avant de passer à la l'interprétation des résultats obtenus.

III.2 Environnement de travail :

III.2.1 Les outils de simulation : [27]

Lors du développement d'un réseau de capteurs sans fil pour une application réelle, la simulation par logiciel de son comportement et de ses performances est essentielle.

Selon Shannon [28], la simulation est « *le processus de modélisation d'un système réel sur lequel on opère des expérimentations afin de comprendre son comportement et/ou d'évaluer plusieurs stratégies opérationnelles sur ce système* ». Cela veut dire qu'une simulation est une représentation fidèle d'un système réel avec des hypothèses initiales qui permettent de réduire la complexité de la modélisation et qui la rendre faisable techniquement. La simulation est souvent utilisée lorsqu'aucune modélisation mathématique n'est possible vu la complexité et la grandeur du système étudié.

Plusieurs simulateurs de RCSFs ou de simulateurs de réseaux adaptés aux RCSFs ont été développés. Par exemple :

- **Castalia Simulator :** simulateur spécialisé uniquement dans les RCSFs ; développé par le laboratoire NICTA et basé sur la plateforme du simulateur OMNeT++. Ce dernier est un simulateur plus général de réseaux.

- **MiXiM :** simulateur basé également sur OMNeT++ et spécialisé dans la simulation des RCSFs.

- **TOSSIM :** simulateur de RCSFs développé pour simuler les plateformes utilisant le système d'exploitation TinyOS. Ce simulateur est performant pour modéliser le comportement des couches d'application, mais présente de faibles performances pour simuler le comportement des protocoles MAC.

- **WSNet :** simulateur de RCSFs qui peut être utilisé avec un autre outil de simulation WSim pour générer des codes pour les microcontrôleurs de capteurs.

-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.….

Pour faire plus simple, le développement de logiciel est l'étude, la conception, la mise au point, la transformation, la maintenance et l'amélioration des logiciels [30]. Ces diverses étapes sont possibles grâce à un langage informatique spécifique ou plutôt grâce à plusieurs langages.

III.2.2 Le simulateur Matlab :

MATLAB (*MATrix LABoratory*) est un langage de programmation simulé par un environnement de développement du même nom, il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The Math Works, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++ et Java. Une interface en ligne de commande est un des éléments du bureau MATLAB qui permet d'exécuter

des commandes simples. Des séquences de commandes peuvent être sauvegardées dans un fichier texte typiquement avec l'éditeur MATLAB, sous la forme d'un « script » ou encapsulé dans une fonction. [30] [31]

Dans notre simulation on a utilisé la version R2015a (8.5.0.197613).

III.2.3 Modèle de consommation d'énergie :

Le Choix du modèle radio est essentiel car les hypothèses sur les caractéristiques radio, y compris la dissipation d'énergie due à l'émission ou à la réception auront un impact direct sur la performance d'un protocole de routage. De ce fait, le modèle radio de consommation d'énergie introduit par W. Heinzelman et al. Dans [32] est repris dans l'élaboration de la simulation de ce protocole.

La Figure III-1 suivante illustre ce modèle de consommation d'énergie :

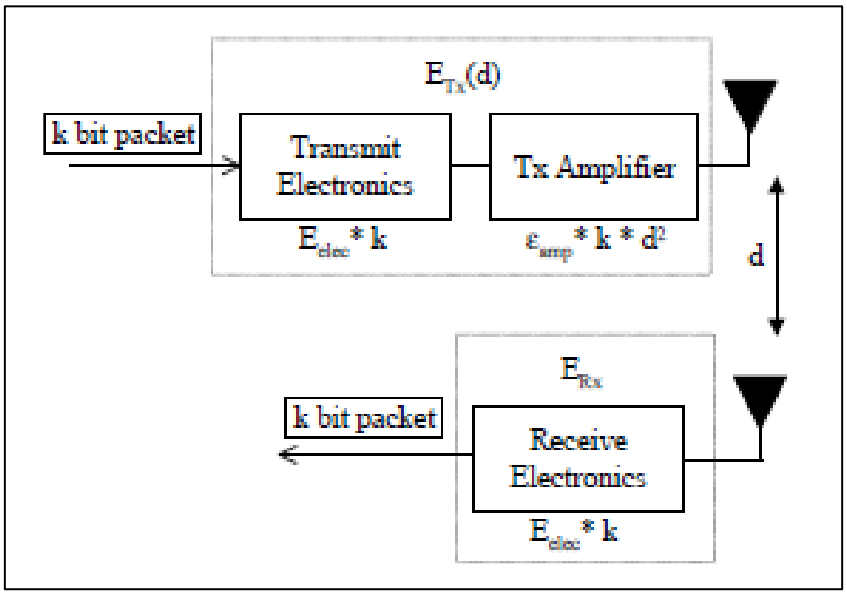


Figure III-2: Modèle radio introduit par W. Heinzelman et al. [32]

- Pour émettre un message de **k** bits vers un récepteur loin de **d** mètres, l'émetteur radio **ET_x** consomme :

$$ET_X(k,d) = ET_{x_{elec}}(k) + ET_{x_{amp}}(k,d) \qquad (III—1)$$

$$ET_X(k,d) = (ET_{elec} * k) + (ET_{amp} * k * d^2) \qquad (III—2)$$

Eelec et **Eamp** représentent respectivement l'énergie dissipée pour faire fonctionner le circuit électronique de l'émetteur ou du récepteur (avec **ETxelec** = **ERxelec** = **Eelec**) et l'énergie d'amplification.

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

$$ER_x(k) = ER_{x_{elec}}(k) \qquad (III—3)$$

$$ER_x(k) = E_{elec} * k \qquad (III—4)$$

Lorsque le CH reçoit des données en provenance des membres de son cluster, ce dernier procède à leur agrégation afin de produire un seul signal à émettre vers la SB. Lors de cette opération, la quantité d'énergie consommé est équivalente à **EAg** (énergie d'agrégation).

