REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Electrique et d'Informatique

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie électrique

Spécialité : **Télécommunications**

THEME

ROUTAGE HIERARCHIQUE SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

Réalisé par :

BOULARAS soufiane

DEHBINE youcef

Proposé et Dirigé par :

M. GUEDMANI Mohamed

Juin 2014

Remerciements

***A**u terme de ce travail :*

***N**ous tenons à remercier tout d'abord **Dieu** le tout puissant et maître de l'univers qui nous a donné la force nécessaire, la fort volonté et la patience afin d'accomplir ce travail.*

***N**ous tenons à exprimer notre gratitude à nos enseignants de Département Génie Electrique et d'Informatique de l'université DR. Yahia Fares De Medea.*

***N**ous remercions également par la même occasion, notre promoteur Mr. **Mohamed GUEDMANI** pour l'aide quel nous a apporté, pour sa disponibilité, ainsi pour ses précieux conseils. L'honneur qu'il nous a fait, en présidant le jury de cette thèse.*

***N**ous exprimons, également nos remerciements à l'examinateur qui participer à l'examen de ce travail.*

Enfin nous adressons nos reconnaissances à tous ceux qui nous ont aidés de prés ou de loin.

Dédicaces

Au nom d'Allah le Miséricordieux le très miséricordieux.

J'ai l'immense honneur de dédier ce mémoire :

A mes très chers parents qui étaient présents pour moi durant toute ma vie.

A mes frères et ma famille.

A mes amis.

A notre encadreur Mr. ***Mohamed GUEDMANI***

A tous ceux qui m'aiment et ceux que j'aime.



Dehbine youcef

et boularas soufiane

ملخص

نقترح في هذا البحث (**العمل**) تقنية جديدة للمسار وجمع المعلومات ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة لشبكات الاستشعار اللاسلكية المؤسسة على طريقة التجميع.

وتهدف التقنية المستعملة إلى استغلال بروتوكول المسار LEACH في المحطة القاعدة، التي تنتقل بهدف توفير الطاقة خلال تدفق المعلومات نحوها. وقد كشفت نتائج التجارب أن التقنية المستعملة تسمح بتخفيض نسبة ضياع الطاقة، ومنح فترة حياة أطول للشبكة، وتحسين أداء بروتوكول LEACH

الكلمات المفتاحية :شبكة الاستشعار اللاسلكي، بروتوكول المسار، استهلاك الطاقة، تقنيات التجميع، الانتقالية.

Résumé

Dans ce projet nous proposons une nouvelle technique de routage et de collecte d'information à basse consommation d'énergie pour les réseaux de capteurs basé sur l'approche de clustering. Notre technique vise à exploiter le protocole de routage LEACH dans un réseau à station de base mobile pour économiser l'énergie dissipée lors de l'acheminement des données capturées à la station de base.

Les résultats des simulations ont montré que notre technique (protocole) permet une réduction de la dissipation d'énergie, une durée de vie du réseau plus grande et un perfectionnement du protocole LEACH.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil, Protocole de routage, Consommation d'énergie, Techniques de clustering, Mobilité.

Abstract

In this project, we will introduce a new routing technique and data gathering that allows low energy consumption in the sensors network based on the clustering approach. Our technique intends to exploit the LEACH routing protocol in a mobile base station network in order to economize the energy dispelled during the routing of captured data to the base station.

The simulation results of this project have shown that our technique (Protocol) allows: reduction of energy dissipation, a longer network lifespan and perfection of LEACH protocol.

Keyword: Wireless sensor network, Routing Protocol, Energy consumption, Clustering Techniques, Mobility.

Table des matières

LISTE DES FIGURES..... ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

LISTE DES TABLEAUX ……..**IV**

LISTE DES ABREVIATIONS..... **V**

TABLE DES MATIERES…….……**IV**

Introduction Générale..... ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

Chapitre I: Généralité Sur Les Réseaux De Capteurs Sans fil **3**

1. Introduction **4**

2. Définition du réseau de capteurs **4**

3. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil..... **5**

4. Capteurs sans fils..... **6**

5. Description technique d'un capteur sans fil **6**

6. Contraintes et facteurs de conception de RCSF **7**

6.1. Durée de vie du réseau 8
6.2. La tolérance aux pannes 8
6.3. Facteur d'échelle 8
6.4. Ressources limitées 8
6.5. Bande passante limitée 8
6.6. Topologie dynamique 9
6.7. Absence d'adressage fixe des nœuds 9
6.8. Coût de fabrication 9

7. Consommation d'énergie dans le RCSF **9**

7.1. Energie de capture 10
7.2. Energie de traitement 11
7.3. Energie de communication 11
7.4. Techniques de minimisation de la consommation d'énergie 11

8. Routage des données dans les RCSF..... **12**

9. Les applications potentielles des RCSF **13**

10. Conclusion..... **1**Erreur ! Signet non défini.

Chapitre II : routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil **17**

1. Introduction..... **18**

2. Caractéristiques d'un protocole hiérarchique..... **18**

2.1. L'algorithme de Clustering utilisé 18
2.2. La réélection des ClusterHeads 19
2.3. La nature des clusters générés 19
2.4. La communication intra-cluster 19
2.5. La communication inter-cluster 20
2.6. Le niveau d'agrégation de données 20

3. Protocoles hiérarchiques existants 20

3.1. Protocole d'auto-organisation LEACH 20
3.2. Principe général de fonctionnement du protocole LEACH 21
3.3. La Phase de construction (Set up phase) 22
3.3.1. Election des Cluster-heads 22
3.3.2. Annoncées des Cluster-heads 23
3.3.3. Formation des clusters… 23
3.3.4. Création de la table TDMA 23
3.3.5. Création de la CDMA 25
3.4. Phase de communication 26
3.5. Le modèle énergétique 27

4. L'état de l'art 29

4.1. Architecture à puits fixe et nœuds capteurs fixes 29
4.2. Architecture à puits statiques et nœuds capteurs mobiles 30
4.3. Architecture à puits mobile et nœuds capteurs mobiles 31
4.4. Architectures à puits mobile et nœuds capteurs fixes 32

5. Conclusion 34

Chapitre III: Evaluation des performances du Protocole LEACH avec station de base mobile 35

1. Introduction 36

2. La Simulation dans les réseaux de capteurs sans fil 36

2.1. Besoins et limitation 36
2.2. Le simulateur MATLAB 37

3. Les Scénarios de la simulation 37

3.1. La modélisation du réseau 38
3.2. Les Paramètres de simulation 39
3.3. algorithme de simulation 40
3.4. Métriques d'évaluation 40

4. Résultats et analyses des simulations 41

4.1. Résultats de simulation pour un réseau homogène 41
4.1.1. Scenario 1 41
4.1.2. Scenario 2 44
4.1.3 Scenario 3 46
4.1.4. Conclusion1 48
4.1.5. Choix de trajectoire optimale 48
4.2. Résultats de simulation pour un réseau hétérogène 53

5. Interprétation 55

6. Conclusion 56

Conclusion générale 57

Perspectives 59

8. bibiographie 60

Liste des figures

Figure I.1. *Réseau de capteurs sans fil* 3

Figure I.2. *Exemple de capteur sans fil.* 4

Figure 1.3. *Architecture d'un nœud capteur*.....4

Figure I.4. *Consommation d'énergie dans un nœud capteur.* 8

Figure I.5. *Les techniques de conservation d'énergie.* 10

Figure I.6. *Domaine de contrôle de l'environnement en utilisant RCSF* 11

Figure I.7. *Surveillance sous l'eau par RCSF*.....11

Figure I.8. *Application des RCSF dans le domaine de la médecine* 12

Figure I.9. *Quelques domaines d'application pour les RCSF* 13

Figure II.1. *Le Protocole d'auto-organisation LEACH.* 19

Figure II.2. *Le déroulement du protocole LEACH en cycles* 20

Figure II.3. *Probabilité Optimale* 21

Figure II.4. *Répartition du temps et différentes phases dans le cycle de LEACH*……..…...22

Figure II.5. *Opérations de la Phase de construction de LEACH*…..……..…….23

Figure II.6. *Méthodes D'accès Au Médium*……..….24

Figure II.7. *Opérations de la phase de communication (Steady-state) de LEACH*…….25

Figure II.8. *Modèle de consommation d'énergie pour la communication*…….…..…26

Figure II.9. *Architecture à puits fixe et nœuds capteurs fixes*…….……...27

Figure II.10. *Architecture du réseau de capteurs dédié à la surveillance du volcan*….....28

Figure II.11. *Représentation de l'infrastructure du système Cenwits*……29

Figure II.12. *Architecture de collecte de données dans ZebraNet*……..…29

Figure II.13. *Schéma d'architecture à puits mobile et nœuds capteurs fixes*…….……30

Figure.III.1. *La mobilité de la station de base sur une trajectoire diagonale*……..…..40

Figure. III.2. *la stabilité du réseau avec station de base mobile sur la diagonal*……..…40

Figure. III.3. *l'énergie consommée par le réseau avec station de base mobile sur la diagonal*……....41

Figure. III.4. *Les paquets de données reçus par la station de base mobile*……...41

Figure.III.5. *La mobilité de la station de base sur une trajectoire axiale*……..42

Figure. III.6. *la stabilité du réseau avec station de base mobile sur une trajectoire axiale*.42

Figure. III.7. *L'énergie du réseau avec station de base mobile sur une trajectoire axiale*...43

Figure. III.8. *Les paquets de données reçus par la station de base*……...……43

Figure. III.9. *La mobilité de la station de base sur le périmètre du champ de captage carré*…….44

Figure. III.10. *la stabilité de réseau avec station de base mobile sur le périmètre du champ de captage*……...……..44

Figure. III.11. *L'énergie consommée par le réseau avec station de base mobile sur le périmètre du champ de captage carré*……..……45

Figure. III.12. *Les paquets de données reçus par la station de base mobile sur le périmètre du champ de captage carré*……...…45

Figure. III.13. *La mobilité de la station de base avec la vitesse optimale sur les trois trajectoires*…….....46

Figure. III.14. *la stabilité du réseau avec station de base mobile à la vitesse optimale sur les trois trajectoires*……47

Figure. III.15. *L'énergie du réseau avec station de base mobile à la vitesse optimale sur les trois trajectoires*…….....47

Figure.III.16. *La quantité de données reçus par la station de base mobile à la vitesse optimale sur les trois trajectoires*…….48

Figure. III.17. *Comparaison entre LEACH et LEACH avec SB mobile sur les trois trajectoires* carré……...49

Figure. III.18. *la stabilité de réseau avec station de base mobile sur les trois trajectoires carrée*……49

Figure. III.19. *L'énergie de réseau avec station de base mobile sur les trois trajectoires carrée*……50

Figure.III.20. *Les paquets de données reçus par la station de base mobile sur les trois trajectoires carrée*…….50

Figure. III.21. *la stabilité du réseau avec station de base mobile sur une trajectoire carrée. LEACH avancé*…….52

Figure. III.22. *L'énergie de réseau avec station de base mobile sur une trajectoire carrée. LEACH avancé*……...……...52

Figure.III.23. *Les paquets reçus par la station de base mobile sur une trajectoire carrée*....53

Liste des tableaux

Tableau II.1. Tableau comparatif des différentes architectures utilisées…….....…...31
Tableau III.1. Les paramètres des simulations……...…37
Tableau III.2. Les périodes de stabilité avec les trois trajectoires et les trois vitesses ….....48
Tableau.III.3. Récapitulation des résultats …….…...….51

Abréviations

RCSF	Réseau de capteur sans fils
S B	Station de base
WSN	Wireless Sensors Network
LEACH	Low Energy Adaptive Clustering Hierarchyest
GPS	Global Position System
QoS	Quality of Service
CH	Cluster Head
TDMA	Time Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
HEED	Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering
MULE	Mobile Ubiquitous LAN Extensions

CHAPITRE I :

GENERALITE SUR LES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

1. Introduction :

Grâce aux avancées technologiques de plusieurs secteurs des technologies de l'information, il devient aujourd'hui envisageable de produire en masse des systèmes d'une taille extrêmement réduite (de quelques centimètres) et embarquant des unités de calcul et de communication sans fil pour un coût réduit. Ayant ces caractéristiques, les nœuds capteurs sont capables de générer et d'échanger des données d'une manière autonome et complètement transparente pour les utilisateurs.

Les réseaux de capteurs représentent actuellement un nouveau domaine, en plein développement, émergeant des innovations des technologies de communication.

L'objectif de ce chapitre est de faire une description synthétique des réseaux de capteurs, leurs architectures, leurs caractéristiques et contraintes ainsi que leurs domaines d'applications variés.

2. Définition du réseau de capteurs:

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) est un système distribué de grande échelle mettant en communication un grand nombre d'entités autonomes communément appelées « capteurs sans fil », ou simplement « capteurs ». Ces capteurs forment donc les nœuds du réseau.

Dans un scénario d'application classique, plusieurs nœuds capteurs sont déployés dans un certain environnement pour mesurer certains phénomènes physiques et faire remonter les informations collectées à une station de base, nommée le nœud puits (une porte d'entrée vers le monde extérieur qui fait l'interface entre le réseau de capteurs et l'utilisateur des données). Dans le cas le plus simple, les capteurs seront dans le voisinage direct du puits (un réseau de type étoile à un saut). Cependant, dans le cas d'un réseau à grande échelle, les capteurs ne sont pas tous dans le voisinage du puits et les messages seront acheminés du nœud source vers le puits en transitant par plusieurs nœuds, selon un mode de communication multi-sauts comme l'illustre la Figure I-1

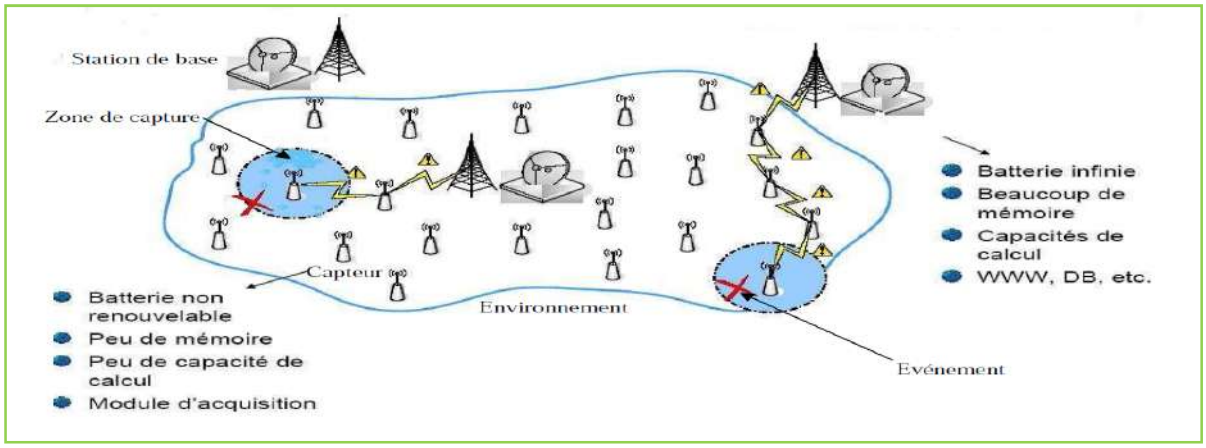


Figure I.1 : *Réseau de capteurs sans fil* **[1].**

3. Architecture d'un réseau de capteurs sans fil:

Un réseau de capteurs est constitué essentiellement de plusieurs nœuds capteurs, un nœud Sink (station de base) et un centre de traitement des données.

- ***Nœuds* :** ceux sont des capteurs, leur type, leur architecture et leur disposition géographique dépendent de l'exigence de l'application en question. Leur énergie est souvent limitée puisqu'ils sont alimentés par des piles.

- ***Sink** (Station de base)* **:** c'est un nœud particulier du réseau. Il est chargé de la collecte des données issues des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif puisque l'arrivée des informations est aléatoire. C'est pourquoi son énergie doit être illimitée. Dans un réseau de capteur sans fils plus ou moins large et à charge un peu élevée, on peut trouver deux Sink ou plus pour alléger la charge.

- ***Centre de traitement des données* :** c'est le centre vers lequel les données collectées par la station de base sont envoyées. Ce centre a le rôle de regrouper les données issues des nœuds et les traiter de façon à en extraire l'information utile et exploitable.

Le centre de traitement peut être éloigné du Sink, alors les données doivent être transférées à travers un autre réseau, c'est pourquoi on introduit une passerelle entre le Sink et le réseau de transfert pour adapter le type de données au type du canal (comme c'est illustré dans la Figure I.1) [1].

4 .Capteurs sans fils :

Les capteurs sont des dispositifs de taille extrêmement réduite avec des ressources très limitées, autonomes, capable de traiter des informations et de les transmettre, via les ondes radio, à une autre entité (capteurs, unité de traitements...) sur une distance limitée à quelques mètres.

Les réseaux de capteurs utilisent un très grand nombre de ces capteurs, pour former un réseau sans infrastructure établie. Un capteur analyse son environnement, et propage les données récoltées aux capteurs appartenant à sa zone de couverture. Chaque capteur relayant l'information sur sa propre zone de couverture, le réseau se trouve entièrement couvert. [2]



Figure I.2: *Exemple de capteur sans fil* [3]

5. Description technique d'un capteur sans fil :

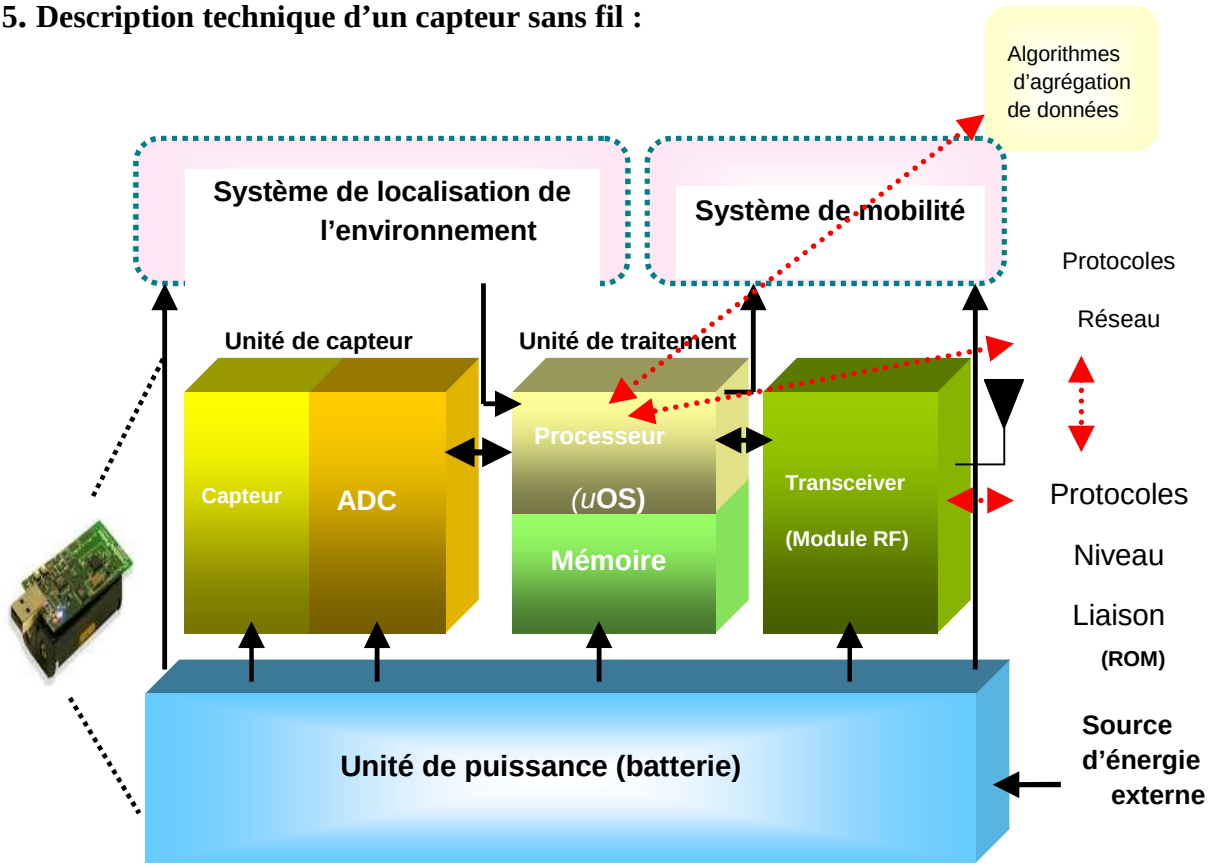


Figure 1.3 : *Architecture d'un nœud capteur.*

- ***Unité de traitement:*** Il se compose d'un microprocesseur (unité microcontrôleur UMC) responsable du contrôle des capteurs et de l'exécution des protocoles de communication.
- ***Unité de puissance (batterie) :*** est un composant important du noeud de capteur. Il fournit de l'énergie au nœud.
- ***Unité de communication :*** Il est composé d'une radio de courte gamme pour la communication. Les radios fonctionnent en plusieurs modes: transmission, réception, inoccupé et inactif pour la conservation d'énergie.
- ***l'unité de capture :*** relie le nœud de capteur avec le monde d'extérieur.
- ***Unité d'application :*** Ce module est la couche application constituée d'un système d'exploitation et des routines traitant le routage et la communication via la radio, etc .
- ***Le système de localisation*** **l'environnement*:***

  Dans plusieurs applications, les tâches de détection et les techniques de routage ont besoin de connaitre la localisation géographique d'un nœud. Ainsi, il est commun pour qu'un nœud soit équipé d'un système de localisation géographique. Ce système peut se composer d'un module de GPS pour un nœud de haut niveau ou bien d'un module de software qui implémente des algorithmes de localisation qui fournissent les informations sur l'emplacement du nœud par des calculs distribués.
- ***Système de mobilité :***

  Un mobilisateur peut parfois être nécessaire pour déplacer un nœud pour accomplir ses tâches. Le support de mobilité exige des ressources énergétiques étendues qui devraient être fourni efficacement. Le mobilisateur peut, également, opérer dans l'interaction étroite avec l'unité de détection et le processeur pour contrôler les mouvements du nœud [5].

