REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications.

Spécialité : Systèmes des télécommunications.

Contribution à l'amélioration de la stabilité des réseaux de capteur sans fil (WSNs)

Présenté par :

Mr. Ramoul Khaled

Mr. Ben Ykhlef Souhil

Proposé et Dirigé par :

Mr. Guedmani Mohamed

Année universitaire 2019-2020

Remerciements

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

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères d'abord à M. BENREKIA Fayçal (Rabbi yarhmou) qui nous a énormément aidé durant le parcours universitaire, ainsi qu'à M. Mohamed Guedmani pour son aide précieuse à l'élaboration de ce mémoire, ce dernier a toujours été à notre écoute, sa disponibilité pour la réalisation de ce mémoire fut remarquable et nous en sommes reconnaissants. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les professeures et tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études. Enfin, nous tenons également à remercier nos amis qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à tout.

Dédicaces

je dédie ce travail

à mes chers parents qui se sont sacrifiés durant tout mon

parcours estudiantin pour leurs encouragements

pour leur volonté et leur désir de me voir achever

mes études brillamment sans oublier ma sœur unique

ainsi qu'à mes frères **Walid** et **Yacine**

à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation

depuis mes débuts au primaire jusqu'à ce jour

à mes amis BELAIDI Mohamed, HADJ AMEUR Mohamed Mehdi, ABDALLAH ELHADJ Brahim

et KALACHE aboubaker

Et bien sûr à mon binôme Souhil Benykhlef

Pour la réalisation de ce mémoire

je tiens à remercier mon cher professeur Guedmani Mohamed

Pour son soutien et ses bénéfiques interventions

Ainsi à tous ceux qui ont été pour moi d'une aide précieuse

à la réalisation de ce mémoire

A l'ensemble des étudiants faisant partie

de la branche télécommunication

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

Khaled

Dédicaces

Je dédie ce travail à **mon père** un héro dans ma vie et à **ma mère** mon ange

Pour leur patience et leur soutien tout au long de parcours scolaire depuis septembre 2000 à nos jours.

À tous ceux qui m'ont soutenu un jour dans ce parcours

À mes frères **Mounir**, **Aniss** et mon petit **Amine**

et à chaqu'un de la famille de BENYKHLEF et BENSOUNA

À la personne que j'aime

Aux les amis de ma vie qui sont resté au leur principe, **ADALI Hamza**, **BENLATRACH Abde Erhmen, MENADLI Monime**

Et **Houssem** qui derrière les Baroux

À mon manager au travail, **KACI Abdenour** et **HADJERSI Nadir**, et pour mes collègues de travaille pour leur soutien

Aux professeurs que je respecte et j'ai l'honore que j'ai étudié chez eux, mon promoteur

M. GUEDMANI Mohamed, M. KhADER Hamza et le professeur **BEN GHARBIA Bilal**, qui ont été sincères dans leur travaille et j'en suis témoin.

À tous mes amis proches et lointains

Et le groupe **dabelide** et ces **admis**

Et bien sûr à mon binôme **RAMOUL Khaled**

Souhil Benykhlef

ملخص

أدّى ظهور التّقنيات الجديدة كالتّقدم في مجال الشّبكات ومعالجة المعلومات إلى ظهور أدوات وأشياء جديدة مثل شبكات الاستشعار اللّاسلكيّة (RCSF) وتطبيقاتها. تتميّز هذه العناصر المبتكرة بالحجم الصّغير، مساحة التّخزين الضّعيفة والطّاقة المحدودة. من بين قيود شبكات الإستشعار اللّاسلكيّة RCSF، يظلّ التّحكّم في استهلاك الطّاقة واطالة عمر عقد الاستشعار من بين القيود الأكثر أهميّة. لذلك، يساهم توفير الطّاقة أو تقليلها إلى حد كبير في إطالة عمر الشّبكة. سنناقش بروتوكولي LEACH وSEP اللذان يسمحان بتقليل استهلاك الطّاقة. كتحليل نهائيّ يتمّ تقديم مقارنة بين هاذين البروتوكولين باستخدام برنامج MATLAB مع وصف دقيق.

الكلمات المفتاحيّة : SEP, LEACH, RCSF.

Résumé

L'apparition de nouvelles technologies comme les progrès effectués dans le domaine des réseaux et du traitement de l'information ont entraîné l'apparition de nouveaux outils et objets tels que les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) et leurs applications. Ces éléments innovants se caractérisent par la taille réduite, l'espace de stockage faible, la source d'énergie limitée. Parmi les facteurs des RSCF, la maîtrise de la consommation d'énergie et la maximisation de la durée de vie des nœuds capteurs sont considérées parmi les contraintes les plus significatives. Par conséquent, l'économie ou la minimisation d'énergie sont très importants pour la prolongation de la vie du réseau. Nous évoquerons deux protocoles de routage hiérarchiques LEACH et SEP qui permettent la minimisation de la consommation d'énergie. En dernier analyse une comparaison entre ces protocoles est présentée à l'aide de programme de MATLAB avec une description bien précise.

Les mots clé : RCSF, LEACH, SEP.

Abstract

The appearances of new technologies such as advances in the field of networks and information processing have led to the appearance of new tools and objects such as wireless sensor networks (WSN) and their applications. These innovative elements are characterized by the reduced size, the low storage space, the limited energy source. Among the factors of WSN, controlling energy consumption, and maximizing the lifespan of sensor nodes are considered among the most significant constraints. Therefore, saving or minimizing energy is very important for extending the life of the network. We will discuss two hierarchical routing protocols LEACH and SEP which allow the minimization of energy consumption. In the final analysis, a comparison between these protocols is presented using MATLAB's program with a very precise description.

Key words: WSN, LEACH, SEP.

Table des matières

Liste des figures……...I

Liste des tableaux …….……...…….... IV

Liste d'abréviation …….…….…….....V

Introduction générale……1

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1. Introduction 4

2. Définition d'un capteur sans fil 4

3. Nœuds capteur 5

3.1 Unité de capture..... 5

3.2 Unité de traitement 6

3.3 Unité de transmission 6

3.4 Unité d'énergie..... 6

4. Définition des réseaux de capteurs sans fil..... 7

5. Réseaux ad hoc 8

6. Caractéristique du réseau de capteurs sans fil 8

7. Architecture de communication d'un RCSF 9

7.1 Le réseau d'acquisition 11

7.2 Le réseau de transport..... 12

8. Types de communications 13

8.1 Communication single-Hop (DT)..... 13

8.2 Communication multi-Hop (MTE)..... 14

9. Facteurs et contraintes conceptuelles des RCSF..... 18

9.1. Contraintes conceptuelles 18

9.1.1 Tolérance aux fautes …..... 18

9.1.2 Scalabilité (Passage à l'échelle) … 18

9.1.3 Coût de production …….. 18

9.1.4 Environnement 18

9.1.5 Média de transmission 18

9.1.6 Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul 18

9.1.7 Agrégation de données 18
9.2 Contraintes matérielles 19
9.2.1 La puissance de calcul limitée 19
9.2.2 Mémoire limitée 19
9.2.3 Environnement 19
9.2.4 La consommation d'énergie 19
9.3 Au niveau de la communication 19
9.3.1 Perte de données à cause de la transmission radio 19
9.3.2 La bande passante 19
9.3.3 Interférences 20
10. Durée de vie du réseau 20
11. Domaines d'application des réseaux de capteurs 20
11.1 Les applications militaires 20
11.2 La santé 21
11.3 Le Transport 22
11.4 La domotique 22
11.5 Applications dans le domaine sportif 23
12. Conclusion 24

CHAPITRE II : Approche sur le routage hiérarchique pour les RCSFs

1. Introduction 26
2. Protocole de routage 26
2.1 Définition de routage 26
2.2 Les approches de routage dans les réseaux de capteurs sans fil 26
2.2.1 Classification selon la structure du réseau 27
2.2.2 Classification selon les modes opératoires 29
2.2.3 Classification selon la manière d'établissement de route 31
3. Le Protocole « LEACH » (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 33
3.1 Définition et architecture du « LEACH » 33
3.2 Caractéristiques du protocole LEACH 33
3.2.1 Phase de configuration (Set-up) 34

3.2.2 Phase de transmission (Steady State Phase) 36
4. Le Modèle LEACH Hétérogène dans WSN 37
4.1 Hiérarchie des clusters 37
4.2 Optimisation du Clustering 38
5. Avantages et inconvénients du protocole LEACH 40
5.1 Les avantages 40
5.2 Les Inconvénients 41
6. Le Protocole « SEP » (Stable Election Protocol) 41
6.1. Le problème du maintien d'une énergie bien répartie - Contraintes de consommation pendant la période de stabilité 43
6.2. Consommation d'énergie garantie et bien répartie pendant la période de stabilité 43

CHAPITRE III : Evaluation des deux protocoles LEACH et SEP

1. Introduction 48
2. Généralités sur la simulation 48
2.1 Définition 48
2.2 Le langage MATLAB 48
3. La préparation de la simulation 49
4. Mesure de Performance 49
5. Le protocole Clustering LEACH hétérogène 50
5.1 Instabilité des protocoles hétérogènes 51
6. Le déploiement dans le protocole SEP 53
6.1. Exemple numérique 53
7. Résultats de la simulation 54
7.1. Résultats du protocole LEACH 55
7.2. Résultats du protocole SEP 57
7.3. La sensibilité entre les deux protocoles LEACH et SEP 60
7.4. L'énergie consommée et résiduelle des deux protocoles LEACH et SEP 62
7.5. Nombre de paquets 64
8. Différence entre les deux protocoles LEACH et SEP 67
9. Conclusion 68

Liste des figures

Figure I.1 : Exemples des nœuds capteurs…….…….....5

Figure I.2 : Les composants d'un nœud capteur…….…7

Figure I.3 : Interconnexion d'un RCSF avec Internet…….…….....10

Figure I.4 : Différentes architectures pour un réseau d'acquisition……..11

Figure I.5 : Différents types de Sink dans un RCSF (a) Un nœud capteur, (b) Système mobile plus puissant, (c) Point d'accès relie un autre réseau……...……12

Figure I.6 : Communication Single-Hop……...13

Figure I.7 : Communication multi-Hop……...…....14

Figure I.8 : Critères du choix des nœuds intermédiaires……..…...15

Figure I.9 : Représentation d'un réseau linière……...…..…16

Figure I.10 : Comparaisons entre multi-Hop et single-Hop en termes de nœuds en vie (simulation pour100 nœuds)……...….17

Figure I.11 : Application militaire…….……...21

Figure I.12 : Application de la santé…….……...…22

Figure I.13 : Application du transport…….…22

Figure I.14 : Application domotique……...19

Figure I.15 : Application sportive……...23

Figure II.1 : Les approches de routage dans les réseaux de capteurs……..……..27

Figure II.2 : Classification selon la structure du réseau……..…...27

Figure II.3 : La structure d'un protocole plat……..…..28

Figure II.4 : La structure d'un protocole hiérarchique……..……29

Figure II.5 : Classification selon leurs modes opératoires……..…..30

Figure II.6 : Classification selon la méthode d'établissement de route……..…...31

Figure II.7 : Architecture de routage hiérarchique LEACH……..…....33

Figure II.8 : Formation de Clusters dans LEACH……..…...34

Figure II.9 : Formation dynamique des Clusters……35

Figure II.10 : Modèle de dissipation d'énergie radio…….....38

Figure III.1 : La distribution des nœuds aléatoires sur un champ 100 m × 100 m…….....51

Figure III.2 : La représentation du champ de captage après la mort totale des nœuds….....52

Figure III.3 : Comportement du LEACH en présence d'hétérogénéité……56

Figure III.4 : Comportement SEP en présence d'hétérogénéité ……..…….58

Figure III.5 : Le point de stabilité entre LEACH normal [m=0 et α=0] et SEP [m=0.3 et α=2] et LEACH avancé [m=0.3 et α=2] en fonction de (m) et (α)……..…54

Figure III.6 : Comportement entre SEP et LEACH en présence d'hétérogénéité dans le cas (m = 0.2 et α = 1) ….……..59

Figure III.7 : Le point de stabilité dans les deux protocoles LEACH et SEP en fonction de (m × α)……..…..61

Figure III.8 : Le pourcentage d'amélioration du point de stabilité du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α)……..……61

Figure III.9 : L'énergie consommée en fonction de (m × α)……..….....62

Figure III.10 : L'énergie résiduelle du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α)…….....…63

Figure III.11 : L'énergie consommée pour un round du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α). ……..…59

Figure III.12 : Nombre des paquets envoyés à Sink pendant le point de stabilité……..…..65

Figure III.13 : Nombre des paquets envoyés à Sink pour un round pendant le point de stabilité en fonction de (m)……...……..…..66

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Les paramètres utilisés dans nos simulations……..…….55

Tableau III.2 : Le point de stabilité entre LEACH normal [m=0 et α=0] et SEP [m=0.3 et α=2] et LEACH avancé [m=0.3 et α=2] en fonction de (m) et (a)……..……..…58

Tableau III.3 : Le point de stabilité en fonction de (m × α)……..…60

Tableau III.4 : Le pourcentage d'amélioration du point de stabilité du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α)……..……...61

Tableau III.5 : L'énergie consommée en fonction de (m × α)……..….62

Tableau III.6 : L'énergie résiduelle du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α)……..…….....63

Tableau III.7 : L'énergie consommée pour un round du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α)…….……..…..63

Tableau III.8 : Nombre des paquets reçus par la station de base dans le point de stabilité.....65

Tableau III.9 : Nombre de paquets reçus par la station de base dans le point de stabilité pour un round en fonction de (m)……66

Tableau III.10 : Comparaison entre SEP et LEACH……..….....68

Liste d'abréviation

ADC: Analog to Digital Converters.

AOMDV: Ad hoc On Demand Multipath Distance Victor Protocol.

CDMA : Accès Multiple par répartition en Code.

CH: Cluster Head.

CRC: Sigle de Cyclic Redundancy Check.

CSMA MAC: Carrier-Sense Multiple Access Media Access Control.

DPM: Dynamics Power Management.

DREAM: Distance Routing Effect Algorithm for Mobility.

DSR: Dinamic Source Routing.

DT: Direct Transmission.

DVS: Dynamics Voltage Scheduling.

GPS: Global Position System.

GSM: Global System for Mobile Communications.

GSR: Global Strate Routing.

ID: Identifier.

LEACH: Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy.

MANETs: Mobile ad hoc networks.

MATLAB: MATrix LABoratory.

MCFA: Menimum Cost Forwarding Algorithm.

MTE : Transmission Minimale Energétique.

PC : Personal Computer.

PDA : Personal Digital Assistant.

QdS : Qualité De Service.

RAM : Random Access Memory.

RCSF : Réseau de Capteur Sans Fil.

RF: Radio Frequency.

SB: Station de base.

SEP: Stable Election Protocol.

SNR: Signal-To-Noise.

SPEED: A Stateless Protocol for Real Time Communication in Senor Networks.

SPIN: Sensor Protocols For Information via Negotiation.

TDMA: Time-division multiple access.

WSN: Wireless Sensors Network.

ZRP: Zone Routing Protocol.

Introduction générale

Les récentes avancées technologiques dans le domaine des systèmes micro-électroniques et des communications sans fil ont permis le développement des capteurs. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) ou WSN (en anglais : Wireless Sensor Networks) sont considérés comme l'une des plus importantes avancées technologiques du 21éme siècle. Un RCSF comprend un grand nombre de nœuds capteurs spatialement répartis pour surveiller, collecter et transmettre de manière coopérative diverses conditions environnementales (température, son, vibrations, pression, mouvements, polluants, etc.) vers une station de base qui sert de passerelle vers d'autres réseaux. Ces caractéristiques ouvrent de grandes opportunités et relèvent d'énormes défis répondant aux exigences d'innombrables secteurs et applications [18].
Parallèlement à leurs possibilités indéniables, les RCSF font face à des contraintes et des difficultés certaines. Les nœuds capteurs souffrent d'handicaps techniques : taille réduite, source d'énergie limitée, espace de stockage faible et capacités de calculs limités. Parmi ces facteurs, la maîtrise de consommation d'énergie et la maximisation de la durée de vie des nœuds capteurs demeurent parmi les contraintes les plus significatives, de par le fait que ces derniers soient alimentés par des batteries de capacité très limitée et généralement non rechargeables et non-remplaçables. Par conséquent, l'économie d'énergie ou la minimisation de celle-ci contribue grandement dans la prolongation de la vie du réseau. En d'autres termes, pour qu'un réseau de capteurs reste autonome pendant une longue durée ayant une longévité maximale (de quelques mois ou de quelques années).

Pour résoudre le problème de la consommation de l'énergie plusieurs travaux de recherche en été réaléser parmi ces travaux, les protocoles de routage des donnes de dans les RCSF tel que LEACH et SEP, Chacun d'eux présente une technique différente tout dans ce domaine, c'est donc la minimisation de la consommation d'énergie à travers l'ensemble du réseau, afin de prolonger la durée vie [05].

Notre mémoire est structuré comme suit : le premier chapitre présente une introduction au domaine des réseaux de capteurs sans fils. Nous commençons d'abord par la définition des différentes notions et concepts gravitant autour de cette thématique, ensuite nous exposons quelques domaines d'application des RCSFs. Le deuxième chapitre décrit les différents

protocoles de routage hiérarchique de ce réseau avec description plus au moins détaillée. Nous évoquerons aussi deux protocoles de routage hiérarchique LEACH et SEP qui permettent la minimisation de la consommation d'énergie. En dernier une comparaison entre ces protocoles est présentée dans le troisième chapitre avec présentation d'une simulation sur MATLAB entre LEACH et SEP sous contrainte énergétique dans les RCSFs avec description.

Chapitre I :

Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil

1. Introduction

L'apparition de nouvelles technologies ainsi que les progrès effectués dans le domaine des réseaux et du traitement de l'information ont entraîné l'apparition de nouveaux outils et objets tels que les réseaux de capteurs sans fils et leurs applications. Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont parmi les technologies les plus importantes de nos jours.

Grâce aux avancées technologiques de plusieurs secteurs, 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. Ce type de réseau est utilisé par plusieurs applications telles que les applications militaires, environnementales, industrielles, médicales, etc. Ces applications ont des exigences plus ou moins différentes, particulièrement en termes de sécurité et surtout en conservation d'énergie qui est l'objectif principal pour augmenter la durée de vie du réseau [05].

L'objectif de ce chapitre est de donner d'abord une vue générale sur les réseaux de capteurs sans fils, en présentant leurs architectures, leurs domaines d'application. Nous aborderons par la suite les caractéristiques et contraintes.

2. Définition d'un capteur sans fil

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique équipé d'une source d'énergie limitée. Les capteurs peuvent être placés ou semés dans une zone d'intérêt pour la surveiller, formant ainsi un réseau de capteurs. Les dispositifs de détection sont conçus pour être capables de former un réseau sans fil autonome, pouvant détecter des données et de les délivrer à un ensemble spécifié de destinations.

Ce capteur est capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, humidité, vibration, etc….), et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Chaque capteur assure les trois principales fonctions de base qui sont : l'acquisition de données, les traitements sur ces données et leurs communications aux stations de base [19].

3. Nœuds capteur

C'est un nœud à l'intérieur d'un réseau de capteurs qui est capable de réaliser certains traitements, comme la collecte d'informations sensorielles et la communication avec d'autres nœuds connectés sur le réseau. Il est principalement composé d'un processeur, d'une mémoire, d'un émetteur/récepteur radio, et d'une pile (source d'énergie) [02].



Figure I.1 : Exemples des noeuds capteurs [30].

Un capteur est composé de quatre composants de base : Unité de capture, unité de traitement, unité d'émission/réception, et une unité d'énergie. Il se peut aussi qu'il existe d'autres composants additionnels dépendant de l'application, par exemple : un générateur d'énergie, un système de localisation, et un mobilisateur.

3.1 Unité de capture

Le capteur est généralement composé de deux sous-unités : le récepteur (l'analyse) et le transducteur (convertissant le signal du récepteur en signal électrique).La fonction principale de l'unité de capture est de capturer ou mesurer les données physiques à partir de l'objet cible. Un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local, sachant que le capteur à avantage de fournir des signaux analogiques. Le signal analogique correspondant aux évènements observés par le capteur est ensuite transformé en données numériques qui peuvent être utilisées par l'unité de traitements à travers d'un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (Analog to Digital Converters) [03].

3.2 Unité de traitement

Cette unité est considérée comme le noyau du capteur sans fil (l'unité principale).Elle a pour responsabilité l'exécution des protocoles de communications ayant un rôle de liaison d'un nœud avec les autres nœuds du réseau. Elle peut aussi analyser les données captées, communiquées au microprocesseur et stockées dans la mémoire [03].