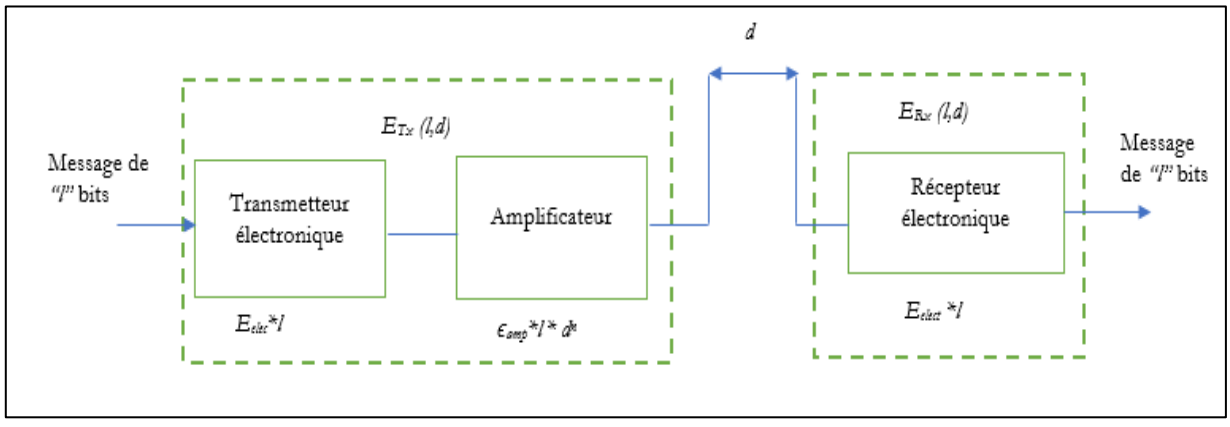


Figure III-3: Modèle de consommation d'énergie. [44]

III.3 La mobilité dans les RCSF :

Un Réseau de Capteurs Sans Fil Mobile (RCSFM) ou Mobile Wireless Sensor Network (MWSN) est défini comme un réseau de capteurs sans fil dans lequel quelques éléments (le Sink, nœuds capteurs, nœuds collecteurs, nœuds relais) ou tous les éléments sont mobiles [33]. Cette mobilité est matérialisée en attachant ces éléments à des robots mobiles, aux êtres humains, aux animaux, aux véhicules, etc.., selon leurs domaines d'application.

III.3.1 Stratégie de la mobilité du Sink pour la collecte de données : [34]

Il existe trois stratégies de mobilité, à savoir la mobilité aléatoire, la mobilité fixe et la mobilité contrôlée :

III.3.1.1 La mobilité aléatoire :

Dans cette stratégie, le Sink suit un chemin aléatoire dans le champ de déploiement, par exemples le Sink est attaché à un animale. Habituellement, le Sink utilise une stratégie d'extraction (pull) pour la collecte de données à partir des nœuds capteurs. Dans une stratégie d'extraction, un nœud capteur transmet ses données uniquement lorsque le Sink lance une demande, alors que dans une stratégie d'envoie (push), un nœud capteur envoie ses données d'une manière proactive au Sink. La collecte de données en mono-saut entraîne la réduction de la consommation d'énergie, car il n'existe pas d'énergie consommée par les nœuds capteurs pour les fonctions de routage et de traitement des données. Cependant, il peut également entraîner une collecte de données incomplète, car il n'y a aucune garantie que le Sink atteindra tous les nœuds capteurs dans le champ de déploiement ou il faudra plus de temps pour le faire. Dans ce cas, le Sink peut être programmé pour collecter des données provenant de tous les nœuds capteurs à travers des communications multi-saut. La Figure III-4 montre les stratégies de collecte de données dans le cas d'une mobilité aléatoire du Sink.

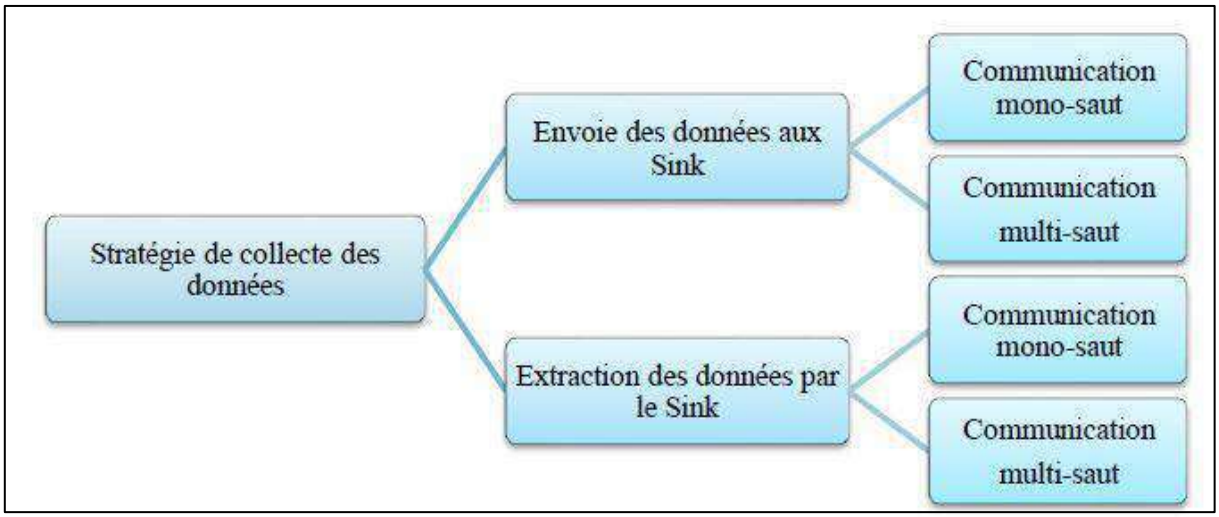


Figure III-5: Stratégie de collecte de données dans le cas d'une mobilité aléatoire du Sink . [34]

Si la collecte de données n'est pas initiée par le Sink, mais suite à une stratégie d'envoi, un surcoût dans le cas de la mobilité aléatoire du Sink se produit en raison de la difficulté de suivre la position actuelle du Sink et d'adapter les chemins de routage au Sink dans le cas d'une communication multi-saut, ce qui entraîne une dissipation d'énergie supplémentaire. Pour résoudre ce problème, les auteurs de [35] ont proposé d'utiliser l'écoute abusive (*Overhearing*) pour suivre la position aléatoire du Sink. Ils proposent que le Sink mobile transmette périodiquement un message (balise) contenant sa position. Chaque fois qu'un nœud capteur voisin du Sink reçoit ce message, il met à jour la position du Sink dans les paquets transmis par la suite. Chaque nœud capteur qui reçoit le paquet des nœuds capteurs voisins du Sink mettra également à jour les coordonnées de la position du Sink, éventuellement tous les nœuds capteurs auront mis à jour les coordonnées de la position du Sink pour le routage.