6. Contraintes et facteurs de conception de RCSF :

La conception et la réalisation des RCSF sont influencées par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF.

6. 1. *Durée de vie du réseau :*

L'énergie est une très rare ressource qui doit être géré de façon judicieuse afin d'étendre la durée de vie du réseau, cette dernière c'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

6.2. *La tolérance aux pannes :*

La défaillance ou le blocage des nœuds dans un réseau de capteurs peut être engendrés par plusieurs causes, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique, ou les interférences liées à l'environnement.

La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau.

6. 3. *Facteur d'échelle:*

Le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues.

6. 4. *Ressources limitées :*

En plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse.

6. 5. *Bande passante limitée :*

Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

6. 6. *Topologie dynamique :*

La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes :

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de batail par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
- Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
- Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.

6. 7. *Absence d'adressage fixe des nœuds:*

Les nœuds dans les réseaux sans fil classiques sont identifiés par des adresses IP. Cependant, cette notion n'existe pas dans les RCSF. Ces derniers utilisent un adressage basé sur l'attribut du phénomène capté, on parle donc de l'adressage basé-attribut. En effet, les requêtes des utilisateurs ne sont pas généralement destinées à un seul nœud, mais plutôt, à un ensemble de nœuds identifiés par un attribut. Par exemple, identifier un ensemble de nœuds par « les nœuds qui captent le volume du CO2 dépassant 0,0375 % dans l'atmosphère».

6. 8. *Coût de fabrication :*

Le coût de production d'un seul micro-capteur est très important pour l'évaluation du coût global du réseau, si ce dernier est supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas financièrement justifiée. Par conséquent, réduire le coût de production jusqu'à moins de 1$ par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil [6].

7. Consommation d'énergie dans les RCSF :

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication [7].

Un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de captage [8].

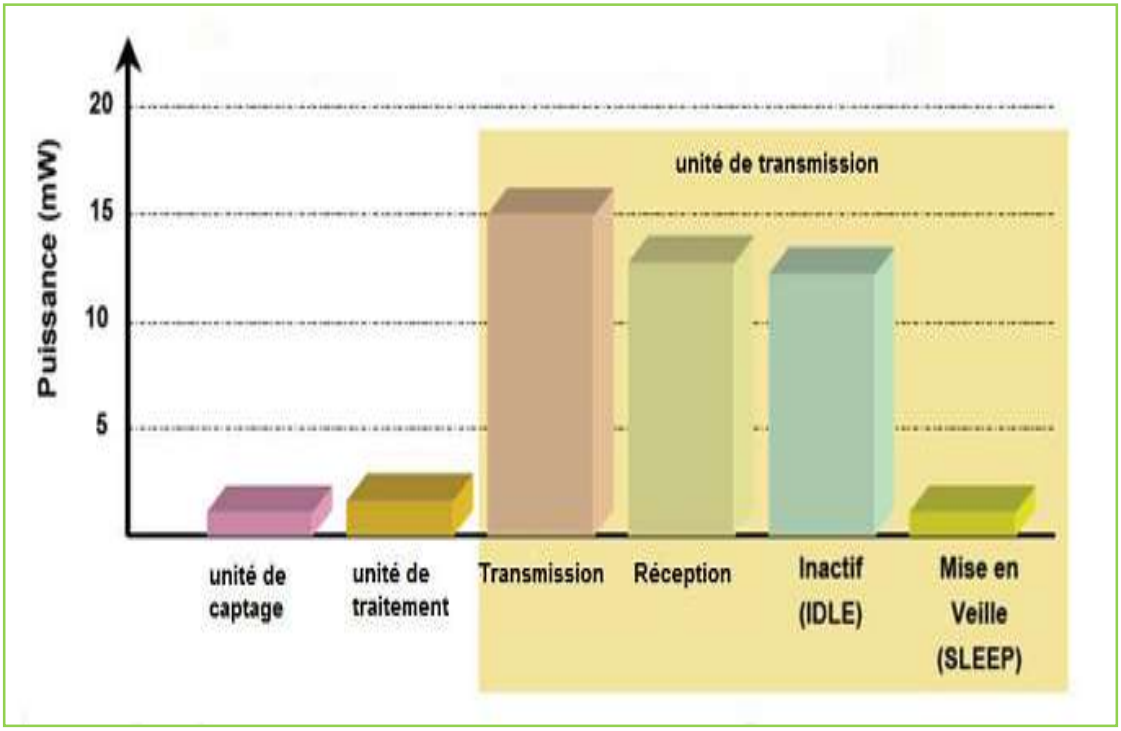


Figure I.4 : *Consommation d'énergie dans un nœud capteur.*

On remarque que l'unité de transmission est très gourmande en consommation d'énergie. En effet la transmission d'un seul bit sur une distance de 100m consomme approximativement la même énergie que l'exécution de 3000 instructions. Toutefois, la mise en veille de la radio réduit de manière significative cette consommation.

Il existe des capteurs qui sont dotés d'autres composants additionnels tels que les systèmes de localisation GPS (Global Position System) et un mobilisateur lui permettant le déplacement

7.1. *Energie de capture :*

Les sources de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture.

7 .2. *Energie de traitement :*

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie: l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel). Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication.

7.3. *Energie de communication :*

L'énergie de communication se décline en trois parties: l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

7.4. *Techniques de minimisation de la consommation d'énergie :*

Dans les réseaux ad hoc, la consommation de l'énergie a été considérée comme un facteur déterminant mais pas primordial car les ressources d'énergie peuvent être remplacées par l'utilisateur. Ces réseaux se focalisent plus sur la QoS (Quality of Service) que sur la consommation de l'énergie. Par contre, dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie est très importante puisque généralement les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles. Ainsi, il est difficile voire impossible de remplacer les batteries après leur épuisement. De ce fait, la consommation d'énergie au niveau des capteurs a une grande influence sur la durée de vie du réseau.

Après la description des principales causes de consommation d'énergie dans les RCSF, nous présentons dans ce qui suit les différentes techniques utilisées pour minimiser cette consommation. Ces techniques sont appliquées soit au niveau de la couche liaison soit au niveau de la couche réseau. Le schéma suivant donne un aperçu global de ces mécanismes :

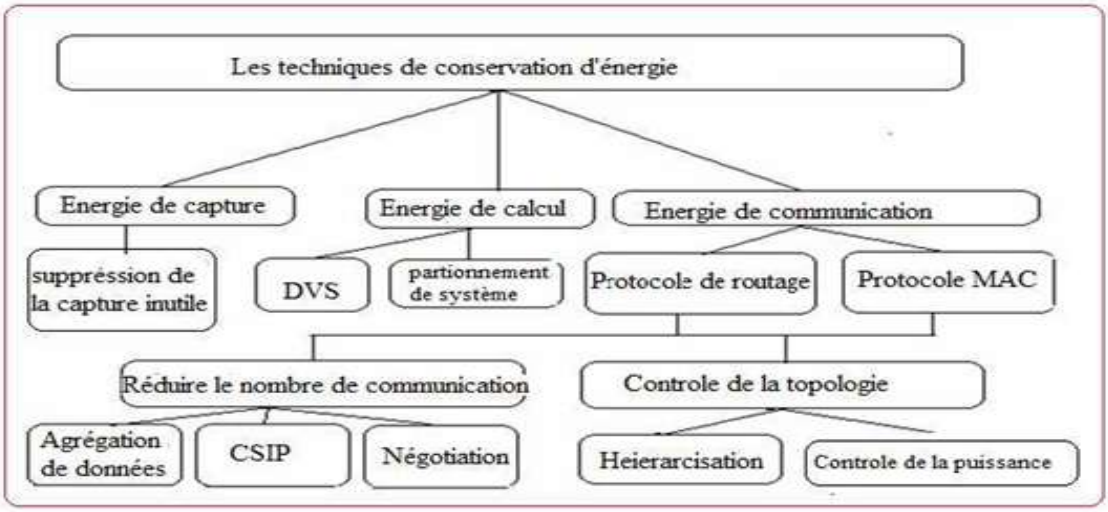


Figure I.5 : *Les techniques de conservation d'énergie.*

L'énergie du capteur peut être économisée soit au niveau de la capture, au niveau de traitement ou au niveau de la communication.

A. La seule solution apportée pour la minimisation de la consommation d'énergie au niveau de la capture consiste à réduire les fréquences et les durées de captures [7].

8. Routage des données dans les RCSF :

Le routage dans ces réseaux diffère du routage traditionnel, car le mode de communication dans les réseaux de capteurs est du type « plusieurs vers un », « n- to -one », ou « un vers plusieurs », « one – to – n » c'est-à-dire que les informations recueillies par les capteurs sont ensuite centralisées vers une passerelle. Les flux qui transitent sur le réseau ont pour unique destination la passerelle. Cette dernière centralise les informations recueillies par les capteurs. Le protocole de routage développé pour les réseaux de capteurs va alors être beaucoup plus simple que ceux créés pour les réseaux Ad Hoc, car les problématiques liées à la communication point à point dans les réseaux Ad Hoc augmentent beaucoup la complexité des tables de routage, de l'espace d'adressage …etc.

Deux grandes familles de protocoles réseaux ont été suggérées pour les réseaux de capteurs. La première famille regroupe les protocoles dont le but est de minimiser la consommation énergétique moyenne, en utilisant par exemple des algorithmes d'acheminement des paquets, et pour lesquels le critère de performance est la consommation électrique. La seconde famille regroupe pour sa part les protocoles dont le but est de limiter les flux applicatifs transitant sur le réseau. En minimisant ainsi les flux, le protocole permet d'économiser de l'énergie.

9. Les applications potentielles des RCSF :

- ***Contrôle de l'environnement* :**

Pour le mesure des températures, des pressions, d'humidités dans un endroit.

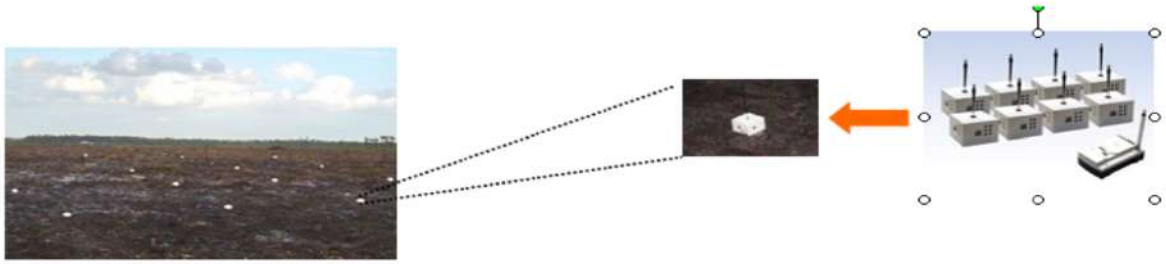


Figure I.6 : *Domaine de contrôle de l'environnement en utilisant RCSF*

- ***Système de surveillance sous l'eau par un réseau de capteurs sans fil.***

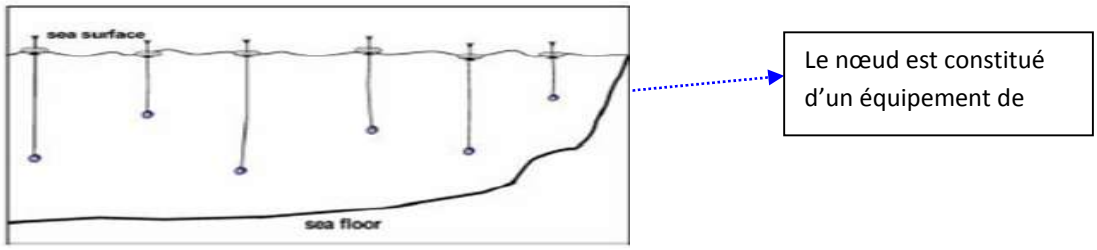


Figure I.7 : *Surveillance sous l'eau par RCSF.*

- ***Militaire :***

Pour les services de sécurité, la détection de dangers chimiques, etc. ...Par exemple : si on est en guerre on veut connaître les mouvements de l'ennemi, il est plus raisonnable de ne pas aller sur le terrain, il suffit simplement de survoler la zone à couvrir et de déployé les capteurs de l'hélicoptère afin qu'ils collectent les données et les transmettent à la station de base. Comme ça on aura une idée sur les mouvements de l'ennemi.

Ces RCFS peuvent fournir d'autres services tels que :

- La surveillance des munitions et des équipements militaires.
- L'évaluation des dommages.
- La connaissance de la position de ses propres soldats.

- ***Applications industrielles :***

Pour gérer la circulation, la direction d'un objet, la lumière, etc.

- ***Santé :***

Cette technologie consiste en la surveillance de la température, la fréquence cardiaque, l'oxygénation du sang et le pouls du patient,…etc. Par exemple :

On peut placer sur le corps d'un patient des capteurs qui surveille constamment sa température, sa fréquence cardiaque, l'oxygénation du sang et son pouls.

Un émetteur-récepteur transmet les données à une station de base branché à un ordinateur personnel ou poste des soins infirmier ou même à un assistant numérique.

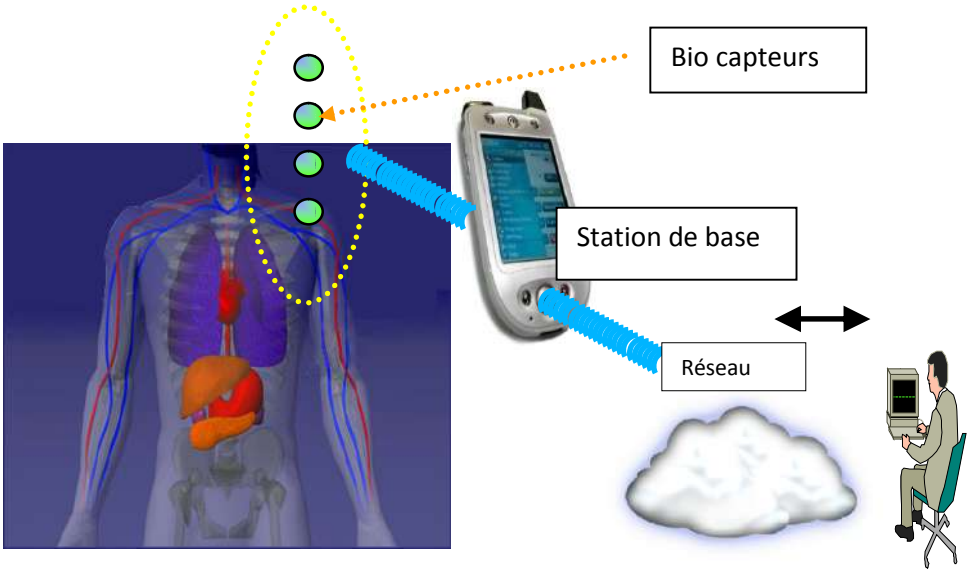


Figure I.8 : *Application des RCSF dans le domaine de la médecine.*

- ***La sécurité des infrastructures:***

Les RCSF est un candidat prometteur pour assurer la sécurité des bâtis stratégiques contre toute attaque à caractère terroriste. En effet, un réseau de cameras vidéo, capteur acoustiques ou autres types de capteurs peuvent être déployés facilement autour de ces bâtiments pour détecter toute intrusion en temps record et avec une précision imbattable.

Le grand nombre de capteurs réduit énormément les fausses alertes grâce à une fusion d'informations; les nouveaux capteurs peuvent également détecter les attaques d'ordre biologique, chimique ou nucléaire.

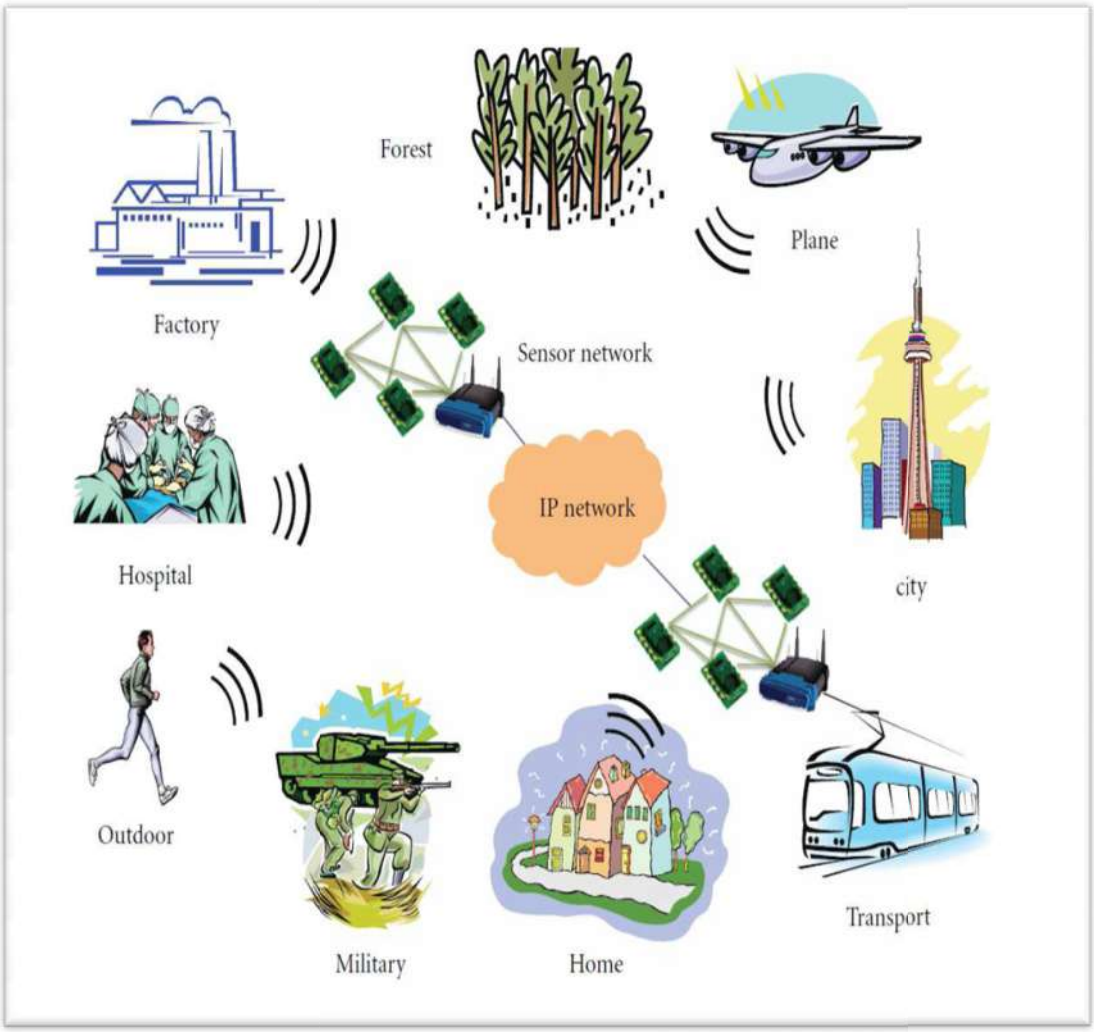


Figure I.9 : *Quelques domaines d'application pour les RCSF.*

Cependant quelques différences existent suivants les fabricants, chacun d'eux développe son type de capteurs, ces types peuvent être mica, mica2, par exemple [1].

10 .Conclusion :

La flexibilité, le prix réduit et les caractéristiques rapides de déploiement des réseaux de capteurs offrent des possibilités infinies de développement dans tous les domaines d'application. Ceci nous permet de penser que les réseaux de capteurs feront bientôt partie intégrante de nos vies et satisferont sûrement les plus grands projets.

Cependant, la réalisation des réseaux de capteurs doit satisfaire quelques contraintes parmi lesquelles on peut citer : la consommation d'énergie, le changement de topologie, la

densité importante des nœuds réseaux... Ces contraintes exigent qu'une auto-organisation des réseaux de capteurs soit mise au point.

Nous nous intéressons, Dans le deuxième chapitre de ce projet, à la présentation des Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil, la Techniques de clusterisation [1].