3.3 Unité de transmission

Les données reçues sont traitées par l'unité de capture et transmises par l'unité de transmission qui effectue toutes les émissions et réceptions des données sur un modem sans fil. Cette unité est généralement capable d'effectuer des communications bidirectionnelles. Concevoir des unités de transmission de type radiofréquence avec une faible consommation d'énergie est un défi car pour qu'un nœud ait une portée de communication suffisamment grande, il est nécessaire d'utiliser un signal puissant et donc une consommation d'énergie plus importante.

Il existe trois schémas de transmission pour les réseaux de capteurs : la communication optique (Laser), l'infrarouge, et la radiofréquence (RF : Radio Fréquence).

Le Laser consomme moins d'énergie que la RF et fournit une haute sécurité, mais il est sensible à la perturbation physique.

L'infrarouge n'a pas besoin d'antennes, mais sa capacité de diffusion est limitée.

La RF est la plus simple à utiliser mais elle exige l'utilisation d'antennes .Plusieurs stratégies de réduction de la consommation d'énergie sont développées, comme la modulation/démodulation et le filtrage. La modulation en amplitude est plus simple par rapport à celle en fréquence, cependant elle est susceptible au bruit [03].

3.4 Unité d'énergie

La consommation d'énergie est un point très important pour les réseaux de capteurs. Les batteries utilisées sont soit rechargeables ou non. Souvent, dans les environnements sensibles il

est impossible de recharger ou changer une batterie, donc avoir une meilleure gestion de la consommation d'énergie est primordial pour augmenter la durée de vie du réseau.

Il existe deux grandes politiques pour conserver la consommation d'énergie. Dans la première, appelée DPM (Dynamics Power Management), les composants inactifs sont mis en veille. Dans ce cas une analyse aléatoire pour prédire les prochains évènements constitue une généralité sur les réseaux de capteurs nécessaires. Dans la deuxième, appelé DVS (Dynamics Voltage Scheduling), l'énergie est fournie aux composants selon leur charge de travail. [03].

Les nouveaux capteurs peuvent contenir des générateurs d'énergie renouvelable, par exemple : l'énergie solaire, et l'énergie mécanique (vibration, air...).

Certaines applications ont besoin de connaitre l'emplacement du capteur. Pour cette raison, ce dernier doit être doté d'un système de localisation telle qu'un GPS (Global Positioning System).

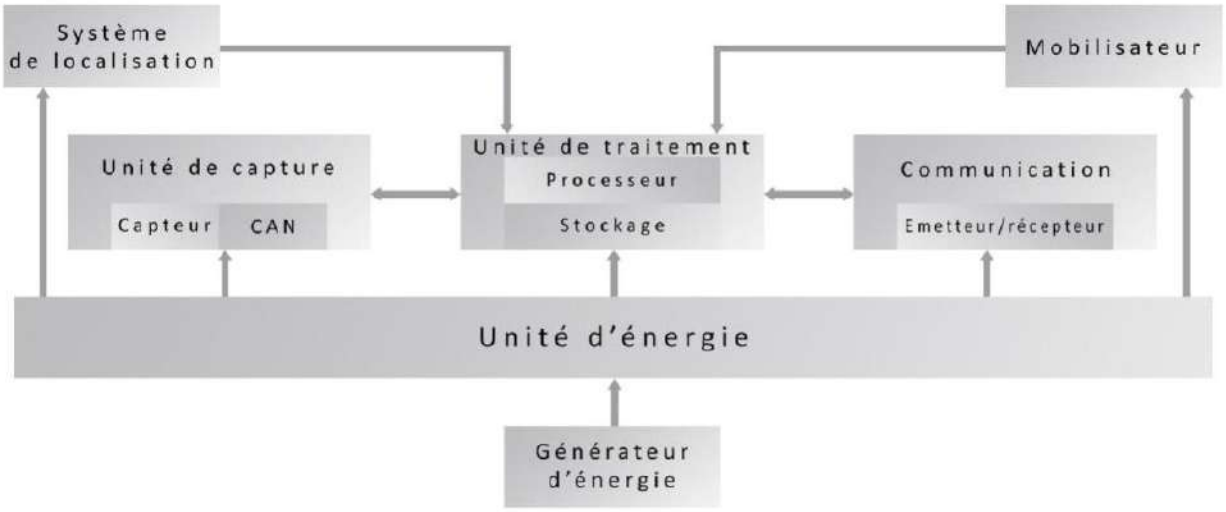


Figure I.2 : Les composants d'un nœud capteur [21].

4. Définition des réseaux de capteurs sans fil

Les RCSF sont un ensemble de capteurs autonomes spatialement distribués capables de récolter et de transmettre les données acquises en collaboration via un réseau ad hoc vers un emplacement principal (puits). L'alimentation électrique de chaque capteur est assurée par une batterie individuelle dans la consommation des communications et les calculs liés au traitement de l'information qui doit être optimisée [01].

5. Réseaux ad hoc

Les réseaux ad hoc sont des réseaux sans fil dont les constituants généralement appelés hôtes ou nœuds communiquent entre eux en mode pair-à-pair et sont capables de s'auto-organiser sans infrastructure définie préalablement et sans la disponibilité d'aucune administration centralisée. Par exemple connecter un équipement à un autre équipement sans l'utilisation d'infrastructure (comme par exemple un point d'accès dans les réseaux sans fil ou un routeur dans les réseaux câblés). Les réseaux ad hoc, dont leur configuration est mobile, sont connus sous le nom de "réseaux mobiles ad hoc" ou MANETs (Mobile ad hoc networks en anglais).

Dans un réseau ad hoc, un nœud peut communiquer directement avec les nœuds qui sont dans son rayon de communication (on les appelle des voisins directs). Pour communiquer avec d'autres nœuds non voisins directs (ceux qui sont en dehors du rayon de communication), un protocole de routage est nécessaire afin de construire des routes entre les nœuds .Ce dernier assure l'acheminement des données du nœud source vers le nœud de destination. En d'autres termes, chaque composant du réseau agit en tant que terminal et nœud de relais. Il participe ainsi au maintien de la connectivité dans le réseau tout entier [20].

6. Caractéristique du réseau de capteurs sans fil

- **Absence d'infrastructure** : les réseaux Ad-hoc en général, et les réseaux de capteurs en particulier se distinguent des autres réseaux par la propriété d'absence d'infrastructure préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables pour établir la connectivité du réseau et le maintenir d'une manière continue.

- **Taille importante** : un réseau de capteurs peut contenir des milliers de nœuds [23].

- **Interférences :** les liens radio ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence, ou utilisant des fréquences proches, peuvent interférer.

- **Topologie dynamique** : les capteurs peuvent être attachés à des objets mobiles qui se déplacent d'une façon libre et arbitraire rendant ainsi la topologie du réseau fréquemment changeante.

- **Sécurité physique limitée** : les réseaux de capteurs sans fil sont plus touchés par le paramètre de sécurité que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.

- **Bande passante limitée** : une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un nœud est limitée.

- **Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul** : la caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la modestie de ses ressources énergétiques car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d'énergie (batterie). Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation des dépenses énergétiques est exigée chez chaque nœud. Ainsi, la capacité de stockage et la puissance de calcul sont limitées dans un capteur [20].

7. Architecture de communication d'un RCSF

L'architecture des réseaux de capteurs sans fil utilise plusieurs sources. Historiquement un travail relatif a été effectué dans le contexte des réseaux à auto-organisation, mobiles et Ad Hoc. Un réseau de capteurs est constitué essentiellement de : plusieurs nœuds capteurs, un nœud Sink et un centre de traitement des données.

Nœuds : Ce 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 capteurs sans fil plus ou moins large à charge un peu élevée, on peut trouver deux Sinks ou plus pour alléger la charge.

Centre de traitement des données : c'est le centre vers lequel les données collectées par le Sink sont envoyées. Ce centre a pour rôle de regrouper les données issues des nœuds et de les traiter de façon à en extraire l'information utile 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 [03].

L'architecture d'un RCSF typique est représentée, comme le montre la Figure I.3, par deux types de réseaux : réseau d'acquisition et réseau et transport. Ces deux réseaux permettent une communication dans deux directions par rapport au RSCF. La première, appelée direction ascendante (Uplink direction), a pour origine les nœuds capteurs vers le destinataire final (centre de traitement). La seconde direction, appelée direction descendante (Downlink direction), assure la communication inverse c'est-à-dire du centre de traitement vers les nœuds capteurs. Les communications dans les deux directions utilisent un ou plusieurs nœuds Sink et un réseau de transport comme moyen de communication intermédiaire [03].

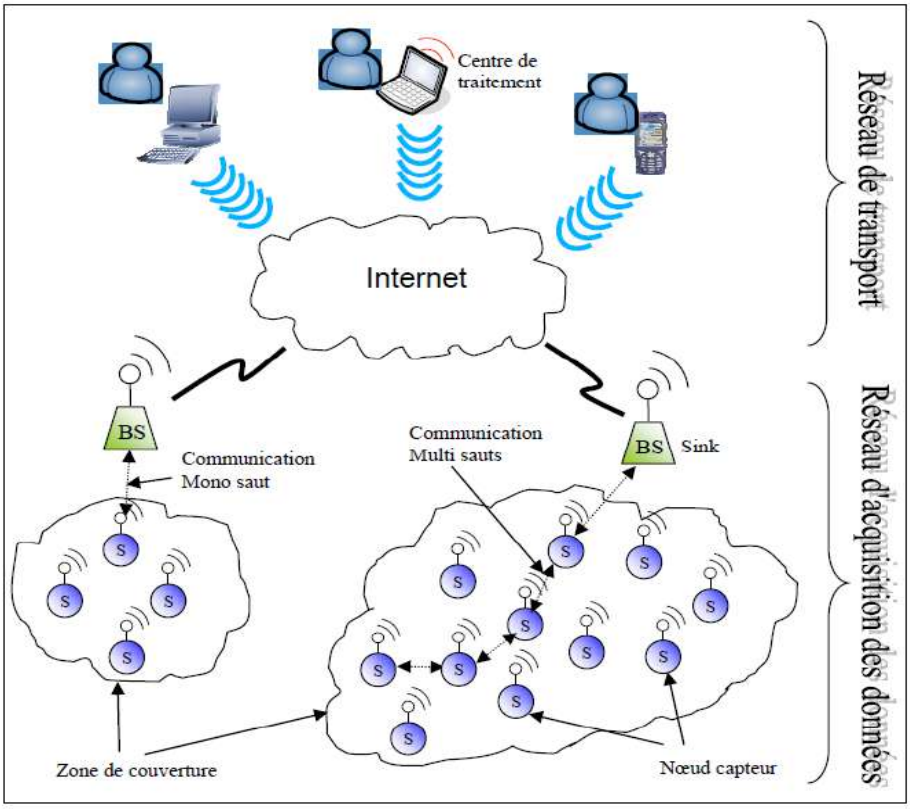


Figure I.3 : Interconnexion d'un RCSF avec Internet [02].

7.1 Le réseau d'acquisition

Il regroupe le Sink et l'ensemble des nœuds capteurs déployés dans une zone d'intérêt pour assurer des fonctions telles que la surveillance et le suivi. En général le déploiement établit une association des nœuds capteurs avec des objets, des créatures ou de simples endroits pour les doter de capacités supplémentaires de traitement de l'information.

Cette association peut être établie par attachement directe ou à l'aide d'un largage à partir d'un avion. exemple : les nœuds capteurs déployés réalisent des opérations de capture et de traitement des données brutes collectées d'un environnement physique afin de les envoyer au centre de collecte (Sink), soit directement en employant une communication mono-saut ou indirectement en empruntant un chemin de routage multi-sauts si le réseau est organisé en clusters et que chaque cluster est représenté par un ensemble de nœuds capteurs appelés nœuds. Les membres du cluster et le nœud coordinateur établissent le trafic (voir Figure I.4) ensuite li y a deux scénarios de communication qui peuvent survenir. Une communication directe entre chaque coordinateur et le Sink, dans ce cas on parle de Clustering mono-saut et une communication multi-saut entre coordinateur jusqu'à ce que le trafic atteigne le Sink. Ce dernier cas caractérise le Clustering multi-sauts [03].

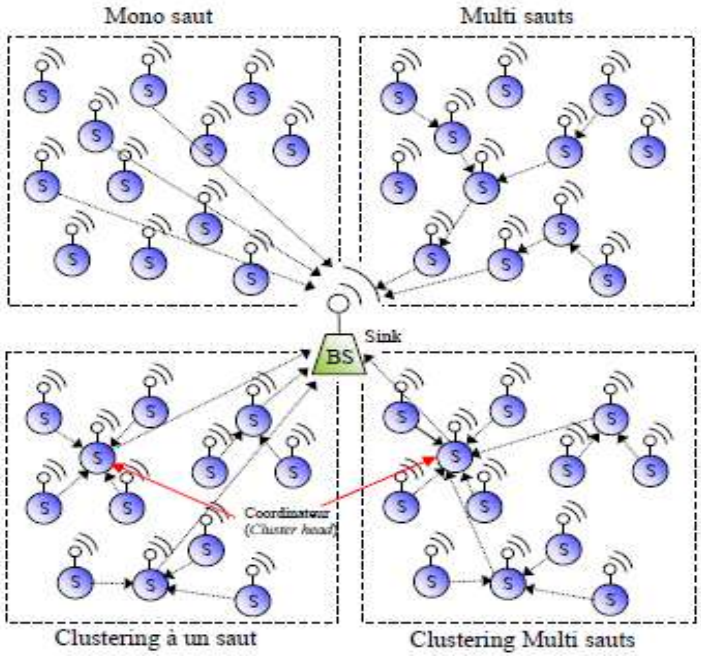


Figure I.4 : Différentes architectures pour un réseau d'acquisition [02].

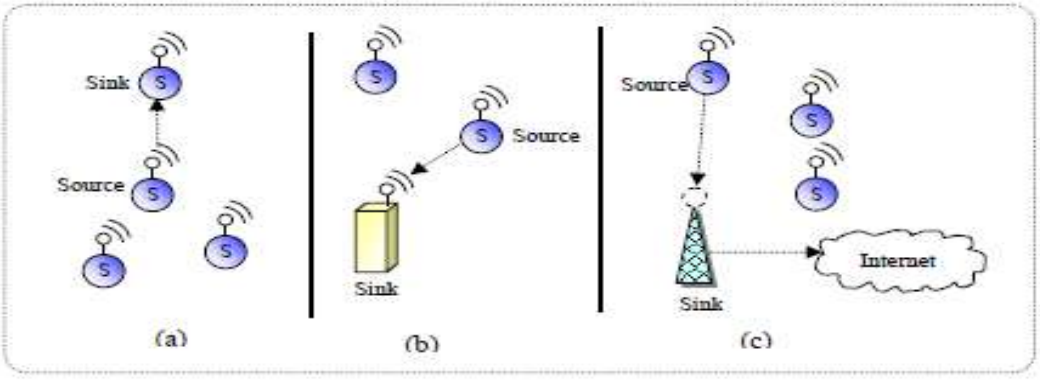


Figure I.5 : Différents types de Sink dans un RCSF (a) Un nœud capteur, (b) Système mobile plus puissant, (c) Point d'accès relie un autre réseau [02].

Le Sink dans un RCSF peut prendre plusieurs formes, comme le montre la Figure I.4.En effet, il peut être un nœud parmi l'ensemble des nœuds capteurs (Figure I.5(a)), mais dans ce cas le problème d'énergie est sérieusement posé puisque tout le trafic passe par ce nœud (donc consommation d'énergie considérable en réception notamment).

Parmi les solutions envisagées pour traiter ce problème, il y a la proposition de déploiement de plusieurs Sink dans un contexte purement distribué (déploiement aléatoire du Sink). Dans le cas où le Sink est un système particulier mobile plus puisant qu'un nœud capteur ordinaire (PDA ou ordinateur portable) (Figure I.5(b)).La collecte par le Sink des informations générées par les nœuds capteurs se fera au fur et à mesure de son déplacement dans le champ de déploiement.

Par contre, dans le cas où le Sink est considère comme une passerelle vers d'autres réseaux tels que Internet (Figure I.5(c)), la problématique de consommation d'énergie n'inclut pas en général dans sa stratégie globale. Notons enfin que souvent on confond le Sink avec le centre de traitement de l'utilisateur pour des raisons de simplification et de réduction de complexité due au facteur d'hétérogénéité réseau qu'il faut à prendre en considération [03].

7.2 Le réseau de transport

Il regroupe le réseau de transport proprement dit ainsi que le centre d'analyse et d'exploitation des données collectés .Le réseau de transport permet d'assurer un acheminement sûr et fiable des donnés générées par RCSF à partir du Sink jusqu'à la station de travail de l'utilisateur final. Il peut s'agir du réseau Internet, réseau de satellite, réseau cellulaire de type GSM ou autre.

À partir d'un centre de traitement dans le cas d'une communication avec direction descendante l'utilisateur peut formuler des requêtes d'extraction de données bien précises à partir du RCSF ou des opérations de maintenance à distance telles que la reconfiguration de certains nœuds de réseau [03].

8. Types de communications

Un nœud peut communiquer directement sans détour grâce à la communication single-Hop (à un seul saut) avec les puits, ou bien en utilisant la communication multi-Hop (à multiple de sauts) passant ainsi l'information à ses voisins [20].

8.1 Communication single-Hop (DT)

Elle est type le plus simple de MANETs (Mobile ad hoc networks en anglais), elle conduit aux transmissions de longues distances avec ses nœuds qui se communiquent directement entre eux sans aucun intermédiaire et ses nœuds ne sont pas obligatoirement statiques, ils restent dans un champ énergétiquement contrôlé [20].

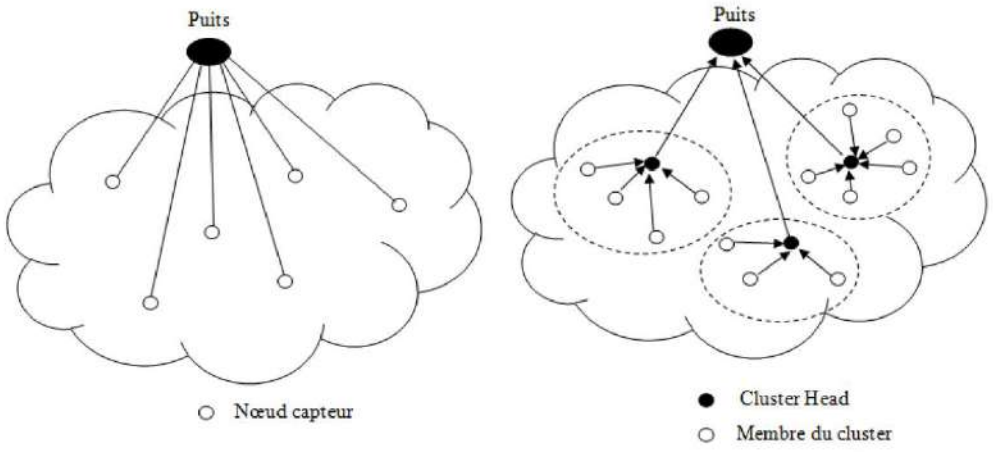


Figure I.6 : Communication Single-Hop [20].

En utilisant ce type de communication chaque nœud peut communiquer directement avec la station de base ou la seule réception de données apparait.

La transmission directe exige une grande quantité d'énergie de transmission de chaque nœud. Si le Sink est vraiment loin des autres nœuds, la batterie des nœuds réduit d'elle-même donc la durée de la vie du réseau est également réduit.

Lorsque les nœuds sont situés à une distance éloignée de la station de base ils seront les premiers á mourir étant donné leur haute énergie de transmission.
Si la station de base est proche du nœuds, ou bien l'énergie exigée pour la réception de données est grande, ce type de communication est acceptable possiblement optimal comme méthode de communication [20].

8.2 Communication multi-Hop (MTE)

L'utilisation d'une communication Multi-Hop permet de réduire la distance de transmission, réduisant ainsi la déperdition d'énergie en vue d'une hausse de la durée de vie du réseau [20].

Dans la transmission à sauts multiples, l'architecture du réseau joue un rôle majeur. Les architectures de réseau à sauts multiples sont typiquement divisées en architectures plates ou hiérarchiques. La Figure I.6 représente ce type de cas.