III.3.1.2 La mobilité fixe :

Dans cette stratégie, le Sink est programmé pour suivre un chemin fixe prédéterminé. Ce chemin peut être la périphérie de la zone de déploiement, une ligne droite, un chemin circulaire ou une zone de rendez-vous qui consiste en un sous-ensemble de nœuds destinés à collecter les données des nœuds capteurs voisins. La couverture du champ de déploiement doit être garantie par une stratégie appropriée pour déterminer les chemins de routage des paquets de données [36].

III.3.1.3 La mobilité contrôlée :

Ce type de mobilité se réfère à des schémas où la mobilité du Sink est contrôlée et prédéterminée off-line ou bien guidée et déterminée on-line en fonction d'un paramètre, comme par exemple l'énergie résiduelle des nœuds capteurs, ou une fonction objective prédéfinie ou encore des événements observables prédéfinis [36] la figure III-6 montre ces différents cas.

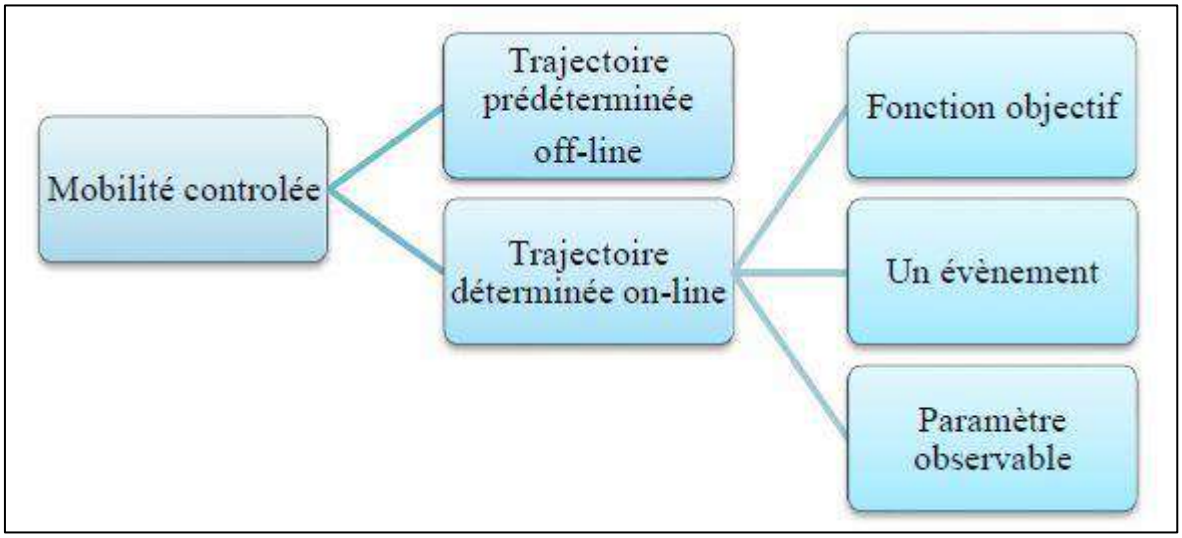


Figure III-6: Stratégie de collecte de données dans le cas d'une mobilité contrôlée du Sink [34].

III.3.2 La mobilité dans le protocole LEACH :

Pour la manière de déplacement de la station de base (Sink) dans le protocole LEACH mobile, on a choisi un mouvement aléatoire de Sink dans chaque round de simulation, d'une façon où elle peut se trouver sur n'importe quel endroit du réseau en fonction de TDMA.

III.3.3 La mobilité dans le protocole PEGASIS : [37]

III.3.3.1 Modèle du réseau :

Nous considérons une zone de 100m x 100m pour le RCSF. Dans notre scénario, 100 nœuds sont déployés dans lesquels 25, 25 nœuds sont divisés aléatoirement dans une zone également espacée en utilisant une distribution aléatoire uniforme. Nous supposons que la mobilité du Sink est telle que Sink se déplace au centre des régions équidistantes et complète sa trajectoire

complète en un tour complet. Le Sink reste à l'emplacement du séjour pendant une durée spécifique appelée temps de séjour.

Nous ignorons l'effet de l'interférence du signal dans le canal sans fil. Nous utilisons un modèle radio de premier ordre pour calculer la consommation d'énergie lors de la transmission de données par les capteurs.

$$\boldsymbol{E_{tx}(k,d) = E_{tx} \times elec(k) + E_{tx} \times amp(k,d)} \qquad \textit{(III—5)}$$

$$\boldsymbol{E_{rx}(k) = E_{rx} \times elec(k)} \qquad \textit{(III—6)}$$

$$\boldsymbol{E_{DA}(k) = E_{DA} \times elec(k)} \qquad \textit{(III—7)}$$

Selon le modèle radio du premier ordre, E_{elec} = 50 nJ/bit est consommé par la radio pour faire fonctionner les circuits d'émission ou de réception et E_{amp} = 100 pJ/bit/m2 est nécessaire pour l'amplificateur d'émission, où *k* est le nombre de bits et *d* la distance. Le circuit de l'émetteur consomme également E_{DA} = 50 nJ/bit pour agréger les données reçues par les nœuds. Sink divise la zone en 4 régions égales dans lesquelles les nœuds sont déployés selon une distribution aléatoire uniforme. Sink se déplace dans ces régions 1 par 1, avec la vitesse particulière et complète son parcours en un tour. Chaque capteur compresse les bits reçus par un facteur d'agrégation de données (DA) de 0,6 en utilisant un échantillonnage compressif distribué.