Chapitre II :

Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs sans fil

1. Introduction:

Pour améliorer le passage à l'échelle des protocoles et garantir plus d'économie en énergie, la hiérarchisation virtuelle des réseaux peut être adoptée. Cela consiste à regrouper les nœuds en groupe dits « Cluster » où chaque cluster est représenté par un seul nœud appelé « ClusterHead ». Nous pouvons distinguer deux types de sélection de cette hiérarchisation: le premier est physique, où le choix du représentant est basé sur les capacités physique du capteur (plus de mémoire, plus de capacité de stockage,…etc.); dans ce cas, on parle d'un réseau de capteurs hétérogènes. Dans le deuxième type, des capteurs physiquement identiques sont utilisés, et le choix du ClusterHead se base sur plusieurs critères; à savoir, l'identifiant, la distance au puits, l'énergie résiduelle,…etc.

2. Caractéristiques d'un protocole hiérarchique:

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

2.1. *L'algorithme de Clustering utilisé:*

Plusieurs algorithmes son t proposés dans la littérature, un classement en trois types de ces algorithmes est proposé dans [09] en se basant sur le type d'algorithme d e contrôle exécuté:

- **Centralisé :** l'algorithme exécuté sur le nœud qui a une vue globale du réseau, généralement, au niveau du puits. Ce type d'algorithme est p eu utilisé à cause de l'overhead généré sui te 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 des pannes et des imprévisibles déconnexions.
- **Distribué :** l'algorithme est exécuté en coopération au niveau de chaque nœud du réseau.

  La synchronisation de s tâches de contrôle est obtenue en échangeant des messages de contrôle. Ce type d'algorithmes minimise la communication relative à la sauvegarde de la vue globale durés eau, car chaque nœud décide, indépendamment des autres, de son rôle et fait connaitre sa décision par l'envoi de message. Cependant, l'efficacité de ces algorithmes dépend de la taille et du nombre de ces messages de synchronisation.
- **Géographique:** l'algorithme de la tâche de contrôle à exécuter par un nœud dépend de sa position géographique.

2.2. *La réélection des ClusterHeads:*

Par sa fonction, le nœud ClusterHead consomme plus d'énergie par rapport aux autres nœuds du réseau. Le ClusterHead coordonne le fonctionnement des nœuds membres de son cluster et agrège leurs données, de ce fait, il dissipe plus d'énergie créant un déséquilibre de la distribution de l'énergie sur le réseau. Pour palier à ce problème, une rotation de ce rôle de ClusterHead est organisée au sein du cluster ou bien au sein du réseau entier. La rotation est effectuée périodiquement ou bien en fonction de la consommation de l'énergie du nœud ClusterHead [09].

2.3. *La nature des clusters générés:*

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

2.4. *La communication intra-cluster:*

La communication entre le nœud ClusterHead et les autres nœuds membres du cluster peut se faire, soit en un seul saut soit, en plusieurs sauts. Dans le cas d'une communication direct (en un saut), les paquets de données sont envoyés directement au ClusterHead. Cela suppose que les nœuds membres sont capables d'atteindre le CH en utilisant une transmission assez puissante pour une bonne réception de données. Ce type de communication engendre une consommation importante d'énergie si la distance, entre le CH et les nœuds, est grande. Pour réduire la consommation de l'énergie, une communication en plusieurs sauts, de petites distances, est utilisée, dans ce cas chaque membre du cluster envoie ses données au plus proche membre de son cluster jusqu'à l'aboutissement au CH. Des communications de type « Unicast » sont souvent utilisées pour réduire le nombre de collisions. On trouve aussi des techniques employées au niveau MAC pour garantir un accès équitable et sans erreurs, à savoir, CDMA (Code Division Multiple Access) en utilisant un code pour chaque cluster, TDMA (Time Division Multiple Access) en allouant pour chaque nœud du cluster un temps spécifique (dit Frame) pour envoyer ses données, ou bien, FDMA (Frequency Division Multiple Access) où chaque nœud utilise une fréquence spécifique pour l'envoi de données[10].

2.5. *La communication inter-cluster:*

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

2.6. *Le niveau d'agrégation de données:*

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

3. Protocoles hiérarchiques existants:

Plusieurs exemples de protocoles hiérarchiques sont décrits dans la littérature(PEGASIS, HEED, LEACH…), nous allons présenter le plus référencés (LEACH):

3.1. *Protocole d'auto-organisation LEACH :*

LEACH **(**Low Energy Adaptive Clustering Hierarch) [11], [12],est le premier et le plus populaire des algorithmes d'auto- organisation hérarchique avec une efficacité énergétique, qui a été proposé pour les réseaux de capteurs sans fil [13], basé sur le clustering adaptatif, qui utilise la rotation randomisée des chefs des clusters (clusters-head) pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds capteurs dans le réseau, figure II.1. LEACH formes des clusters par l'utilisation d'un algorithme hiérarchique (à deux niveaux) distribué, où les nœuds sont autonomes c.-à-d.Qu'ils prennent leurs décisions sans contrôle centralisé.

Tous les traitements de données telles que la fusion et l'agrégation se déroulent localement au cluster.

Sur le registre des avantages de LEACH, nous citons une réduction d'un facteur 7 de la dissipation d'énergie comparativement avec la communication directe [14].

LEACH est fondé sur deux hypothèses de base:

- La station de base est statique et est placée à la porté de tous les nœuds de réseau.
- Tous les nœuds du réseau sont limités en énergie.

Les caractéristiques principales de l'algorithme LEACH se résument en :

- ✓ Tous les nœuds sont considérés statiques, et régis par la contrainte de consommation d'énergie.
- ✓ Contrôle localisé pour le transfert des données.
- ✓ Formation dynamique des clusters.
- ✓ La rotation aléatoire des chefs de groupes.
- ✓ L'agrégation (fusion) locale des données pour réduire le taux de communications avec la station de base.

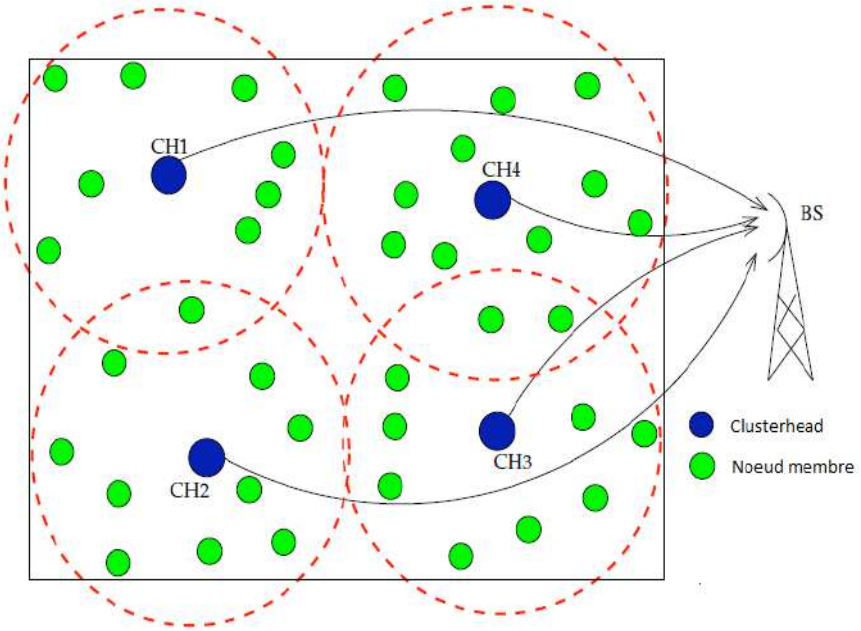


Figure II.1 : *Le Protocole d'auto-organisation LEACH [12].*

3.2. *Principe général de fonctionnement du protocole LEACH:*

LEACH emploie la technique de clustering qui divise le réseau en deux niveaux: les Cluster-Heads (CHs) et les nœuds membres. La vie du réseau est alors segmentée en cycles (rondes ou tours) caractérisées par un choix de cluster-heads de clusters, pour chacun de ces cycles, les cluster-heads sont sélectionnés aléatoirement parmi les capteurs qui n'ont pas été auparavant élu cluster-heads

Donc le protocole se déroule en cycles. Chaque cycle se compose de deux phases: construction (*Set up phase*) et communication (*Steady-state phase*) [15].

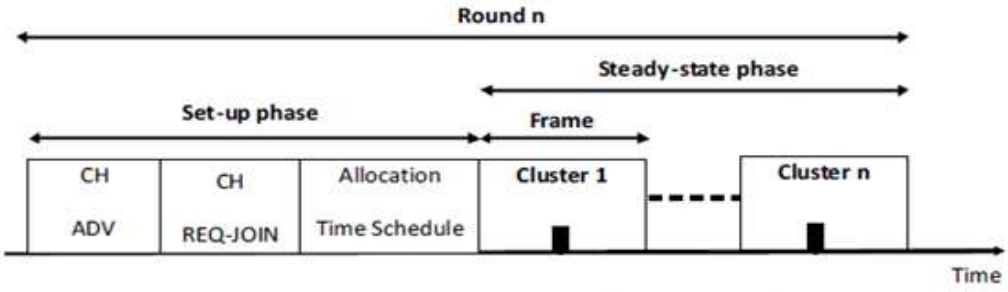


Figure II.2 : *Le déroulement du protocole LEACH en cycles [16].*

3.3. *La Phase de construction (Set up phase) :*

3.3.1. *Election des Cluster-heads :*

La première phase est la construction des clusters en choisissant les chefs (CHs) et en établissant la politique d'accès au media au sein de chaque groupe. Durant cette phase, chaque nœud **n** choisit un nombre aléatoire compris entre 0 et 1. Si ce nombre est inférieur à un seuil T(n), le nœud **n** devient Cluster-heads. T(n) est défini comme suit [17] :

$$T(n)=\begin{cases}\dfrac{p}{1-p[r \bmod(1/p)]} & \text{Si } n\in G\\ 0 & \text{Sinon}\end{cases}$$

Tel que :

- ***p***: le pourcentage des cluster-head
- *r :* est le numéro de la période courante.
- *G :* l'ensemble des nœuds n'ayant pas été sélectionnés cluster-head durant les *(1/p)* dernières périodes.

La figure II.3 represente le pourcentage (Probabilité) d'étre un cluster- head en fonction de nombre de nœuds d'un réseau de capteurs déployés sur une surface carrée de 100*100 (m).

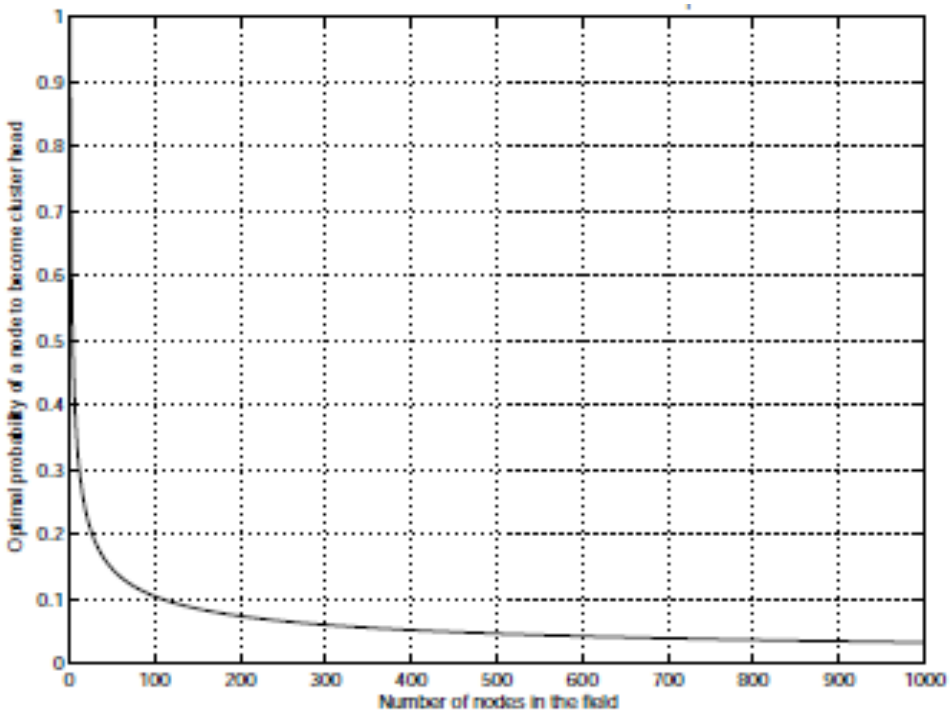


Figure II.3 : *Probabilité Optimale [11] [18]*.

3.3. 2. *Annoncées des Cluster-heads :*

Par la suite, chaque nœud qui s'est élu cluster-head émet un message de notification (ADV Advertisment message) à tous ces voisins. Ce dernier est un petit message qui contient l'identifiant (ID) du nœud et un en-tête qui distingue ce message comme une annonce que ce message doit être diffusé pour atteindre tous les nœuds dans le réseau.

3.3. 3. *Formation des clusters :*

Les nœuds qui récoltent les messages de notification, décident leur appartenance à un cluster. La décision est basée sur l'amplitude du signal reçu, le cluster-head ayant le signal le plus fort est choisi (i.e. le plus proche). En cas d'égalité, un chef aléatoire est choisi. Chaque membre informe son chef de sa décision tout en lui envoyant une demande d'appartenance (JOIN -REQ). Ce message consisté de l'identifiant ID du nœud et l'identifiant ID cluster-head et l'entête (header).

3.3. 4. *Création de la table TDMA :*

La création d'un modèle de communication intra-cluster sans collision est la dernière étape liée à la phase de clustering. Dans le bit d'éviter les collisions entre les nœuds de même cluster, l'algorithme d'auto-organisation LEACH utilise la méthode de multiplexage temporel (**TDMA** : Time Division Multiplexed Access) comme méthode d'accès au médium [19].

Chaque nœud utilise la totalité de la bande passante allouée par le système de transmission durant son slots de temps. En fait, chaque CH agit comme un centre de commande local pour coordonner les transmissions de données dans son cluster. Il crée un modèle de communication en se basant sur TDMA, ensuite il transmet ce modèle aux nœuds de son cluster. Etant donné que chaque nœud connait d'avance le slot de temps qu'il va occuper, il est alors permis de passer à l'état *endormi* durant les slots inactifs. Ainsi, la perte d'énergie due aux états de sur-écoute (overhearing) et d'écoute- passive (idle) est évitée.

Le fonctionnement du protocole est basé sur des cycles ou Ronds (*Round*) : chaque cycle est constitué de deux phases : la phase *Setup* et la phase *Steady-state*. Pendant la phase *Setup* les nœuds exécutent l'algorithme d'élection de Cluster-heads et les clusters sont formés. La phase *Steady-state* est la phase du fonctionnement ordinaire du réseau, elle est subdivisée en trames (frame). La trame, à son tour, est subdivisée en *TimeSlots*. La longueur de la trame est variable d'un cluster à l'autre selon le nombre des nœuds du cluster.

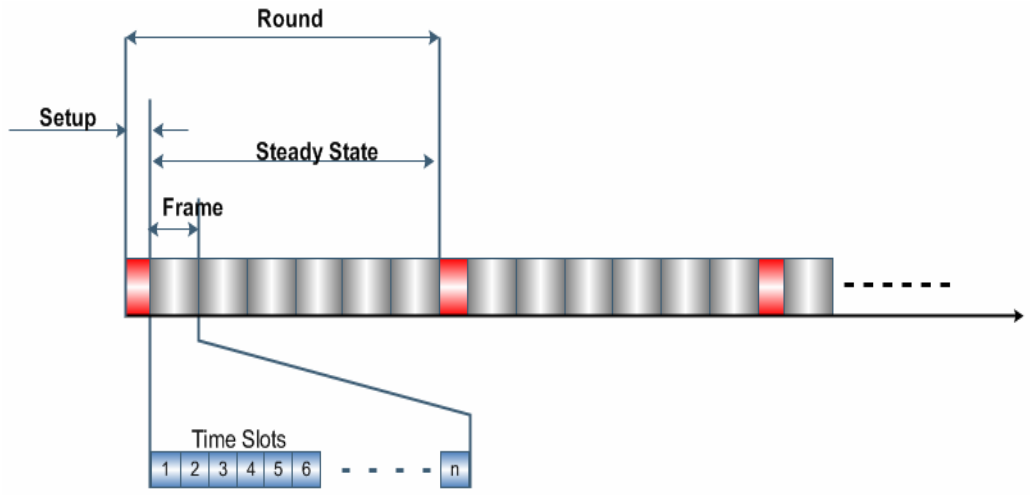


Figure II.4 : *Répartition du temps et différentes phases dans le cycle de LEACH*

La figure II.4 illustre la répartition du temps effectuée par LEACH : le Round "*cycle*", les phases *Setup* et *Steady-State*, la répartition en trames et en *Time Slots*.

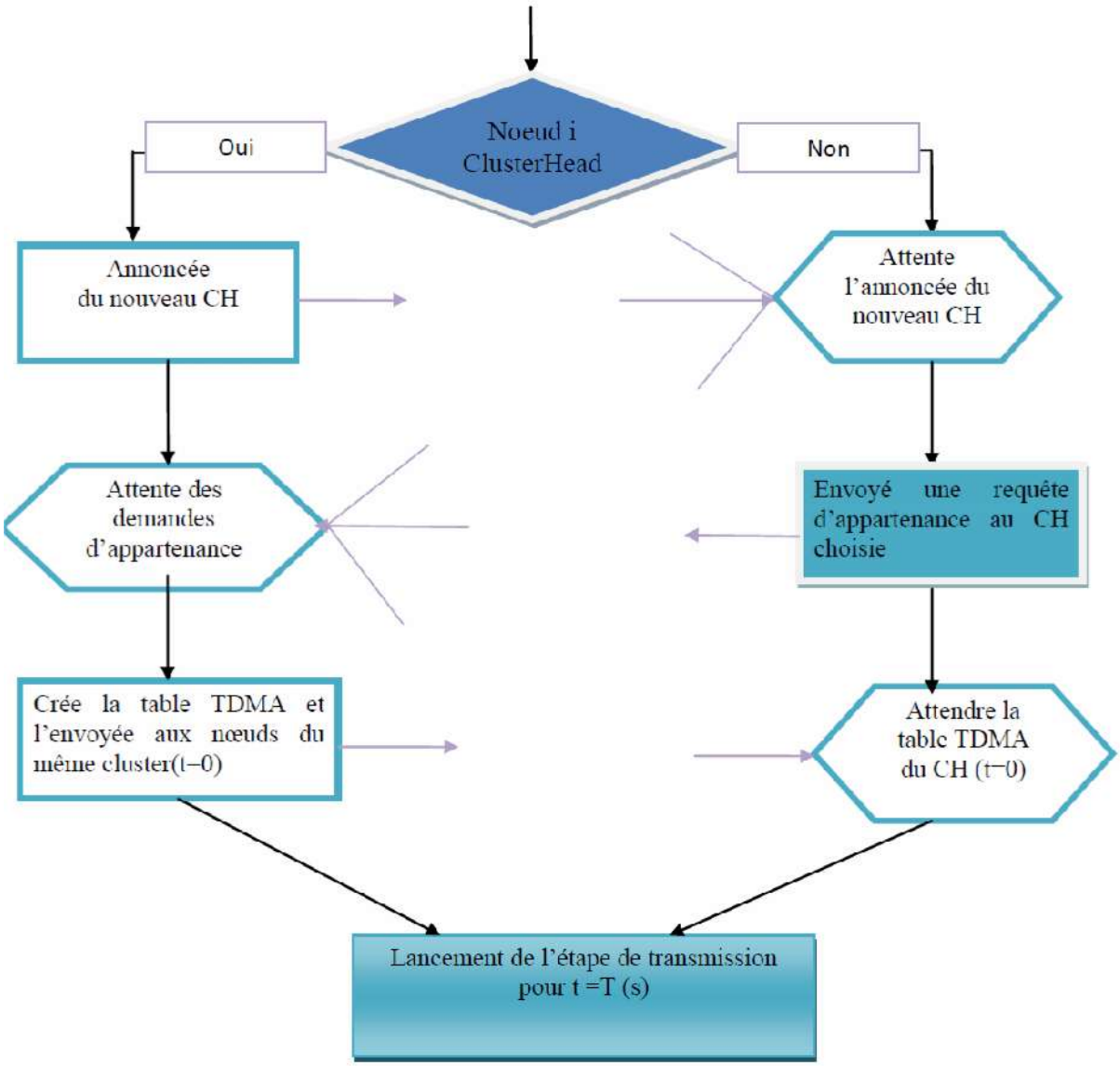


Figure II.5 : *Opérations de la Phase de construction (Set up) de LEACH [15].*

3.3. 5. *Création de la CDMA :*

Encore Chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation **CDMA** (Code Division Multiple Access), il transmet aux nœuds appartenant à son cluster afin de l'utiliser pour leurs transmissions, Ceci afin de minimiser les interférences entre les messages des CHs les plus proches.