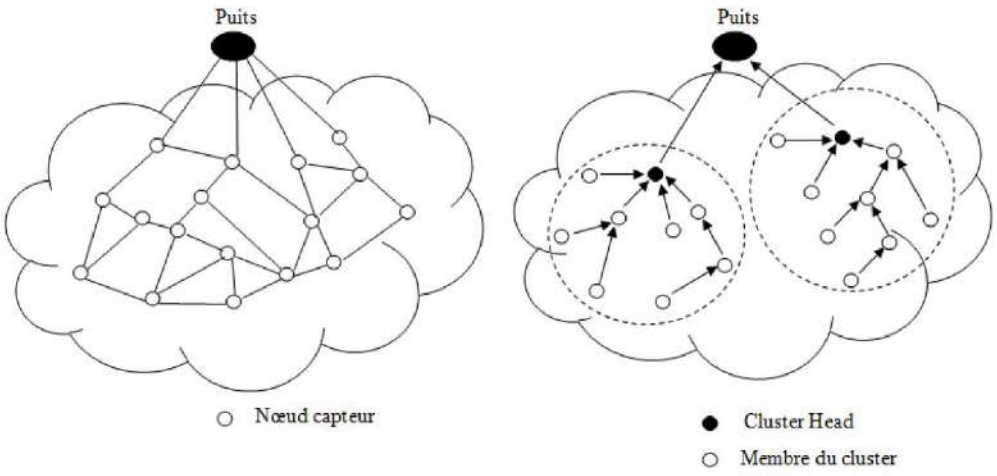


Figure I.7 : Communication multi-Hop [20].

Dans ce type de communication, le nœud dirige les données destinées totalement à la station de base à travers des nœuds intermédiaires qui servent des routeurs pour les données des autres nœuds pour la détection de l'environnement.

Dans la Communication multi-Hop, les nœuds intermédiaires sont choisis de telle façon à minimiser l'énergie de transmission d'amplificateur :

$$E_{Tx\text{-}amp}(L, d) = \varepsilon_{amp} * L * d^2 \qquad (I.1) \qquad [05].$$

Avec d : La distance entre l'expéditeur et le destinataire.

L : Taille d'un message L-bit.

ε_{amp} : Facteur d'amplification.

C'est-à-dire que le nœud A va transmettre au nœud C à travers le nœud B Si :

$E_{transmit}(d=d_{AB}) + E_{transmit}(d=d_{BC}) < E_{transmit}(d=_{AC})$ avec: $d^2_{AB}+d^2_{BC}<d^2_{AC}$ [05].

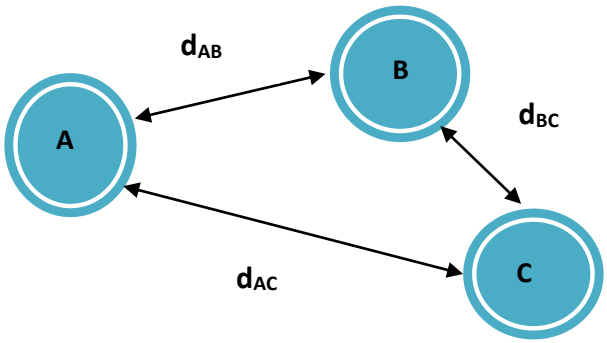


Figure I.8 : Critères du choix des nœuds intermédiaires [05].

Mais les nœuds plus proches au Sink, sont les premiers qui vont mourir dans la Communication multi-Hop puisqu' ils sont les plus utilisés fréquemment comme routeurs pour les autres données des capteurs.

Au lieu d'avoir une seule transmission de données (à haute énergie) chaque message doit être passé par n transmissions (à faible énergie) et n réceptions, tout dépend du rapport coût de l'amplificateur d'émission et l'électronique de radio, l'énergie totale dépensée dans le système pourrait en fait être actuellement grande par multi-Hop que par l'usage du protocole de communication directe.

Pour illustrer ce point, on considère ce réseau linéaire présenté par la Figure I.9, ou la distance entre les nœuds est r. Si on considère l'énergie de transmission d'un seul message de L-bits à partir d'un nœud localisé à une distance n×r de la station de base.

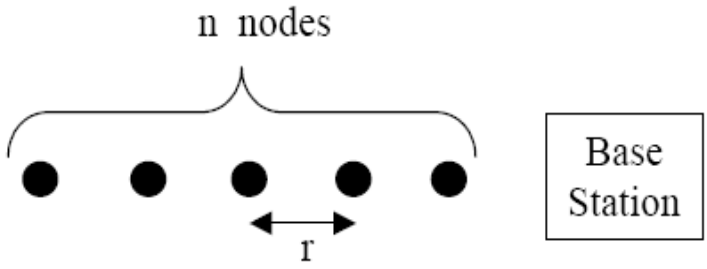


Figure I.9 : Représentation d'un réseau linéaire [05].

En utilisant l'approche transmission direct (DT) on aura :

$$E_{direct} = E_{TX}(L, d=n\times r) = E_{elec} * L + \varepsilon_{amp} * L * (n\times r)^2 \quad [05] \qquad (I.2)$$

E_{elec} : L'énergie de transmission/réception électronique.

n :L'ensemble des nœuds.

r : La distance entre les nœuds.

Dans la Communication multi-Hop, chaque nœud envoie un message vers le nœud le plus proche à la station de base, ou le nœud localisé à une distance (n×r) de BS exige n transmissions de distance r et (n-1) réceptions.

$$E_{MTE} = n * E_{TX}(L, d=r) + (n-1) * E_{RX}(L) = n(E_{elec} * L + \varepsilon_{amp} * k * r^2) + (n-1) * E_{elec} * L$$

$$= k((2n-1) E_{elec} + \varepsilon_{amp}\, n\times r^2) \quad [05]. \qquad (I.3)$$

On constate que la transmission directe exige moins d'énergie que le routage MTE si :

$$E_{direct} < E_{MTE}$$

$$E_{elec} + \varepsilon_{AMP}\, n^2 r^2 < (2n-1) E_{elec} + \varepsilon_{amp}\, n\, r^2 \quad [05]. \qquad (I.4)$$

$$\frac{E_{elec}}{\varepsilon_{amp}} > \frac{r^2 n}{2}$$

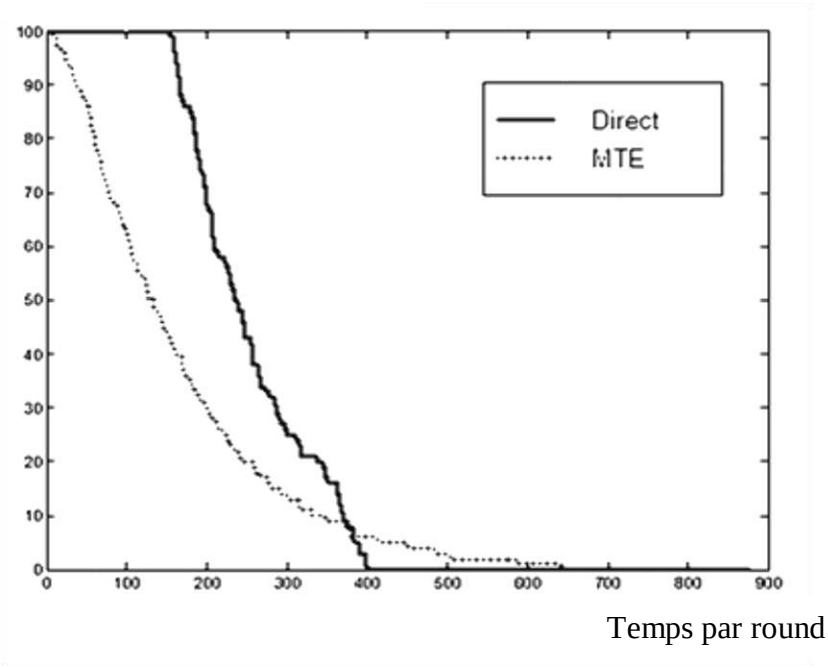


Figure I.10 : Comparaisons entre multi-Hop (MTE) et single-Hop (DT) en termes de nœuds en vie (simulation pour 100 nœuds) [05].

Le premier nœud s'épuisera plus vite en utilisant multi-Hop que single-Hop (si $\boldsymbol{\varepsilon_{amp}}$ est grand).

Quand le diamètre du réseau est petit, l'énergie électronique de la radio est élevée, la transmission directe est plus économe en énergie que multi-Hop.

La conception des protocoles et des applications de ces réseaux doit être économe en énergie afin de prolonger la durée de vie du réseau, car le remplacement des batteries est un processus très difficile une fois ces nœuds déployés. Avec le transfert direct (DT), les nœuds du capteur se déplacent directement vers le Sink, de sorte que les nœuds éloignés du Sink meurent en premier. D'un autre côté, avec une capacité de transmission minimale (MTE), les données sont acheminées sur des routes avec un coût minimum, où le coût reflète la puissance transmise consommée. Sous MTE, les nœuds proches du Sink agissent comme des relais avec une probabilité plus élevée que les nœuds éloignés du Sink. Ainsi, les nœuds proches du Sink ont tendance à mourir rapidement [05].

9. Facteurs et contraintes conceptuelles des RCSF

9.1. Contraintes conceptuelles

La conception des RCSF, leurs protocoles leurs algorithmes sont guidés par plusieurs facteurs [04] :

9.1.1 Tolérance aux fautes : Le réseau doit être capable des maintenir ses fonctionnalités sans interruption en cas de défaillance de l'un de ses capteurs. Cette défaillance peut être causée par une perte d'énergie, par un dommage physique ou par interférence de l'environnement. Le degré de tolérance dépend du degré de criticité d'application et des données échangées.

9.1.2 Scalabilité (Passage à l'échelle) : Une des caractéristiques des RCSF est qu'ils peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Le réseau doit être capable de fonctionner avec ce nombre de capteurs tout en permettant l'augmentation de ce nombre et la concentration (densité) des nœuds dans une région [02].

9.1.3 Coût de production : Le coût des RCSF constitués d'un grand nombre de nœuds dépend d'un seul nœud qui ne doit pas par conséquent être cher [02].

9.1.4 Environnement : Les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes conditions environnementales : forte chaleur, pluie, humidité…

9.1.5 Média de transmission : Les nœuds communicants sont reliés sans fil. Ce lien peut être réalisé par radio, signal infrarouge ou un média optique [02].

9.1.6 Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul : La caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la modestie de ses ressources énergétiques car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d'énergie, de calcul et de stockage. Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation des dépenses énergétiques est exigée chez chaque nœud [02].

9.1.7 Agrégation de données : Agrégation de données : Dans les RCSF, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont corrélées spatialement et temporellement, pour

recevoir toutes les données à la réception de la station de base. La réduction de la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau c'est ainsi que l'on peut améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données, appelée aussi fusion des données.

9.2 Contraintes matérielles

Bien qu'ils aient de nombreux avantages, les nœuds capteurs sont caractérisés par des ressources et des composantes plus limitées en raison de leurs tailles réduites, ce qui conduit à la génération du nombre de ses contraintes, parmi lesquelles on retrouve : [28]

9.2.1 La puissance de calcul limitée : fonctionnant dans la majorité des cas avec des registres 8 ou 16 bits, les processeurs des réseaux de capteurs sont différents de ceux d'une machine classique, car ils utilisent souvent des microcontrôleurs de faible fréquence.

9.2.2 Mémoire limitée : 2 à 250 Ko de RAM et 1 à 32 Mo de mémoire flash.

9.2.3 Environnement : Les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes conditions environnementales (forte chaleur, pluie, humidité, etc.).

9.2.4 La consommation d'énergie : dans ces réseaux, les nœuds sont typiquement gérés par la durée de vie de leurs batteries qui est une réserve d'énergie limitée, afin de minimiser la consommation d'énergie á importance primordiale et prolonger la durée de vie du RCSF.

9.3 Au niveau de la communication

9.3.1 Perte de données à cause de la transmission radio : les RCFS sont des réseaux sans fil, ce qui fait que la portée de communication est limitée par la capacité du rayonnement des antennes utilisées, à quoi s'ajoute la limitation des renvois de paquets en raison du manque d'énergie.

9.3.2 La bande passante : limitée et partagée par tous les nœuds du réseau de capteurs.

9.3.3 Interférences : ce réseau travaille sur une bande de fréquence non propriétaire, ce qui rend les communications vulnérables devant les problèmes d'interférences.

10. Durée de vie du réseau

La durée de vie est un élément essentiel pour tout réseau de capteurs sans fil. Le but de n'importe quelle application est d'avoir des nœuds placés sur le terrain pour des mois ou des années. Le principal facteur limitant la durée de vie d'un réseau de capteurs est l'énergie.

Comme la seule source d'énergie d'un capteur est une batterie à durée de vie limitée, l'optimisation énergétique doit être prise en considération quel que soit le problème traité. En effet, un réseau de capteurs ne peut pas survivre si la perte de nœuds est très importante car ceci engendre des pertes de communications dues à une très grande distance entre les nœuds restants. Donc il est très important que les batteries durent le plus longtemps possible, étant donné que dans la plupart des applications il est impossible de retourner les changer.

Plusieurs solutions, à la fois matérielles et logicielles, ont été proposées afin d'optimiser la consommation d'énergie pour maximiser la durée de vie du réseau de capteurs. Par exemple du coté des batteries l'utilisation des piles à combustible qui atteignent des performances bien supérieures aux batteries classiques. An niveau logiciel, le but est de concevoir des algorithmes non complexes distribués pour minimiser la consommation d'énergie, et des protocoles (routage par exemple) à moindre communication. Diverses approches ont été proposées dans ce domaine [04].

11. Domaines d'application des réseaux de capteurs

Les réseaux de capteurs offrent une facilité de déploiement qui représente un avantage d'utilisation dans différents domaines. En plus, les réseaux de capteurs peuvent être constitués de différents types de capteurs tels que thermique, infrarouge, acoustique, magnétique, optique et sismique, pour surveiller une large variété de paramètres physiques.

11.1 Les applications militaires

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur d'origine pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit,

l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine.
Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou complexe d'accès, permet par exemple de surveiller l'ensemble des mouvements (amis ou ennemis), ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations).

Dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur d'origine pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto-organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui rendent ce type de réseaux un outil appréciable dans un domaine pareil.

Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou complexe d'accès, permet par exemple de surveiller l'ensemble des mouvements (amis ou ennemis), ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations) [22].



Figure I.11 : Application militaire [29].

11.2 La santé

Parmi les applications dans le domaine de santé, les réseaux de capteurs soutiennent des interfaces pour les personnes handicapées, la surveillance intégrée des patients, les diagnostics et l'administration de médicaments dans les hôpitaux, la télésurveillance des données physiologiques de l'homme, le suivi et la surveillance des médecins ou des patients à l'intérieur d'un hôpital [22].



Figure I.12 : Application de la santé [29].

11.3 Le Transport

Les réseaux de capteurs déployés dans les moyens de transport peuvent donner un mode de transport intelligent puisque les informations sur le trafic en temps réel sont collectées par les réseaux de capteurs afin d'améliorer plus tard des modèles de transport et de signaler une alerte de congestion également des problèmes de circulation aux conducteurs [22].



Figure I.13 : Application du transport [29].

11.4 La domotique

Le déploiement des capteurs de mouvements et de température dans les futures maisons dites intelligentes permet d'automatiser plusieurs opérations domestiques telles que la lumière qui s'éteint, la musique qui se met en état d'arrêt lorsque la chambre est vide. La climatisation et

le chauffage s'ajustent selon les points multiples de mesure, le déclenchement d'une alarme par le capteur anti-intrusion quand un intrus veut accéder à la maison [22].



Figure I.14 : Application domotique [29].

11.5 Applications dans le domaine sportif

L'évolution des réseaux de capteurs est utilisée de plus en plus dans le domaine sportif, à savoir les systèmes de surveillance, les systèmes de calcul de trajectoires (comme dans le tennis), systèmes de détection d'erreurs d'arbitrage (comme dans le football indiquent si la balle a franchi la ligne de but) [22].



Figure I.15 : Application sportive [29].

12. Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil présentent un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant vue la diversité de ses applications : santé, environnement, industrie et même dans le domaine sportif.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication. Cependant, nous avons remarqué que plusieurs facteurs et contraintes compliquent la gestion de ce type de réseaux. En effet, les réseaux de capteurs se caractérisent par une capacité énergétique limitée rendant l'optimisation de la consommation d'énergie dans des réseaux pareils une tâche critique pour prolonger la durée de vie du réseau.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons les différents facteurs qui interviennent dans la consommation d'énergie et nous présenteront quelques techniques pour la conserver. L'aspect efficacité énergétique y est significatif et contraignant, d'où l'importance de la modélisation du routage de contrôle et donc la nécessité de définir les protocoles de routages correspondants. Cela va être traité en **Chapitre II**.

Chapitre II :

Approches de routage hiérarchiques pour les RCSF

1. Introduction

La problématique majeure dans les RCSFs est la maitrise de l'énergie consommée par chaque nœud capteur, ce qui nécessite l'optimisation de cette dernière pour allonger la durée de vie du réseau .Cette problématique a été largement étudiée .et plusieurs techniques ont été utilisées afin d'assurer l'efficacité énergétique. Parmi ces dernières la technique d'équilibrage de charge est très avantageuse grâce à sa capacité de partager le trafic sur tous les nœuds. Dans ce chapitre nous allons décrire en premier lieu, les protocoles de routage dans les RCSFs et nous allons citer des exemples .Dans un deuxième lieu, nous présenterons deux protocoles de routage hiérarchique dans les RCSFs qui assurent l'efficacité énergétique [06].

Le LEACH est le premier protocole de routage basé sur un Cluster implanté .Il est également considéré comme la base des autres protocoles de routage de Cluster .Dans ce chapitre on prendra le protocole LEACH et son extension SEP.

2. Protocole de routage

2.1 Définition de routage

La technique de routage est une méthode d'acheminement des données vers la bonne destination à travers un réseau de connexion donnée. Le problème de routage au sein des RCSFs est assez complexe, cela est dû essentiellement à l'absence d'infrastructure fixe (forêt, mer,… etc.), de toute administration centralisée et à d'autres défis qui doivent être vérifiés.

Dans le cadre des RCSFs, les protocoles doivent être efficaces en énergie. Pour cela, il faut s'assurer de trouver un chemin ne consommant pas trop d'énergie et qui ne soit pas trop long également. Avant d'entamer la phase de conception d'une technique de routage efficace en énergie, il est nécessaire d'apporter une étude minutieuse des principaux protocoles de routage utilisés dans les RCSFs [06].

2.2 Les approches de routage dans les réseaux de capteurs sans fil

Pour permettre la communication dans un réseau de capteurs, il y'a lieu d'employer un protocole de routage basé sur la communication multi-sauts nécessairement. Cependant, il existe une multitude de protocole dont le principe de fonctionnement diffère selon la philosophie de

l'approche à laquelle ils appartiennent. Ces approches peuvent être distinguées comme suit : la structure du réseau, les objectifs des protocoles et l'établissement de route. La figure suivante (Figure II.1) représente les approches de routage dans les réseaux de capteurs. [06]

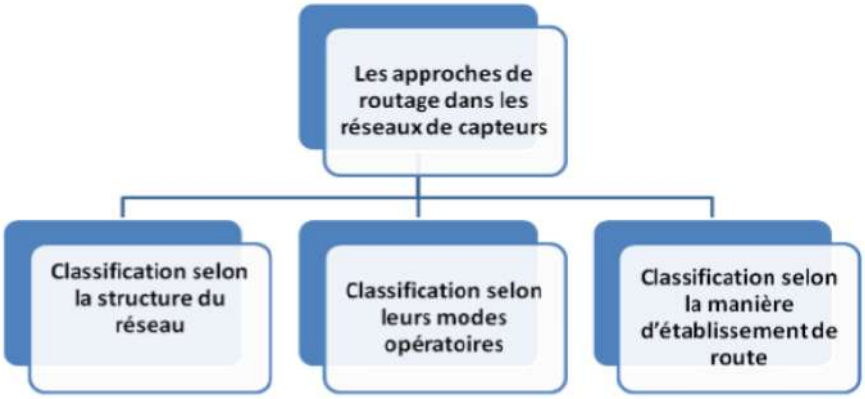


Figure II.1 : Les approches de routage dans les réseaux de capteurs [06].

2.2.1 Classification selon la structure du réseau

Les protocoles de routage utilisés pour l'acheminement des données entre les nœuds et le Sink sont basés sur la structure du réseau qui peut être classifiée en trois catégories. La figure suivante (Figure II.2) représente la classification selon la structure du réseau [06].

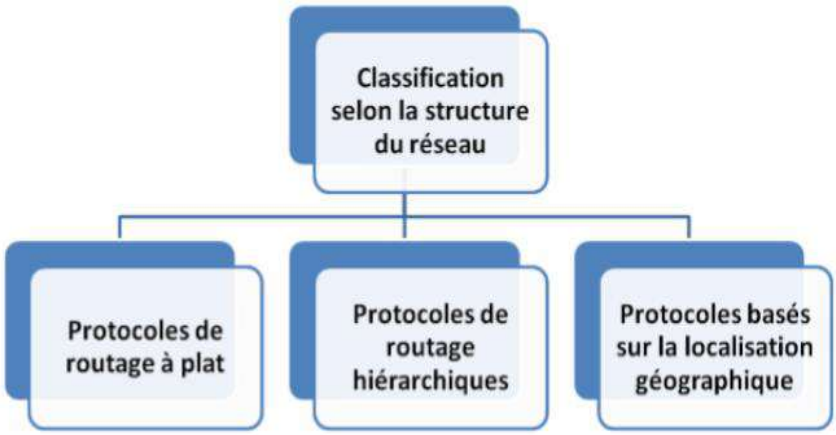


Figure II.2 : Classification selon la structure du réseau [06].