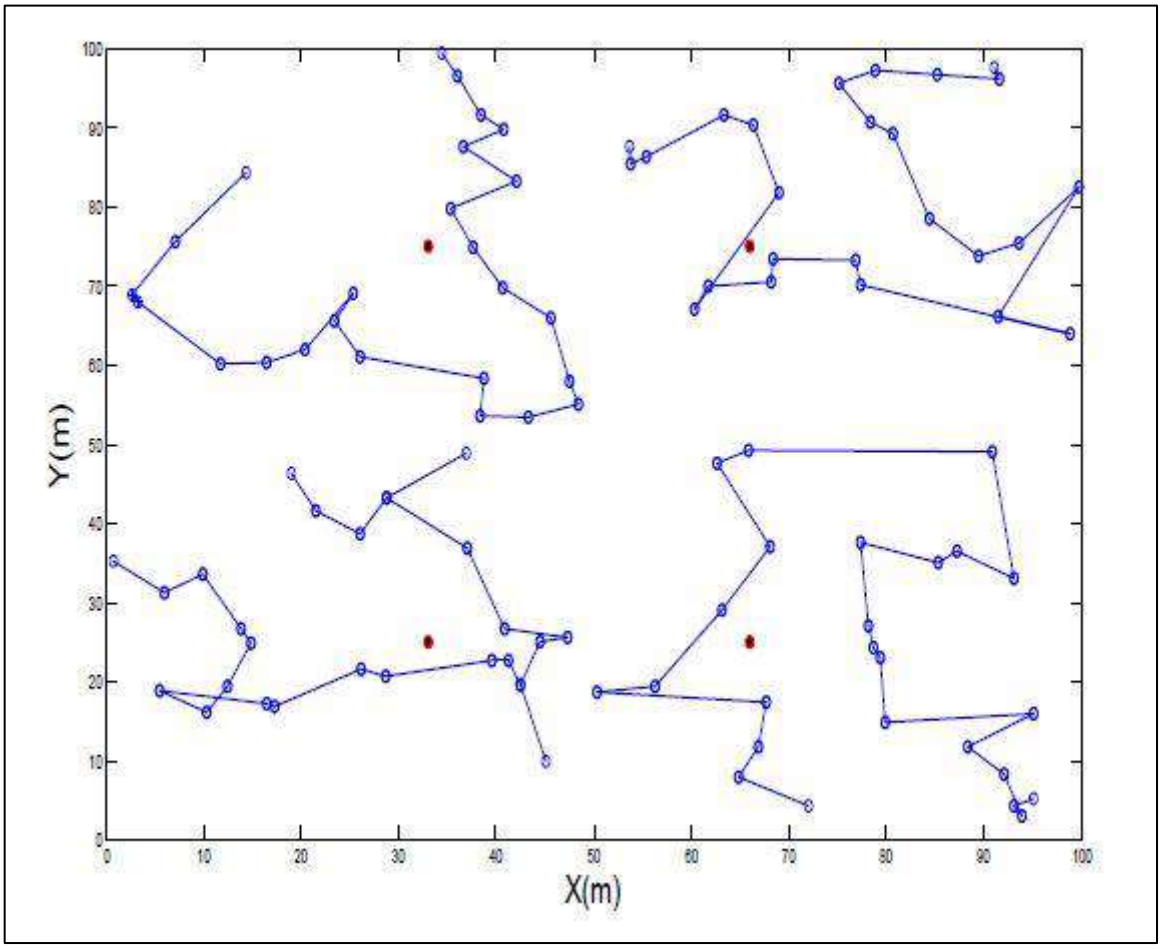


Figure III-7: Formation de chaînes et lieux de séjour dans le MIEEPB. [37]

III.3.3.2 Construction de multi-chaînes : [37]

La procédure de construction des chaînes est la même que pour PEGASIS. Dans MIEEPB, il y a 4 chaînes dans notre proposition, donc la formation de la chaîne se fait de la manière suivante.

- Sink envoie un paquet hello à tous les nœuds pour obtenir des informations sur tous les nœuds.
- Sink trouve le nœud le plus éloigné en comparant les distances de tous les nœuds par rapport à lui-même dans la première région.
- La formation de la chaîne commence à partir du nœud i le plus éloigné, également appelé nœud final. Le nœud final trouve le nœud le plus proche de lui-même.

- Par conséquent, chaque nœud trouve la distance entre lui-même et le nœud le plus proche qui n'est pas connecté à la chaîne, puis se connecte avec lui en suivant la même approche.
- Dans la chaîne, chaque nœud i recevant des données du nœud j, agit comme un parent du nœud j, tandis que le nœud j agit comme un enfant du nœud i.

Le même processus de formation de chaîne se répète dans les 4 régions et ainsi, 4 chaînes sont créées.

III.3.3.3 Sélection des CHs : [37]

Dans cette section, la chaîne choisit le premier CH sur la base du poids Q attribué à chaque nœud. Chaque nœud calcule son poids Q en divisant son énergie résiduelle par sa distance à la station de base. Le réseau compare les poids de tous les nœuds de la chaîne. Le réseau calcule le nœud ayant le poids le plus élevé et le juge comme leader primaire de la chaîne. Après la formation de la chaîne, chaque nœud i calcule sa distance dp avec le nœud parent, puis la compare avec la distance dbs avec le puits. Si la distance ultérieure est inférieure ($dp \geq dbs$), le nœud i agit comme une tête de chaîne secondaire et envoie les données collectées au Sink, au lieu de les transférer au nœud parent.

$$\boldsymbol{Q_i = E_i \div D_i} \qquad \textbf{\textit{(III—8)}}$$

Où Ei désigne l'énergie résiduelle du nœud de capteur i tandis que Di indique la distance entre le nœud de capteur i et Sink.

III.3.3.4 Mobilité du Sink : [37]

Nous considérons que Sink a une quantité illimitée d'énergie et que sa mobilité est utilisée pour maximiser la durée de vie du réseau. Le Sink se déplace dans le RCSF selon une trajectoire fixe, se déplace d'une région à l'autre et attend pendant un temps de séjour à l'emplacement de séjour. Le temps de séjour est l'intervalle de temps pendant lequel Sink reste à une position spécifique et reçoit des données des CHs. L'emplacement de séjour est l'endroit où Sink reste temporairement pour la collecte de données. Dans notre proposition, les lieux de séjour sont (33m, 25m), (33m, 75m), (66m, 25m) et (66m, 75m).