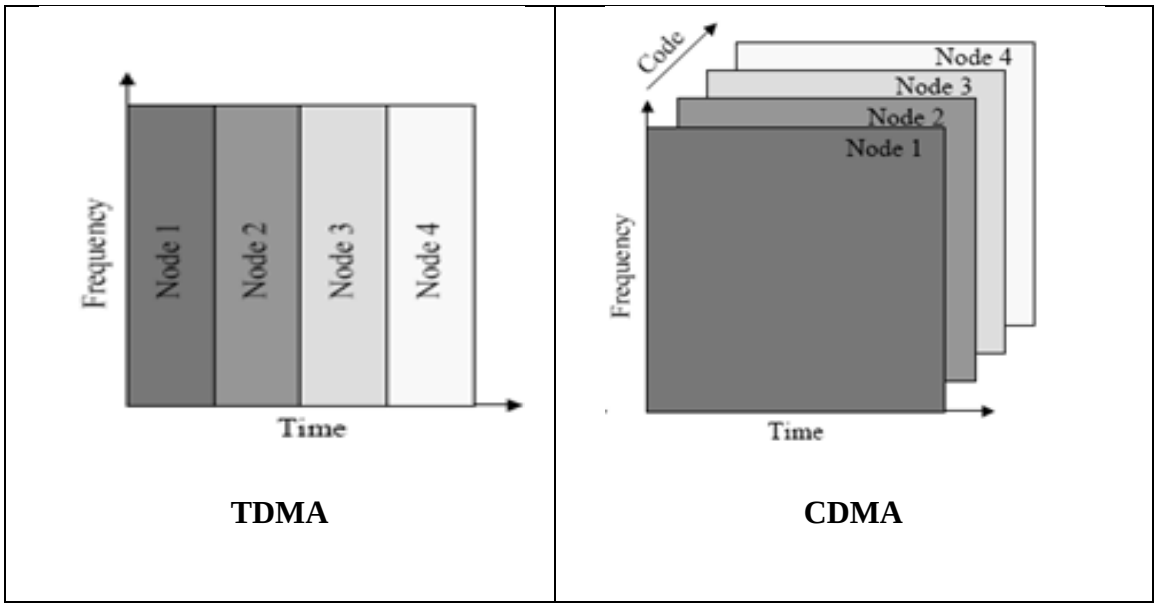


Figure II.6 : *Méthodes D'accès Au Médium.*

3.4. *Phase de communication :*

Pendant cette phase, les nœuds capteurs peuvent commencer à envoyer leurs données captées au cluster-head pendant leurs propres slots. Cela leur permet d'éteindre leur interface de communication en dehors de leurs slots réservés, afin d'économiser leur énergie.

Le cluster-head agrège les données reçues avant de les transmettre au collecteur (Station de base). Cette communication, entre un cluster-head et le collecteur, se fait d'une manière directe, et toutes les communications membre-chef se font avec le code CDMA. Après une certaine période de temps, un nouveau round est initié, et de nouveaux clusters sont établis.

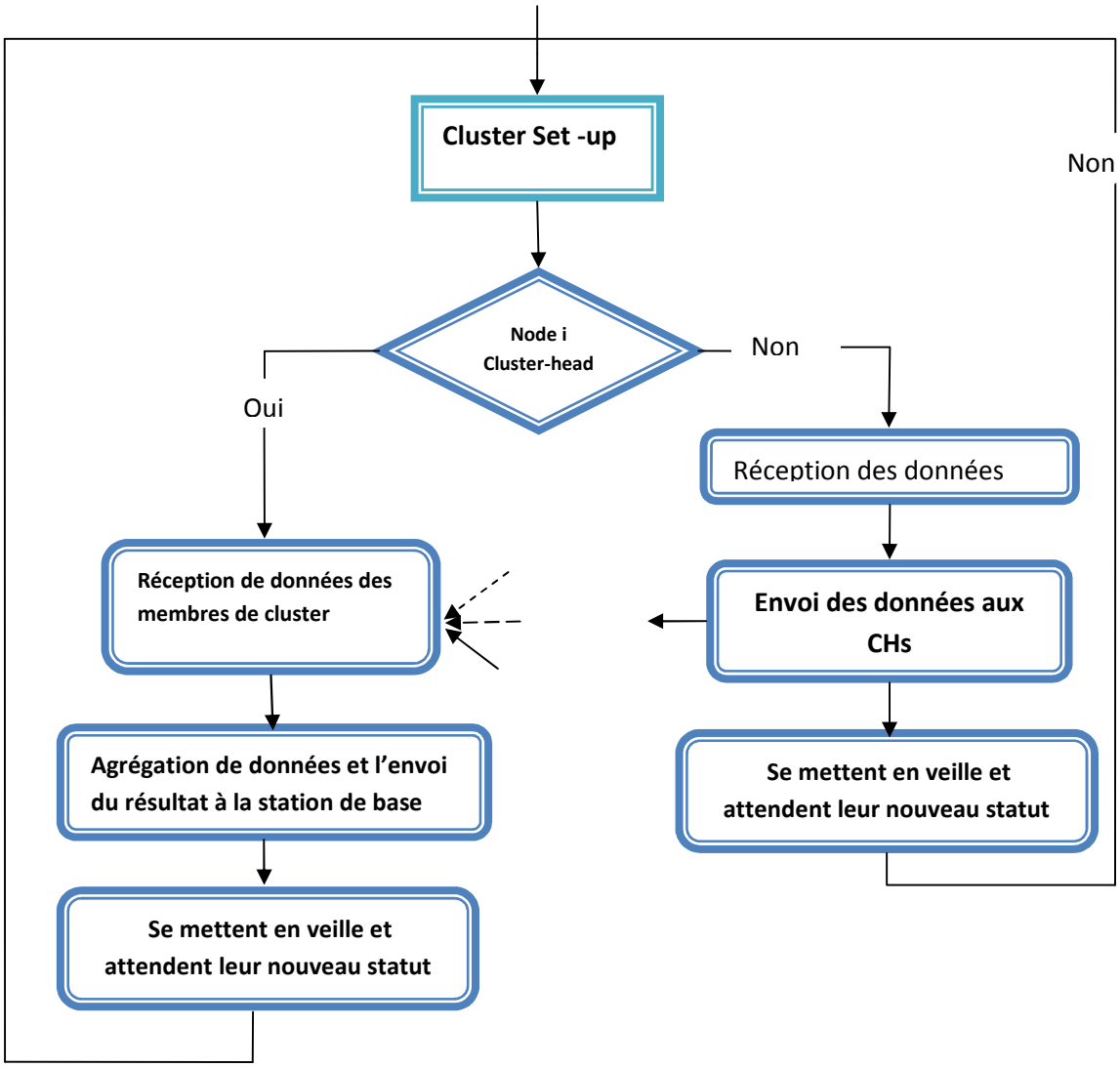


Figure II.7 : *Opérations de la phase de communication (Steady-state) de LEACH [15].*

3.5. *Le modèle énergétique :*

Un capteur utilise son énergie pour réaliser trois actions principales : l'acquisition, la communication et le traitement des données [20] [18].

- **Acquisition :** L'énergie consommée pour effectuer l'acquisition n'est pas très importante. Néanmoins, elle varie en fonction du phénomène et du type de surveillance effectuée.
- **Communication :** Les communications consomment beaucoup plus d'énergie que les autres taches. Elles couvrent les communications en émission et en réception. La figure II.8 présente le modèle d'antenne et les règles de consommation d'énergie associées utilisé par le protocole LEACH [21].

Pour transmettre un message de *k bits* sur une distance de *d mètres*, l'émetteur consomme :

$$E_{TX}(k,d) = \begin{cases} E_{elec} * k + \varepsilon_{fs} * k * d^2 & \text{si } d <= d_0 \\ E_{elec} * k + \varepsilon_{tr} * k * d^4 & \text{si non} \end{cases}$$

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

- L'énergie consommée pour recevoir un message de taille *k (bits)* est :

$$E_{RX}(k) = E_{elec} * k$$

Avec :

E_{elec} : C'est la consommation d'énergie du circuit de transmission et de réception d'un bit.
k : taille d'un message.
d : Distance entre l'émetteur et le récepteur.
ε_{fs} : est le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission inferieur ou égale à la distance seuil **d_0** et **ε_{tr}** : est le facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission supérieure ou égale à la distance seuil $d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{tr}}}$

(Cette distance seuil d_0 est nommée encore dans quelques références $d_{\text{cross over}}$ (Cross over distance))

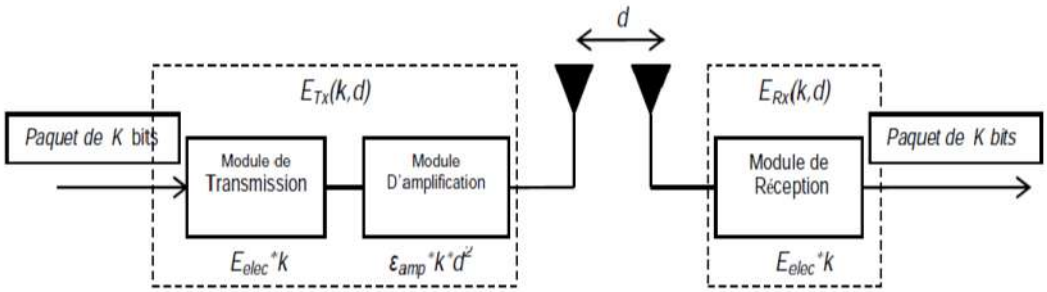


Figure II.8 : *Modèle de consommation d'énergie pour la communication [20].*

- **Traitement des données :** L'énergie consommée pour les opérations de calculs est beaucoup plus faible que l'énergie de consommation. L'énergie nécessaire pour transmettre 1KB sur une distance de 100 mètre est approximativement équivalente à l'énergie nécessaire pour exécuter 3 millions d'instruction avec une vitesse de 100 millions d'instruction par seconde. Ce niveau peut être dépassé en fonction des circuits installés dans les nœuds.

4. L'état de l'art sur la mobilité [22] **:**

Dans cette section, nous commencerons par un état de l'art sur les architectures de collecte des données proposées pour les réseaux de capteurs sans fil utilisant un puits ou/et collecteurs fixes ou mobiles à travers une présentation des projets phares exploitant les réseaux de capteurs sans fil dans le domaine de la surveillance de l'environnement.

4.1. *Architecture à puits fixe et nœuds capteurs fixes :*

Dans cette architecture classique (Figure II-9) les nœuds capteurs et le puits sont fixes. Les données captées sont relayées au puits fixe.

Ce type d'architecture est caractérisé par une forte densité afin d'avoir toujours au moins un chemin entre deux nœuds quelconques du réseau. Cette forme de collecte de données centralisée peut raccourcir la durée de vie de réseau. En effet, il a été démontré dans les travaux ultérieurs [22], que l'architecture à puits ou/et collecteur fixe pose le problème de l'épuisement d'énergie des nœuds relais voisins du collecteur fixe. Le relayage de données à un puits fixe peut causer une consommation d'énergie non uniforme sur l'ensemble du réseau. Et on peut avoir une surcharge au niveau des nœuds relais voisins du puits fixe et former ainsi, un goulot de congestion critique.

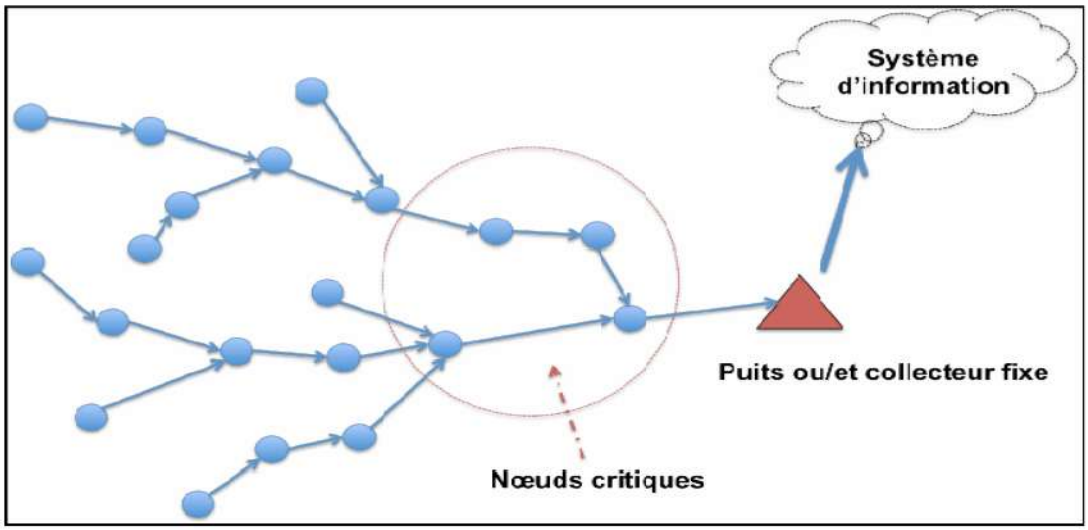


Figure II.9 *: Architecture à puits fixe et nœuds capteurs fixes.*

Comme type d'application environnementale utilisant ce type d'architecture, nous citons le projet :

Projet VOLCANO: Ce projet interdisciplinaire a mis en évidence le potentiel de l'exploitation des réseaux de capteurs dans la compréhension de l'activité volcanique à la surveillance des éruptions des volcans qui sont actifs et dangereux.

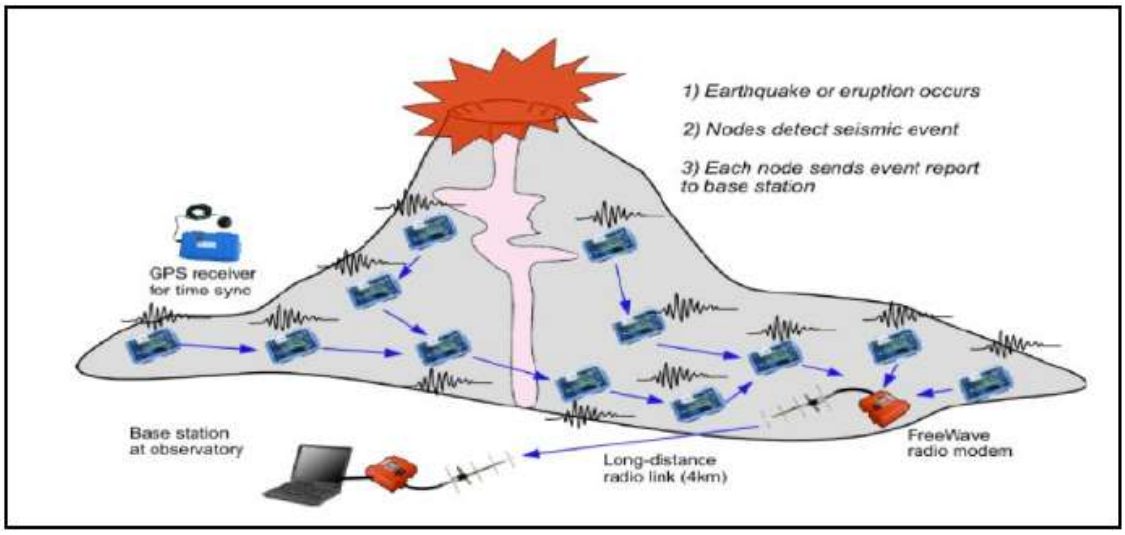


Figure II.10 *: Architecture du réseau de capteurs dédié à la surveillance du volcan.*

4.2. Architecture à puits statiques et nœuds capteurs mobiles :

Dans ces dernières années, la mobilité des nœuds capteurs a été prise en compte par la communauté scientifique [22], Et une architecture dense n'est plus nécessaire pour assurer une totale couverture de captage de la zone à surveiller et une meilleure connectivité du réseau.

Comme exemple de projets utilisant ce type d'architecture où les nœuds capteurs bougent tandis que le puits est fixe, nous citons le projet CENWITS.

A travers ce projet, les auteurs ont développé un système d'assistance pour des secouristes dont l'objectif est de simplifier la localisation de randonneurs ou d'alpinistes. Ce système appelé CenWits (Figure II.11) est basé sur l'utilisation de capteurs portés par les randonneurs. Les capteurs enregistrent localement à intervalles de temps réguliers la position GPS de chacun des randonneurs.

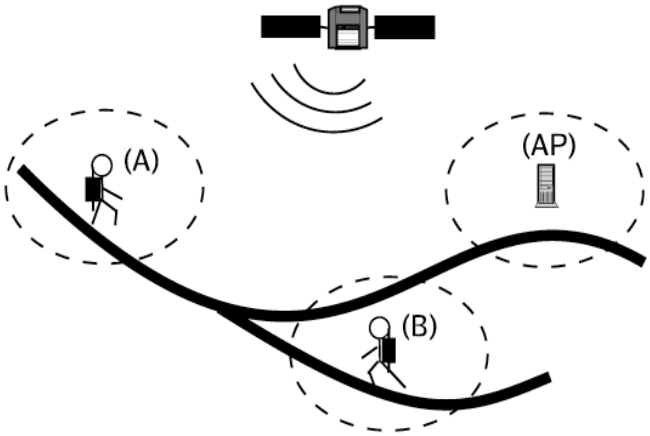


Figure II.11 : *Représentation de l'infrastructure du système Cenwits* [22].

4.3. Architecture à puits mobile et nœuds capteurs mobiles :

Dans ce type d'architecture, la mobilité est considérée aussi bien au niveau du puits collecteur de données qu'au niveau des nœuds capteurs déployés sur la zone d'intérêt.
Comme type d'applications environnementales utilisant ce type d'architecture nous trouvons le projet de suivi des zèbres (ZebraNet) [22].

L'objectif de ce projet est de déployer des capteurs sur des Zèbres de la réserve de Sweetwaters à MPALA en plein centre du Kenya.

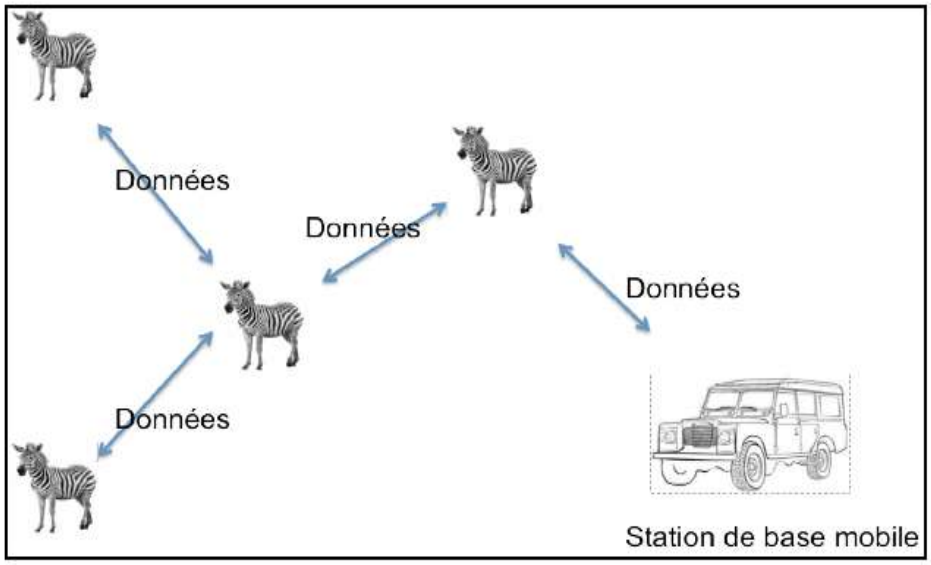


Figure II.12 : *Architecture de collecte de données dans ZebraNet.*

4.4. *Architectures à puits mobile et nœuds capteurs fixes :*

Ce type d'architecture représente une solution intéressante qui est l'utilisation d'agents mobiles omniprésents qui se déplacent d'une manière aléatoire ou contrôlée pour rassembler des données lorsqu'ils se rapprochent des nœuds capteurs fixes. Dans la littérature, ces agents mobiles sont appelés des MULEs (Mobile Ubiquitous LAN Extensions), ou puits mobiles ou encore collecteurs de données mobiles. Les éléments mobiles peuvent être des robots, des humains, des animaux ou des véhicules. Ces éléments mobiles forment une couche de transport de paquets intermédiaire entre les points d'accès et les nœuds capteurs fixes déployés. Ils transportent les informations récoltées jusqu'à un relai ou un centre de traitement de données. Leur mobilité prévisible peut être utilisée pour l'économie d'énergie. Le temps de passage de l'élément mobile peut être fixé selon un calendrier de visite prévu. Ainsi, les nœuds capteurs ne passent en mode de transmission de données que lors du contact de l'élément mobile.

- une couche composée de points d'accès chargés de récupérer les données portées par les éléments mobiles et les transmettre à la plateforme de traitement de données. Le positionnement des points d'accès peut être fait selon les besoins en connectivité et en économie d'énergie.
- une couche représentant les éléments mobiles dont la mobilité peut être contrôlée, prévisible ou non. Ils assurent la connectivité du réseau et lui offre souplesse et évolutivité à moindre coût.
- une couche contenant les nœuds capteurs fixes destinés à mesurer les valeurs physiques des phénomènes à observer.