2.2.1.1 Protocoles de routage à plat

Un réseau de capteurs sans fil à structure plat est un réseau homogène, où tous les nœuds sont identiques en termes de batterie et de fonction, excepté la Station de Base (Sink).

Dans ce protocole, tous les nœuds capteurs possèdent le même rôle et collaborent entre eux pour accomplir la tâche de routage. Les réseaux plats sont caractérisés par : la simplicité des protocoles de routage, un coût de maintien réduit, une grande tolérance aux pannes, ainsi qu'une habilité à construire de nouveaux chemins suite aux changements de structure.

Ce pendant, les nœuds proches du Sink participent plus que les autres aux tâches de routage .De plus, ces réseaux présentent une fiable scalabilité due au fonctionnement identique des nœuds distribués, ainsi au grand nombre de messages de contrôle. On peut citer parmi les protocoles à structure plat : le protocole EAR (energy aware routing) et le protocole MCFA (minimum cost forwarding algorithm). La figure suivante Figure II.3 illustre l'organisation des capteurs d'une structure plate [24].

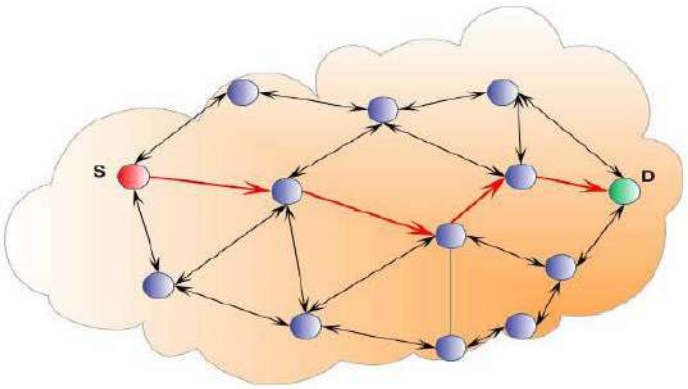


Figure II.3 : La structure d'un protocole plat [24].

2.2.1.2 Protocoles de routage hiérarchique

Les protocoles à structure hiérarchique forment des réseaux dans lesquels un nœud central Sink (le niveau supérieur de la hiérarchie) est relié à un ou plusieurs autres nœuds qui appartiennent à un niveau plus bas dans la hiérarchie (deuxième niveau) avec une liaison point à point. Aussi, chacun des nœuds du deuxième niveau aura également un ou plusieurs autres nœuds de niveau plus bas dans la hiérarchie (troisième niveau) reliés à lui avec une liaison point à point. Chaque ensemble de nœuds forme une sorte de motif (Cluster). Le nœud central n'a aucun autre nœud au-dessus de lui dans la hiérarchie sauf le centre de traitement des données ou la passerelle si elle existe. Les nœuds du deuxième niveau (Cluster) jouent le rôle des passerelles entre ceux du troisième niveau et le Sink. Dans ce cas, le routage devient plus simple, puisqu'il s'agit de passer

par les passerelles pour atteindre le nœud destinataire [07].Cette catégorie contient : le LEACH. La Figure II.4 ci après illustre l'organisation des capteurs d'une structure hiérarchique.

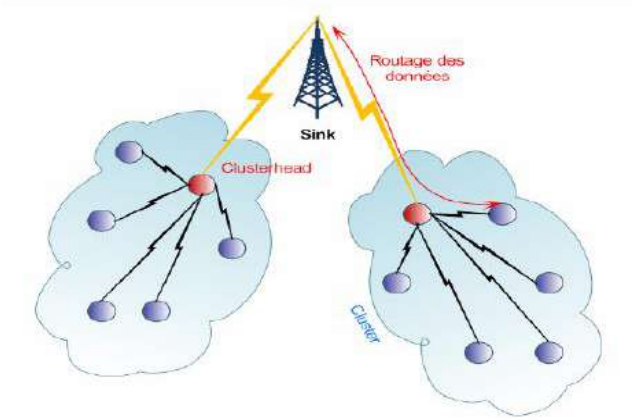


Figure II.4 : La structure d'un protocole hiérarchique [24].

2.2.1.3 Protocoles basés sur la localisation géographique

Un routage est dit géographique lorsque les décisions de routage sont basées sur la position des nœuds. Tous les nœuds possèdent un moyen de localisation, soit un système natif comme le GPS (Global Position System), soit un système logiciel comme un protocole de localisation. Un nœud source connaît toujours la position du nœud destinataire. Pour ce faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds, soit un service de localisation doit être utilisé. Parmi ces protocoles qui sont fondés sur cette architecture, nous citons : Le protocole DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility) [06]

2.2.2 Classification selon les modes opératoires

Les protocoles de routage basés selon les modes opératoires peuvent être classifiés en trois catégories. La figure suivante (Figure II.5) représente la classification selon leurs modes opératoires [06].

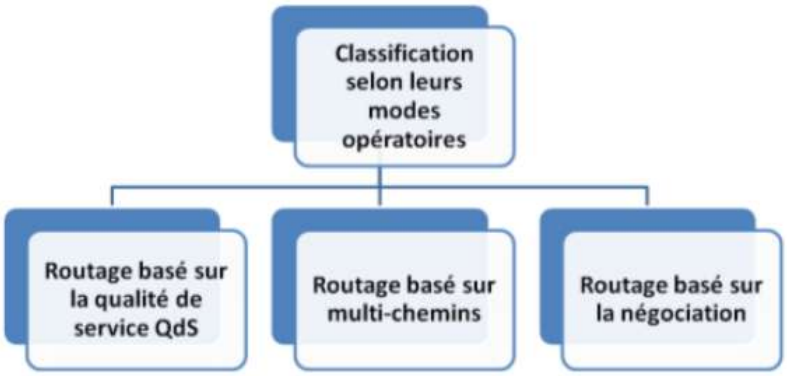


Figure II.5 : Classification selon leurs modes opératoires [06].

2.2.2.1 Routage basé sur la qualité de service QdS

Dans les protocoles basés sur la qualité de service, Il devrait y avoir un équilibre entre la consommation d'énergie et la qualité des données qui doit être trouvée. En particulier, le réseau doit satisfaire certaines métriques qui quantifient la qualité de service (délai (retard)), énergie, largeur de bande,…etc.) Lorsqu'il délivre les données à la station de base [08]. Parmi les protocoles qui sont fondés sur cette architecture, nous citons : Le protocole SPEED [06].

2.2.2.2 Routage basé sur multi-chemins

Les protocoles qui utilisent des chemins multiples, au lieu d'un seul chemin améliorent la performance du réseau. La tolérance aux fautes d'un protocole est mesurée par la probabilité d'existence d'un chemin alternatif entre la source et la destination lorsque le chemin primaire a échoué. Parmi ces protocoles qui sont fondés sur cette architecture, on cite : Le protocole AOMDV (Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector protocol) [06].

2.2.2.3 Routage basé sur la négociation

Les protocoles de routage sont basés sur la négociation avant la transmission. Les nœuds capteurs négocient entre eux leurs données en échangeant des paquets de signalisation spéciale. Ces paquets permettent de vérifier si les nœuds voisins disposent des mêmes données à transmettre. Cette procédure garantit que seules les informations utiles seront transmises et élimine la redondance des données. Parmi ces protocoles, on cite : Le protocole SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) [06].

2.2.3 Classification selon la manière d'établissement de route

Suivant la manière de création et de maintien des chemins pendant le routage nous distinguons trois catégories de protocoles de routages : protocoles proactifs, réactifs ou hybrides. La figure suivante (Figure II.6) représente la classification selon la méthode d'établissement de route [06].

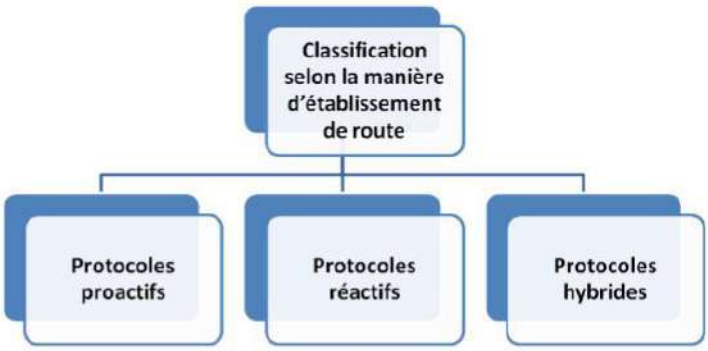


Figure II.6 : Classification selon la méthode d'établissement de route [06].

2.2.3.1Protocoles proactifs

Les protocoles de routage proactifs maintiennent à jour les tables de routage avant de commencer la transmission. Chaque nœud maintient donc une table pour stocker les informations de routage. Du fait de l'aspect dynamique de la topologie des réseaux, la maintenance des tables de routage nécessite l'envoi périodique par chaque nœud d'un message de signalisation indiquant sa présence à tous ses voisins. L'idée majeure est de conserver dans chaque nœud des informations de routage vers tous les autres nœuds du réseau pour accélérer le routage des paquets par la suite. Les changements topologiques du réseau sont gérés par la propagation à tous les voisins de la mise à jour des routes afin que chacun d'eux puisse maintenir une vue globale sur le réseau. Malheureusement ces protocoles atteignent rapidement leurs limites avec l'accroissement du nombre de nœuds et de leur mobilité. Or les changements topologiques sont fréquents et le réseau sera constamment inondé par les paquets de contrôle qui réduisent considérablement la bande passante. Mais en cas d'envoi successif d'informations d'une même source vers une même destination, ils permettent d'utiliser toujours la même route connue à l'avance. Parmi ces protocoles, on cite : Le protocole GSR (Global State Routing) [25].

2.2.3.2 Protocoles réactifs

La deuxième classe de protocole que nous allons étudier est le protocole de routage réactif. Un protocole réactif permet d'établir une table de routage lorsqu'un nœud capteur décide de transmettre des données (suite à un événement) aucune donnée sur le réseau n'existe. Ne connaissant pas la topologie de celle-ci ni l'énergie disponible, le protocole réactif va permettre de rassembler les différentes données des entités du réseau pour déterminer le chemin le plus optimale à prendre afin de communiquer avec un autre nœud du réseau, ou avec le nœud puits (Sink) [09]. Parmi ces protocoles, nous citons : DSR (Dynamique Source Routing) [25].

2.2.3.3 Protocoles hybrides

Ces protocoles combinent les propriétés de base des deux premières classes, en une seule. Autrement dit, ils sont à la fois réactifs et proactifs. Les protocoles hybrides sont utilisés dans un réseau découpé en zone. Ils emploient un protocole proactif dans la zone et un autre protocole réactif pour les communications interzones.

Pour être utilisé, cette technique de partitionnement en plusieurs zones, confère aux nœuds deux tables de routage. La première table aura pour objectif d'acheminer les données à l'intérieur de la zone, et la deuxième table aura pour but de router les données entre les différentes zones du réseau. Cette deuxième table de routage est utilisée par les nœuds qui sont aux frontières des différentes zones. Ces derniers joueront le rôle de « Gateway » (portes, relais) entres les différentes zones du réseau.

Quand un réseau est constitué de milliers de capteurs, la gestion de l'acheminement des données entre les différents capteurs est coûteuse dans le domaine énergétique et en capacité de stockage. Dans la technique de Clustering, les données ne sont pas transmises directement à la station de base mais au Cluster-Head (CH) correspondant. A partir de là, le Cluster-Head transmet toutes les données agrégées vers la station de base distante. Nous pouvons alors en déduire que les Cluster-Head reçoivent et transmettent le plus de données dans un Cluster en proie à une grande consommation d'énergie. Donc il est nécessaire de mettre en place des techniques permettant d'éviter à un Cluster-Head de consommer sa capacité énergétique totale. Parmi ces protocoles, on cite : Le protocole ZRP (Zone Routing Protocol) [25].

3. Le Protocole « LEACH » (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

3.1 Définition et architecture du « LEACH »

Le protocole « LEACH » est l'une des premières approches de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs (RCSF) qui était proposé par Heinzelman et les autres. L'idée est de former des clusters de nœuds de capteurs basés sur les zones où il y a un fort signal reçu. L'utilisation des Clusters-Head locaux comme passerelle pour atteindre la destination. Cela permet d'économiser de l'énergie car les transmissions ne sont effectuées que par les Cluster-Head plutôt que par tous les nœuds de capteurs. La figure ci-dessous représente l'architecture de routage hiérarchique LEACH (Figure II.7) [12].

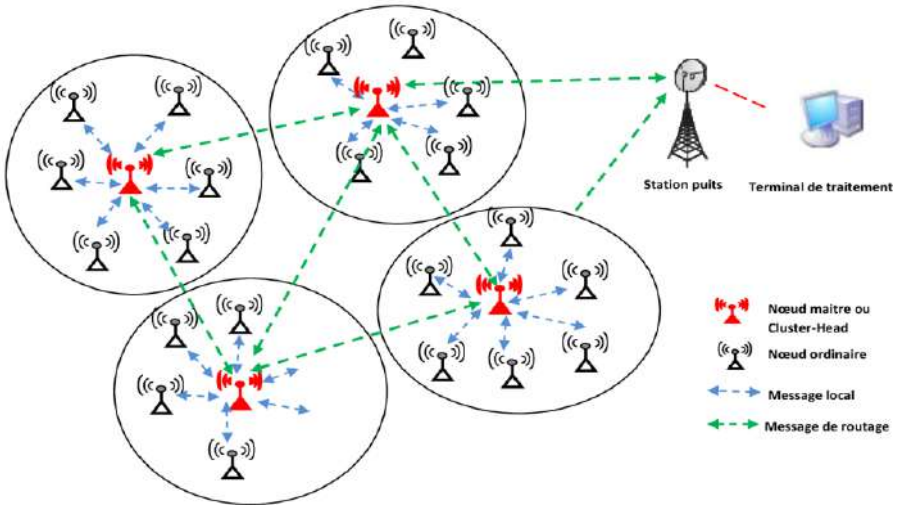


Figure II.7 : Architecture de routage hiérarchique LEACH [12].

3.2 Caractéristiques du protocole LEACH

Pour répondre au besoin du réseau de capteurs sans fil le LEACH a été développé, C'est un protocole auto organisateur basé sur le Clustering adaptatif, qui utilise la rotation randomisée des chefs de groupes pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds capteurs dans le réseau. LEACH est fondé sur deux hypothèses de base [05] :

- la station de base est fixe, placée loin des capteurs.
- Tous les nœuds du réseau sont limités en énergie**.**

LEACH inclut les caractéristiques suivantes :

- Auto-configuration, adaptive.
- Formation dynamique de Cluster.
- Contrôle localisé pour le transfert des données.
- Application spécifique pour le traitement des données (Data Processing), comme l'agrégation de données.
- Basse consommation d'énergie pour l'accès media.

LEACH choisit les nœuds Cluster-Head de façon aléatoire et périodique, en fonction de l'état de sa batterie et attribue ce rôle aux différents nœuds pour garantir une consommation équitable d'énergie entre les nœuds parce que le Cluster-Head (CH) consomme plus d'énergie. Dans le but de réduire la quantité d'informations transmises à la station de base. CH est responsable de la création et de la manipulation « TDMA » et envoie des données (les paquets) agrégées des nœuds à la station de base où ces données sont nécessaires en utilisant CDMA (accès multiple par répartition en code). LEACH est exécuté en deux phases : la phase "Set-up" et la phase "Steady-state" suivant la figure II.8 [05].

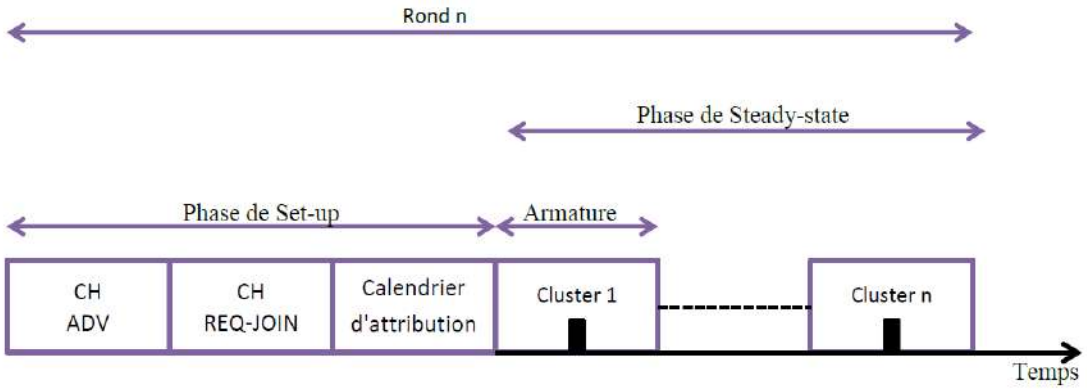


Figure II.8 : Formation de Clusters dans LEACH [05].

3.2.1 Phase de configuration (Set-up)

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 devient Cluster-Head. T(n) est défini comme suit :

$$T(n) = \begin{cases} \dfrac{P}{1-P*\left(r \bmod \frac{1}{P}\right)} & si(n \epsilon G) \\ 0 & sinon \end{cases} \quad [05] \qquad (II.1)$$

Avec P : pourcentage des nœuds désirant devenir Cluster-Head.

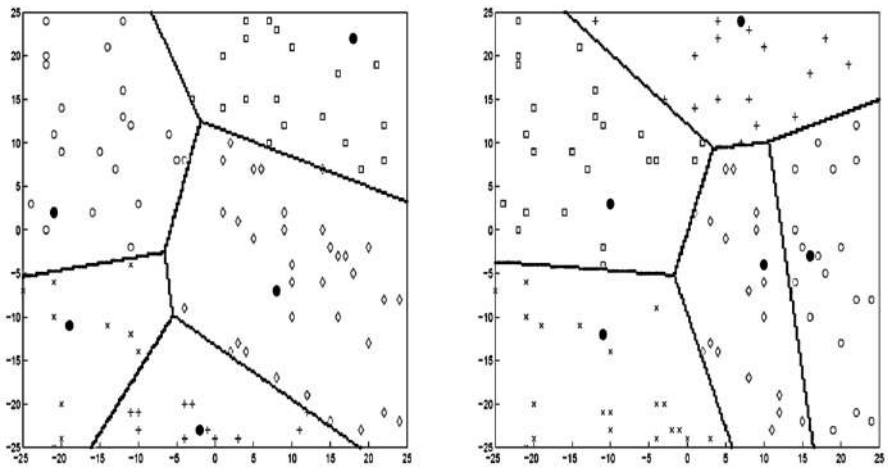
r : numéro du round courant.

G : ensemble de nœuds n'ayants pas été élus Cluster-Head Durant les 1/P dernières périodes précédentes.

3.2.1.1 Annoncées des Cluster-Head

Chaque Cluster-Head émet un message d'avertissement (ADV-CH) à tous ces voisins. Ce dernier est un petit message qui contient l'ID du nœud et un en-tête qui distingue ce message comme une annonce. Ce message doit être diffusé pour atteindre tous les nœuds dans le réseau tout en utilisant le protocole CSMA MAC protocole (Carrier-Sense Multiple Access Media Access Control). [13]

À travers cette Figure II.9, nous expliquons que le protocole LEACH utilise la rotation randomisée à des chefs de groupe pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds capteurs dans le réseau.



Clusters au temps t Clusters au temps t+d

Figure II.9 : Formation dynamique des Clusters [05].

3.2.1.2 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 désigné. Chaque membre informe son chef de sa décision tout en envoyant une demande d'appartenance (JOIN -REQ) de même en utilisant le protocole CSMA MAC. Ce message détermine l'identifiant ID du nœud, l'ID du CH et l'entête (header) [13].

3.2.1.3 Création de la table TDMA

Après la réception de tous les messages des nœuds voulons être inclus dans le Cluster, le nœud (CH) est considéré comme un centre de contrôle local pour coordonner les transmissions de données dans un Cluster, Il va créer un programme TDMA (Time division multiplexe d'accès) et assigne à chaque nœud un slot de temps quand il peut transmettre. Ce programme est émis à tous les nœuds dans le Cluster [26].

LEACH utilise la technique de multiplexage temporal TDMA comme méthode d'accès au medium. Chaque nœud utilise la totalité de la bande passante allouée par le système de transmission durant son slot de temps. Cette technique permet de minimiser les collisions en allouant à chaque nœud un temps alloué pour transmettre ses données vers son CH. Ceci garantit l'absence de collision durant la transmission des messages de données et permet aussi l'arrêt du nœud à tout moment, sauf s'il y a une décision de transmettre les données par le nœud, donc réduction de l'énergie consommée. En cas où chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA, 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 [26].