Nous proposons un algorithme évolutif pour le Sink mobile contraint par la distance afin de traiter les problèmes mentionnés ci-dessus. Il se compose des trois étapes suivantes. Le profil du temps de séjour à chaque emplacement de séjour est d'abord calculé. Sur la base des profils

de temps de séjour, il commence ensuite la tournée de séjour pour le Sink mobile en identifiant les emplacements de séjour de (33m, 25m), (33m, 75m), (66m, 25m), (66m, 75m) soumis aux contraintes spécifiées. Dans la troisième étape, il calcule le temps de séjour total en un tour. Le récepteur calcule le temps de séjour total des 4 emplacements de séjour en un tour comme suit

$$\boldsymbol{T_s = \sum_{i=1}^{4}(\tau_i)} \qquad \textit{(III—9)}$$

où Ts est le temps de séjour total d'un parcours. Le but est d'augmenter la durée du réseau en augmentant le temps de séjour total, tandis que l'objectif est de garantir une transmission cohérente des données entre Sink et les CHs. Par conséquent, le problème est de maximiser :

$$\boldsymbol{\sum_{i=1}^{4}(\tau_i)} \qquad \textit{(III—10)}$$

Sous réserve :

$$\boldsymbol{x_{ij} = \begin{cases} D & si\ i = j \\ 0 & si\ non \end{cases}} \qquad \textit{(III—11)}$$

Où x_{ij} est le nombre de bits transmis entre les CHs et Sink ayant des emplacements potentiels i et j, $1 \leq i$, $j \geq 4$. D est le total des données transférées entre CHs et Sink en temps de séjour. Les emplacements potentiels dépendent des 4 régions uniformes. Les CHs d'une même chaîne, acheminent les données vers Sink à un seul emplacement de séjour en utilisant le TDMA.

III.4 Résultats de simulation :

III.4.1 Paramètres de simulation :

On a choisi comme paramètres les données du tableau suivant, avec :

E_{TX} : Consommation d'énergie du circuit de l'émission (transmission d'un bit).

E_{RX} : Consommation d'énergie du circuit de réception (transmission d'un bit).

E_{fs} : Facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission inferieure à la distance seuil do.

E_{mp} : Facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission supérieure à la distance seuil do.

E_{DA} : Facteur d'énergie consommée pour l'agrégation de données (un bit).

Tableau III-1: Paramètres de simulation.

Paramètres	Contexte	
Protocole	LEACH, PEGASIS	LEACH mobile, PEGASIS mobile
Surface de déploiement	100m x 100m	100m x 100m
Nombre des nœuds	100	100
Position de Sink	(50 ; 50)	Aléatoire
Déploiement de nœuds	Aléatoire	Aléatoire
Taille d'un paquet de donnée	4 Kbits	4 Kbits
Énergie initiale du nœud E_0	0,5 J	0,5 J
E_{elec} $(E_{TX}\ et\ E_{RX})$	50 x 10^{-9} J/bit	50 x 10^{-9} J/bit
E_{fs}	10 x 10^{-12} J/bit/m²	10 x 10^{-12} J/bit/m²
E_{mp}	0,0013 x 10^{-12} J/bit/m²	0,0013 x 10^{-12} J/bit/m²
E_{DA}	5 x 10^{-9} J/bit	5 x 10^{-9} J/bit

III.4.2 Analyse des résultats :

Nous avons effectué plusieurs simulations des programmes de routage LEACH, PEGASIS, LEACH mobile et PEGASIS mobile, et on a gardé les mêmes paramètres de simulation cités dans le tableau III-2. Les résultats des figures ci-après représentent la moyenne de ces simulations.

III.4.2.1 Nombre des nœuds vivants (Stabilité du réseau) :

Dans le but d'évaluer la durée de vie du RCSF, plusieurs itérations (plus de 3000 round) sont exécutées. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés par le graphe de la Figure III-8 suivante :

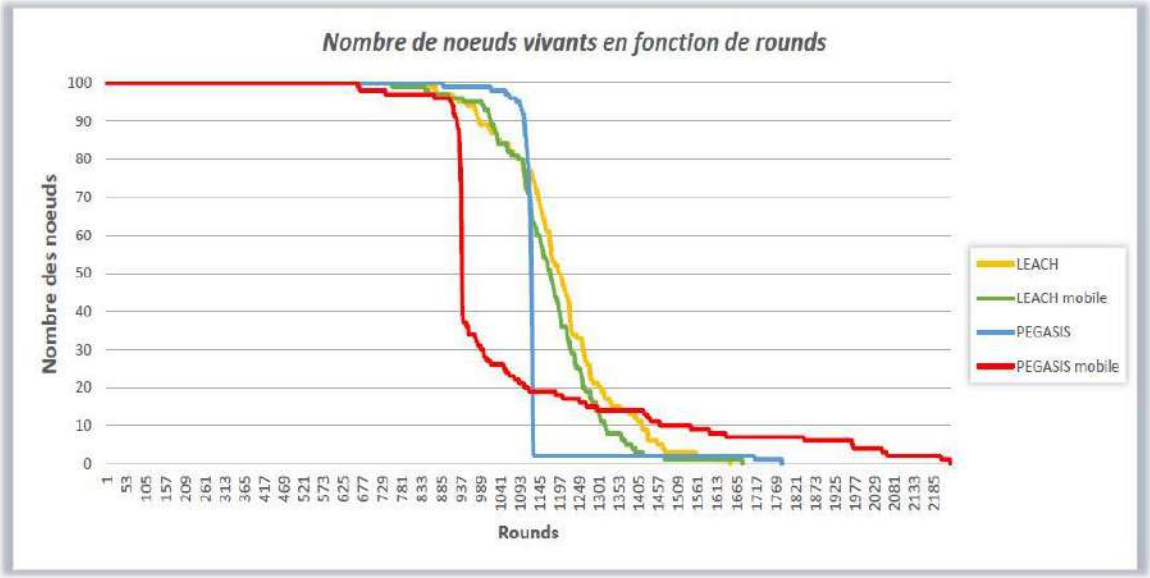


Figure III-9: Nombre de nœuds vivants en fonction de rounds.