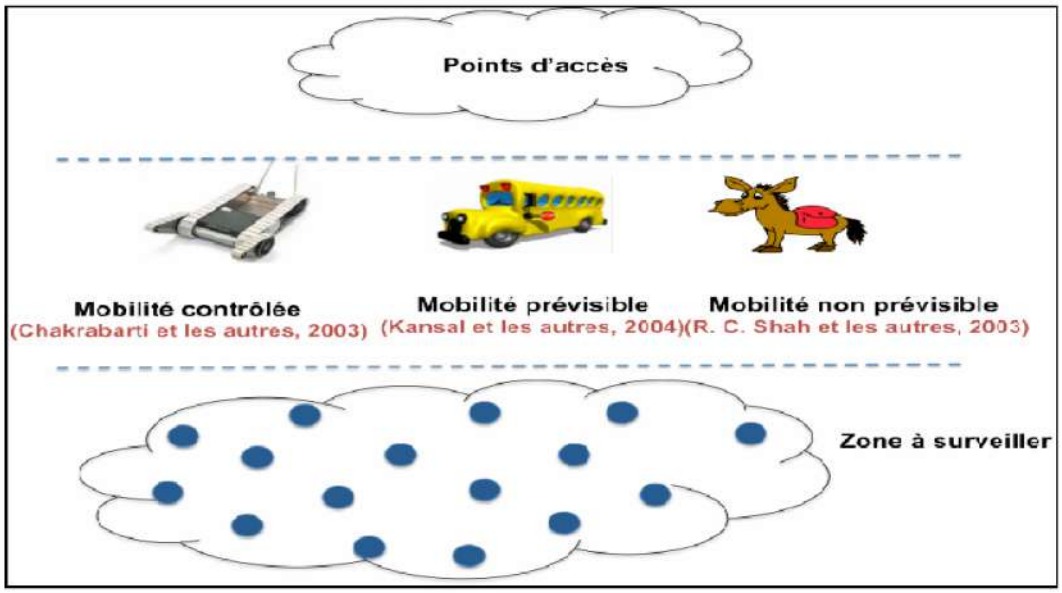


Figure II.13 : *Schéma d'architecture à puits mobile et nœuds capteurs fixes.*

Cette architecture présente l'avantage de relaxer la contrainte de forte densité pour assurer une connectivité suffisante du réseau de capteurs sans fil déployé sur une large zone de captage. Ainsi, une architecture clairsemée de réseau de capteurs sans fil devient une option faisable permettant, ainsi, d'éviter les problèmes de collision et de pertes de messages induits par l'utilisation d'un réseau dense.

Les éléments mobiles, lors de leur visite des nœuds capteurs fixes du réseau, peuvent établir des connexions à un nombre de sauts réduit voire même à un simple-saut ce qui permettra de réduire les collisions et la perte de messages.

Un autre avantage apporté par l'utilisation des éléments mobiles dans le réseau réside dans le fait d'éliminer l'épuisement prématuré d'énergie des nœuds proches du puits. Les éléments mobiles peuvent aider à résoudre ce problème en allant collecter dans différentes zones du réseau, tout en assurant un équilibrage de charge énergétique plus au moins uniforme, même dans le cas d'une architecture dense du réseau.

Tableau II.1 : *Tableau comparatif des différentes architectures utilisées [22].*

Type d'architecture	Avantages	Inconvénients
A puits statique et nœuds capteurs statiques (Werner-Allen et al., 2006) (Padhy et al., 2005) (Mainwaring et al., 2002)	Facile à mettre en œuvre Protocoles de routage simples	Pas d'équilibrage de charges (Problèmes de nœuds goulots d'étranglement en voisinage du puits) Perte d'énergie à la retransmission des données.
A puits statiques et nœuds capteurs mobiles (Handcock et al., 2009) (Huang et al., 2005)	Communication à 1-saut Pas de problème de connectivité du réseau. Pas de perte d'énergie du à la retransmission des données.	Risque d'isolement du puits, Les nœuds mobiles doivent convergés vers le puits pour faire le transfert des données. Difficulté d'optimisation de déploiement des puits.
A puits mobiles et nœuds capteurs statiques (Shah et al., 2003) (Jea et al., 2005) (Chakrabarti et al., 2003)	Equilibrage de charge Résout le problème de connectivité du réseau. Transfert de données à 1-saut Pas de perte d'énergie du à la retransmission des données.	Problème liés à la gestion de mobilité (aléatoire, contrôlée, prédictible) Temps de visite, durée de contact. Problème de synchronisation entre plusieurs puits mobiles
A puits mobiles et nœuds capteurs mobiles (Juang et al., 2002).	Déploiement aléatoire Gain en consommation l'équilibrage de charge énergétique Optimisation du routage diminution du délai de bout en bout Résolution des problèmes de connectivité du réseau.	Problème liés à la gestion de mobilité (aléatoire, contrôlée, prédictible) du puits mobile et des nœuds capteurs mobiles Temps de visite, durée de contact. Problème de synchronisation entre plusieurs puits mobiles

5. Conclusion :

Le routage hiérarchique est un type particulier de routage de données dans les WSNs, Il vise à rendre les protocoles plus favorables au passage à l'échelle tout en restant plus économique en consommation d'énergie.

Le Clustering est la technique la plus utilisée par les protocoles hiérarchiques. Il consiste a regrouper les nœuds dans des clusters avec un seul représentant qui permet l'agrégations de données de son cluster et le routage de ces informations vers la station de base.

LEACH adopte une agrégation de données au niveau des CHs pour réduire la taille des données transmises à la station de base, et par conséquent, il permet de consommer moins d'énergie.

Dans le chapitre suivant on adopte le protocole LEACH, on considère la mobilité d'un réseau de capteur et par simulation on montre l'évolution de ces propositions sur les performances du réseau et sur le protocole adopté lui-même.

CHAPITRE III

EVALUATION DES PERFORMANCES

DU PROTOCOLE LEACH AVEC STATION DE BASE MOBILE

1. Introduction:

Le routage hiérarchique des données dans les WSNs, est une classe spécifique des protocoles de routage, elle englobe les solutions qui adoptent une restructuration du réseau physique en un système d'hiérarchie logique, visant l'optimisation de la consommation de l'énergie, le passage à l'échelle et d'augmenter la durée de vie; à titre d'exemples :le protocole de clustering et de routage de données LEACH.

Plusieurs solutions de routage hiérarchique sont présentées dans la littérature [11] [23] [24]. Chacune d'elle présente une technique différente pour minimiser la consommation de l'énergie sur l'ensemble du réseau. Néanmoins, des améliorations restent à apporter pour achever de meilleures performances.

L'objectif a été de concevoir une nouvelle technique au protocole hiérarchique LEACH qui garantie une meilleure consommation en énergie.

La station de base peut être mobile. Autrement dit, nous pouvons imaginer un réseau de capteurs fixes déployé; la collecte des informations pourrait se faire lors du passage automatisé d'une station de base mobile. Plusieurs choix peuvent être faits. La station peut passer par chaque capteur pour récupérer les informations, il s'agit alors simplement pour le capteur de transmettre ses données lorsqu'il détecte un puits à portée radio.

On adopte le protocole LEACH et nous nous intéressons à la mobilité de la station de base afin d'évaluer les performances de cette technique sur le réseau. Différentes trajectoires et différentes vitesses ont été proposées à la station de base mobile afin de voir l'impacte de ces dernières sur la stabilité, l'énergie consommé et la durée de vie du réseau.

Des résultats des simulations du protocole (LEACH avec station de base mobile) vont être présentés et comparés avec le protocole de routage LEACH. Les simulations effectuées permettent d'évaluer les performances de la solution et de consolider nos affirmations.

2. La Simulation dans les réseaux de capteurs sans fil. :

2.1. *Besoins et limitation:*

A cause du coût élevé et de la complexité liée au déploiement et à la maintenance d'un réseau de capteurs par exemple pour le teste des différents solutions d'implémentation sur des plateformes réelles et sur des réseaux de centaines et milliers de nœuds n'est souvent pas

possible pour des raisons de temps, de coût, de logistique, etc. Ceci explique pourquoi de plus en plus d'intérêt est accordé aux outils de simulations pour les WSN.

D'une manière générale, pour tester le bon fonctionnement d'un processus et évaluer ses performances, on utilise trois méthodes d'évaluation : la méthode analytique, la méthode par simulation et la méthode par mesure sur un système réel existant. Ces trois méthodes diffèrent par le coût, la durée et l'exactitude des résultats [22].

En ce qui concerne la méthode de simulation, il s'agit d'implanter un modèle du système à l'aide d'un programme de simulation adéquat. C'est une technique largement utilisée pour l'évaluation des performances. Elle présente l'avantage par rapport aux méthodes analytiques de traduire d'une manière plus réaliste le comportement du système à évaluer. On recourt généralement à la simulation pour évaluer un nouveau système ou bien pour des raisons de coûts d'évaluation par des mesures réelles. En plus, la simulation permet de visualiser les résultats sous forme de graphes faciles à analyser et à interpréter. Et c'est pour ces raisons que nous avons décidé d'utiliser la simulation pour tester le bon fonctionnement et évaluer les performances de notre algorithme de clustering avec station de base mobile et reste à choisir quel simulateur utiliser?

2.2. *Le simulateur MATLAB :*

Nous avons choisi le simulateur Matlab qui est le plus populaire des simulateurs dans le domaine académique. Sa force réside dans son code ouvert qui a permit aux chercheurs d'évaluer, à chaque fois, leurs contributions pour faire améliorer la recherche sur ce thème.

3. Les Scénarios de la simulation:

Les simulations ont été réalisées avec trois scénarios, chaque scénario à ça propre infrastructure virtuelle en ce qui concerne la forme géométrique de la trajectoire et la vitesse de la station de base. On utilise le protocole d'auto organisation et de routage hiérarchique de données LEACH comme référence d'évaluation, une simulation d'une station de base mobile à été réaliser avec ce dernier. La station de base mobile prend dans chaque scénario une trajectoire prédéterminée avec différentes vitesse afin de voir l'impacte de la mobilité sur la stabilité et la consommation d'énergie du réseau complet. Cette mobilité peut être imposée par la nature de l'application déployée, ou pour améliorer les performances du réseau en termes de connectivité, densité, durée de vie du réseau, etc. Nous allons présenter la notion d'infrastructure virtuelle comme zone de rendez-vous pour les requêtes de la station de base mobile et les données des

nœuds sources (clusters heads) afin d'optimiser la dissémination.

La question qui se pose:"existe-t-il une infrastructure optimale qui peut améliorer les performances du réseau ? ".

3.1. *La modélisation du réseau:*

L'évaluation du protocole 'LEACH avec station de base mobile' est réalisée sur un réseau de capteurs sans fil de 100 nœuds fixe déployés sur une zone carré de surface (100*100) m^2.

Ce réseau est considéré:

- ✓ ***Homogène:*** Tous les nœuds du réseau sont semblable, en ce qui concerne, les caractéristiques techniques et l'énergie initiale (E_0).

- ✓ ***Non uniforme:*** Les nœuds du réseau sont déployés d'une manière aléatoire sur la zone de captage.

- ✓ ***Statique*****:** Les nœuds sont immobiles durant toutes les simulations. Et avec les hypothèses suivantes:

- Le rayon de transmission est supposé fixe et semblable pour tous les nœuds du réseau;
- La consommation de l'énergie lors de l'envoi et la réception d'un message est la même;
- La distance, séparant deux nœuds, peut être calculée selon la force du signal reçu;
- Les nœuds du réseau ne disposent d'aucun dispositif de géo-localisation;
- Tous les nœuds sont considérés comme sources de données avec un prélèvement et une dissémination périodique.

- ✓ ***Mobilité :***

  La station de base est mobile et prend trois formes géométriques qui seront décrites par la suite et pour chaque forme géométrique on adopte trois vitesses différentes de la station de base.

- ➢ ***Hétérogénéité***: un réseau hétérogène est constitué par deux types de nœuds à des caractéristiques techniques semblables [18].
  - Le 1^{er} type : constitué par m*n nœuds appelés nœuds avancés (Advanced ondes).
  - Le 2^{eme} type : constitué par (1-m)*n nœuds appelés nœuds normaux.

Avec **n** : Le nombre total des nœuds du réseau .
m : La fraction (Pourcentage) des nœuds avancés.

L'énergie initial:

- L'énergie initiale d'un nœud normal est égale à $E_{0.}$
- L'énergie initiale d'un nœud avancé est égale à E_0 (1+a).

Avec **a** : Le facteur supplémentaire d'énergie entre un nœud normal et nœud avancé .

3.2. *Les Paramètres de simulation:*

Pour l'analyse des résultats, nous avons adopté les Paramètres utilisé pour le protocole LEACH. Le tableau suivant résume l'ensemble des paramètres utilisés pour les simulations:

Tableau III.1: Les paramètres des simulations.

Les Paramètres	Les Valeurs
Le nombre des nœuds Total (N)	100
Surface (LxL, L longueur du réseau)	100x100 m^2
Le nombre de sauts (K)	1
L'énergie initiale pour un nœud	0.5 J
La position de la station de base	mobile
La taille des messages de données	4000 bit
L'énergie consommée pour la transmission « **ETX** »	50 nJ/bit
L'énergie consommée pour la réception « **ERX** »	50 nJ/bit
le facteur d'amplification du signal (**Efs)** pour « **d<=d0** »	10 pJ/bit
le facteur d'amplification du signal(**Emp)** pour « **d>d0** »	0.0013 pJ/bit
distance seuil (d_0)	87.705801930702930 m
L'énergie d'agréation (EDA)	5 nJ
l'énergie totale de system(E)	50 J
Le nombre des rounds 'tours' (**r** max)	3000 rounds
Valeur pour Les nœuds avancés (m,a)	m=20% , a=1
La probabilité d'être CH (P)	10%

3.3. Algorithme de simulation de la mobilité:

Ce programme assure la mobilité de la station de base dans le champ de captage.
La trajectoire de la station de base à une forme générale :

$$y = ax + b$$

$$x = \pm v\, r + d$$

$$d = r\, v$$

Avec :

a : la pente du droit.

b : la position initial de la station de base (m).

v : la vitesse de la station de base (m/round).

r : round (tours).

d : la distance totale balayée par la station de base (m).

(x, y) : les cordonnées instantanée de la station de base (m).

- ***Pour une trajectoire diagonale :***

$$y = ax \text{ et } x = \pm v\, r + d$$

- ***Pour une trajectoire axiale :***

$$y = 50 \text{ et } x = \pm v\, r + d$$

- ***Pour une trajectoire carrée :***

  La trajectoire carrée est composé de quatre trajectoires particulières :

  - **Première trajectoire :**

$$x = 0 \text{ et } y = +v\, r + d$$

  - **Deuxième trajectoire :**

$$y = 100 \text{ et } x = +v\, r + d$$

  - **Troisième trajectoire :**

$$x = 100 \text{ et } y = -v\, r + d$$

  - **Quatrième trajectoire :**

$$y = 0 \text{ et } x = -v\, r + d$$

3.4. Métriques d'évaluation:

L'objectif des simulations faites est d'évaluer et analyser le protocole proposé selon trois métriques : la stabilité du réseau, la consommation d'énergie totale par rond ou bien les coûts des

communications ainsi que le nombre des paquets de données envoyés par les chefs de groupe à la station de base mobile.

- ✓ ***Stabilité du réseau :*** C'est la durée jusqu'à la mort du premier nœud du réseau.

- ✓ ***Cout des communications :*** C'est l'énergie totale consommée par tous les capteurs.

- ✓ ***Paquets to station de base mobile: (quantité d'information) :***C'est la quantité de données (messages) reçus par la station de base.

4. Résultats et analyses des simulations :

Les simulations ont été faites pour un réseau homogène et hétérogène. Pour chaque scénario on fixe et on détermine la géométrie de la trajectoire et on fait varier la vitesse de la station de base. L'objectif était de montrer l'évolution des métriques d'évaluation choisi en fonction de ces deux paramètres mais vue la complexité du programme de simulation on a fixé les vitesses adoptées par la station de base à : 1m/rond, 5m/rond et 10m/rond. (Lente, moyenne et rapide).

Les résultats de simulation seront présentés par des courbes qui montrent l'évolution de la stabilité, l'énergie totale consommé par rond et la quantité des paquets de données envoyées à la station de base en fonction de la géométrie de la trajectoire et la vitesse de la station de base.

4.1. ***Résultats de simulation pour un réseau homogène:***

4.1. 1. *Scenario 1:*

On adopte le protocole LEACH et on simule une station de base mobile qui prend une trajectoire sur la diagonale du champ de captage et qui devise ce dernier en deux moitié égaux. La figure 3.1 montre l'environnement de la simulation.

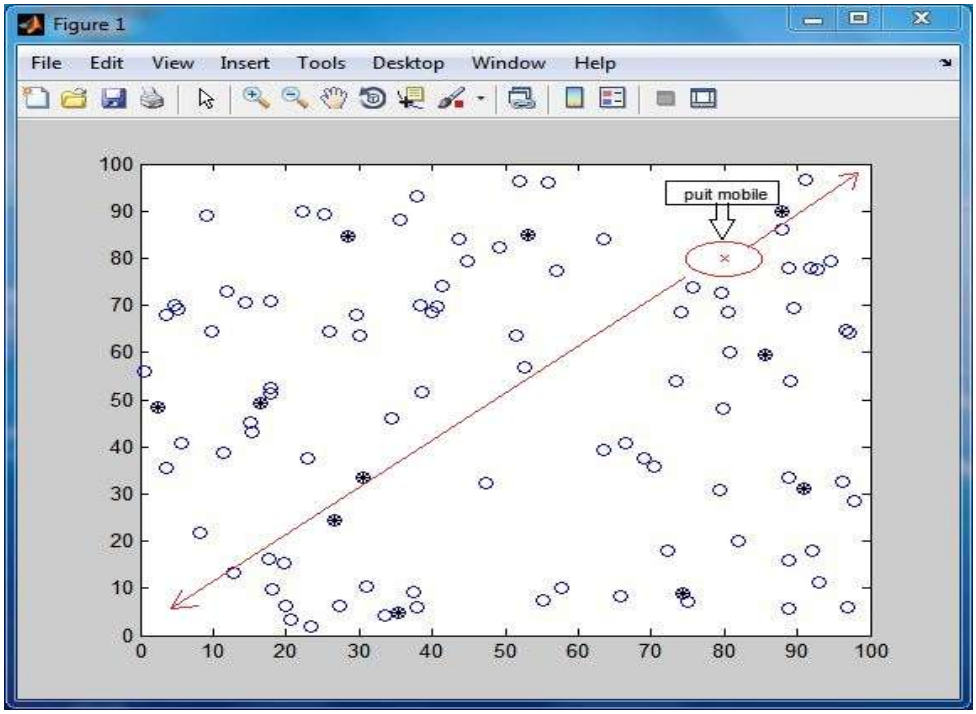


Figure. III.1 : *La mobilité de la station de base sur une trajectoire diagonale.*

- ***La Stabilité:***

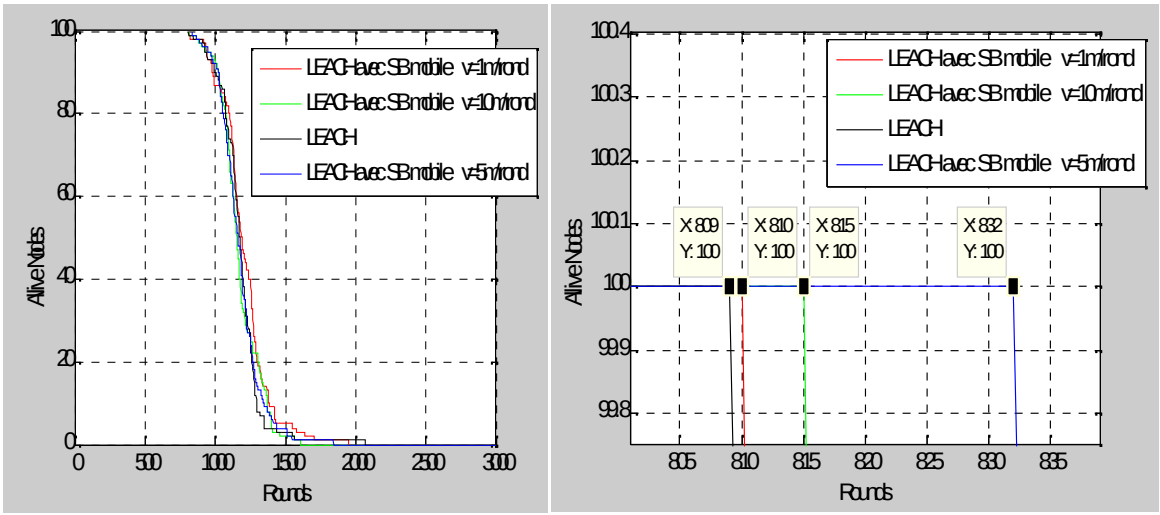


Figure. III.2 : *la stabilité du réseau avec station de base mobile sur la diagonal.*

La figure 3.2 montre que la mobilité de la station de base sur une trajectoire diagonale augmente la stabilité du réseau de **23 ronds** par rapport au protocole LEACH et elle est meilleure pour une vitesse de **5 m/rond**.