3.2.2 Phase de transmission (Steady State Phase)

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 (Sink).Cette

communication, entre un Cluster-Head et le collecteur se fait d'une manière directe .Après la phase de communication qui dure un certain temps, recommence alors la phase de construction.

Enfin les CHs ont pour mission d'assurer les fonctions les plus coûteuses en énergie, à savoir la communication avec le nœud puits qui est supposé éloigné, ainsi que tous les traitements de données (agrégation, fusion et transmission de données) afin de réduire la quantité des données transmises. Par sa fonction, le Cluster-Head consomme plus l'énergie par rapport aux autres nœuds du réseau. Le Cluster-Head coordonne le fonctionnement des nœuds membres de son Cluster et agrège leurs données, de ce fait, il dissipe plus l'énergie créant un déséquilibre de la distribution de l'énergie sur le réseau. Pour pallier ce problème, une rotation de Cluster-Head est organisée au sein du Cluster ou bien au sein du réseau entier. La rotation est effectuée périodiquement, alors ce dispositif permet d'économiser l'énergie puisque les transmissions sont uniquement assurées par les CHs plutôt que par tous les nœuds du réseau. Par conséquent, LEACH réalise une réduction significative de la dissipation d'énergie [26].

4. Le Modèle LEACH Hétérogène dans WSN

Dans cette section, nous décrivons notre modèle de capteur sans fil avec des nœuds hétérogènes dans leur quantité initiale d'énergie. Nous présentons notamment dans ce cadre, le modèle énergétique. Supposons que le pourcentage des nœuds capteurs est équipé de plus de ressources énergétiques que le reste des nœuds. Soit (m) la fraction du nombre total des nœuds (n), qui sont équipés (α) fois plus d'énergie que les autres, nous appelons ces nœuds puissants : les nœuds avancés, et le reste comme nœuds normaux à supposer que tous les nœuds sont répartis uniformément sur le champ du capteur.

4.1 Hiérarchie des clusters

Considérons un réseau de capteurs groupé hiérarchiquement. LEACH (Hiérarchie de Clustering adaptatif à faible énergie). Dans LEACH [03] les clusters sont rétablis à chaque «round». Les nouveaux chefs de groupe sont élus à chaque round et par conséquent, la charge est bien répartie et équilibrée entre les nœuds du réseau. De plus, chaque nœud transmet au cluster la plus proche de façon à partager le coût de la communication avec Sink (qui est des dizaines de fois supérieur au coût de traitement et de fonctionnement.) Seul le chef de groupe doit se

présenter à Sink et peut dépenser une grande quantité d'énergie, mais cela se produit périodiquement pour chaque nœud. Dans LEACH, il y a un pourcentage de P_{opt} optimal de nœuds qui doivent devenir des Cluster Head à chaque round en supposant une distribution uniforme des nœuds dans l'espace [05], [13], [14], [15].

En moyenne $n \times P_{opt}$ nœuds doivent devenir des clusters Head par round. Les nœuds élus, ne peut devenir des clusters Head au même round.

4.2 Optimisation du Clustering

Des travaux antérieurs ont étudié soit par simulation [05], [13] ou analytiquement [14], [15] la probabilité optimale qu'un nœud soit élu en tant que chef de groupe en fonction de la densité spatiale lorsque les nœuds sont répartis uniformément sur le champ du capteur. Ce regroupement est optimal dans le sens où la consommation d'énergie est bien répartie sur tous les capteurs et la consommation totale d'énergie minimale. Un tel regroupement optimal dépend fortement du modèle énergétique que nous utilisons. On utilise modèle et analyse d'énergie similaires à ceux proposés dans [13]. Selon le modèle de dissipation d'énergie radioélectrique illustré sur Figure II.10, afin d'obtenir un rapport signal / bruit acceptable Ratio (SNR) dans la transmission d'un message L-bit sur une distance d. L'énergie dépensée par la radio est donnée par :

$$E_{Tx}(L.d) = \begin{cases} L.E_{elec} + L.\varepsilon_{fs}.d^2 & \text{if } d \leq d_0 \\ L.E_{elec} + L.\varepsilon_{mp}.d^4 & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad \text{(II.2)}$$

Pour recevoir un Message L-bit que la radio dépense $E_{RX} = L \cdot E_{elec}$ (II.3)

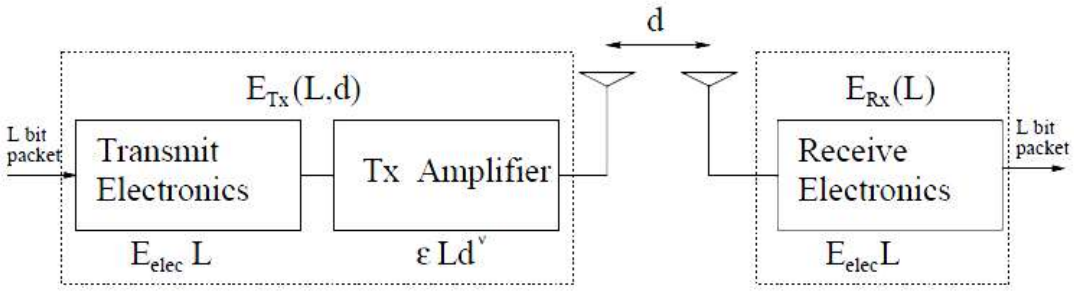


Figure II.10 : Modèle de dissipation d'énergie radio [13].

E_{elec} est l'énergie dissipée pour un bit pour exécuter le circuit émetteur ou récepteur, ϵ_{fs} et ϵ_{mp} dépendent du modèle d'amplificateur de l'émetteur que nous utilisons, d est la distance entre l'expéditeur et le destinataire. En assimilant les deux expressions à $d = d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}}$

Supposons une aire A = M × M mètres carrés sur laquelle (n) nœuds sont uniformément répartis. Pour simplifier, nous supposons que Sink est situé au centre du champ, et que la distance de n'importe quel nœud à Sink est $\leq d_0$.

Ainsi, l'énergie dissipée par Cluster Head pendant un round est donné par la formule suivante :

$$E_{CH} = \left(\frac{n}{k} - 1\right) L \,.\, E_{elec} + \frac{n}{k} L.\, E_{DA} + L.\, E_{elec} + L.\, \varepsilon_{fs}\, d^2_{to\ BS} \quad [07] \qquad (II.4)$$

k est le nombre de clusters, E_{DA} L'énergie du traitement (l'énergie d'agrégation de données) coût d'un bit par rapport à Sink, et $d_{to\ BS}$ est la distance moyenne entre le Cluster Head et le Sink. L'énergie utilisée dans un nœud principal non cluster est égale à :

$$E_{nonCH} = L \,.\, E_{elec} + L.\, \varepsilon_{fs}.\, d^2_{to\ CH} \qquad [07] \qquad (II.5)$$

d_{toCH} est la distance moyenne entre un membre cluster et son chef de groupe. En supposant que les nœuds sont uniformément répartis, on peut montrer que :

$$d^2_{to\ CH} = \int_{x=0}^{x=x_{max}} \int_{y=0}^{y=y_{max}} (x^2 + y^2)\rho(x,y)dxdy = \frac{M^2}{2\pi K} \qquad [07] \qquad (II.6)$$

Où ρ (x, y) est la distribution des nœuds. L'énergie dissipée dans un cluster par round est donnée par :

$$E_{cluster} \approx E_{CH} + \frac{n}{k} E_{nonCH} \qquad [07] \qquad (II.7)$$

L'énergie totale dissipée dans le réseau est égale à :

$$E_{tot} = L\left(2nE_{elec} + nE_{DA} + .\, \varepsilon_{fs}\left(kd^2_{to\ BS} + nd^2_{to\ CH}\right)\right) \qquad [07] \qquad (II.8)$$

Pour la distance moyenne d'une Cluster Head à Sink est donnée par :

$$d_{\text{to BS}} = \int_A \sqrt{(x^2 + y^2)} \, \frac{1}{A} dA = 0.765 \, \frac{M}{2} \qquad [07] \qquad (II.9)$$

Si la distance d'un pourcentage significatif de nœuds au le Sink est supérieur à d_0 par rapport à la même analyse on obtient :

$$K_{opt} = \sqrt{\frac{n}{2\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}} \sqrt{\frac{M}{d^2_{\text{to BS}}}} \qquad [07] \qquad (II.10)$$

La probabilité optimale qu'un nœud devienne un Cluster Head, P_{opt} peut être calculée comme suit :

$$P_{opt} = \frac{k_{opt}}{n} \qquad [07] \qquad (II.11)$$

La construction optimale de clusters (ce qui équivaut au réglage de la probabilité optimale pour qu'un nœud devienne une Cluster Head) est très importante. Dans [05], les auteurs ont montré que si les clusters ne sont pas construits de manière optimale, l'énergie totale consommée du réseau de capteurs par round est augmentée de façon exponentielle soit lorsque le nombre de clusters qui sont créés est supérieur ou surtout lorsque le nombre des groupes construits est inférieur au nombre optimal de clusters.

5. Avantages et inconvénients du protocole LEACH

Bien que LEACH économise la consommation d'énergie comparé à la transmission directe, grâce à l'agrégation de données, un nombre d'inconvénients restent plus ou moins apparents. Dans ce qui suit, nous citerons quelques avantages et inconvénients du protocole LEACH.

5.1 Les avantages

Parmi les avantages du protocole LEACH [13] :

- **Algorithme distribué :** l'auto-configuration des clusters se fait indépendamment de la BS.
- **Rotation des rôles de chef de groupe :** les CHs sont choisis de façon aléatoire et périodique parmi les nœuds formant le cluster, ce qui empêche la forte consommation d'énergie pour la transmission des données.

- **Faible énergie pour l'accès au média :** Le mécanisme de groupes permet aux nœuds d'effectuer des communications sur des petites distances avec leurs CHs afin d'optimiser l'utilisation du média de communication en la faisant gérer localement par un CH pour minimiser les interférences et les collisions.
- **Agrégations des données :** Les CHs compressent les données provenant de leurs membres, et envoient un paquet d'agrégation au nœud Sink afin de réduire la quantité d'informations qui doit lui être transmise. Cela permet de réduire la complexité des algorithmes de routage, de simplifier la gestion du réseau, d'optimiser les dépenses d'énergie et enfin de rendre le réseau plus évolutif.

5.2 Les Inconvénients

Le protocole LEACH présente les inconvénients suivants [13] :

- **Absence des CHs :** On pourrait ne pas avoir des CHs durant un round si les nombres aléatoires générés par tous les nœuds du réseau sont supérieurs à la probabilité Pi(t).
- **La distance entre le CH et les autres nœuds :** Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport aux plus proches.
- **Diminution de l'énergie des nœuds :** cette diminution est due à l'utilisation d'une communication à un seul saut au lieu d'une communication multi-sauts.
- **La rotation des CHs :** c'est une méthode qui n'est pas efficace pour de grandes structures de réseaux à cause de la surcharge d'annonces engendrée par le changement des CHs, et qui réduit le gain d'énergie initial.
- **La sécurisation :** le protocole LEACH n'est pas sécurisé. Aucun mécanisme de sécurité n'est intégré dans ce protocole. Ainsi, il est très vulnérable même aux simples attaques. Donc, un attaquant peut facilement monopoliser le réseau et induit à son disfonctionnement.

6. Le Protocole « SEP » (Stable Election Protocol)

Dans cette section, nous décrivons SEP. On utilise les caractéristiques de paramètres d'hétérogénéité à savoir la fraction de nœuds avancés (m) et le facteur d'énergie supplémentaire entre nœuds avancés et normaux (α), afin de prolonger la stabilité de la région et le point de la stabilité (la mort du premier nœud dans le réseau). Le SEP tente de maintenir la contrainte d'une

consommation d'énergie bien équilibrée, les nœuds avancés doivent devenir des Clusters Head plus souvent que les nœuds normaux, ce qui équivaut à un contrainte d'équité sur la consommation d'énergie. Dans le nouveau cadre hétérogène (avec des nœuds avancés et normaux) aucun effet sur la densité spatiale du réseau donc probabilité optimale d'élection des CHs (P_{opt}) de l'équation (II.11) ne change pas. D'autre part, l'énergie totale du système change. Supposons que (Eo) est l'énergie initiale de chaque capteur normal, l'énergie de chaque nœud avancé est Eo • (1 + α), l'énergie totale (initiale) du nouveau cadre hétérogène est égale à :

$$n \cdot (1 - m) \cdot E_o + n \cdot m \cdot E_o \cdot (1 + \alpha) = n \cdot E_o \cdot (1 + \alpha \cdot m) \quad [07] \quad (II.12)$$

Ainsi, l'énergie totale du système est augmentée d'un facteur (1 + α · m). La première amélioration du LEACH existant consiste à augmenter la durée de vie du réseau de capteurs proportionnellement à l'incrément d'énergie. Afin d'optimiser la région stable du système, le nouveau round doit devenir égal $\frac{1}{Popt}(1 + \alpha \cdot m)$ parce que le système est (α · m) fois plus d'énergie et pratiquement (α · m) plus de nœuds (avec la même énergie que les nœuds normaux.)

Nous pouvons maintenant augmenter le point de stabilité du réseau de capteurs de (1 + α · m) fois, si chaque nœud normal devient un Cluster Head $\frac{1}{Popt}(1 + \alpha \cdot m)$ une fois tous les rounds par round (i) ; chacun nœud avancé devient un Cluster Head exactement (1 + α) fois tous les $\frac{1}{Popt}$ (1 + α · m) par rounds (ii); et la moyenne le nombre du Cluster Head par round est égal ($n \times P_{opt}$) (iii) (puisque la densité spatiale ne change pas.).La Contrainte (ii) est très stricte si la fin de chaque round, le nombre de fois d'un capteur avancé est devenu une Cluster Head n'est pas égal à (1 + α), alors l'énergie n'est pas bien répartie, la moyenne du nombre du Cluster Head par round sera alors inférieure à ($n \times P_{opt}$).

Ce problème peut être réduit à un problème optimal seuil T (s) (cf. équation 1), avec la contrainte que chaque nœud doit devenir un Cluster Head autant de fois que son énergie initiale divisée par l'énergie d'un nœud normal. Le nombre du Cluster Head par round par époque sera inférieur à ($n \times P_{opt}$).

6.1. Le problème du maintien d'une énergie bien répartie - Contraintes de consommation pendant la période de stabilité

Si le même seuil est défini pour les niveaux normaux et avancés à la différence que chaque nœud normal ∈ G devient une Cluster Head une fois tous les $\frac{1}{\text{Popt}}(1 + \alpha \cdot m)$ rounds par époque, chaque nœud avancé ∈ G devient une Cluster Head $(1 + \alpha)$ toutes les $\frac{1}{\text{Popt}}(1 + \alpha \cdot m)$ rounds par époque. Il n'y a pas alors à garantir le nombre des Cluster Head par round, par époque et sera $n \times P_{opt}$. La raison en est qu'il existe un nombre important de cas où ce nombre ne peut pas être maintenu par round par époque avec probabilité 1. Un pire scénario pourrait être le suivant : Supposons que chaque nœud normal devienne un Cluster Head une fois dans le premier $\frac{1}{\text{Popt}}(1 + \alpha \cdot m)$ round de l'époque pour maintenir les contraintes de consommation l'énergie bien réparties. Tous les nœuds restants (nœuds avancés) doivent devenir des chefs de groupes avec probabilité 1 pour le prochain $\frac{1}{\text{Popt}}(1 + \alpha \cdot m)$ rounds de l'époque. Cependant le seuil T (s) augmente avec le nombre de rounds dans chaque époque et devient égal à 1 seulement au dernier round (lorsque tous les nœuds restants deviennent des Cluster Head avec probabilité 1.) Donc, la contrainte ci-dessus des Cluster Head

$(n \times P_{opt})$ à chaque round est violée. Dans la section suivante, nous introduisons SEP où l'énergie supplémentaire des nœuds avancés doit être dépensée dans des sous-périodes de l'époque d'origine.

6.2. Consommation d'énergie garantie et bien répartie pendant la période de stabilité

Dans cette section, nous proposons une solution appelons SEP (Stable Election Protocol) basé sur l'énergie initiale des nœuds. Cette solution est plus applicable par rapport à toute solution qui suppose que chaque nœud connaît l'énergie totale du réseau, puis adapte sa probabilité d'élection à devenir une Cluster Head en fonction de son énergie restante [16].

Notre approche consiste à attribuer un poids à la probabilité optimale P_{opt}. Ce dernier doit être égal à l'énergie initiale de chaque nœud divisé par l'énergie initiale du nœud normal. P_{nrm} est

définie comme étant la probabilité d'élection pondérée pour la normale nœuds et P_{adv} la probabilité d'élection pondérée pour les nœuds avancés.

Il existe pratiquement $n \times E_0 (1 + \alpha \cdot m)$ nœuds d'énergie égale à l'énergie initiale d'un nœud normal afin de maintenir la consommation d'énergie minimale à chaque round d'une époque. Le nombre moyen du Cluster Head par round doit être constant et égal à $(n \times P_{opt})$. Dans le scénario hétérogène le nombre moyen du Cluster Head par round est égal à :
$n \cdot (1 + \alpha \cdot m) \times P_{nrm}$ (car chaque nœud virtuel a l'énergie initiale d'un nœud normal.) Les probabilités pondérées pour les nœuds normaux et avancés sont respectivement :

$$P_{nrm} = \frac{p_{opt}}{1+\alpha+m} \qquad [07] \qquad (II.13)$$

$$P_{adv} = \frac{p_{opt}}{1+\alpha+m} \times (1 + \alpha) \qquad [07] \qquad (II.14)$$

Dans l'équation (II.12), nous remplaçons P_{opt} par les probabilités pondérées pour obtenir le seuil utilisé pour élire le Cluster Head à chaque round. Nous définissons comme $T(S_{nrm})$ le seuil pour nœuds normaux, et $T(S_{adv})$ le seuil pour les nœuds avancés. Ainsi, pour les nœuds normaux, nous avons [07] :

$$\left(T(S_{nrm})\right) = \begin{cases} \frac{P_{nrm}}{1-P_{nrm}.\left(r.\mathrm{mod}\frac{1}{P_{nrm}}\right)} & \text{if } S_{nrm} \in G' \\ 0 & \text{par ailleurs} \end{cases} \qquad (II.15)$$

r est le round en cours, G' est l'ensemble des nœuds normaux qui ne sont pas devenus des chefs de groupe au cours des derniers $\frac{1}{p_{nrm}}$ rounds de l'époque, et $T(S_{nrm})$ est le seuil appliqué à une population $[n \cdot (1 - m)]$ de nœuds (normaux). Cela garantit que chaque nœud normal deviendra un Cluster Head exactement une fois tous les $\frac{1}{Popt}(1 + \alpha \cdot m)$ rounds par époque, et que le moyen nombre de cluster Head qui sont des nœuds normaux par round est égal à : $n \cdot (1 - m) \times P_{nrm}$.

De même, pour les nœuds avancés, nous avons [07] :

$$\left(T(S_{adv})\right) = \begin{cases} \frac{P_{adv}}{1-P_{adv}.\left(r.\mathrm{mod}\frac{1}{P_{adv}}\right)} & \text{if } S_{adv} \in G'' \\ 0 & \text{par ailleurs} \end{cases} \quad [07] \quad (II.16)$$

G'' est l'ensemble des nœuds avancés qui ne sont pas devenus cluster Head dans le dernier $\frac{1}{Padv}$ Rounds de l'époque, et $T(S_{adv})$ est le seuil appliqué à une population de $(n \cdot m)$ nœuds (avancés). Cela garantit que chaque nœud avancé deviendra une tête de cluster exactement une fois tous les $\frac{1}{P_{opt}}\left(\frac{1+\alpha.m}{1+\alpha}\right)$ rounds .Définissons cette période comme une sous-époque .il est clair que chaque époque «hétérogène» à $(1+\alpha)$ sous-époques, chaque nœud avancé devient alors un Cluster Head exactement $(1+\alpha)$ fois dans une époque hétérogène. Le moyen nombre des chefs de groupe (nœuds avancés) par round par époque hétérogène (et sous-époque) est égale à $(n \cdot m \times P_{adv})$.