Et voici le tableau qui exprime le round du premier et dernier nœud qui épuise son énergie dans chaque protocole:

Tableau III-3: Le premier et le dernier nœud mort de chaque protocole.

Protocole	Round of First Dead	Round of Last Dead
LEACH	773	1649
LEACH mobile	756	1682
PEGASIS	892	1786
PEGASIS mobile	667	2231

Le réseau utilisant le protocole LEACH mobile expire après 756 rounds de simulation et c'est presque le même dans LEACH après 773, ce qu'on peut considère qu'ils ont une même durée de vie. Au niveau du protocole LEACH, la durée de vie du réseau est faible car dans ce dernier, les nœuds s'épuisent plus rapidement, compte tenu de la distance entre les CH et leurs membres d'une part et la distance entre les CH et la station de base (Sink). En effet, les phases d'initialisation, c'est-à-dire les phases de formation des groupes, qui génèrent un grand nombre

de messages de contrôle, auront lieu à chaque nouveau tour impliquant une consommation d'énergie supplémentaire.

Le protocole PEGASIS mobile ne parvient pas à allonger le temps d'utilisation par rapport aux autres protocoles car il perd l'énergie dans la partition du réseau en 4 régions. Et ce qu'il paraît le protocole PEGASIS a la plus longue durée de vie, vue que les performances fournies par le protocole PEGASIS sont obtenues en supprimant la surcharge introduite par le clustering dynamique dans LEACH et LEACH mobile.

PEGASIS surpasse les trois protocoles en terme de stabilité. Et concernant le protocole où le réseau reste actif à partir du dernier nœud c'est PEGASIS mobile qu'on peut trouver 2231 rounds jusqu'au dernier nœud éteindre, d'une différence de 600-700 rounds par rapport aux LEACH, LEAHC mobile et PEGASIS.

III.4.2.2 Énergie résiduelle :

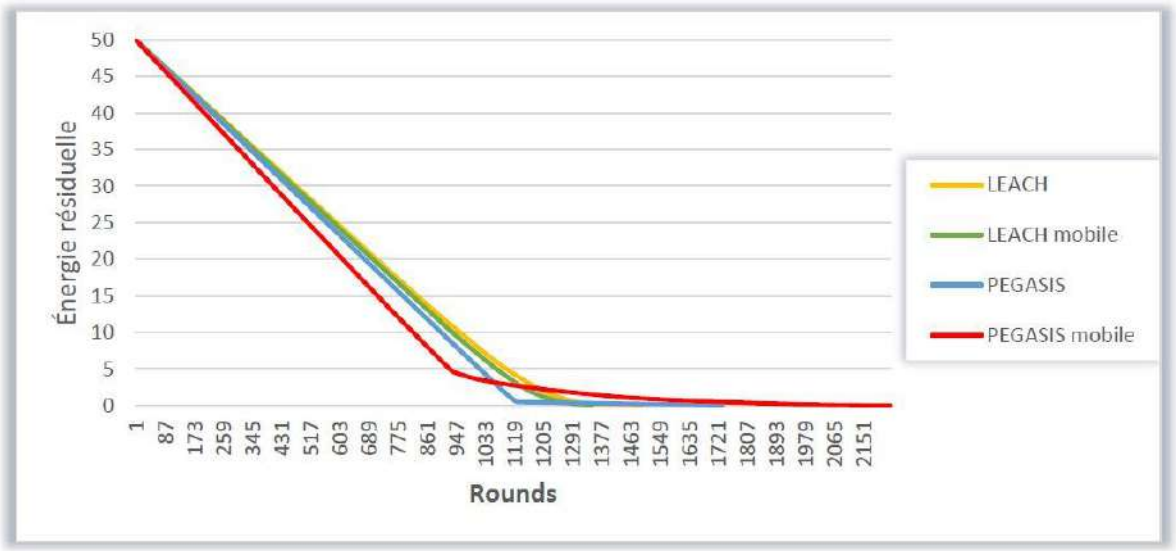


Figure III-10: L'énergie résiduelle.

La Figure III-11 présente la comparaison de la consommation moyenne normalisée d'énergie du LEACH, LEACH mobile, PEGASIS, PEGASIS mobile. La distribution de l'énergie dans les deux protocoles LEACH et LEACH mobile est presque égale. Les résultats de la simulation montrent que l'énergie résiduelle du réseau au cours des rounds diminue progressivement dans les quarte protocoles, mais la consommation d'énergie est beaucoup plus efficace dans

PEGASIS mobile, car les CHs consomment moins d'énergie à cette fin en raison de la mobilité du Sink qui entraîne une distance moindre entre lui-même et les CHs.

III.4.2.3 Données transmises à la station de base (Sink) :