➢ ***L'énergie :***

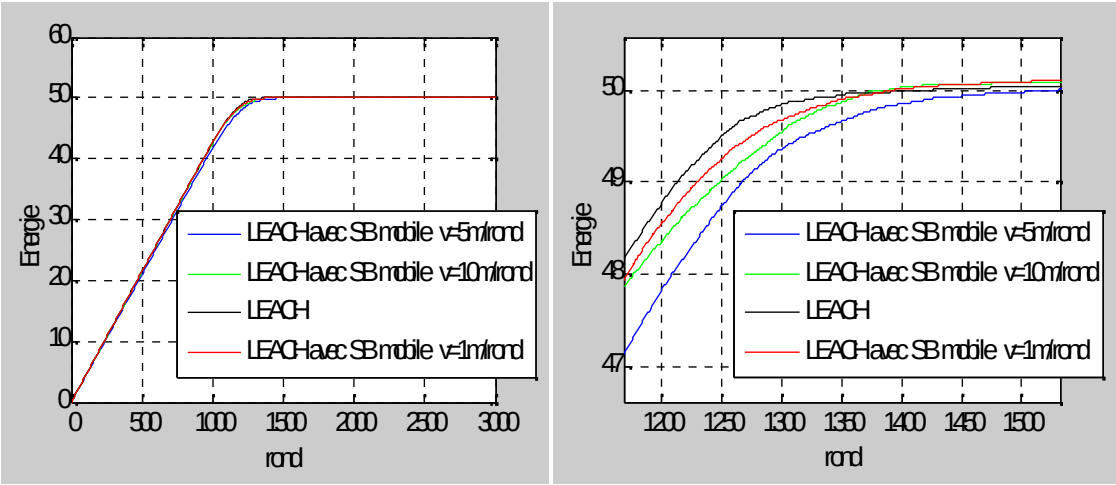


Figure. III.3 : *l'énergie consommée par le réseau avec station de base mobile sur la diagonal.*

La figure 3.3 montre que la mobilité de la station de base sur une trajectoire diagonale diminue la consommation d'énergie totale par rond et cette consommation est minimale si la station de base a une vitesse de **5m/rond**.

➢ ***La quantité de données reçues par la station de base :***

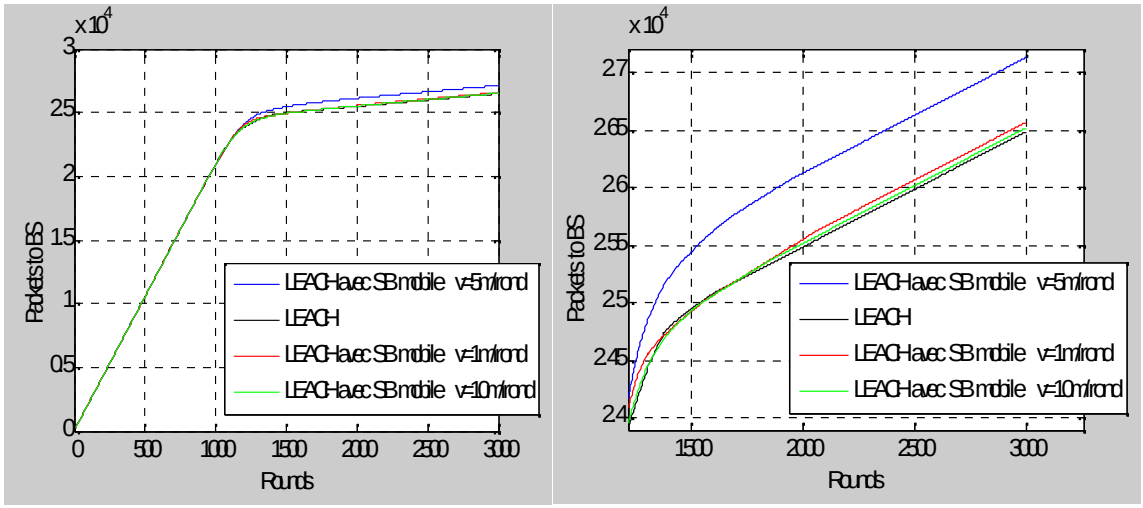


Figure. III.4 : *Les paquets de données reçus par la station de base mobile.*

La figure 3.4 montre aussi que la mobilité de la station de base augmente le nombre de paquets de données reçus par cette dernière et le nombre de ces paquets de donnés est maximum pour une vitesse **de5m/rond** de la station de base.

❖ ***Conclusion A :***

La mobilité de la station de base sur une trajectoire diagonale avec une vitesse de 5m/rond augmente les performances du réseau.

4.1. 2. *Scenario 2:*

La simulation de la station de base mobile a été réalisée avec le protocole de routage LEACH sur une trajectoire axiale qui devise le champ de captage carré on deux partie égaux avec les différentes vitesses citées. La figure 3.5 montre l'environnement de ce scénario.

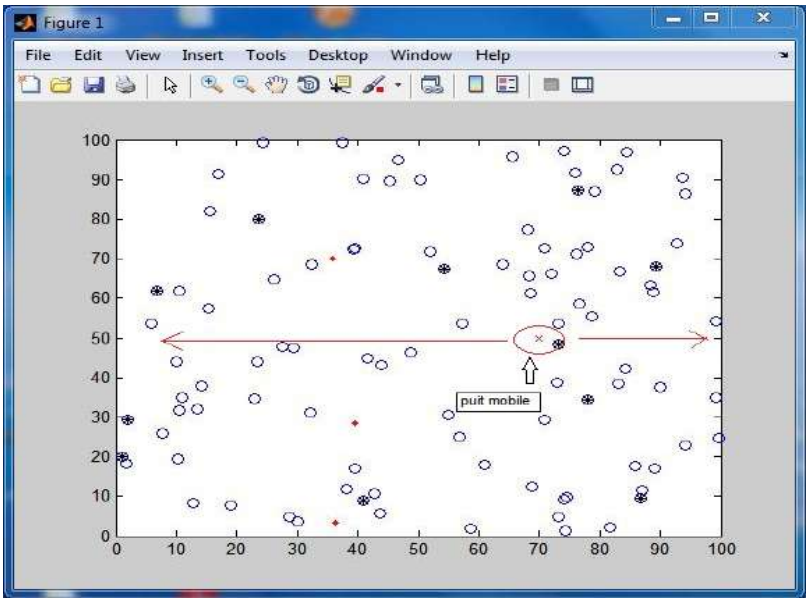


Figure.III.5 : *La mobilité de la station de base sur une trajectoire axiale.*

- ***Stabilité :***

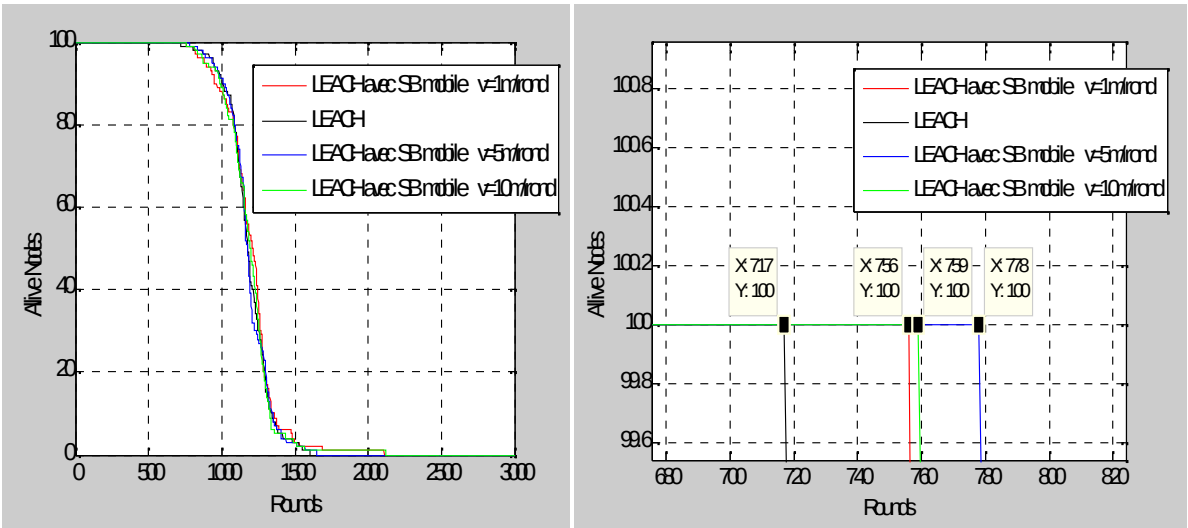


Figure. III.6 : *la stabilité du réseau avec station de base mobile sur une trajectoire axiale.*

La figure 3.6 montre que la mobilité de la station de base sur une trajectoire axiale augmente la stabilité du réseau de **61 ronds** par rapport au protocole LEACH et elle est meilleure pour une vitesse de **5 m/rond**.

➢ ***L'énergie :***

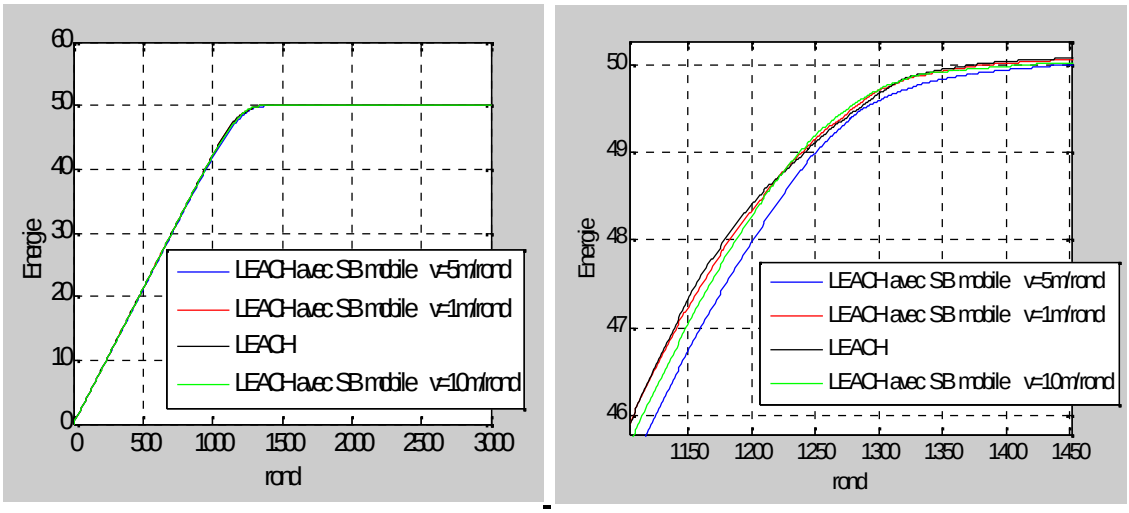


Figure. III.7 : *L'énergie du réseau avec station de base mobile sur une trajectoire axiale.*

La figure 3.7 montre que la mobilité de la station de base sur une trajectoire axiale diminue la consommation d'énergie totale par rond et cette consommation est minimale avec une vitesse de **5m/rond** de la station de base.

➢ ***La quantité de données reçues par la station de base :***

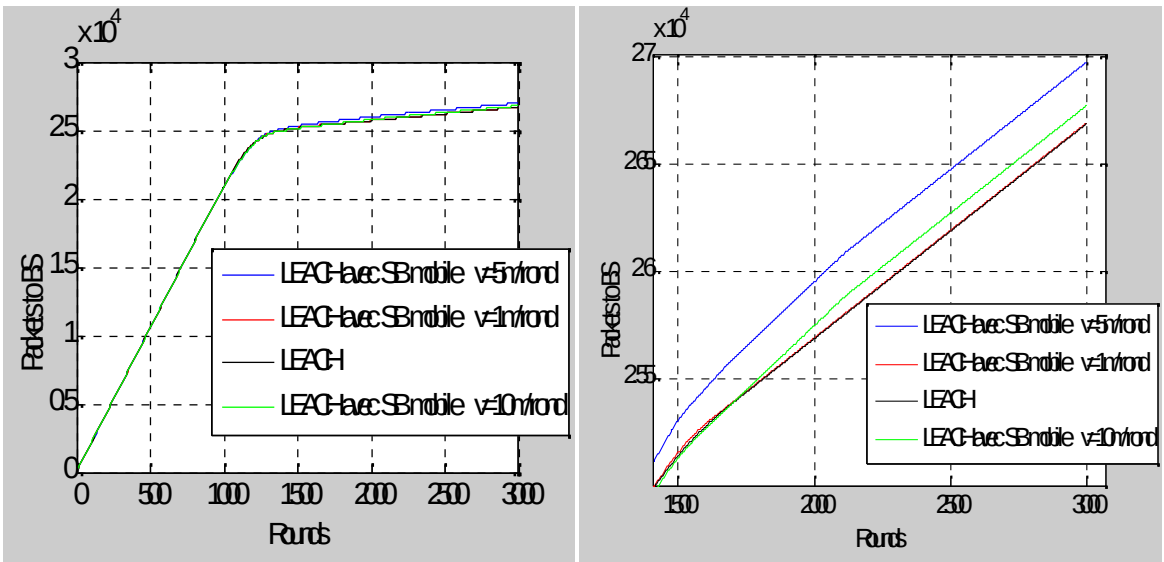


Figure. III.8 : *Les paquets de données reçus par la station de base.*

La figure 3.8 montre aussi que la mobilité de la station de base augmente le nombre de paquets de données reçus à partir des chefs de clusters et le nombre de ces paquets de donnés est maximum pour une vitesse de **5m/rond** de la station de base.

❖ ***Conclusion B:***

La mobilité de la station de base sur une trajectoire axiale avec une vitesse de 5m/rond augmente les performances du réseau.

4.1. 3. *Scénario 3:*

Dans ce troisième scénario la zone de rendez-vous ou la trajectoire de la station de base mobile est un anneau carré sur le périmètre du champ de captage. La figure 3.9 montre l'environnement de ce scénario.

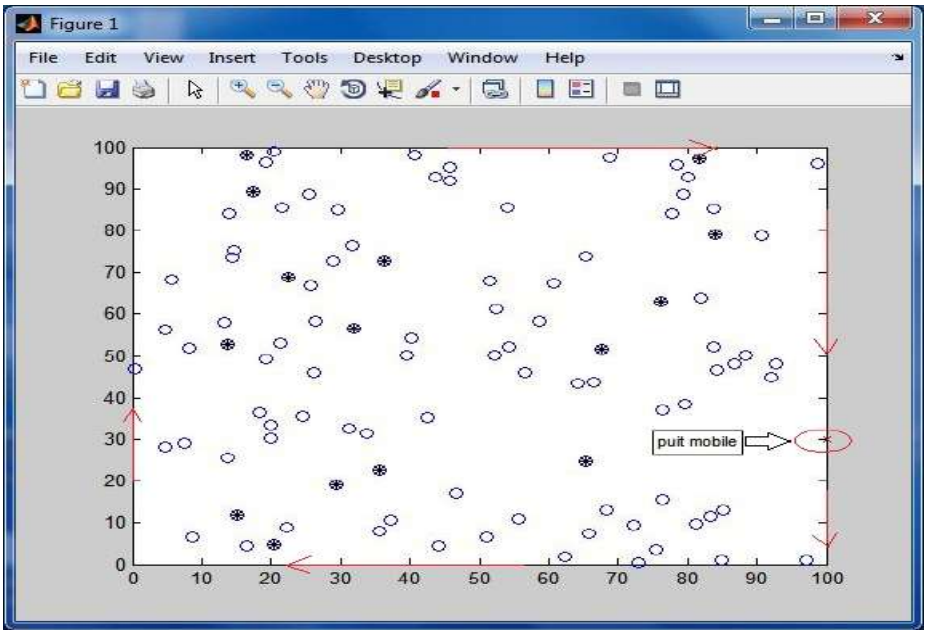


Figure. III.9 : *La mobilité de la station de base sur le périmètre du champ de captage carré.*

➢ ***Stabilité :***

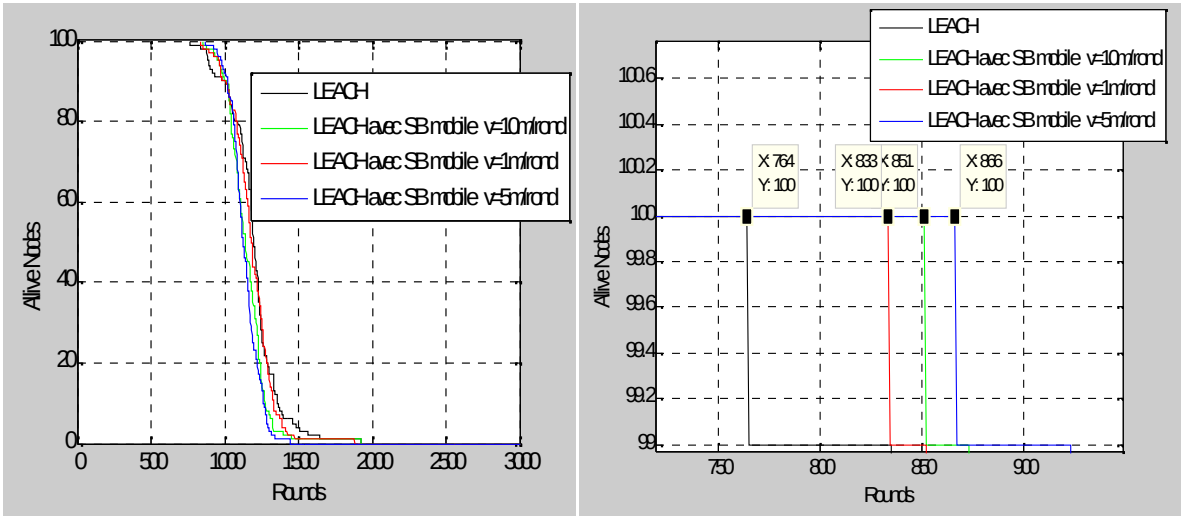


Figure. III.10 : *la stabilité de réseau avec station de base mobile sur le périmètre du champ de captage.*

La figure 3.10 montre que la mobilité de la station de base sur le périmètre du champ de captage augmente la stabilité du réseau de **102 ronds** par rapport au protocole LEACH et elle est meilleure pour une vitesse de **5 m/rond**.

- ***L'énergie :***

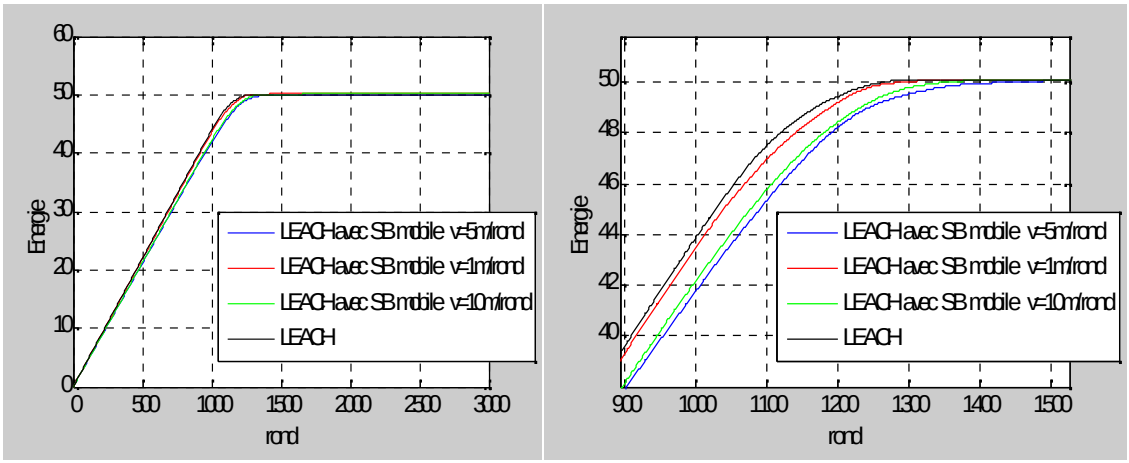


Figure. III.11: *L'énergie consommée par le réseau avec station de base mobile sur le périmètre du champ de captage.*

La figure 3.11 montre que la mobilité de la station de base sur une le périmètre du champ de captage diminue la consommation d'énergie totale par rond et cette consommation est minimale avec une vitesse de **5m/rond** de la station de base.

- ***La quantité de données Reçue Par La Station De Base :***

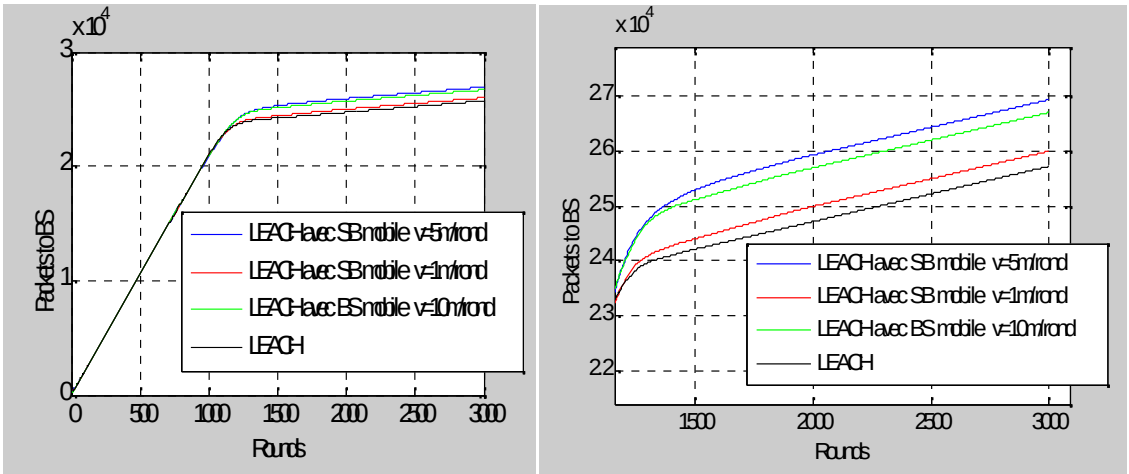


Figure. III.12 : *Les paquets de données reçus par la station de base mobile sur le périmètre du champ de captage.*

La figure 3.12 montre aussi que la mobilité de la station de base augmente le nombre de paquets de données reçus à partir des chefs de clusters et le nombre de ces paquets de donnés est maximum pour une vitesse de **5m/rond** de la station de base.