Ainsi, le nombre total moyen du Cluster Head par round par époque hétérogène est égal à :

$$n.(1-m) \times P_{nrm} + n.m \times P_{adv} = n \times p_{opt} \quad [07] \quad (II.17)$$

Qui est le nombre souhaité des Clusters Head par round par époque. Nous discuterons par la ensuite de la mise en œuvre de notre protocole SEP.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté une classification des protocoles de routage en se penchant sur les caractéristiques des différentes classes, il s'avère que les protocoles répondants aux critères établis en début de chapitre sont parmi les protocoles hiérarchiques basés « Clustering ». Le choix d'étude se porte d'abord sur le protocole « LEACH », considéré comme le premier protocole de routage basé sur un Cluster pour les RCSF, et qui partitionne les nœuds en Clusters. Il est également considéré comme la base des autres protocoles de routage de Cluster.
Comme extension au « LEACH », notre étude s'intéresse au protocole « SEP » : basé sur des probabilités électorales pondérées de chaque nœud pour devenir un Cluster Head en fonction de l'énergie restante dans chaque nœud. Cela nous amène à entamer une étude comparative et une

étude de dualité « LEACH » - « SEP » en partie simulation (Chapitre III), où nous allons essayer de démontrer que le protocole SEP prolonge toujours la période de stabilité (et que les paquets sont supérieurs) par rapport à celui obtenu en utilisant les protocoles de Cluster actuels (LEACH).

Chapitre III :
Evaluation des deux Protocol LEACH et SEP

1. Introduction

Dans ce présent chapitre nous allons comparer par simulation les deux protocoles LEACH et SEP .Nous commençons par justifier le choix du simulateur qui sera utilisé et présentons les résultats de la simulation LEACH / SEP sur MATLAB, il s'ensuit les relevés des résultats et des graphes avec interprétation ainsi qu'une étude comparative inter protocoles. En dernier, le tout sera clôturé par une conclusion.

2. Généralités sur la simulation

De nos jours, la simulation connaît un essor considérable grâce à l'intérêt que présentent les modèles informatiques des systèmes simulés.

2.1 Définition

La simulation consiste à la modélisation informatique d'un système quelconque en offrant une représentation de toutes les entités de ce système. Leurs comportements propres, ainsi que leurs interactions. Elle met à la disposition de l'utilisateur un environnement d'expérimentation dont on peut faire varier les paramètres.

Grâce aux progrès réalisés dans le domaine du développement et des techniques de programmation, nous disposons aujourd'hui d'un langage de programmation très puissant. Il devient ainsi possible de réaliser un simulateur dans un environnement de programmation existant.

2.2 Le langage MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) est un langage de programmation simulé par un environnement de développement du même nom, il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The Math Works, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C qui est un langage très puissant en calcul. Une interface en ligne de commande est un des éléments du bureau MATLAB qui permet d'exécuter des commandes simples. Des séquences de commandes peuvent être sauvegardées dans un fichier texte typiquement avec l'éditeur MATLAB, sous la forme d'un « script » ou encapsulé dans une fonction [31].

3. La préparation de la simulation

Nous étudions l'impact de l'hétérogénéité des nœuds en termes d'énergie, dans les réseaux de capteurs sans fil qui sont groupés hiérarchiquement. Dans ces réseaux, certains des nœuds peuvent devenir chefs de groupe, agréger les données des membres du cluster et les transmettre à Sink. Nous supposons qu'un pourcentage des nœuds capteurs est équipé d'une énergie d'supplémentaire ressource. C'est une source d'hétérogénéité qui peut résulter à partir du réglage initial ou à mesure que le fonctionnement du réseau évolue. Nous supposons également que les capteurs sont aléatoires (uniformément) distribués et ne sont pas mobiles, les coordonnées de Sink et les dimensions du champ du capteur sont connues. Nous montrons que le comportement de tels réseaux de capteurs devient très instable une fois que le premier nœud meurt, en particulier en présence de nœuds hétérogènes. Les protocoles de Clustering classiques supposent que tous les nœuds sont équipés de la même quantité d'énergie. La conséquence est qu'ils ne peuvent pas profiter pleinement de la présence hétérogénéité des nœuds. Nous proposons que le protocole SEP est un protocole hétérogène qui prolonge l'intervalle temporel avant la mort du premier nœud (période de stabilité). Ce qui est crucial pour de nombreuses applications où le round du réseau de capteurs doit être fiable. Le protocole SEP est basé sur les probabilités électorales pondérées de chaque nœud pour devenir chef de cluster en fonction de l'énergie restante. Nous démontrons par simulation que le protocole SEP prolonge toujours la période de stabilité par rapport au protocole LEACH.

4. Mesure de Performance

Nous définissons ici les mesures que nous utilisons dans ce mémoire pour évaluer les performances des protocoles de Clustering.

• **Période de stabilité :** C'est l'intervalle de temps entre le début de fonctionnement du réseau jusqu'à la mort du premier nœud capteur.

• **Durée de vie du réseau :** C'est l'intervalle de temps entre le début de fonctionnement (du réseau de capteurs) jusqu'à la mort du dernier nœud vivant.

• **Nombre de nœuds vivants (total, avancé et normal) par round :** cette mesure instantanée reflète le total nombre de nœuds et chaque type n'ayant pas dépensé son énergie.

•**Nombre des paquets :** nous mesurons le nombre de paquets envoyés sur le réseau par les chefs de groupe á Sink à chaque round. D'un autre côté, il y a un compromis entre la fiabilité et la durée de vie du système jusqu'à la mort du dernier nœud. Il nous reste encore des observations sur le champ du capteur, même si ce dernier peut ne pas être fiable. Le manque de fiabilité des commentaires provient du fait qu'il n'y a aucune garantie qui ait au moins un Cluster Head par round lors des derniers rounds de l'opération.

Dans notre modèle, l'absence Cluster Head dans une zone empêche tout rapport sur cette zone à Sink. Il n'est y pas de paquets envoyés vers la station de base parce qu'il n'y a aucune transmission entre Cluster Head et le Sink.

5. Le protocole Clustering LEACH hétérogène

La version originale de LEACH ne prend pas en compte l'hétérogénéité des nœuds en termes d'énergie initiale, par conséquent la consommation des ressources énergétiques du réseau de capteurs n'est pas optimisée en présence d'une telle hétérogénéité. La raison en est que LEACH ne dépend que de la densité spatiale du réseau de capteurs. On utilise LEACH en présence d'hétérogénéité en supposant que les nœuds normaux et avancés sont répartis uniformément dans l'espace.

Dans le cas homogène, chaque nœud est équipé de la même énergie que celle d'un nœud normal, il faut s'attendre à ce que le premier nœud meurt en moyenne dans un tour qui est proche de la ronde. En outre, nous attendons à ce que le premier nœud mort soit un nœud normal. Par ailleurs on prévoit aussi que lors des rounds suivants, la probabilité d'une mort d'un nœud normal soit supérieure à celle d'un nœud avancé. Pendant les derniers rounds, seuls les nœuds avancés seraient vivants [10].

Par la suite, nous démontrons comment le protocole Clustering LEACH hétérogène n'est pas parvenu à maintenir la stabilité du système, à cause de l'hétérogénéité des nœuds. Cela entraine la motivation d'un autre protocole qui donnera à son tour de bons résultats que le SEP et dont l'impact est supérieur au protocole LEACH.

5.1 Instabilité des protocoles hétérogènes

Dans cette section, nous discutons de l'instabilité des protocoles hétérogènes, tels que LEACH une fois que certains nœuds meurent. Dans ce cas, le processus de construction optimale des clusters échoue puisque la densité spatiale s'écarte de l'uniforme supposé (distribution des nœuds sur le champ du capteur).

Supposons un capteur hétérogène dans un champ de 100 m × 100 m, comme le montre dans la Figure III.1. Pour ce paramètre, à partir de l'équation (2) la probabilité optimale en fonction de nombre de nœuds est égale $k_{opt} = 0.1$. Notons avec ° un nœud normal, avec **+** un nœud avancé avec •, un nœud mort avec ✱, un cluster Head avec ‘’ **Carré**’’ Sink.

A un certain moment, le premier nœud meurt .Après ce point, le nombre des capteurs diminue lorsque les nœuds meurent au hasard, voir Figure III.2. La réduction du nombre des nœuds introduit alors une instabilité dans le réseau de capteurs et le processus d'élection des chefs devient peu fiable. Ceci est dû au fait que la valeur de P_{opt} n'est pas optimale quant le nombre des capteurs dans le réseau est constant et égal au nombre initiale (n) des capteurs. Lorsque le nombre des nœuds commence à diminuer, le nombre de chefs de groupe élus par round devient instable (plus faible que prévu) et, par conséquent, rien ne garantit un nombre constant de Cluster Head (égal à $n \times P_{opt}$) qui sera élu par round par époque car il y a moins de nœuds vivants. Donc l'échantillonnage (détection) du champ est inférieur aux nœuds prévus.

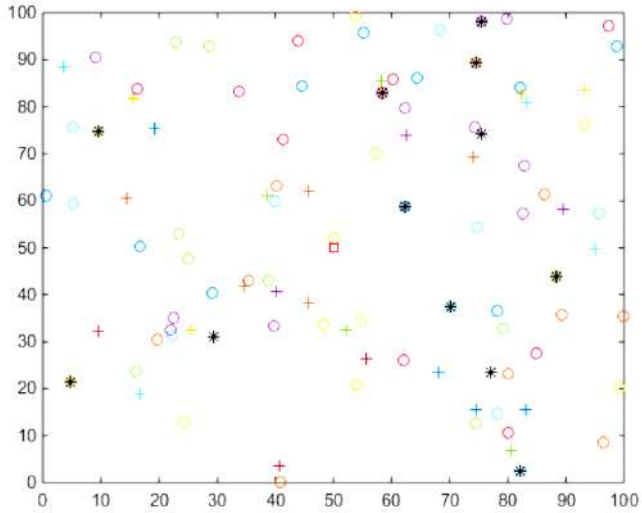


Figure III.1 : La distribution des nœuds aléatoires sur un champ 100 m × 100 m.

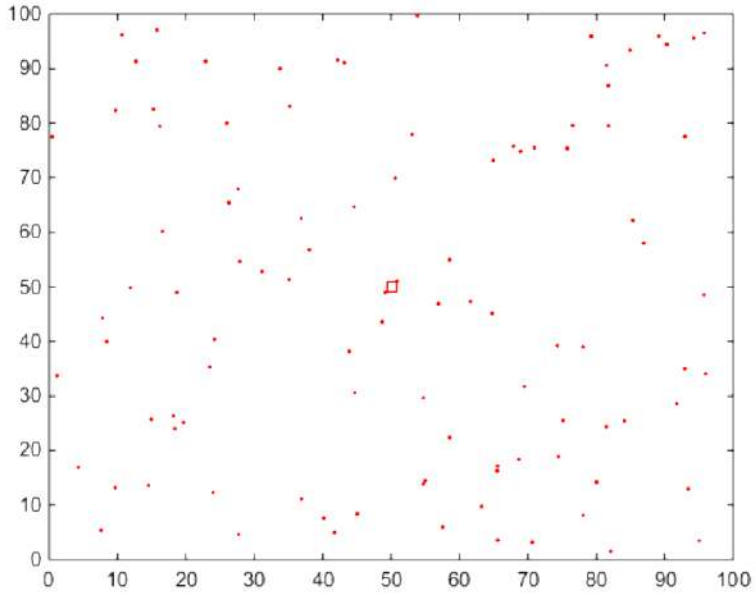


Figure III.2 : La représentation du champ de captage après la mort totale des nœuds.

La seule garantie est qu'il y aura au moins un Cluster Head par époque (cf. équation (II.1)). Dans un seul round par époque, tous les nœuds vivants rendront leur rapport au Sink (Cela suppose que chaque nœud vivant est dans une portée de communication d'un cluster Head).L'impact (qualité) de ces rapports dépend fortement de l'application. Pour certaines d'entre elles, même ce minimum de signalement est une rétroaction précieuse, pour d'autres non. Clairement un rapport minimal se traduit par une sous-utilisation importante des ressources et de la bande passante d'application.

Le round du point de stabilité (le premier nœud meurt) du LEACH dans le cas homogène est court, autrement dit le premier nœud meurt dans un temps réduit. Après la mort du premier nœud, tous les nœuds restants pourraient mourir en moyenne dans un nombre petit de rounds. Ceci est dû à l'instabilité de la consommation d'énergie. Si l'espace de la densité du réseau de capteurs est grande, la probabilité d'un grand nombre de nœuds élus en tant que chefs de cluster est importante tant que la population des nœuds n'a pas régressé d'une manière significative. Dans ce que nous avons vu un le processus de regroupement (détection) reste relativement fiable. On peut remarquer la même chose même si la densité spatiale est faible .Le P_{opt} reste grand cependant. D'un autre côté, LEACH dans le cas des nœuds hétérogènes présentent une grande région instable. La raison en est que, bien que tous les nœuds avancés soient alimentés de presque

la même énergie, l'élection des chefs de groupe demeure instable. Par conséquent, dans la plupart du temps, les Clusters Head n'ont pas été élus. Ces nœuds avancés sont inactifs.
Dans la section suivante, nous présentons ce nouveau protocole SEP hétérogène dans le but d'augmenter le point de la stabilité et de diminuer la région instable afin d'améliorer la qualité de la rétroaction des réseaux de capteurs sans fil [10].

6. Le déploiement dans le protocole SEP

Comme mentionné précédemment, l'hétérogénéité de l'énergie des nœuds peut résulter du fonctionnement normal du réseau. Par exemple, les nœuds pourraient avec le temps, dépenser différentes quantités d'énergie dues aux caractéristiques de communication radio ou les événements aléatoires tels que des défaillances de liaison à court terme ou des caractéristiques morphologiques du terrain (par exemple, un terrain inégal). Pour faire face à ces hétérogénéités, notre protocole SEP pourrait être déclenché chaque fois qu'un certain seuil d'énergie est dépassé par un ou plusieurs nœuds. Les chefs ne faisant pas partie du cluster pourraient périodiquement joindre leurs énergies aux messages qu'ils envoient pendant la prise de contact processus avec leurs chefs de groupe et pourraient envoyer ces informations à Sink [09].

Le Sink peut vérifier l'hétérogénéité sur le terrain en examinant si un ou un certain nombre de nœuds atteignent ce seuil d'énergie. Si c'est le cas, le Sink pourrait diffuser aux Cluster Head dans ce round les valeurs de P_{nrm} et P_{adv} à leur tour. Les Cluster Head diffusent ces valeurs aux nœuds de leurs groupes en fonction de l'énergie au cours du processus de négociation. Si certains des nœuds déjà utilisés n'ont pas été programmés avec cette capacité, un protocole de transport fiable, tel que celui proposé dans [09], pourrait être utilisé pour programmer de tels capteurs. L'évaluation des frais généraux d'un tel déploiement SEP est un sujet de notre travail en cours.

6.1. Exemple numérique

Supposons que (m =0,3) c'est-à-dire 30% des nœuds sont des nœuds avancés (m =0,3) alimentés d'énergie plus que les autres nœuds normaux .Dans le premier cas nous prenons ($\alpha = 1$) c'est-à-dire l'énergie des nœuds avancés est double de celle des nœuds normaux. On considère la population d'un réseau de capteurs dans un champ de 100m × 100m de 100 nœuds. P_{opt} Ce

paramètre est approximativement égal à $P_{opt} = 0,1$, C'est-à-dire que 10 nœuds doivent devenir des Cluster Head par round.

Si nous considérons un scénario homogène où chaque nœud a une énergie initiale égale à l'énergie d'un nœud normal, alors l'époque serait égale a $\frac{1}{\text{Popt}} = 10$ rounds. Dans notre cas hétérogène, l'époque hétérogène étendue est égale à $\frac{1+\alpha\cdot m}{\text{Popt}} = \frac{1}{\text{Pnrm}} = 13$ rounds, et chaque sous époque est égale à $\frac{1}{\text{Popt}}\left(\frac{1+\alpha\cdot m}{1+\alpha}\right) = 6.5$ rounds.

En moyenne, $n \cdot (1 - m) \times P_{nrm} = 5.384$. En simplifiant on a 5 nœuds normaux qui deviennent Cluster Head par round, et chacun d'eux sera un Cluster Head exactement tous les 13 tours (une époque hétérogène). De plus, $n \cdot m \times P_{adv} = 4.614$ par simplification cela donne 5 nœuds avancés devenant cluster Head par round. Le nombre total de capteurs qui deviennent des Clusters Head (à la fois normaux et avancées) est égal à 10, soit le nombre souhaité. Chaque capteur avancé devient un Cluster Head exactement une fois dans chaque sous-époque et devient également un Cluster Head $(1 + \alpha)$ fois par époque hétérogène, c'est-à-dire que chaque nœud avancé devient un Cluster Head 6.5 fois dans une époque hétérogène.

Dans le deuxième cas nous prenons ($\alpha = 2$) c'est-à-dire l'énergie des nœuds avancés est triple de celle des nœuds normaux. Les autres paramètres ne change pas comme (P_{opt} et m) en même champ, l'époque de scénario homogène serait égale a $\frac{1}{\text{Popt}} = 10$ round. L'époque hétérogène étendue est égal à $\frac{1+\alpha\cdot m}{\text{Popt}} = \frac{1}{\text{Pnrm}} = 16$ rounds, et chaque sous époque est égal à $\frac{1}{\text{Popt}}\left(\frac{1+\alpha\cdot m}{1+\alpha}\right) =$ 5.3 rounds. En moyenne, $n \cdot (1 - m) \times P_{nrm} = 4.375$. En simplifiant on a 4 nœuds normaux deviennent Cluster Head par round, et chacun d'eux devient un Cluster Head exactement une fois en 16 tours (une hétérogène époque). En plus, $n \cdot m \times P_{adv} = 6.921$ par simplification cela donne 7 avancé les nœuds deviennent Cluster Head par round. Chaque nœud avancé devient un Cluster Head 5.3 fois dans une époque hétérogène.

7. Résultats de la simulation

Nous simulons un réseau de capteurs sans fil en cluster dans un champ de dimension

100m × 100m. Le nombre total de capteurs n = 100. Les nœuds normaux et avancés sont répartis de façon aléatoire sur le terrain. Cela signifie que les coordonnées horizontales et verticales de

chaque capteur sont sélectionnées au hasard entre 0 et la valeur maximale de la dimension. Sink est au centre. L'énergie initiale d'un nœud normal est définie à E0 = 0,5 Joules — Bien que cette valeur soit arbitraire pour le but de cette étude, cela n'affecte pas le comportement de notre Protocole SEP. Les caractéristiques radios utilisées dans nos simulations sont résumées dans le Tableau III.1, le nombre de paquets envoyés sur le réseau par les chefs de groupe vers Sink dans chaque round est défini sur 4000 bits.

Tableau III.1 : Les paramètres utilisés dans nos simulations.

Les Paramètres	Les Valeurs
Le nombre des nœuds	n = 100
La surface du champ	100m * 100m
La position de la station de base	Au centre du champ
Energie initiale des nœuds normaux (en joules)	E_0 = 0.5 J
La probabilité optimale en fonction de nombre de nœuds.	P_{opt}= 0.1
consommation d'énergie du circuit de l'émission (transmission d'un bit)	ETX=50*0.000000001 joules
Consommation d'énergie du circuit de réception (transmission d'un bit)	ERX=50*0.000000001 joules
Facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission inferieure à la distance seuil do	ε_{fs}=10*0.000000000001
Facteur d'amplification du signal pour une distance d'émission supérieure à la distance seuil do	ε_{mp}=0.0013*0.000000000001
La durée de simulation	rmax=5000 round

7.1. Résultats du protocole LEACH

Les résultats de nos simulations LEACH sont illustrés dans la Figure III.3, pour m = 0.3 et α = 1 on observe que LEACH profite de la présence d'hétérogénéité (pour les nœuds avancés), car le premier nœud meurt après un nombre de rounds plus élevé (c'est-à-dire que la période de stabilité est plus longue) par rapport au cas homogène (m = α = 0). La durée de vie du réseau est

augmentée, mais comme nous le montrerons plus tard, cela ne signifie pas que les nœuds transmettent (le débit peut être faible).