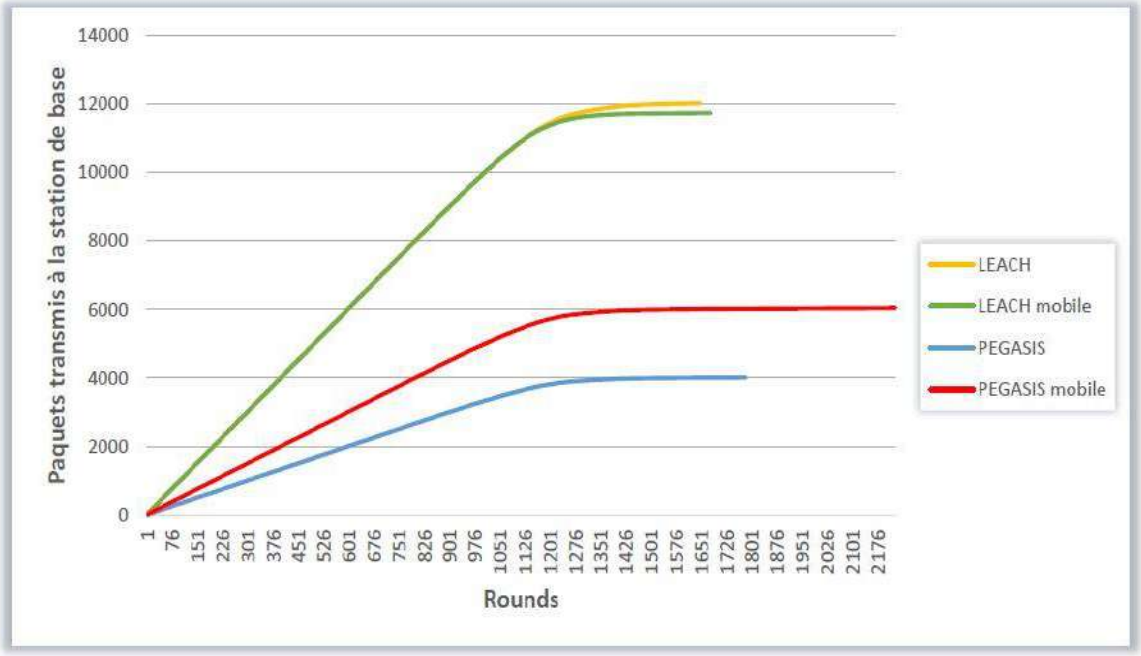


Figure III-11: Nombre de paquets transmis au Sink.

Dans cette figure qui représente le nombre de données ou paquets envoyé vers la station de base on remarque que dans LEACH et LEACH mobile les paquets envoyés sont presque doubles des paquets envoyés dans PEGASIS mobile et triples de celles de PEGASIS, à de nombre de points de communication avec Sink durant chaque round dans LEACH et LEACH mobile qui sont les CHs. L'envoi beaucoup à la SB n'est pas un bon résultat pour la performance d'un protocole de routage puisque tous les nœuds ont la même capacité" de collection de quantités physiques tels la température, l'humidité, la vibration...etc. L'efficacité de PEGASIS mobile et PEGASIS apparait dans la livraison d'un nombre plus faible de paquets à la SB grâce à un seul point communicant avec Sink une fois chaque round qui représente le leader.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a expérimenté les quatre différents protocoles de routage hiérarchique en ce qui concerne la durée de vie du réseau, les données transmises à la station de base (Sink) et l'énergie résiduelle.

Le clustering permet aux nœuds d'effectuer des communications sur des petites distances avec leurs CHs, ces derniers ayant pour tâche de communiquer les résultats de leurs calculs à la station de base, ceci leur coûte en termes d'énergie. Par contre, dans l'approche basée sur le multi-chaîne, le principe de clustering n'est pas utilisé, les nœuds du réseau sont organisés de façon à former une grande chaîne, n'auront ainsi besoin de communiquer qu'avec seulement leurs voisins les plus proches et se relaient dans la communication avec la station de base. Ceci réduit l'énergie nécessaire à la transmission des données par cycle, ce qui mène au prolongement de temps de vie du réseau.

L'implémentation des protocoles LEACH mobile et PEGASIS mobile sous Matlab nous a permis de confirmer la performance de l'approche basée sur les chaînes en terme de prolongement de temps de vie du réseau et de gestion économique d'énergie même avec le facteur de mobilité de Sink dans les deux différentes approches.

Conclusion générale

Les réseaux de capteurs ont un champ d'application très large, ils font partie des nouvelles technologies qui commencent à changer le monde et notre façon de vivre et de travailler.

La batterie d'un nœud capteur joue un rôle important, elle n'est généralement pas remplaçable ni rechargeable. Cette batterie est petite et ne fournit donc qu'une quantité d'énergie très limitée. Cela limite la durée de vie du capteur et affecte les performances globales du réseau. Par conséquent, la consommation d'énergie a été le principal problème dans RCSF pour prolonger la durée de vie du réseau.

Les protocoles de routage sont l'une des techniques d'économie d'énergie utilisées et de nombreuses recherches sont en cours dans ce domaine aujourd'hui.

Nous avons donc pris les deux protocole de routage LEACH et PEGASIS, qui sont les principaux protocoles des deux différents approches le clustering et les chaînes, et nous avons évaluer leurs performances en les comparants dans le scénario du mobilités de la station de base de chaque protocoles.

Bibliographie

[1] Y.Challal, Réseaux de Capteurs Sans Fils, Support de cour, 2008

[2] S. MOAD, "Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil" Master recherche en 2éme année informatique, vol. Université : FSIC Rennes 1, Laboratoire de recherche : DYONISOS-IRISA, 2008.

[3] R. Kacimi, "Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil" thèse, l'université de Toulouse, France, 2009.

[4] S. Harchi, "Un protocole de session dans les réseaux de capteurs sans fils," PhD, universite de Lorraine, Lorraine, France, 2014.

[5] C. Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo, "Sensor Information Networking Architecture and Applications," IEEE Pers. Commun., Aug, 2001, pp. 52-59.

[6] G. Hoblos, M. Staroswiecki, and A. Aitouchen "Optimal Design of Fault Tolerant Sensor Networks," IEEE Int'l. Conf. Cont. Apps., Anchorage, AK, Sept, 2000, pp. 467-72.

[7] Philippe Berger, Les capteurs, Support de cours, 2010.

[8] David Martins, Sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil Stéganographie et réseaux de confiance, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2010

[9] M. Sofiane, "Optimisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil," Etude bibliographique, IFSIC-Rennes 1, Renne, france, 2008.

[10] M. Bouallegue, "Protocoles de communication et optimisation de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil," PhD, université Bretagne Loire, Rennes, france, 2016.

[11] Milica Pejanovic Đuriši ' c, Zhilbert Tafa, Goran Dimi ' c, and Veljko Milutinovic. "A survey of military applications of wireless sensor networks," In 2012 Mediterranean conference on embedded computing (MECO), pages 196–199. IEEE, 2012.

[12] P. Kuila and P. K. Jana, "Clustering and routing algorithms for wireless sensor networks: Energy efficiency approaches." CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2018.

[13] S. BOUCHELAGHEM, S. GHABBI, M. HAMANI, "Le protocole LEACH pour les réseaux de capteurs sans fil," thèse, Université Abderrahmane Mira Béjaia, Béjaia, Algérie.

[14] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. "Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks". Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 3005-3014, Janvier 2000.

[15] Mr. ABABSA Raouf, « Etude Comparative Entre Les Protocoles Hiérarchique Et Le protocole Multi-chaine PEGASIS », MEMOIRE Pour l'obtention du diplôme de MASTER en Architecture Distribue, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi,2018.

[16] Luis Javier García VILLALBA, Ana Lucila Sandoval OROZCO, Alicia Triviño CABRERA, Cláudia Jacy Barenco ABBAS, « Routing Protocols in Wireless Sensor Networks », Sensors 2009, 9, 8399-8421, ISSN 1424-8220, 2009.

[17] Y. Yaser, « Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil », Thèse de Doctorat, université de Haute Alsace, 08 juillet 2010.

[18] Mr Boubiche Djallel Eddine, « Protocole de routage pour les réseaux de capteurs sans fil », MEMOIRE DE MAGISTERE EN INFORMATIQUE, Université de l'Hadj Lakhdar-Batna, Promotion 2007-2008.

[19] Ravneet Kaur, Deepika Sharma and Navdeep Kaur, Comparative Analysis Of Leach And Its Descendant Protocols In Wireless Sensor Network, International Journal of P2P Network Trends and Technology, Vol. 3, Issue 1, 2013, pp. 51-55.

[20] Ali Norouzi1, Abdul Halim Zaim, An Integrative Comparison of Energy E_cient Routing Protocols in Wireless Sensor Network, Scientific Research of Wireless Sensor Network, Vol. 4, 2012, pp. 65-67.

[21] Parminder Kaur1, Mrs. Mamta Katiyar, The Energy-E_cient Hierarchical Routing Protocols for WSN : A Review, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, Vol. 2, Issue 11, November 2012, pp. 194-199.

[22] J. Gnanambigai, Dr. N. Rengarajan, K. Anbukkarasi, Leach and Its Descendant Protocols: A Survey, International Journal of Communication and Computer Technologies, Vol. 01, No.3, Issue 02, September 2012, pp. 15-21.

[23] K. Du, J. Wu and D. Zhou, " Chain-based protocols for data broadcasting and gathering in sensor networks," *International Parallel and Distributed Processing Symposium*, April 2003.

[24] S. Lindsey, S. Raghavendra, "Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics", *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, Vol.13, No.9, 2002.

[25] S. Lindsey, C. Raghavendra, “PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems", *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2002, Vol. 3, 9-16 pp. 1125-1130.

[26] « Les réseaux de capteurs », Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2013- 2014.

[27] YOUCEF ZIANI, « Étude comparative de méthodes de routage dans les réseaux de capteurs sans fil pour le domaine résidentiel », Mémoire présenté à l’université du Québec à Trois-Rivières, juin 2013.

[28] V. Mhatre and C. Rosenberg, “Design Guidelines for Wireless Sensor Networks: Communication, Clustering and Aggregation”, Ad Hoc Networks, 2(1), 2004, pp.45-63.

[29] Heinzelman, M. ET Perillo, W. Wireless Sensor Network Protocols. [éd.] CRC Hall. 2005.

[30] E. Hamida, “Modélisation stochastique et simulation des réseaux sans fil multi-sauts,” 2009, [Online]. Available: http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Mod?lisation+stochastique+et+simulation+des+r?seaux+sans+fil+multi-sauts#0.

[31] “MATLAB - Wikipédia.” https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB (accessed Sep. 14, 2020).

[32] Akyildiz, I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, « A Survey on Sensor Networks ». IEEE Communication Magazine, Aout. 102-114, 2002.

[33] J Rezazadeh, M Moradi, and A S Ismail, "Mobile Wireless Sensor Networks Overview," *IJCCN International Journal of Computer Communications and Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 17-22, 2012.

[34] Khadidja FELLAH, "Optimisation de la consommation d’énergie dans les réseaux de capteurs sans fil mobiles", thèse présentée en vue de l’obtention du diplôme de Doctorat en sciences à l’université d’Oran 1, Mai 2018.

[35] F Yu, E Lee, S Park, and S Kim, "A simple location propagation scheme for mobile sink in wireless sensor networks," IEEE Communications Letters, vol. 14, no. 4, pp. 321–323, 2010.

[36] M I Khan, W N Gansterer, and G Haring, "Static vs. Mobile sink: The influence of basic parameters on energy efficiency in wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 36, no. 9, pp. 965–978, 2013.

[37] Mohsin Raza Jafri, Nadeem Javaid, Akmal Javaid and Zahoor Ali Khan.'' Maximizing the Lifetime of Multi-Chain PEGASIS Using Sink Mobility'', World Applied Sciences Journal 21 (9): 1283-1289, 2013, ISSN 1818-4952, IDOSI Publications, 2013.

[38] https://www.electricaltechnology.org/2018/11/types-sensors-applications.html.

[39] SARI Mounya Amal, '' ETUDE DU RSSI POUR L'ESTIMATION DE LA DISTANCE DANS LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL'', mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en informatique, Université Aboubakr Belkaid,-Tlemcen, 2017.

[40] https://psiborg.in/home-security-and-automation-using-wsn/

[41] Waleed Youssef and Mohamed Younis, ''Intelligent Gateways Placement for Reduced Data Latency in Wireless Sensor Networks'', DOI:10.1109/ICC.2007.627, IEEE Xplore, Conference: Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on.

[42] Nayif Saleh, Abdallah Kassem, Ali Haidar, "Energy-Efficient Architecture for Wireless Sensor Networks in Healthcare Applications", IEEE Access PP(99):1-1,DOI:10.1109/ACCESS.2018.2789918'', January 2018.

[43] Tamoghna Ojha, S. Misra, N. Raghuwanshi, "Wireless sensor networks for agriculture : The state-ofthe-art in practice and future challenges", Materials Science; Corpus ID: 36792032, Published in 2015.

[44] SARI Madiou Nabila et Merbouti Kahina '' Approches du clustering dans les réseaux de capteurs sans fil'', mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en informatique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.

[45] https://www.mdpi.com/1424-8220/12/8/11113/htm