❖ ***Conclusion C:***

La mobilité de la station de base sur le périmètre du champ de captage carré avec une vitesse de **5m/rond** augmente les performances du réseau.

4.1. 4. *Conclusion1:*

La mobilité de la station de base augmente la stabilité, la quantité d'information reçu et diminue l'énergie totale consommé par les capteurs du réseau. On constate que la vitesse moyenne de la station de base v=5m/rond est optimale ce qui donne une meilleure performance et prolonge plus la durée de vie du réseau.

Si la vitesse de la station de base est lente impose aux chefs de clusters loin d'elle d'envoyer les messages avec un facteur d'amplification du signale Emp pour « d>d0 » Ce qui augmente la consommation d'énergie du réseau et par la suite une perte de stabilité et réduction de la durée de vie. Alors si la vitesse est rapide ne laisse pas le temps nécessaire de traitement de données par les clusters heads et par la suite ce trouvent rapidement loin d'elle et envoient ces données toujours avec un facteur d'amplification du signale Emp pour « d>d0 ».

4.1. 5. Choix de trajectoire optimale :

Pour un meilleur choix de la trajectoire optimale d'une station de base mobile, on compare par simulation les performances qu'offre chaque configuration.

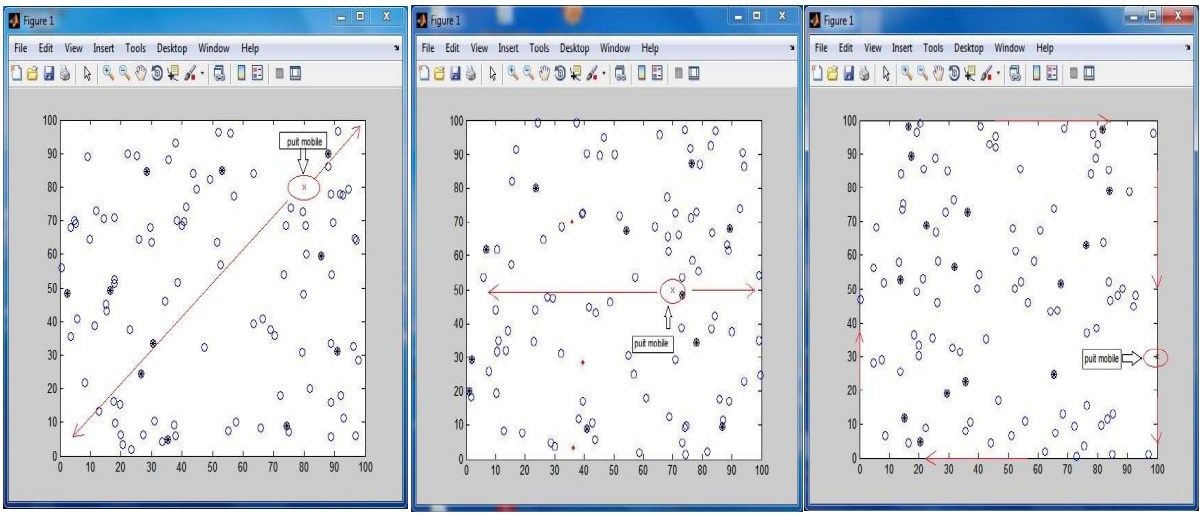


Figure. III.13 : *La mobilité de la station de base avec la vitesse optimale sur les trois trajectoires.*

Les résultats de simulations représentés par les figures 3.14, 3.15 et 3.16 montrent l'évolution des métriques d'évaluation pour les trois trajectoires avec une station de base mobile à une vitesse optimale moyenne de 5m/rond.

- ***La Stabilité :***

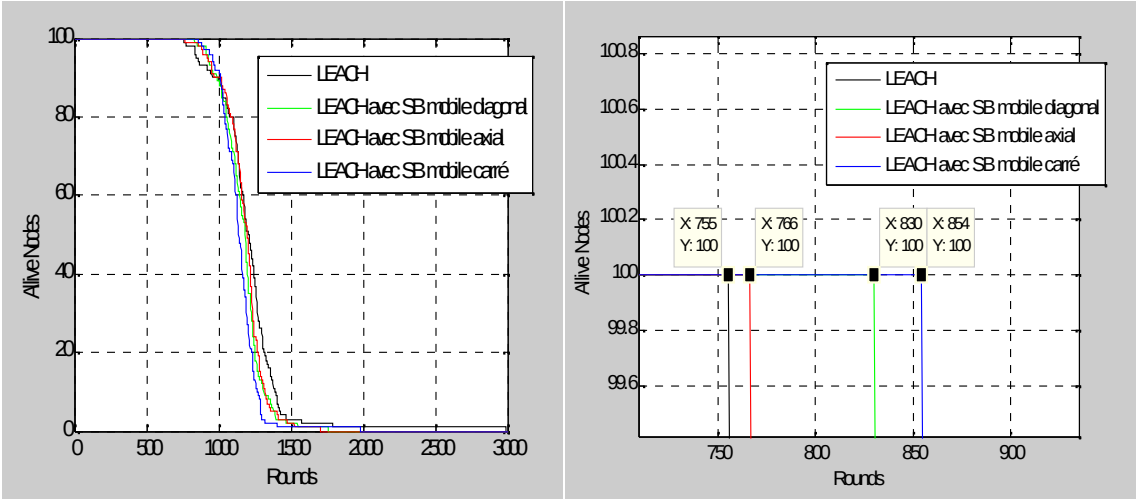


Figure.III.14 : *la stabilité du réseau avec station de base mobile à la vitesse optimale sur les trois trajectoires.*

La figure 3.14 montre que la mobilité de la station de base sur une trajectoire en anneau carré sur le périmètre du champ de captage offre une stabilité du réseau meilleure par rapport aux deux autres trajectoires.

- ***L'énergie*** :

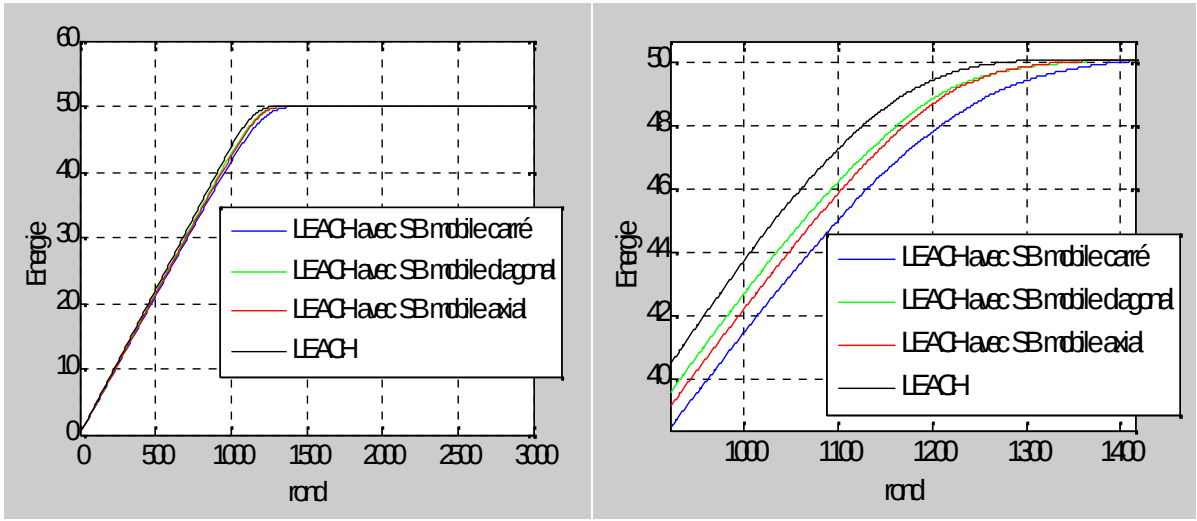


Figure. III.15 : *L'énergie du réseau avec station de base mobile à la vitesse optimale sur les trois trajectoires.*

La figure 3.15 montre que la mobilité de la station de base sur une trajectoire carré diminue la consommation d'énergie du réseau moins que les deux autres trajectoires.

- ***La quantité des paquets reçus par la station de base :***

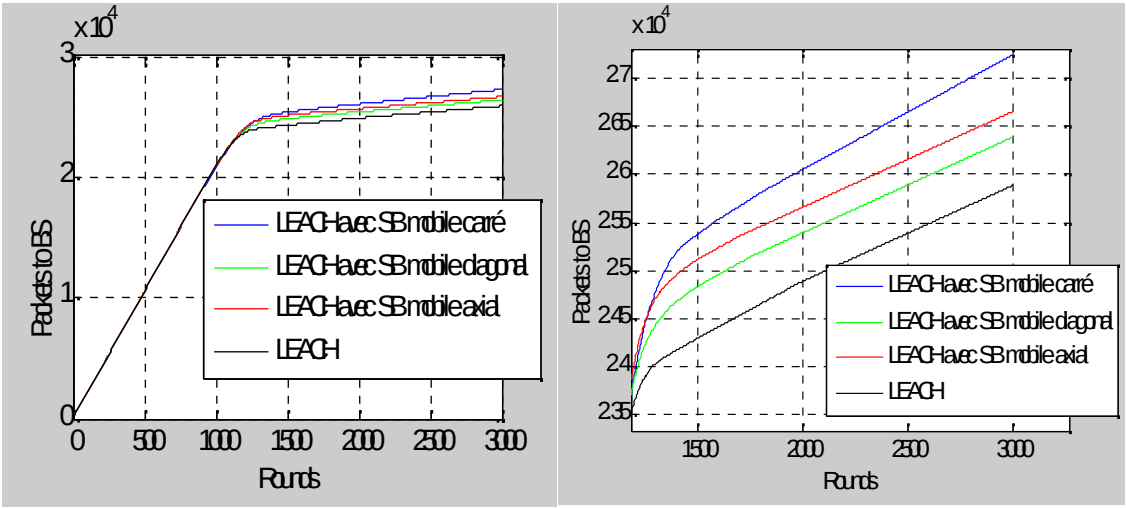


Figure. III.16 : *La quantité de données reçus par la station de base mobile à la vitesse optimale sur les trois trajectoires.*

La figure 3.16 montre que la quantité de données reçus par la station de base est meilleure si cette dernière est sur une trajectoire carrée.

Le tableau III.2 montre les résultats de la période de stabilité dans les déférentes trajectoires et avec déférentes vitesses de la station de base.

Tableau III.2 : *les périodes de stabilité avec les trois trajectoires et les trois vitesses.*

Vitesse / trajectoire	1m/rounds	5m/rounds	10m/rounds
DIAGONAL	810 ronds	832 ronds	815 ronds
AXIAL	756 ronds	778 ronds	759 ronds
CARRE	833 ronds	**866** ronds	851 ronds
LEACH (avec SB fixe)	809 ronds 764 ronds 717 ronds		

❖ ***Conclusion :***

La mobilité de la station de base avec une vitesse optimale de **5m/rond** sur une trajectoire en anneau carrée offre une meilleure performance pour le réseau, elle augmente la stabilité, réduit la consommation d'énergie et augmente la quantité d'information reçus par la station de base.

La trajectoire en anneau carré peut être sur le périmètre, à l'intérieure ou à l'extérieure du champ de captage. Les résultats représentés par les figures 3.18, 3.19 et 3.20 montrent le lieu optimal de trajectoire en anneau carré.

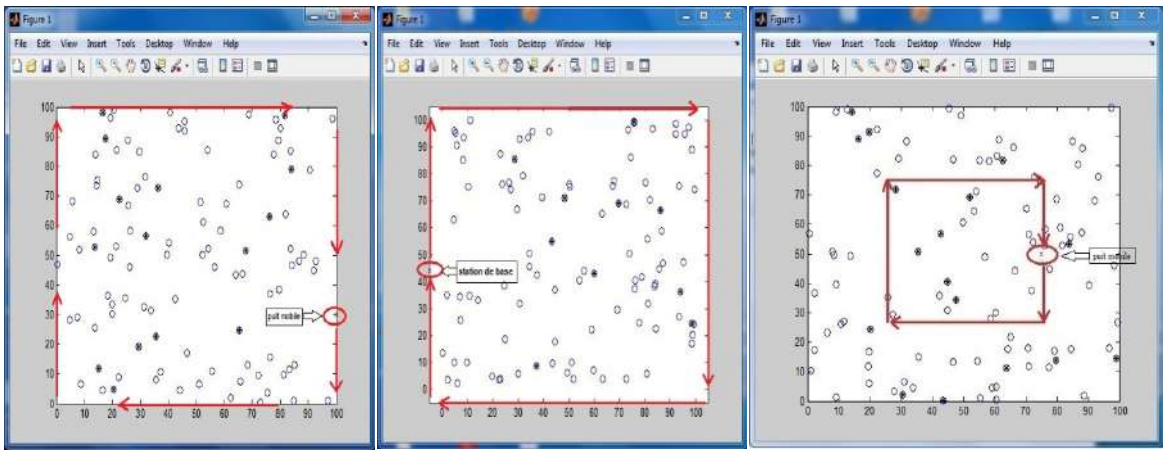


Figure. III.17 : *Comparaison entre LEACH et LEACH avec SB mobile sur les trois trajectoires carré.*

➢ ***La stabilité :***

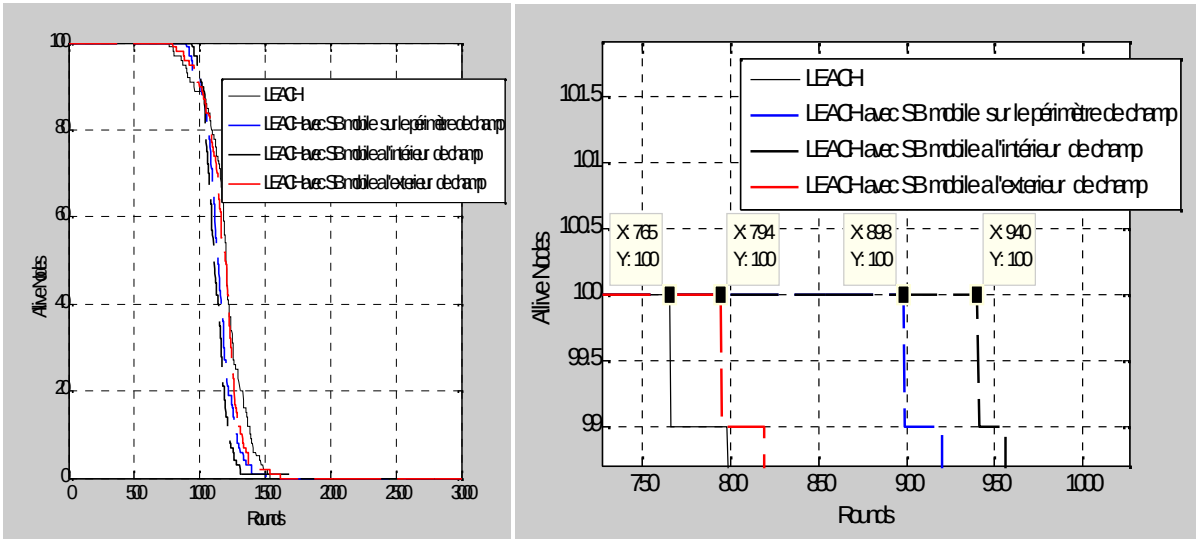


Figure. III.18 : *la stabilité de réseau avec station de base mobile sur les trois trajectoires carrée.*

La trajectoire en anneau carrée de (25x4) mètre de périmètre à l'intérieure du champ de captage augmente la stabilité du réseau de **175 ronds** par rapport au LEACH avec station de base fixe.

- ***L'énergie :***

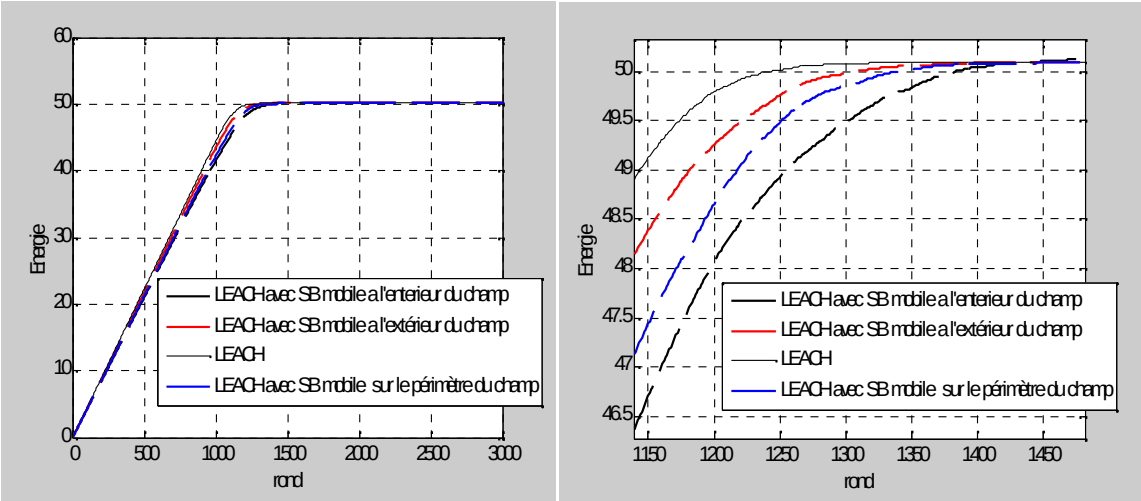


Figure. III.19 : *L'énergie de réseau avec station de base mobile sur les trois trajectoires carrée.*

La figure 3.19 montre que si la trajectoire de la station de base est mobile sur une trajectoire carrée à l'intérieure du champ de captage l'énergie consommé par le réseau au **round 940** qui correspond au premier nœud mort est réduite de **3 joule** par rapport au LEACH avec station de base fixe.

- ***Les paquets reçus par la station de base :***

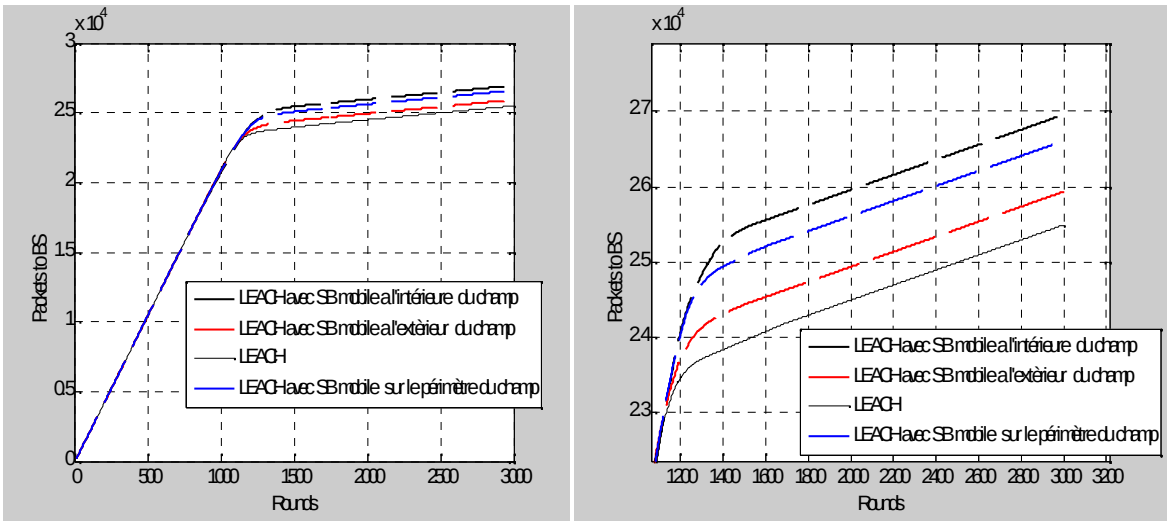


Figure.III.20 : *Les paquets de données reçus par la station de base mobile sur les trois trajectoires carrée.*

La figure III.21 montre que si la station de base est mobile sur une trajectoire carrée de périmètre (25x4) mètre à l'intérieure du champ de captage, la quantité de données reçus par cette dernière augmente de **1500 paquets** au round 3000 qui correspond à la fin de la simulation par rapport au protocole LEACH avec station de base fixe.

Le tableau.III.3 récapitule les résultats de simulations obtenues pour les trois trajectoires en anneau carrée.

Tableau.III.3 : *Récapitulation des résultats.*

les Métriques / **La trajectoire**	**La stabilité**	**L'énergie** *(au round 1150)*	***paquets reçus par la station de base*** *(au round 3000)*
Carré à l'extérieur du champ	794 rounds	48.39 J	2.594 e+4
Carré sur le périmètre du champ	898 rounds	47.44 J	2.661 e+4
Carré à l'intérieur du champ	**940 rounds**	**46.7 J**	**2.696 e+4**
LEACH	765 rounds	49.12 J	2.55 e+4

4.2. *Résultats de simulation pour un réseau hétérogène:*

La configuration ou l'infrastructure optimale trouvée par simulation pour un réseau homogène sera appliquée à un réseau hétérogène avec le protocole LAECH hétérogène avec **m=*0.2*, *a=1*.**

On adopte le protocole LEACH hétérogène avec une station de base mobile sur une trajectoire en anneau carrée de 25x4 mètre de périmètre au milieu du champ de captage et avec une vitesse de **5 m/rond**, on obtient les résultats de simulations suivants :

➢ ***La stabilité :***

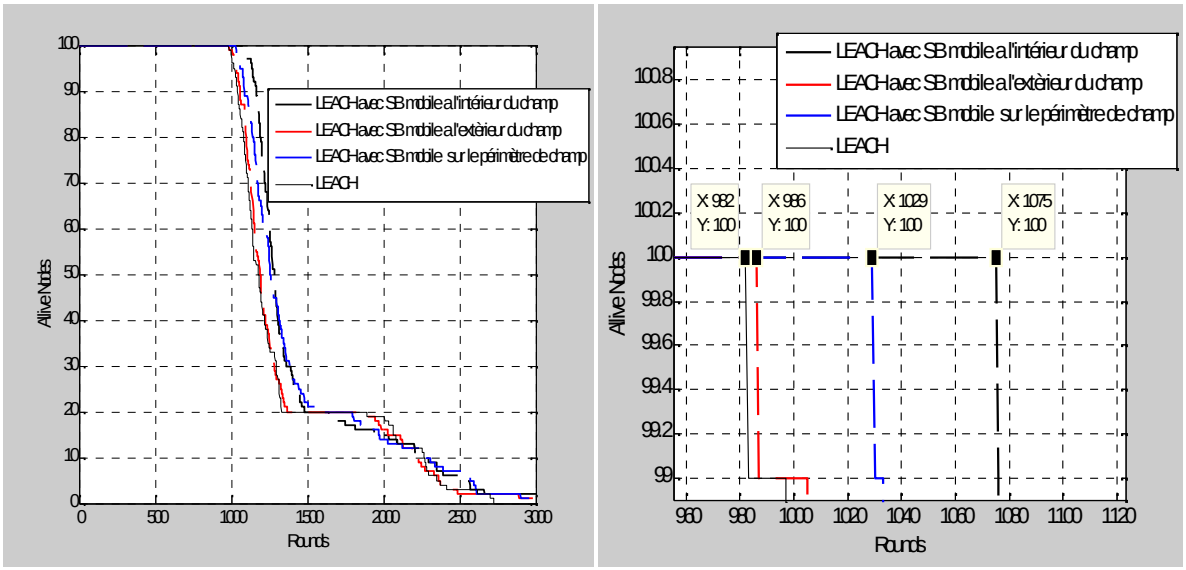


Figure. III.21 : *la stabilité du réseau avec station de base mobile sur une trajectoire carrée. LEACH hétérogène.*

La configuration optimale appliquée à un réseau hétérogène montre qu'elle augmente la stabilité du réseau de **93 ronds** par rapport au protocole LEACH hétérogène.

➢ ***L'énergie :***

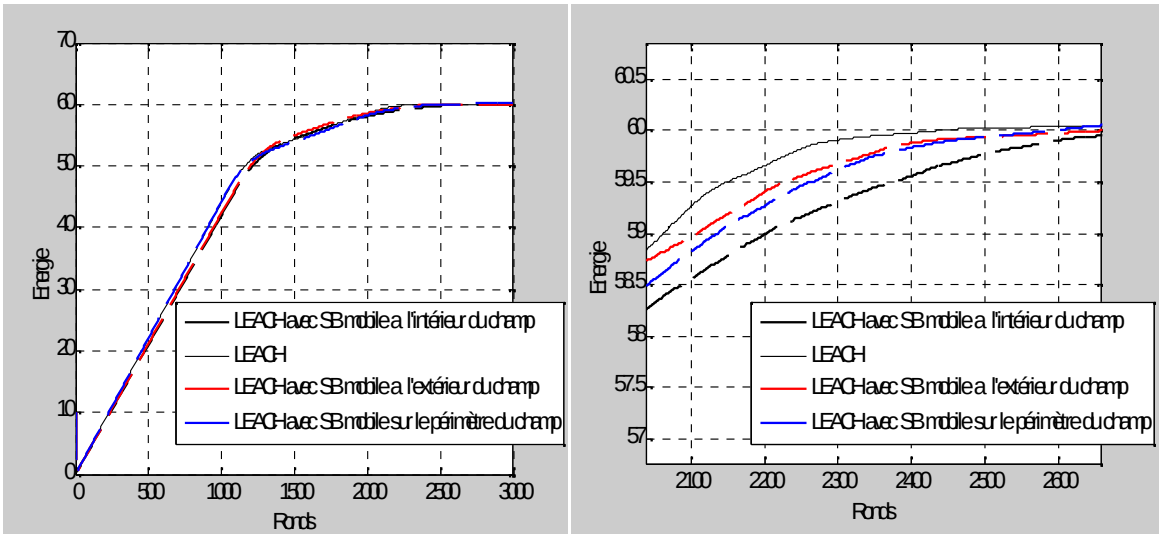


Figure. III.22: *L'énergie de réseau avec station de base mobile sur une trajectoire carrée. LEACH hétérogène.*

La figure 3.33 montre que la mobilité de la station de base diminue la consommation d'énergie d'un réseau de capteur auto- organisé par un protocole LEACH hétérogène.

✓ ***La quantité de données reçue par la station de base :***

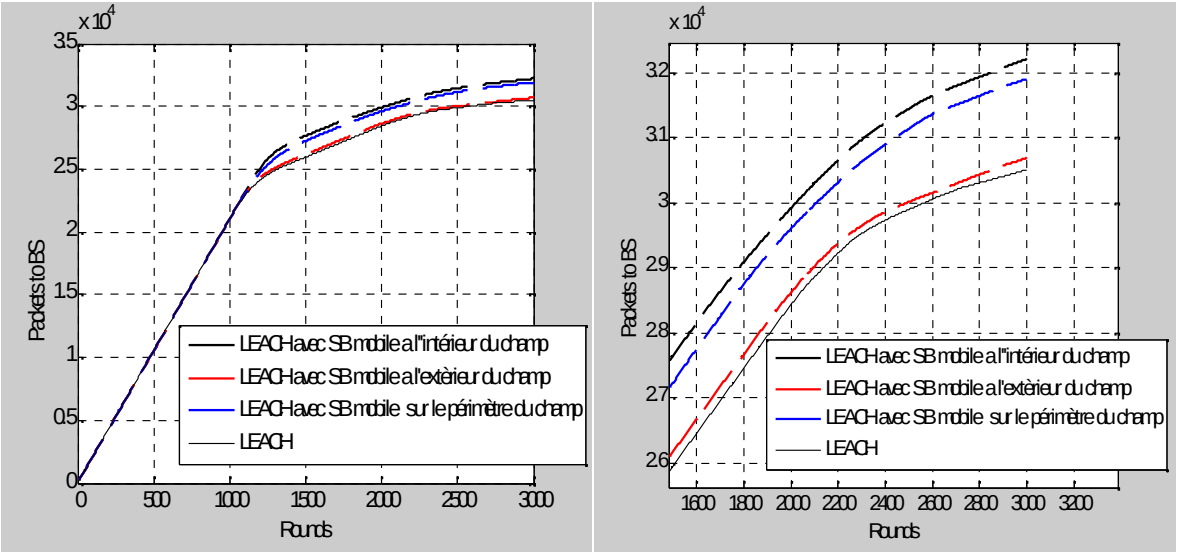


Figure.III.23 : *Les paquets reçus par la station de base mobile sur une trajectoire carrée. LEACH hétérogène.*

Ce résultat montre aussi que la mobilité augmente la quantité d'information reçu par la station de base dans un réseau de capteur géré par le protocole LEACH hétérogène.
Donc la mobilité augmente les performances du protocole LEACH hétérogène.

5. Interprétation :

À travers l'analyse des différentes approches de dissémination et infrastructure virtuelle avec puits mobile, nous avons mis en évidence le compromis entre la trajectoire et la vitesse de la station de base et l'impact sur les performances du réseau. Ce qui réduit le temps du parcours de visite de la station de base et par conséquent augmente la fréquence de ses visites aux chefs de groupes. Les travaux présentés dans cette mémoire traitent donc, des réseaux de capteurs sans fil où la collecte d'informations utilisant une station de base mobile, afin de réduire la densité du réseau. Ce type d'architecture représente une solution intéressante qui est l'utilisation d'agents mobiles omniprésents qui se déplacent d'une manière prédéterminé pour rassembler des données lorsqu'ils se rapprochent des nœuds capteurs fixes.

Contraire des réseaux statiques où Cette forme de collecte de données centralisée peut raccourcir la durée de vie de réseau. L'architecture à puits ou/et collecteur fixe pose le problème de l'épuisement d'énergie des nœuds relais voisins du collecteur fixe. Le rélayage de données à un puits fixe peut causer une consommation d'énergie non uniforme sur l'ensemble du réseau et on peut avoir une surcharge au niveau des nœuds relais voisins du puits fixe et former ainsi, un goulot de congestion critique. Cette architecture présente l'avantage de relaxer pour assurer une

connectivité suffisante du réseau de capteurs sans fil déployé sur une large zone de captage. Ainsi, une architecture clairsemée de réseau de capteurs sans fil devient une option faisable permettant, ainsi, d'éviter les problèmes de collision et de pertes de messages induits par l'utilisation d'un réseau dense.

Les éléments mobiles, lors de leur visite des nœuds capteurs fixes du réseau, peuvent établir des connexions à un nombre de sauts réduit voire même à un simple-saut ce qui permettra de réduire les collisions et la perte de messages.

Un autre avantage apporté par l'utilisation des éléments mobiles dans le réseau réside dans le fait d'éliminer l'épuisement prématuré d'énergie des nœuds proches du puits. Les éléments mobiles peuvent aider à résoudre ce problème en allant collecter dans différentes zones du réseau, tout en assurant un équilibrage de charge énergétique plus au moins uniforme, même dans le cas d'une architecture dense du réseau.

Si la vitesse de la station de base est lente impose aux équipements interconnectés (les nœuds) d'avoir des espaces de stockage trop importants. (Chaque nœud stocke dans son cache les informations reçues d'un autre nœud pour les transmettre quand le lien devient fonctionnel et disponible.). Or notre réseau est constitué de nœuds caractérisés par une faible capacité de stockage ce qui rend difficile l'implémentation de la couche réseau au niveau du réseau de captage formé des nœuds capteurs de faibles capacité de stockage. Même au niveau des chefs de clusters, la donnée est traitée au fur et à mesure qu'elle est reçue des nœuds membres. Ainsi, le chef de cluster n'envoie au collecteur qu'une information synthétique comme par exemple, la valeur moyenne mesurée au sein de son cluster.

Lorsque la mobilité est trop rapide, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exigent habituellement un nombre important de messages de contrôle de la topologie et donc une consommation d'énergie importante.

6. Conclusion :

Les résultats de la simulation montrent que la mobilité de la station de base dans un réseau de capteur auto-organisé par le protocole LEACH augmente les performances du réseau (période de stabilité, la consommation d'énergie et la quantité d'information envoyé à la station de base) ce qui conduit à une longue durée de vie du réseau.

On a montré aussi que le choix d'une vitesse optimale de la station de base (pas trop lente et pas trop rapide) donne une meilleure performance au réseau de capteur.

Ces résultats montrent aussi que la trajectoire carré de la station de base et la meilleure trajectoire que l'axiale et la diagonale et si cette dernière (la station de base mobile) est placé au

milieu du réseau donne de meilleure résultat et cette configuration (ou infrastructure) performe au mieux le protocole LEACH utilisé avec une station de base mobile.

La mobilité de la station de base montre qu'elle performe aussi le protocole LEACH avancé.

Nous avons proposé une amélioration du protocole LEACH qui s'est basé sur la mobilité de la station de base comme un nœud d'agrégation de données. Les résultats des simulations montrent clairement que notre amélioration de protocole LEACH, permet de meilleures prestations par rapport au protocole standard LEACH, en ce qui concerne la région de stabilité, la durée de vie du réseau et la quantité d'information reçu par la station de base.

Conclusion générale

Bien que les protocoles de routage de données dans les réseaux de capteurs sans fil augmentent les performances du réseau, le routage hiérarchique basé sur le clustering est le protocole de référence qui est utilisé par les chercheurs pour réduire la consommation d'énergie, ce dernier utilisé on considère la mobilité dans un réseau de capteur avec un choix adéquate d'une bonne infrastructure augmente la durée de vie et performe le protocole utilisé.

En conclusion, une fois l'architecture choisie où la station de base doit visiter les chefs de clusters, nous devons diminuer le nombre de points de collecte que l'élément mobile doit visiter. Car, faire un balayage de tous les nœuds capteurs par l'élément mobile pour récupérer les informations mesurées au niveau de chaque nœud capteur est une tâche très onéreuse en temps de collecte.

Une solution possible et intéressante à ce problème est le clustering : les nœuds s'associent pour former des groupes (clusters), et transmettent leurs informations à leurs chefs de groupes, qui agrègent les données et les communiquent au collecteur mobile lors de sa visite. Ainsi, moins de paquets sont transmis et les mesures peuvent être fortement corrélées par le processus d'agrégation. L'algorithme de clustering utilisé, est le protocole LEACH.

L'introduction d'éléments mobiles dans les architectures de réseaux de capteurs sans fil présente quelques défis à relever (temps de détection d'un nœud mobile entrant dans la zone de couverture, synchronisation des visites des nœuds mobiles avec les nœuds visités, …etc.), elle permet de résoudre différents problèmes et apporte des avantages conséquents comme :

* le gain en consommation, l'efficacité énergétique, l'équilibrage de charge énergétique et par conséquent un prolongement de la durée de vie du réseau.
* l'optimisation du routage et la diminution du délai de bout en bout. Du fait que le collecteur mobile permet vraiment de réduire le nombre de sauts que les données doivent effectuer.
* la résolution du problème de connectivité en assurant un degré de connectivité du réseau très intéressant.

Même pour l'utilisation d'une architecture reposant sur l'exploitation des puits ou/et collecteurs fixes (considérés riches en ressources) s'avère non adéquate dans un

environnement où les nœuds capteurs sont mobiles, placer un puits ou/et collecteur fixe s'avère inadéquat. Celui-ci risque d'être hors de portée des nœuds capteurs mobiles. En se déplaçant, ils peuvent sortir de la zone de couverture du puits.

La mobilité est une caractéristique importante dans les réseaux de capteurs sans fil. Elle peut être considérée au niveau des nœuds capteurs destinés au captage ou au niveau des puits, ou encore au niveau des collecteurs. Lorsque la mobilité est trop rapide, la détection des voisins et la reconfiguration du réseau exigent habituellement un nombre important de messages de contrôle de la topologie et donc une consommation d'énergie importante.
Dans notre contexte, nous considérons un type particulier de réseaux de capteurs : dans lequel la mobilité et la vitesse du collecteur sont pris en considération.

Notre objectif été aussi de voir l'évolution des métriques d'évaluation en fonction de la vitesse et les trajectoires et nous avons mis en évidence le compromis entre la trajectoire et la vitesse de la station de base et l'impact sur les performances du réseau, mais vue la complexité du programme de simulation les vitesses et les trajectoires ont été choisi d'une manière bien déterminée et différente mais pas variables d'une façon continue.

Perspectives

Cette technique proposée peut être implémentée sur les nœuds capteurs du réseau pour qu'ils aient une information sur le trajet, la vitesse, le temps de visite et de collecte de messages et elle peut aussi être appliqué aux autres protocoles de routage hiérarchiques basé sur LEACH comme SEP, Z-SEP, PGASIS, TEEN, DEEC etc.…, et voir les performances qu'elle peut apporter.

Nous proposons de développer notre approche pour traiter le problème de passage à l'échelle (scalability) par l'usage des algorithmes de routage hiérarchiques à plusieurs sauts pour les grands réseaux ou bien l'introduction de plusieurs puits mobiles ou chefs de cluster mobiles.

Un autre protocole peut être réalisé où Les requêtes peuvent êtres disséminer par la station de base que moment du passage de cette dernière à cotés des chefs de groupes pour avoir une meilleure dissémination et collecte de données avec une consommation d'énergie très réduite et une prolongation de durée de vie.

Référence

[1] : Mahmodi Brahim «***Développement et évaluation de fonctionnalités d'auto organisation Pour les réseaux de capteurs sans fil».*** Mémoire de Magister en Electronique. Université Dr Yahia Fares de Médéa Faculté des Sciences et de la Technologie. *Janvier 2014*.

[2] : Fares Abdelfattah ***«Développement d'une bibliothèque de capteurs»,*** Mémoire de Master en Informatique. Université Montpellier 2 Sciences et Technique. *25/04/2008.*

[3] : Boubiche Djallel Eddine ***«Protocole de routage pour les réseaux de Capteurs Sans fil»*** mémoire de Magistère en Informatique. Université de l'Hadj Lakhdar-Batna Faculté des sciences de l'ingénieur. *2007-2008*.

[4] : Rahim Kacimi, ***«Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil »***, Thèse en vue de l'obtention du titre Docteur de l'université de Toulouse, INPT, France *2009*.

[5] : Meldjem Sara - Khalfi Chahinez - Merabtine Nour Houda - Hadj Rabah Karima ***«Les réseaux de capteurs»***, mémoire de Licence 3 en électronique et informatique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.*2013 – 2014*.

[6]: Leboukh Aboubakre. Saidi Madani Amine. ***«La Localisation dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil : Cas d'un Milieu Fermé***». Mémoire de Master en Génie électrique et informatique. Université Dr. Yahia Fares de Médéa.
juin ***2013.***

[7] : Yousef Yasser ***«Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux De Capteurs Sans Fil»,*** Thèse de Doctorat Spécialité Informatique, Université de Haute Alsace Faculté des Sciences et Techniques. *08/07/2010*.

[8] : Mlle. Bouchenafa Soumia ***«Etude et simulation des protocoles de routage dans WSN»*** mémoire de Master en Génie électrique e t informatique .Université Dr. Yahia Fares de Médéa.*juin.2013*.

[09] : Luis Javier Garya VILLALBA, Ana Lucila Sandoval OROZCO, Alicia Trivi o CABRERA, Cludia Jacy Barenco ABBAS, ***«Routing Protocols in Wireless Sensor Networks»***, Sensors ,*2009*.

[10]: Ian F. AKYILDIZ, Mehmet Can VURAN, ***« Wireless Sensor Networks»***, John Wiley & Sons Ltd, *2010*.

[11]: W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan ***«Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks »,*** *IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, **2000**.

[12] : W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, ***« An pplication-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks »*** IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 660670, *October 2002*.

[13]: AL-KARAKI J.N, KAMAL A.E, ***«Routing Techniques in Wireles Sensor Networks: A Survey »***, IEEE Wireless Communications, *06- 2004*.

[14] : BOUDJAADAR Amina, ***« Plateforme Basée Agents Pour l'Aide à la onception et la Simulation des Réseaux de Capteurs Sans Fil »***, memoire de magister, université 20 aout 55 de Skikda, BOUDJAADAR Amina, *2010*.

[15] : Boubiche Djallel Eddine ***«Protocole de routage pour les réseaux de Capteurs Sans fil»*** mémoire de Magistère en Informatique. Université de l'Hadj Lakhdar-Batna Faculté des sciences de l'ingénieur. *2008.*

[16] : Beydoun Kamel ***«Conception d'un protocole de routage hiérarchique Pour les réseaux de capteurs***. ***»*** Thèse pour l'obtention d'un grade de
Docteur de l'université de Franche-Comté en informatique. *Décembre 2009*.

[17]: Hania AOUDIA, Youcef TOUATI, Arab ALI-CHERIF et Patrick GREUSSAY, ***« Approche de routage hiérarchique basée sur un mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs sans fil »***, Manuscrit auteur, publié dans 9ème édition de la conférence Majecstic, université de Lille, *2012*.

[18]: Smaragdakis, G., Matta, I., & Bestavros, A, ***« SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks ».***Boston University Computer Science Department, *2004*.

[19] : Omar MOUSSAOUI, ***« Routage hiérarchique basé sur le clustering »*** Thèse de Doctorat, université de Cergy-Pontoise, *2006*.

[20]: Aderohunmu, F. A., & Deng, J. D, ***« An Enhanced Stable Election Protocol SEP) for Clustered Heterogeneous WSN »***, (No. 2009/07), Discussion Paper Series, *2009*.

[21] : Lehsaini Mohammed ***«Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique»*** Thèse de Doctorat en informatique. Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l'Ingénieur && Université de Franche-Comté U.F.R Sciences et Techniques École Doctorale SPIM. *2009*.

[22] : **Said HARCHI**, «***Un protocole de session dans les réseaux de capteurs sans fils***. **»** Thèse pour obtenir le diplôme de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE En Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique. *décembre 2013*.

[23]: O. YOUNIS, S. FAHMY, ***«HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks»***, IEEE Transactions on Mobil Computing, vol. 3, no. 4, pp.366-379, *2004*.

[24]: Qi YANG, Yuxiang ZHUANG, Hui LI, ***«A Multi-hop Cluster Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks»***, Journal of Convergence Information Technology, Volume 6, Number 3, *Mars 2011*.