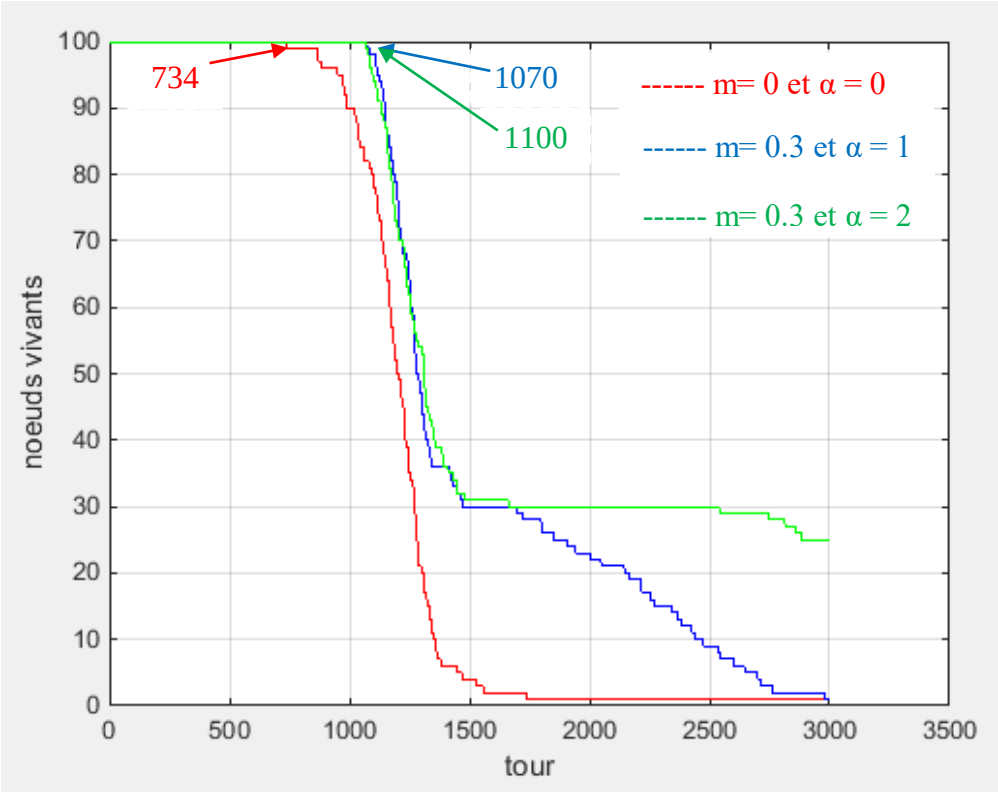


Figure III.3 : Comportement du LEACH en présence d'hétérogénéité

La raison en est qu'après la mort d'un nombre important des nœuds, le processus d'élection des chefs de groupe devient instable, par conséquent, moins de nœuds deviendront chefs de groupe. Pire encore pire, au cours des derniers tours, ne restera que peu de tour pour l'élection d'un chef de groupe.

Répétons la même simulation, en fixant le m (m = 0.3) puis le (α) chaque fois qu'il varie .Dans le premier cas (α = 1) et le deuxième cas (α = 2). Les résultats de cette simulation sont présentés dans la Figure III.3. La longueur de la période de stabilité (jusqu'à la mort du premier nœud) est presque assez stable. L'amélioration de la duré de vie du réseau entre la première et la troisième simulation est estimée à 366 round. Cependant le LEACH tire avantage de l'hétérogénéité qui se manifeste dans le nombre important de nœuds avancés.

Une vue détaillée du comportement du LEACH est illustrée dans la Figure III.3, pour différentes distributions d'hétérogénéité. Dans celle ci le LEACH ne tire pas pleinement parti de

l'hétérogénéité (énergie supplémentaire). Dans les deux scénarios (m = 0.3 et α =1) et (m = 0.3 et α = 2), le premier nœud meurt presque au même round, les autres nœuds normaux meurent très rapidement dans les deux cas. Par conséquent le champ de détection devient clairsemé très vite. En revanche, les nœuds avancés meurent très lentement car ils ne sont pas élus souvent comme Cluster Head après la mort des nœuds normaux, parce que le processus électoral des chefs des groupes est devenu instable par conséquent le nombre de chefs de groupe élus est inférieur au nombre optimal. En outre, lorsqu'un nombre important de nœuds normaux est mort, la moyenne du nombre de chefs de groupe par round est inférieure à 1.Cela signifie que dans la plupart des tours, il n'y a pas de chef de groupe. Dans notre modèle les nœuds restants ne peuvent donc pas rapporter leurs valeurs vers Sink.

7.2. Résultats du protocole SEP

Dans cette sous-section, nous comparons les performances de notre protocole SEP à LEACH dans le même cadre hétérogène .LEACH où l'énergie initiale supplémentaire des nœuds avancés est uniformément répartie sur tous les nœuds du champ du capteur. Dans ce dernier paramètre, le LEACH ne tire pas pleinement parti de l'hétérogénéité (énergie supplémentaire). Dans les deux scénarios précédents du protocole LEACH (m = 0.3et α = 1) et (m = 0.3 et α = 2), le premier nœud meurt presque au même round. Les performances des protocoles SEP et LEACH sont comparées dans le même cadre hétérogène, le même cas de m et α. L'énergie initiale supplémentaire des nœuds avancés est uniformément répartie sur tous les nœuds dans le champ du capteur, nous observons que le SEP profite pleinement de l'hétérogénéité (énergie extra des nœuds avancés) : la période de stabilité est augmentée significativement (de 21%) par rapport à celle du LEACH dans le cas (m = 0.3 et α = 2). Les résultats de simulation SEP sont présentés dans la Figure III.4.

La région instable du SEP est plus courte que celle du LEACH parce que dans le SEP les nœuds avancés suivent le processus de mort des nœuds normaux. Nos observations sur la performance du SEP valent également pour des réseaux à plus petite échelle, où la distance entre un grand pourcentage de capteurs et la station de base est moins de d_0.

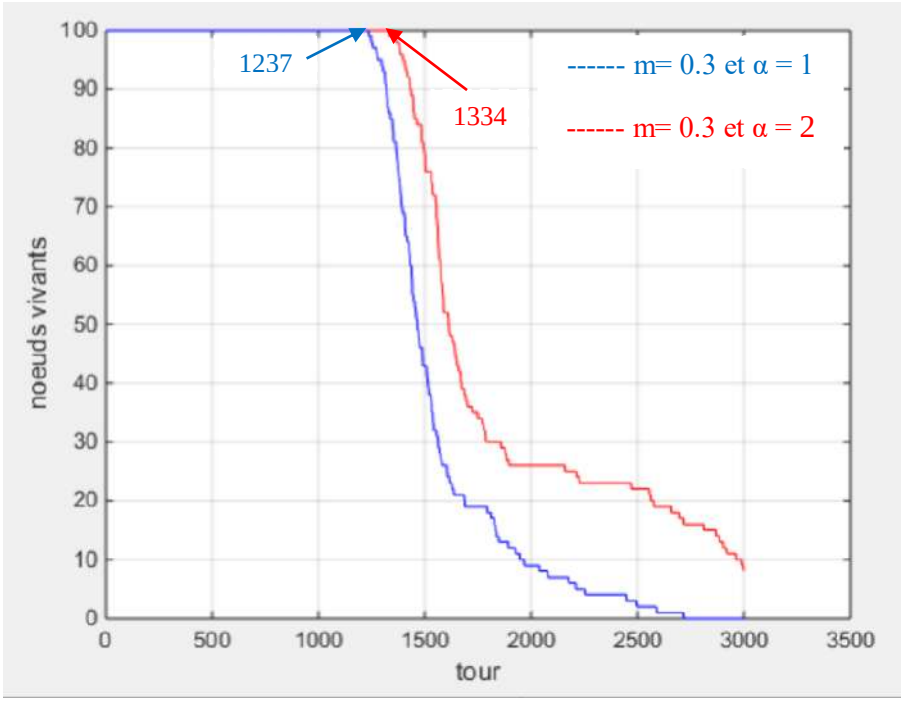


Figure III.4 : Comportement SEP en présence d'hétérogénéité

Tableau III.2 : Le point de stabilité entre LEACH normal [m=0 et α=0] et SEP [m=0.3 et α=2] et LEACH avancé [m=0.3 et α=2] en fonction de (m) et (α).

	LEACH (cas homogène)	LEACH (cas hétérogène)	SEP
Le point de stabilité	734	1100	1334

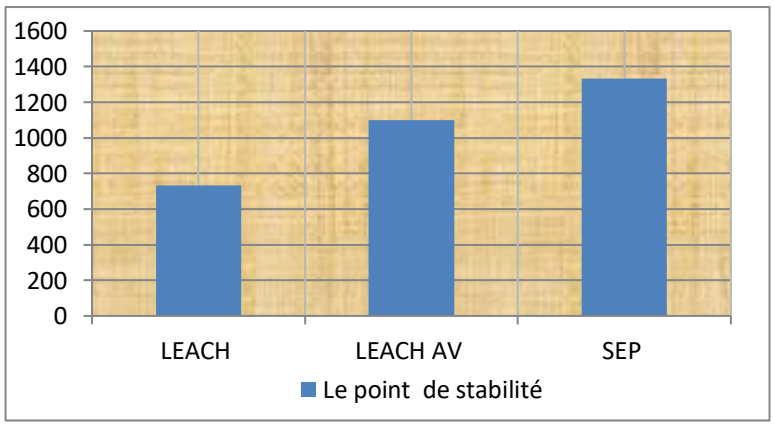


Figure III.5 : Le point de stabilité entre LEACH normal [m=0 et α=0] et SEP [m=0.3 et α=2] et LEACH avancé [m=0.3 et α=2] en fonction de (m) et (α).

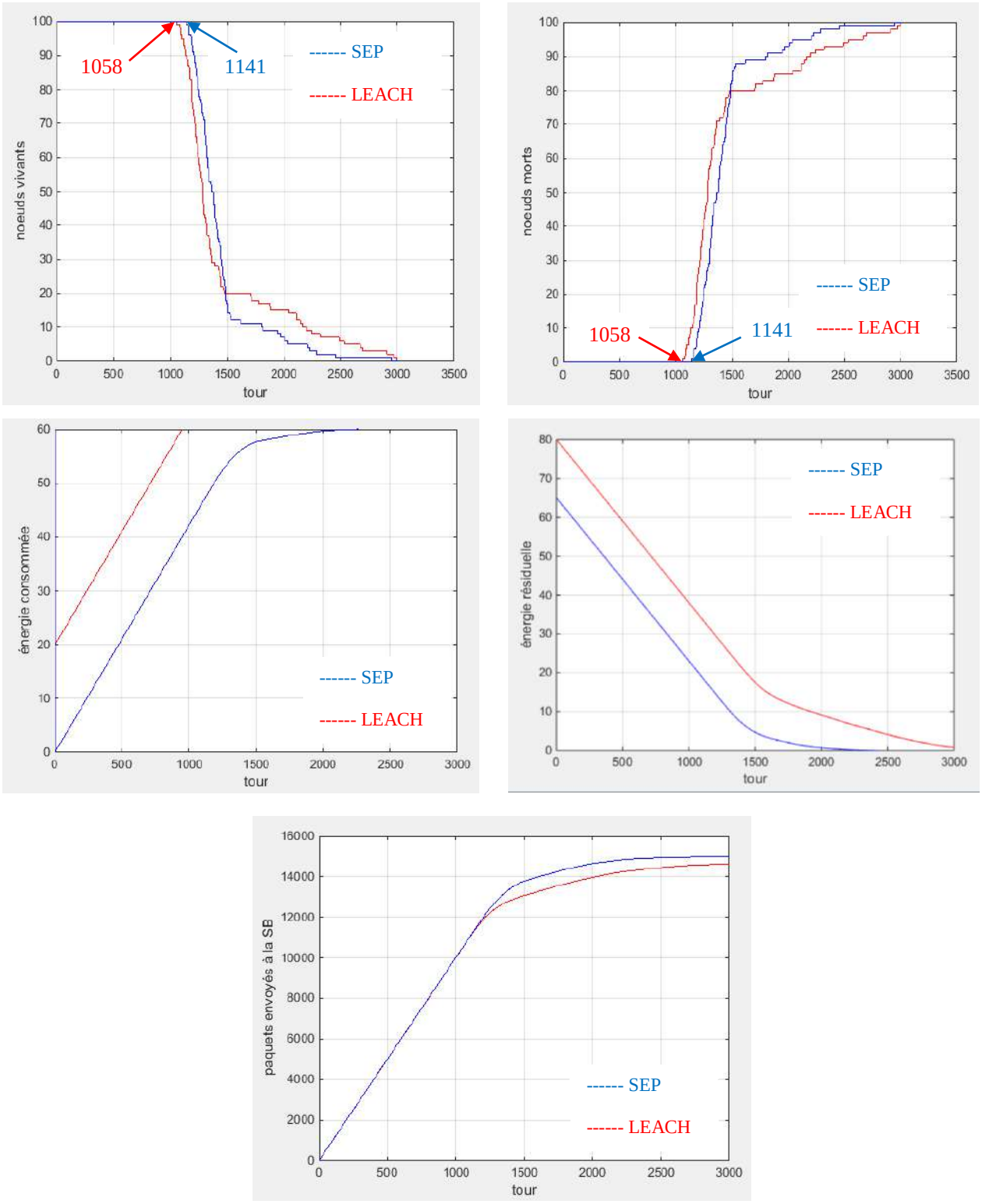


Figure III.6 : Comportement entre SEP et LEACH en présence d'hétérogénéité dans le cas (m = 0.2 et α = 1)

7.3. La sensibilité entre les deux protocoles LEACH et SEP

Nous étudions ici la sensibilité entre le protocole SEP et le protocole LEACH, en termes de longueur de la période de stabilité, en faisant varier (m). La Figure III.7 et le Tableau III.3 montrent le point de stabilité par rapport à (m × α). Nous supposons que (α) est fixe égale (α=2), les valeurs de (m) changent chaque fois. Nous observons comme prévu que la période de stabilité sous LEACH augmente plus lentement. Ce changement de période de stabilité est presque stable avec (m × α).

D'un autre côté, la période de stabilité sous SEP augmente plus rapidement. En plus, dans l'utilisation efficace de l'énergie supplémentaire, Le pourcentage d'amélioration du point de stabilité (la Figure III.8 le Tableau III.4) est maximisé sous SEP et le LEACH pour la plupart des valeurs de (m × α). Chaque fois que les valeurs de (m × α) augmentent, le pourcentage du SEP et LEACH progresse également pendant la période de stabilité.

Dans l'utilisation efficace d'énergie supplémentaire, le pourcentage dans la période de stabilité est maximisé sous SEP pour la plupart des valeurs de (m × α). Dans tous les cas, SEP surpasse LEACH parce que dans SEP les nœuds avancés sont élus en tant que chefs de groupe. Leur énergie "supplémentaire" est consommée plus judicieusement au lieu d'une partie de cette énergie supplémentaire repartie à tous les nœuds (comme dans SEP), ces nœuds peuvent se trouver plus éloignés du Sink. On remarque également que le pourcentage de SEP sur LEACH augmente lorsque (m × α) augmente. SEP surpasse LEACH jusqu'à 53% lorsque (m × α) = 1.8. Cela confirme que les performances ne dépendent pas des valeurs individuelles de (m) et (α) pour chacun mais plutôt sur leur produit (m × α), ce qui représente la quantité totale d'énergie initiale supplémentaire apportée par nœuds avancés. A la fin, pour le SEP donne une amélioration du période de stabilité est de 43% et pour le LEACH est de 15%.

Tableau III.3 : Le point de stabilité en fonction de (m × α).

m × α	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**0,8**	**1**	**1,2**	**1,4**	**1,6**	**1,8**
Le point de stabilité SEP	1153	1231	1370	1365	1506	1553	1529	1668	1650
Le point de stabilité LEACH	932	1030	1092	1075	1076	1124	1091	1064	1076

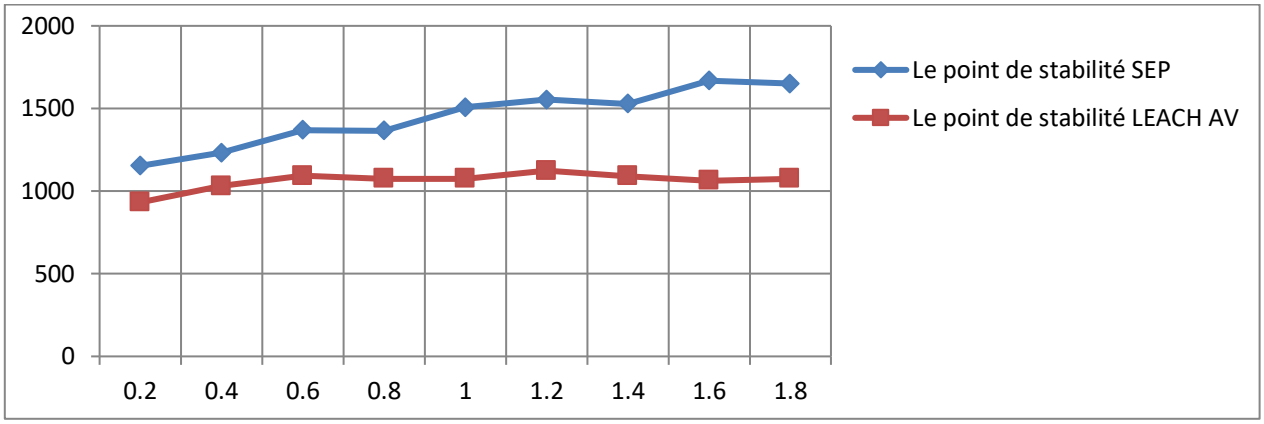


Figure III.7 : Le point de stabilité dans les deux protocoles LEACH et SEP en fonction de (m × α).

Tableau III.4 : Le pourcentage d'amélioration du point de stabilité du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α).

m × α	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**0,8**	**1**	**1,2**	**1,4**	**1,6**	**1,8**
Le pourcentage d'amélioration du point de stabilité du protocole SEP par rapport au LEACH	23,71	19,51	25,45	26,97	39,96	38,16	40,14	56,76	53,34

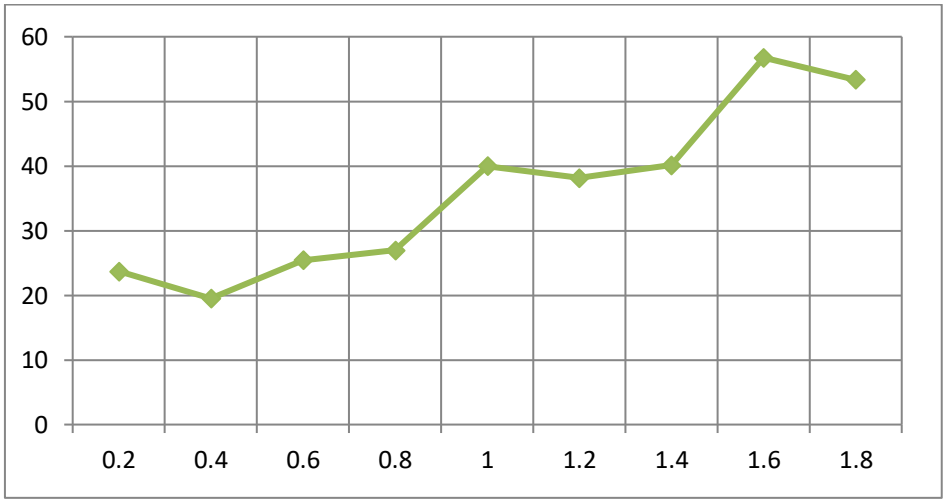


Figure III.8 : Le pourcentage d'amélioration du point de stabilité du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α).

7.4. L'énergie consommée et résiduelle des deux protocoles LEACH et SEP

Tableau III.5 : L'énergie consommée pour les deux protocoles LEACH et SEP en fonction de (m × α).

m × α	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**0,8**	**1**	**1.2**	**1.4**	**1.6**	**1.8**
L'énergie consommée du SEP	48.5	51.69	57.56	57.63	63.29	65.27	64.22	69.85	69.15
L'énergie consommée du LEACH avancé	39.18	43.42	46	45.16	45.27	47.46	45.73	44.59	45.27

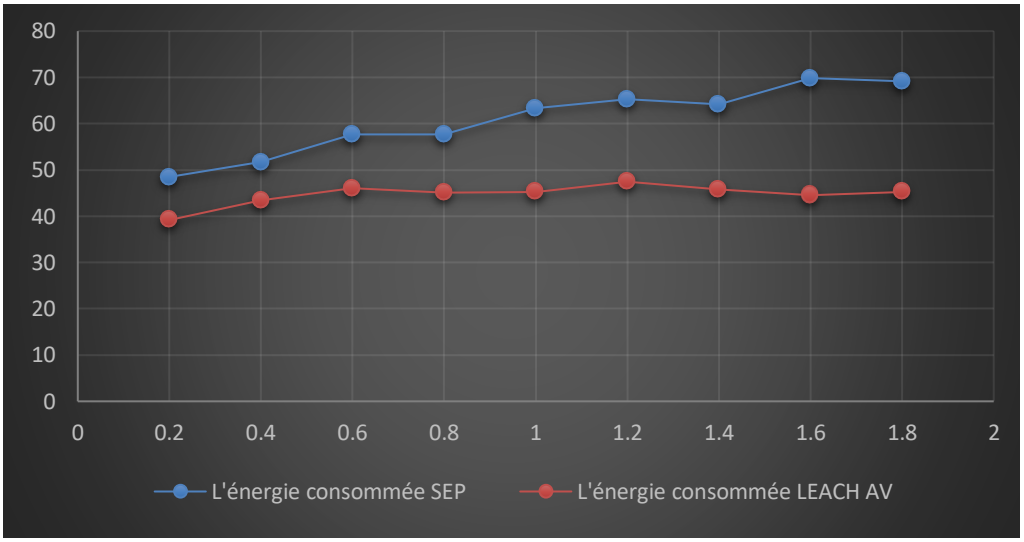


Figure III.9 : L'énergie consommée en fonction de (m × α).

On remarque qu'après chaque round, l'énergie consommée augmente pour les deux protocoles LEACH et SEP avec (m × α). (Figure III.9 et Tableau III.5) .Cependant, le réseau réserve mieux son énergie. Par conséquent il prolonge sa durée de vie et celle des nœuds restant vivants. Par contre dans le protocole SEP l'énergie du réseau est presque consommée entièrement par rapport au LEACH .Ce n'est pas un problème ou une contrainte pour le réseau du capteur parce que dans (la Figure III.10 et le Tableau III.6) nous observons que l'énergie résiduelle dans le LEACH est plus grande que celle du SEP lorsque les valeurs de (m × α) sont augmentées .Ce qui signifie que cette énergie n'a pas été consommée entièrement. L'énergie restante donc est une perte sèche, non utilisée.

Tableau III.6 : L'énergie résiduelle du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α).

m × α	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**0,8**	**1**	**1.2**	**1.4**	**1.6**	**1.8**
L'énergie résiduelle SEP	11.5	18.31	22.44	32.37	36.71	44.73	55.78	60.15	70.85
L'énergie résiduelle LEACH avancé	20.82	26.58	34	44.84	54.73	62.54	74.27	85.41	94.73

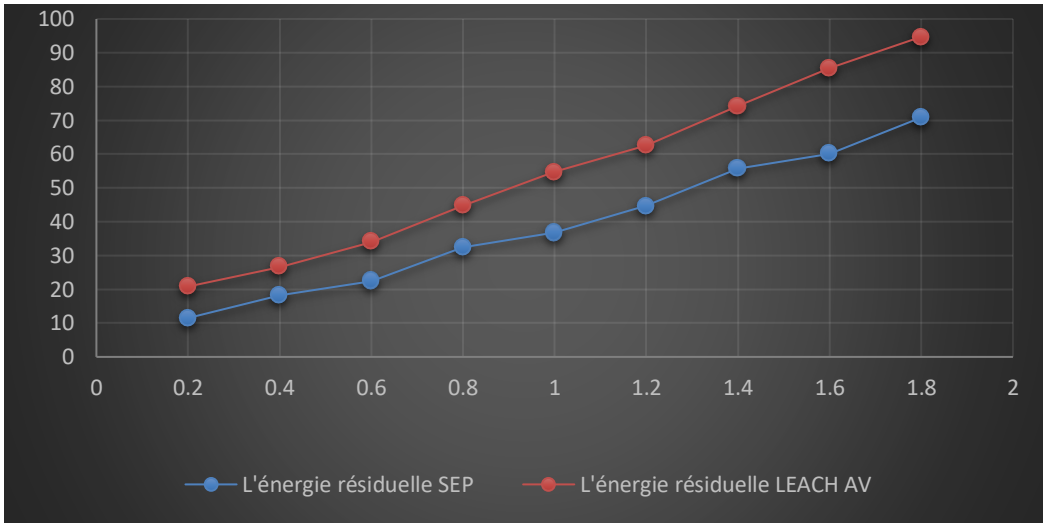


Figure III.10 : L'énergie résiduelle du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α).

Tableau III.7 : L'énergie consommée pour un round du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α).

m × α	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
L'énergie consommée pour un round (SEP)	0.042	0.041	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.041	0.041
L'énergie consommée pour un round (LEACH)	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.041	0.041	0.042

Nous observons aussi chaque nœud consomme même énergie pour un round dans les deux protocoles. Les résultats sont présentés dans le Tableau III.7 et la Figure III.11.

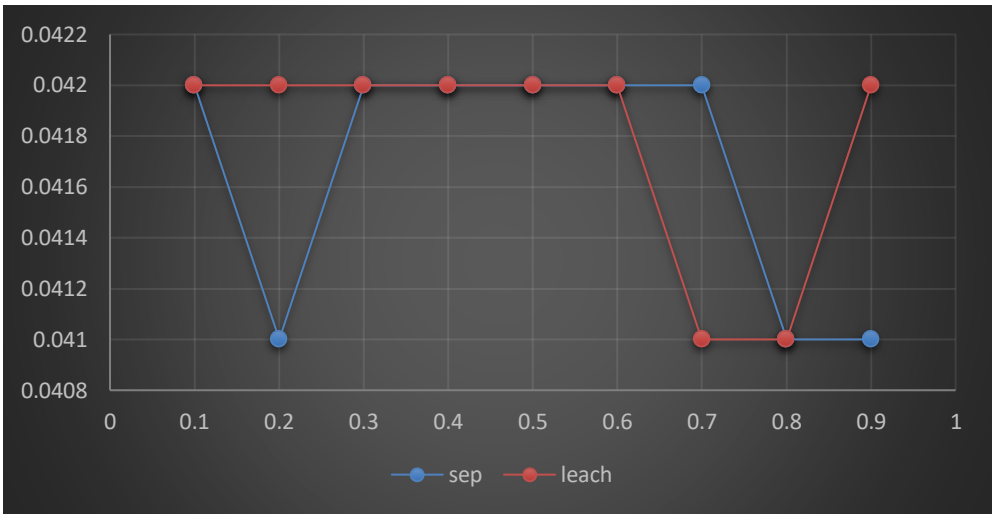


Figure III.11 : L'énergie consommée pour un round du protocole SEP par rapport au LEACH en fonction de (m × α).

Cette amélioration apportée par notre protocole SEP nous a présenté deux avantages. Le premier avantage, est que l'énergie totale du réseau est consommée presque entièrement, et la deuxième avantage, est qu'il assure un bon prolongement au point de stabilité pour maximiser la durée de vie du capteur .Cela est dû au choix optimal des Clusters Head. Cette optimisation est basée sur une fonction objective qui prend en considération la maximisation de l'énergie totale de réseau et la minimisation de la communication intra-cluster ainsi que la communication entre les CH et la station de base.

7.5. Nombre de paquets

Supposons que la bande passante disponible sur le capteur n'est pas serrée. D'après la Figure III.12 et le Tableau III.8 au-dessus ils sont clairs que pour les deux protocoles (LEACH, SEP) que montrent les paquets envoyés sur le réseau par les chefs de groupe vers le Sink. La valeur de « α » est considérée comme 2, c'est-à-dire l'énergie des nœuds avancés est triple de celle des nœuds normaux. LEACH pendant le point de stabilité parce qu'il y a beaucoup des transmissions des chefs de groupe vers la station de base sous le SEP. Ces chefs des groupes feront leur rapport vers le Sink. En plus les paquets envoyés à partir des nœuds au sein du groupe à son chef. En outre le nombre total de paquets envoyés dans SEP est supérieur à celui de

LEACH pendant la période de la stabilité. Ce que nous montre que l'énergie consommée dans le SEP est supérieur à celui de LEACH en raison des nombreuses transmissions de paquets par les chefs de groupe vers la station de base.

Tableau III.8 : Nombre des paquets reçus par la station de base dans le point de stabilité.

Pourcentage des nœuds avancés (m)	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
Les paquets envoyés dans le SEP $\times(10^4)$	1.154	1.273	1.446	1.367	1.628	1.705	1.53	1.855	1.841
Les paquets envoyés dans LEACH Avancé $\times(10^4)$	0.9331	1.031	1.093	1.075	1.076	1.125	1.062	1.065	1.076

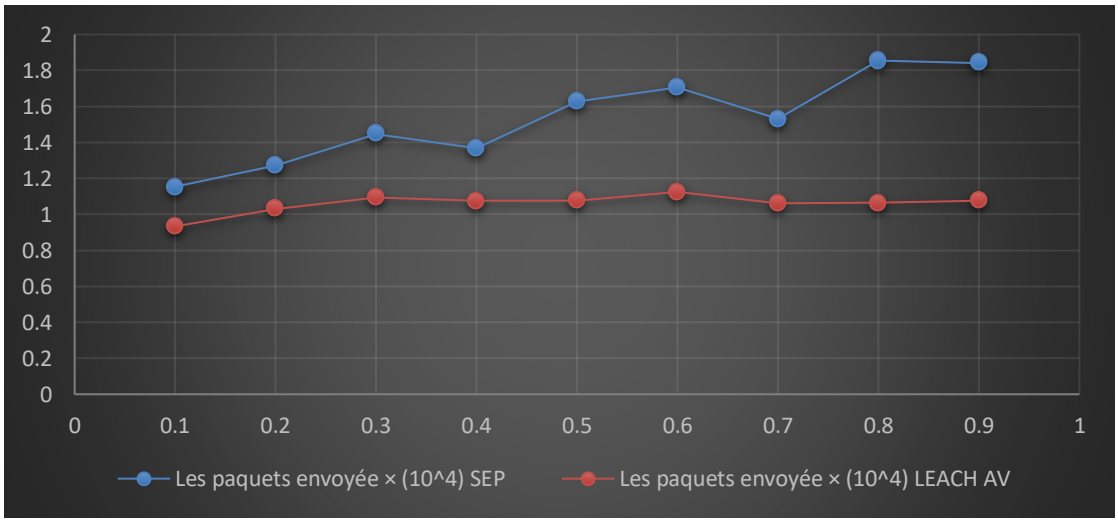


Figure III.12 : Nombre des paquets envoyés à Sink pendant le point de stabilité.

Pour le SEP, nous observons aussi que le nombre de paquets transmis vers BS est de 1.841×10^4 et pour LEACH, le nombre de paquets à BS est de 1.076×10^4 dans cas que le pourcentage des nœuds avancés (m) est égale 0,9. Par conséquent, l'augmentation d'un paquet vers BS est de près de 26% pour le SEP et 15% pour le LEACH. Il est évident qu'en cas de plus d'énergie, les nœuds normaux et avancés ont une plus grande capacité à transmettre des informations à BS, donc l'effet des zones / secteurs diminue.

Nous constate également que le nombre de paquets envoyés pour un round vers BS pour chaque nœud est presque invariable dans les deux protocoles. Les résultats sont présentés dans le Tableau III.9 et la Figure III.13.

Tableau III.9 : Nombre de paquets reçus par la station de base dans le point de stabilité pour un round en fonction de (m).

Pourcentage des nœuds avancés (m)	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
Les paquets envoyés pour un round dans le SEP	10	10.34	10.55	10.01	10.81	10.97	10	11.12	11.15
Les paquets envoyés pour un round dans le LEACH Avancé	10.01	10	10	10	10	10	9.73	10	10

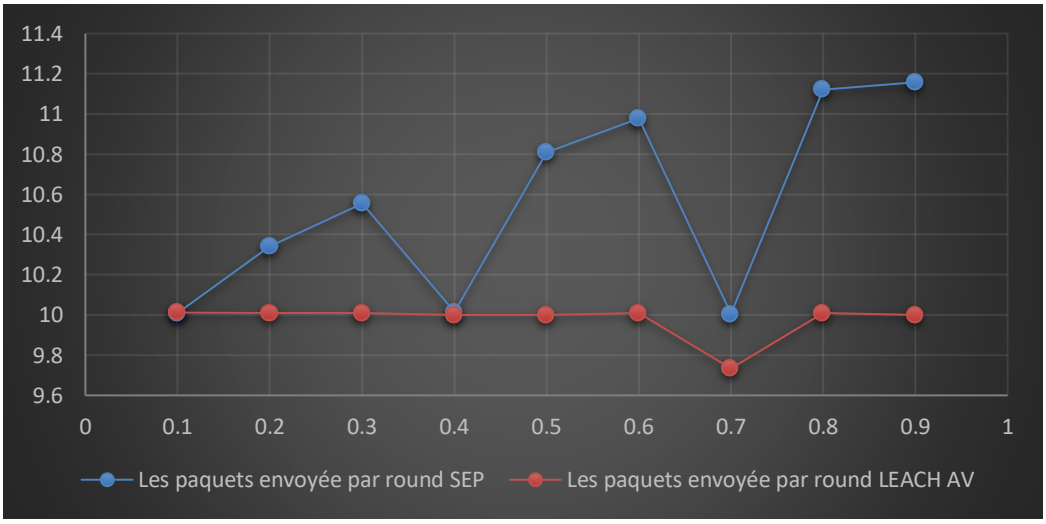


Figure III.13 : Nombre des paquets envoyés à Sink pour un round pendant le point de stabilité en fonction de (m).

8. Différence entre les deux protocoles LEACH et SEP

Dans les sous-sections ci après la simulation du protocole LEACH et le protocole SEP, en présence d'hétérogénéité dans l'énergie initiale des nœuds nous évaluons le comportement des deux protocoles en termes de mesures de performance. Résumons tout d'abord nos observations générales :

• Dans un réseau de capteurs sans fil avec des nœuds hétérogènes, LEACH passe instantanément à un fonctionnement instable juste après la mord du premier nœud en raison de sa sensibilité à une telle hétérogénéité.

• Notre protocole SEP étend avec succès la période de stabilité tout en étant conscient de l'hétérogénéité avec attribution des probabilités d'élection des chefs de groupe équilibrée par la relative énergie initiale des nœuds.

• Les performances du SEP sont proches de celles d'une borne supérieure idéale obtenue, en distribuant l'énergie supplémentaire des nœuds avancés uniformément sur tous nœuds dans le champ du capteur.

• SEP est plus souple que LEACH pour la consommation globale d'énergie supplémentaire des nœuds avancés, SEP donne aussi une période de stabilité plus longue pour des valeurs plus élevées d'énergie supplémentaire.

À partir de nos simulations, nous avons observé également les éléments suivants :

1. La période de stabilité du SEP a été prolongée par rapport à LEACH dans des environnements hétérogènes (Figure III.6).

2. LEACH est assez robuste en présence d'hétérogène et assure une meilleure répartition d'énergie qu'en milieu homogène (Figure III.3).

3. L'énergie résiduelle étant plus faible dans SEP que dans LEACH pour les nœuds avancés et les nœuds normaux (Figure III.10).

4. Les paquets envoyés dans SEP sont significativement plus grands que ceux de LEACH pendant le point de stabilité (Figure III.13).

Tableau III.10 : Comparaison entre SEP et LEACH.

LEACH	SEP
- LEACH ne profite pas pleinement de l'énergie supplémentaire des nœuds avancés. - Les nœuds normaux meurent très vite. - Processus d'élection devenant instable rapidement. - Le nombre des paquets reçus vers la station de base est faible [5].	- SEP tire pleinement parti de l'énergie supplémentaire des nœuds avancés. - Les nœuds avancés suivent le processus de mort des nœuds normaux. - Les chefs de groupe choisis-en fonction de l'énergie des nœuds par rapport à celle des autres.

Pour résumer nos simulations, nous avons obtenu une période de stabilité prolongée, une consommation d'énergie totale du réseau. Idéalement, les nœuds avancés deviennent chefs de groupe plus que les nœuds intermédiaires et normaux. Les nœuds intermédiaires jouent le rôle de Cluster Head plus fréquemment que les nœuds normaux.

9. Conclusion

Au regard des tests et évaluations par simulation appliqués aux deux protocoles LEACH et SEP étudiés en dualité, en étudiant aussi la sensibilité du protocole SEP aux paramètres d'hétérogénéité capturant le déséquilibre énergétique dans le réseau, Il s'avère que le choix est fait sur SEP de sorte que chaque capteur nœud dans un réseau hiérarchique hétérogène à deux niveaux indépendamment choisit lui-même comme Cluster Head en fonction de son initiale énergie par rapport à celle des autres nœuds. Nous avons trouvé que SEP donne une période de stabilité plus longue pour des valeurs plus élevées d'énergie supplémentaire apportée par des nœuds plus puissants. De plus, notre analyse du SEP n'est pas idéale, c'est-à-dire que l'analyse s'applique aussi bien aux petits réseaux.

Bibliographie

[01] M. Sedrati, L. Aouragh, L. Guettala & A. Bilami – « Etude des performances des protocoles de routage dans les réseaux mobiles ad-hoc », dans Proc.4th Int'l Conf. On Computer Integrated Manufacturing (CIP'2007), 2007.

[02] F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam & E. Cayirci – « Wireless sensor networks: a survey », IEEE Communications Magazine 40 (2002), no. 8, p. 102–114.

[03] International Journal of Application and Innovation in Engineering & Management, Vol. 3, Issue 3, March 2014.

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

[05] W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energyefficient communication protocol for wireless microsensor networks," in Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-33), January 2000.

[06] GUETTAF Dihia, HADJAL Lydia. Amélioration et simulation du protocole de routage AORP dans les réseaux de capteurs sans fil, Mémoire fin de cycle, En vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel en informatique, Promotion 2015-2016.

[07] Wassim ZNAIDI , « Modélisation formelle de réseaux de capteurs à partir de TinyOS »,projet fin d'etude, école polytechnique de tunisie,2006.

[08] Aina Andriamampianina Randrianarisaina, Modélisation De La Consommation D'énergie En Vue De La Conception Conjointe (Matériel/Logiciel) Des Applications Embarquées. Application aux Réseaux de Capteurs sans Fil (WSN), Thèse de Doctorat. l'Université de Nantes Sous le label de l'Université Nantes Angers Le Mans Discipline, École doctorale Sciences et Technologies de l'Information et Mathématiques (STIM), Soutenue le 6 février 2015

[09] F. Theoleyre, Une auto-organisation et ses applications pour les réseaux ad hoc et hybrids. These de Doctorat, 2006.

[10] Talwandi Sabo, District Bathinda, Punjab, India, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 3, Issue 3, Improved Cluster Head Selection Using Enhanced LEACH Protocol Nikita Sehgal, Gurwinder Kaur Department of Electronics and Communication Engineering Yadavindra College of Engineering (YCoE) Punjabi University Guru Kashi Campus, September 2013

[11] Hania Aoudia, Youcef Touati, Arab Ali-Cherif, Patrick Greussay», Approche de routage hiérarchique basée sur un mécanisme de clustering dans les réseaux de capteurs sans fil ,9ème édition de la conférence Manifestation des JEunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication - MajecSTIC 2012 (2012), Oct 2012, Villeneuve d'Ascq, France. 2012.

[12] BOUCHELAGHEM Siham,GHEBBI Sofian,HAMANI Mounir, Le protoocle LEACH pour les reseaux de capteur sans fil, Université Abderrahmane Mira Bejaia,Faculté des sciences exactes,Département d'informatique.

[13] W. Heinzelman, A.P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks", In IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 4, pp. 660-670. June (2002).

[14] S. Bandyopadhyay and E. J. Coyle, "An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks," in Proceedings of INFOCOM 2003, April 2003.

[15] ——, "Minimizing communication costs in hierarchically-clustered networks of wireless sensors," Computer Networks, vol. 44, no. 1, pp. 1–16, January 2004.

[16] W. R. Heinzelman, "Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks," Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.

[17] C.-Y. Wan, A. T. Campbell, and L. Krishnamurthy, “PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor networks,” in Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA’02), July 2002, pp. 1–11.

[18] Oussama Benzaid, Ishak Bouyahia, surveillance de trafic routier urbain par un réseau de capteur sans fil, Mémoire de Master en Génie électrique, Option Système Intelligents et Communicants, Université de Médéa, Juin 2015.

[19] Leila Imane NIAR , Théme : Analyse Graphique pour la surveillance dans un réseau de capteurs sans fils(RCSF), Mémoire Magister Informatique, Simulation OMNET++,Juillet 2012.

[20] Christian Bettstetter, On the Connectivity of Ad Hoc Networks, in the Computer Journal, Vol. 47 No. 4, pp. 432-447, 2004.

[21] M. Ayaz, I. Baig, A. Azween, I. Faye. “A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks”, Elsevier Ltd, Vol.34, No 1, pp. 1908-1927, 2011.

[22] A. Makhoul, «Réseaux de capteurs : localisation, couverture et fusion de données», Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Franche-Comté, novembre 2008.

[23] Ana-Belen Garcia-Hernando, Jose-Fernan Martinez-Ortega, Juan-Manuel Lopez- Navarro, Aggeliki Prayati, and Luis Redondo-López, Problem Solving for Wireless Sensor Networks, Series : Computer Communications and Networks, ISBN-10 : 1848002025, ISBN-13 : 978-1848002029, Springer, 2008.

[24] Mémoire de Master en informatique, Théme : Simulation d’un réseau de capteur sans fil sous Contiki ‘La localisation d’un mobile’,Université A/Mira de Bejaia.

[25] F. Theoleyre, Une auto-organisation et ses applications pour les réseaux ad hoc et hybrids. These de Doctorat, 2006.

[26] Sachin Mujumdar, « Prioritized Geographical Routing In Sensor Networks », Thèse, Université Vanderbilt, Mai 2004.

Web graphie

[27] http://www.tafats.fr/Techniques/Reseaux_de_capteurs/Reseaux_capteur_text.html.

[28] https://pixabay.com/fr/

[29] http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/Bunel/Presentation.html

[30] https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB